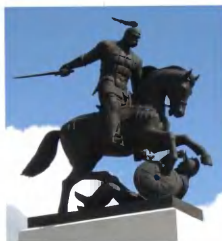


ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

ОПТИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРИБОРЫ

ОПТИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

*«Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве учебника
для учащихся средних специальных учебных заведений»*



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1975

О-62

УДК 681.4(075.3)

Оптико-механические приборы. М., «Машиностроение», 1975, 400 с.

В учебнике изложены основы теории и принципы действия различного типа оптико-механических приборов: микроскопов, интерферометров, кино- и фотоаппаратов, геодезических, астрономических, спектроскопических. Рассмотрены принципиальные схемы (оптические и кинематические) основных представителей каждого типа приборов; приведены их характеристики и эксплуатационные данные.

Книга может быть полезна также работникам оптико-механической промышленности.

Табл. 13, ил. 271, список лит. 14 назв.

Авторы книги: С. В. Кулагин, В. Н. Дикарев, Г. М. Мосягин, Е. Н. Лебедев, В. Е. Зубарев, А. С. Гоменюк.

Рецензенты — Красногорский оптико-механический техникум
и канд. техн. наук В. С. Усов

О $\frac{20405-296}{038(01)-75}$ 296-75

© Издательство «Машиностроение», 1975 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оптико-механическое приборостроение занимает одно из ведущих мест в отечественной приборостроительной промышленности. Оптико-механические приборы находят широкое применение в различных областях деятельности человека: на производстве, в научно-исследовательских лабораториях, при строительстве сооружений, в искусстве и т. д.

Большой вклад в развитие оптико-механического приборостроения внесли советские ученые, которые продолжили и приумножили работы выдающихся отечественных ученых М. В. Ломоносова, А. Г. Столетова, П. Н. Лебедева, П. П. Лазарева и многих других.

Разработкой технологии производства и обработки оптического стекла занимались такие видные ученые, как Д. С. Рождественский, Н. Н. Качалов, И. В. Гребенщиков и т. д.

Вопросам разработки теории и методов расчета оптических систем посвящали свои работы советские ученые А. И. Тудоровский, Д. Д. Максutow, Г. Г. Слюсарев, М. М. Русинов, И. А. Турыгин, Б. В. Фефилов, Д. С. Волосов и др.

Исследованием теоретических вопросов, связанных с разработкой и практическим применением оптических приборов, занимались С. И. Вавилов, Г. С. Ландсберг, А. А. Лебедев, В. П. Линник, В. Н. Чуриловский, Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Е. М. Голдовский, В. А. Фабрикант, И. А. Черный, С. В. Елисеев, С. М. Проворнов, Л. П. Лазарев и др.

Схема и конструкция оптического прибора существенно зависят от того, использует ли человек свое зрение при эксплуатации прибора, или прибор работает без участия человека. В первом случае приборы содержат в основном оптические и механические узлы, во втором — световая энергия преобразуется в электрическую с помощью различного рода приемников энергии излучения. Вырабатываемый ими сигнал используется для выполнения функциональной задачи прибора. Такие приборы обычно имеют сложные оптико-электронные системы и элементы автома-

тического управления. Широкое применение электроники является характерной особенностью большинства современных оптических приборов. В данном учебнике все рассматриваемые оптические приборы подразделены на несколько групп в зависимости от их назначения.

Большая группа оптических приборов используется для осуществления различных измерений или проведения всевозможных исследований в лабораториях научных учреждений и промышленных предприятий. Поэтому такие приборы сведены в группу лабораторных оптических приборов.

Оптические приборы, используемые для высокоточных измерений в геодезии и астрономии, сведены в группу геодезических и астрономических приборов.

Группу фото- и киноприборов составляют оптические приборы, предназначенные как для фоторегистрации (фото- и кино- съемки) предметов внешнего мира с использованием различных светочувствительных материалов, так и для проецирования фото- и другого вида изображений на экран.

Большую и весьма специфическую группу приборов составляют оптические приборы, используемые в авиации, космонавтике и других областях. К ним относятся приборы наведения, аэронавигационные и т. д.

При рассмотрении различных типов оптико-механических приборов, существенно отличающихся по своей конструкции и принципу действия, авторы старались придерживаться единой методики.

Настоящий учебник написан в соответствии с программой курса «Оптико-механические приборы» для учащихся техникумов.

Раздел I написан канд. техн. наук В. Е. Зубаревым (гл. 1, 2, 3, 4, 5, 7) и канд. техн. наук А. С. Роменюк (гл. 6), разд. II (гл. 8—14) — доктором техн. наук С. В. Кулагиным. Раздел III написан канд. техн. наук Г. М. Мосягиным (гл. 15—18), канд. техн. наук Е. Н. Лебедевым (гл. 19) и канд. техн. наук В. Н. Дикаревым (гл. 20, 21).

Авторы благодарят рецензентов книги за ценные советы. Все замечания по книге следует направлять по адресу: Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3, изд-во «Машиностроение».

Лабораторные приборы

Глава 1

МИКРОСКОПЫ

1.1. УСТРОЙСТВО ГЛАЗА И ЕГО ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У микроскопов, зрительных труб и других оптических приборов в качестве приемника света часто служит глаз.

Глаз человека, являясь своеобразной оптической системой, представляет собой шаровидное тело диаметром около 25 мм с небольшой выпуклостью вперед. Передняя прозрачная часть оболочки называется **роговицей**.

За роговицей находится передняя камера глаза, заполненная прозрачной жидкостью. Внутри камеры расположена **радужная оболочка** с отверстием посредине — **зрачком глаза**.

За радужной оболочкой находится **хрусталик** глаза — двояково-выпуклая линза, изображающая внешние предметы на **сетчатой оболочке** (сетчатке) внутренней полости глаза. Внутренняя полость заполнена студенистым прозрачным веществом.

Сетчатка состоит из светочувствительных элементов — палочек и колбочек, являющихся окончаниями зрительного нерва. Палочки имеют форму цилиндра диаметром около 2 мкм, колбочки — форму груши, максимальный диаметр которой 4,5—6,5 мкм. Всего на сетчатке расположено около 7 млн. колбочек и от 75 до 130 млн. палочек. Палочки и колбочки расположены неравномерно: в центральной части сетчатки преобладают колбочки — эта часть диаметром 1—1,5 мм называется **желтым пятном**. В центре пятна имеется углубление (ямка) диаметром 0,3—0,4 мм, где находятся только колбочки: к каждой колбочке подходит отдельное ответвление зрительного нерва. Изображения предметов, лежащие на желтом пятне, и особенно в его ямке, видны наиболее резко. Угловое поле зрения, соответствующее желтому пятну, равно 6—8°, а ямке желтого пятна — всего 2°

Рассмотрим оптические характеристики нормального глаза.

Наблюдение различно удаленных предметов заключается в приведении их изображений на сетчатку с помощью хрусталика переменной оптической силы. Этот процесс изменения оптической

силы хрусталика с помощью кольцевой мышцы называется **аккомодацией**.

При наблюдении бесконечно удаленных предметов мышца хрусталика не напряжена и заднее фокусное расстояние равно максимальному значению 22,78 мм. При наибольшем напряжении мышцы заднее фокусное расстояние уменьшается до 18,93 мм, что позволяет приблизить предмет к глазу на расстояние всего 92 мм.

Для нормального глаза при хорошем освещении (~ 50 лк) **расстояние наилучшего зрения** равно 250 мм. Это расстояние позволяет длительно читать и вести другие наблюдения близко расположенных предметов без значительного утомления глаза.

Одной из основных характеристик глаза является **острота зрения**, т. е. способность различать мелкие детали объектов. Острота зрения характеризуется величиной, обратной минимальному углу ψ , под которым глаз может видеть раздельно две близко расположенные точки или линии. Этот угол ψ называют **разрешающей способностью глаза**.

Две точки видны раздельно лишь в том случае, если их изображения лежат на двух светочувствительных элементах сетчатки, разделенных невоспринимающим промежутком, и оба светочувствительных элемента имеют отдельные соединения с мозгом.

Расчет разрешающей способности для углубления желтого пятна дает значение $\psi = 60''$. Это значение хорошо согласуется с дифракционной теорией идеальной оптической системы при зрачке глаза 2,5 мм.

Разрешающая способность зависит от структуры сетчатки, контраста наблюдаемого объекта и фона, формы разрешаемых деталей объекта, диаметра зрачка глаза, дефектов зрения, освещенности объекта, спектрального состава света и других условий наблюдения.

Способность глаза приспосабливаться к различным яркостям объектов (от $2 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^5$ кд/м²) называется **зрительной адаптацией**. Она выражается в изменении чувствительности глаза с помощью нескольких зрительных устройств.

Во-первых, при **ночном зрении** (малые яркости объектов до 0,01 кд/м²) действуют только палочки, обладающие высокой чувствительностью, но не различающие цветов; при **сумеречном зрении** (яркость до 10 кд/м²) палочки действуют вместе с колбочками, различающими цвета; при **дневном зрении** (яркость выше 10 кд/м²) действуют только колбочки.

Во-вторых, адаптация обеспечивается изменением отверстия зрачка от 2 до 8 мм.

В-третьих, зрительное раздражение регулируется изменением концентрации **зрительного пурпура** (светочувствительного вещества) палочек и колбочек и перемещением темного пигмента в

слоях сетчатки, который защищает палочки и колбочки от избытка света.

Минимальная яркость, вызывающая зрительное ощущение в данных условиях наблюдения, называется **пороговой яркостью**, а величина, обратная ей, — **световой чувствительностью глаза**.

Чувствительность глаза к монохроматическим излучениям различной длины волны называется **спектральной чувствительностью глаза**.

Глаз реагирует на поток излучения при длинах волн от 380 до 770 нм. Спектральная чувствительность глаза непостоянна в этом диапазоне и характеризуется кривой видности. Максимум этой кривой для дневного зрения приходится на длину волны 555 нм, а для ночного зрения — на 510 нм.

Большое значение в распознавании внешних объектов имеет чувствительность глаза к различию яркостей объекта и фона. Наименьший контраст объекта и фона, воспринимаемый глазом, называется **пороговым**. Он представляет собой отношение минимальной разности яркостей объекта и фона (ΔB) к яркости фона (B_{ϕ}).

Контрастная чувствительность глаза является величиной, обратной пороговому контрасту.

В фотометрах при яркости $B_{\phi} = 130\text{—}640$ кд/м² достигается максимальная контрастная чувствительность $B_{\phi}/\Delta B \approx 500$.

Особенность зрения человека — восприятие цвета — объясняется строением колбочкового аппарата сетчатки. Установлено, что колбочки разделяются по спектральной чувствительности на синечувствительные, зеленочувствительные и красночувствительные. При восприятии света сложного спектрального состава возникают три отдельных возбуждения, которые поступают в мозг и суммируются, в результате чего возникает окончательное впечатление о цвете объекта. При одинаковом уровне возбуждения трех различных колбочек создается впечатление белого цвета.

Зрение двумя глазами, когда два изображения одного и того же объекта соединяются в единый зрительный образ, называется **бинокулярным**. Такое зрение обеспечивается **конвергенцией** глаз, т. е. сведением их зрительных осей при наблюдении близко расположенных объектов.

Наблюдение объектов двумя глазами дает представление о глубине пространства. Трехмерное восприятие пространства с помощью бинокулярного зрения называется **стереоскопическим зрением**.

Между центрами зрачков глаз имеется определенное расстояние — база глаз (~ 65 мм).

Угол, под которым видна база глаз из данной точки пространства, называется **параллактическим углом**.

Очевидно, точки объектов, различно удаленных от глаза, видны наблюдателю под различными параллактическими углами.

Разность этих углов называется **бинокулярным параллаксом**. Опытный наблюдатель надежно фиксирует бинокулярный параллакс величиной $10''$ и даже несколько меньше.

1.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МИКРОСКОПА

Угловой размер детали объекта при его наблюдении невооруженным глазом зависит от линейного размера детали и от расстояния между объектом и глазом. Это расстояние нельзя сделать меньше 92 мм без потери резкости, к тому же работа глаза близко к пределу аккомодации сильно утомляет зрение. По этой причине такой способ получения большого увеличения нельзя считать приемлемым.

При наблюдении деталей объекта, угловые размеры которых меньше $\varphi=60''$, используют увеличительные приборы. Лупы и микроскопы предназначены для наблюдения с увеличением тех объектов, которые расположены в непосредственной близости от наблюдателя.

Лупа представляет собой одиночную линзу или простейшую оптическую систему, аналогичную такой линзе. В передней фокальной плоскости лупы устанавливается объект, а в задней — зрачок глаза. Бесконечно удаленное изображение объекта глаз наблюдает с наименьшим напряжением хрусталика, поэтому такое расчетное расположение элементов схемы считается оптимальным. Отклонения от расчетного расположения элементов вызываются спецификой зрения отдельных наблюдателей. Например, для близорукого глаза объект надо приблизить к лупе на такую величину, чтобы мнимое изображение установилось на удобном для данного глаза расстоянии.

Видимое увеличение лупы находят по формуле

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'_л}, \quad (1.1)$$

где 250 — расстояние наилучшего зрения в мм;

$f'_л$ — фокусное расстояние лупы в мм.

Это увеличение показывает, во сколько раз угловой размер изображения объекта, наблюдаемого в лупу, больше углового размера объекта, наблюдаемого без лупы с расстояния 250 мм.

По формуле (1.1) рассчитывают номинальное увеличение лупы. Некоторые отклонения от номинала возможны при положениях объекта или глаза, отличных от расчетного, иначе говоря, при ухудшении условий работы глаза.

Лупы малого увеличения (до $7\times$) выполняются в виде одиночных линз. Лупы среднего (до $15\times$) и сильного (до $40\times$) увеличений имеют сложную схему и состоят из трех-четырех линз. По коррекции аберраций это обычно апланатические и анастигматические системы с коротким фокусным расстоянием и малым рабочим отрезком.

Микроскоп является сложной системой, предназначенной для наблюдения близко расположенных объектов с большим увеличением и большой разрешающей способностью.

На расчетной (эквивалентной) схеме микроскопа (рис. 1.1) показано расположение главных плоскостей и фокусов объектива, окуляра и всего микроскопа.

Объект (препарат) l находится на некотором расстоянии от переднего фокуса объектива. Объектив образует действительное увеличенное и перевернутое изображение l' препарата в плоско-

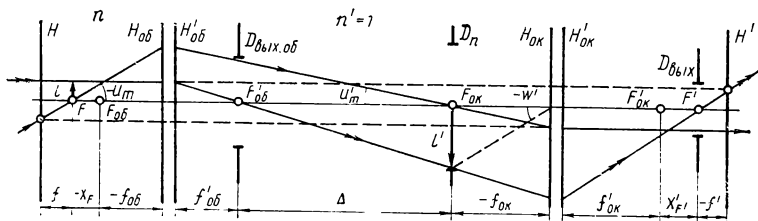


Рис. 1.1. Эквивалентная схема микроскопа

сти, совпадающей с передней фокальной плоскостью окуляра. Действие окуляра подобно действию лупы: окуляр образует вторичное увеличенное мнимое и прямое изображение — l'' , удаленное в бесконечность. Это означает, что препарат находится в переднем фокусе сложной лупы — микроскопа. В результате микроскоп дает сильно увеличенное перевернутое изображение препарата.

На эквивалентной схеме даны обозначения величин, входящих в расчетные формулы микроскопа. Расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра, обозначенное Δ , называют **оптической длиной тубуса микроскопа**.

Согласно формуле геометрической оптики, связывающей фокусные расстояния находящейся в воздухе оптической системы и ее отдельных элементов, переднее и заднее фокусные расстояния микроскопа соответственно равны

$$f = -f' = \frac{f'_{об} f'_{ок}}{\Delta}. \quad (1.2)$$

Под видимым увеличением микроскопа понимают отношение размера изображения препарата на сетчатке глаза, образованное при наблюдении через микроскоп, к размеру изображения того же препарата, полученному на сетчатке при наблюдении невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения.

Все рассуждения об увеличении лупы справедливы для микроскопа, поэтому видимое увеличение микроскопа записывают в виде

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'}, \quad (1.3)$$

где f' — фокусное расстояние всего микроскопа в мм.

Если в формуле (1.3) f' заменить его выражением по формуле (1.2), то увеличение микроскопа

$$\bar{\Gamma} = -\frac{\Delta}{f'_{об}} \frac{250}{f'_{ок}} \quad (1.4)$$

Знак минус указывает на то, что изображение, образованное микроскопом, перевернуто по отношению к объекту.

Линейное увеличение объектива по формуле геометрической оптики

$$\beta_{об} = -\frac{\Delta}{f'_{об}}, \quad (1.5)$$

а увеличение окуляра, работающего как лупа,

$$\bar{\Gamma}_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}}, \quad (1.6)$$

откуда

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок}. \quad (1.7)$$

Это наиболее часто употребляемое выражение для определения общего увеличения микроскопа, которое равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра.

В отдельных микроскопах объектив рассчитывает при том условии, что препарат находится в его переднем фокусе, а изображение в бесконечности. В этом случае говорят, что оптическая длина тубуса микроскопа равна бесконечности. За объективом в параллельном пучке лучей устанавливается **тубусная линза** с фокусным расстоянием $f'_{т.л.}$. В заднем фокусе этой линзы получается действительное перевернутое изображение препарата с увеличением

$$\beta_{об.т.л} = -\frac{f'_{т.л.}}{f'_{об}} \quad (1.8)$$

Подставив в формулу (1.7) $\beta_{об.т.л}$ вместо $\beta_{об}$, находят увеличение такого микроскопа.

Кроме того, существуют важные характеристики микроскопа, которые связаны не с положением его элементов на оптической оси, а с диаметрами диафрагм и оправ линзовых систем. Это све-

тосила прибора, его поле зрения, глубина резкого изображения и разрешающая способность.

Светосилу микроскопа определяет конус лучей, который выходит из осевой точки препарата и опирается на наименьшую оправу или диафрагму, называемую **апертурной диафрагмой**. Половина угла при вершине этого конуса называется **апертурным углом** u_m (см. рис. 1. 1).

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов называется **входным зрачком**, а в пространстве изображений — **выходным зрачком**. В микрообъективах выходным зрачком служит оправа одной из последних линз или специальная диафрагма. В обоих случаях можно считать, что выходной зрачок микрообъектива $D_{\text{вых.об}}$ совпадает с его задней фокальной плоскостью (см. рис. 1. 1), а входной зрачок объектива (и всего микроскопа) находится в бесконечности. Выходной зрачок микроскопа $D_{\text{вых}}$ есть изображение выходного зрачка объектива, образованное окуляром.

Микрообъектив является системой **апланатической**, т. е. для него выполняется условие синусов

$$n \sin u_m : n' \sin u'_m = \beta_{\text{об}} = \text{const.} \quad (1.9)$$

Величина $A = n \sin u_m$ называется **числовой апертурой**. Поэтому условие синусов можно записать в виде

$$A = \beta_{\text{об}} A', \quad (1.10)$$

где A' — числовая апертура объектива в пространстве изображений.

Диаметр выходного зрачка объектива равен

$$D_{\text{вых.об}} = 2\Delta \operatorname{tg} u'_m.$$

Апертурный угол u'_m в пространстве изображений мал, поэтому можно записать $\operatorname{tg} u'_m \approx \sin u'_m = A'$, и тогда

$$D_{\text{вых.об}} = 2\Delta A'. \quad (1.11)$$

Формула линейного увеличения связывает выходной зрачок объектива и его изображение — выходной зрачок микроскопа:

$$D_{\text{вых}} = D_{\text{вых.об}} \frac{f'_{\text{ок}}}{\Delta}$$

Применяя формулы (1.6), (1.10) и (1.11), можно записать выражение

$$D_{\text{вых}} = \frac{2\Delta A}{\beta_{\text{об}}} \frac{250}{\Delta \bar{\Gamma}_{\text{ок}}} = \frac{500A}{\beta_{\text{об}} \bar{\Gamma}_{\text{ок}}}$$

или окончательно

$$D_{\text{вых}} = \frac{500A}{\bar{\Gamma}}. \quad (1.12)$$

Из этой формулы следует, что микроскопы большого увеличения имеют малые выходные зрачки, значительно меньше зрачка глаза.

Например, при $\Gamma=1000\times$; $n=1$; $\sin u_m=1$ выходной зрачок $D_{\text{вых}}=0,5$ мм. Это значит, что для получения достаточной освещенности на сетчатке глаза препарат должен быть довольно сильно освещен. Кроме того, дифракция света на структурных неоднородностях глаза в пределах малого зрачка ухудшает качество изображения.

Поле зрения микроскопа ограничивает **полевая диафрагма** $D_{\text{п}}$, которая установлена в плоскости промежуточного изображения. **Линейное поле зрения** определяется величиной предмета, изображение которого заполняет полевую диафрагму. Это поле равно

$$2l = \frac{D_{\text{п}}}{\beta_{\text{об}}} . \quad (1.13)$$

Диаметр полевой диафрагмы зависит от качественного поля зрения окуляра $2\omega'$ и его фокусного расстояния. Для средних окуляров этот диаметр составляет 13—18 мм. Благодаря полевой диафрагме края изображения в микроскопе резко ограничены, а плоскость изображения равномерно освещена (т. к. нет виньетирования наклонных пучков).

Глубина резкого изображения складывается из трех величин: аккомодационной, геометрической и волновой.

В процессе наблюдения объемного предмета глаз непрерывно просматривает разные по глубине участки предмета («аккомодирует»). Создается впечатление, что весь предмет виден одновременно резким. Если глаз аккомодирует с бесконечности до 250 мм, то резкими видны детали предмета, лежащие между передней фокальной плоскостью микроскопа и плоскостью, удаленной от фокуса на расстояние $T_{\text{ак}}$. Эта глубина предмета $T_{\text{ак}}$ и называется **аккомодационной глубиной**:

$$T_{\text{ак}} = \frac{f'^2}{250} = \frac{250}{\Gamma^2} \quad (1.14)$$

Пусть глаз аккомодирован на бесконечность. Тогда на сетчатке глаза резко изображены только те точки предмета, которые находятся в передней фокальной плоскости микроскопа. Точки, находящиеся дальше или ближе фокальной плоскости, изображаются на сетчатке в виде кружков рассеяния. Если угловой размер кружков рассеяния не превышает разрешающей способности глаза ϵ , то соответствующие точки предмета кажутся резкими, а расстояние между ними называется **геометрической глубиной**.

Рис. 1.2 поясняет расчет геометрической глубины для случая, когда на предмете выделены две точки: A — лежит в фокусе, B — на расстоянии x от фокуса ближе к объективу. Предмет и

микроскоп не показаны, но даны изображения A' и B' указанных точек после микроскопа. Удаление x' изображения B' от глаза определяется по формуле

$$x' = \frac{D_{\text{гл}}}{\epsilon}, \quad (1.15)$$

где $D_{\text{гл}}$ — диаметр зрачка глаза. В дальнейших расчетах принимается, что зрачок глаза и выходной зрачок микроскопа равны. Расстояние между точками A и B согласно формуле Ньютона и формул (1.15) и (1.3)

$$x = -\frac{f'^2}{x'} = \frac{125\epsilon}{A\Gamma}.$$

Другая половина геометрической глубины соответствует точкам объекта, расположенным по другую сторону фокальной плоско-

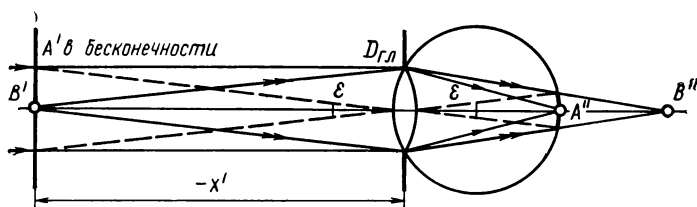


Рис. 1.2. Схема к расчету геометрической глубины резкого изображения

сти. Таким образом, геометрическая глубина резкого изображения равна

$$T_r = 2x = \frac{250\epsilon}{A\Gamma} \quad (1.16)$$

Приняв разрешающую способность глаза равной $\epsilon = 2'$, формулу для геометрической глубины часто записывают как

$$T_r = \frac{1}{7A\Gamma}. \quad (1.17)$$

Образование изображения предмета световыми пучками есть сложный процесс интерференции лучей в некотором пространстве, а не в одной плоскости, причем этот процесс сопровождается обязательным ограничением пучков и проявлением дифракции света. Волновую глубину считают равной

$$T_v = \frac{\lambda}{2A^2}. \quad (1.18)$$

Окончательно полная глубина резкого изображения

$$T = T_{\text{ак}} + T_r + T_v = \frac{250}{\Gamma^2} + \frac{250\epsilon}{A\Gamma} + \frac{\lambda}{2A^2} \quad (1.19)$$

1.3. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МИКРОСКОПА. НОРМАЛЬНОЕ И ПОЛЕЗНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

Микроскопическую структуру большинства биологических объектов можно рассматривать как особую дифракционную решетку, состоящую из совокупности непрозрачных, прозрачных и полупрозрачных мельчайших элементов, разнообразных по форме (точки, линии и т. д.). Размеры этих элементов сравнимы с длиной волны света. Проходя сквозь такую микроскопическую

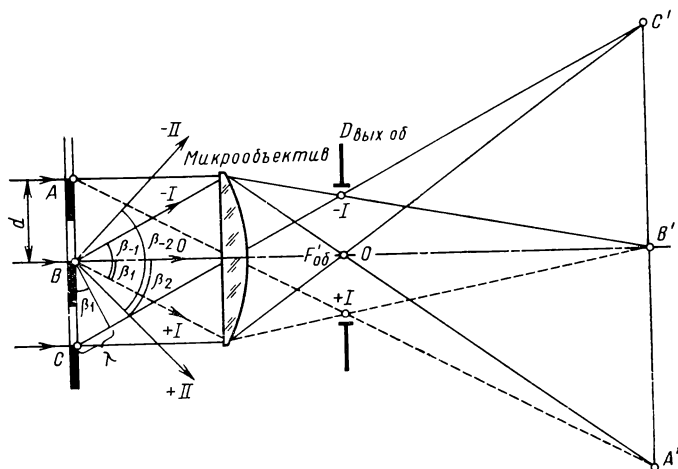


Рис. 1.3. Дифракционная решетка и ее изображение в микроскопе

структуру, свет сильно рассеивается на краях этих элементов, т. е. наблюдается явление дифракции. Для упрощения рассмотрим дифракцию, если объектом для микроскопа служит регулярная дифракционная решетка с периодом d (рис. 1.3).

Пусть на решетку падает по нормали пучок параллельных лучей от удаленного источника света. Пройдя решетку, свет в результате дифракции распадается на множество параллельных пучков, образуя с нормалью решетки углы дифракции $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k, \beta_{-1}, \beta_{-2}, \dots, \beta_{-k}$.

Направление главных максимумов определяется уравнением:

$$\sin \beta_{\pm k} = \frac{k\lambda}{d}, \quad (1.20)$$

где k — порядок спектра или в данном случае номер пучка света, т. е. число целое, положительное или отрицательное; λ — длина волны света.

При освещении решетки монохроматическим светом углы дифракции зависят только от ее постоянной d . Если используется бе-

лый свет, то пучки лучей, кроме нулевого, разлагаются в спектры, и в дальнейшем главные максимумы называются спектральными.

Параллельные пучки разных порядков сводятся объективом в его выходном зрачке $D_{\text{вых. об}}$ и образуют здесь соответствующие изображения источника света, т. е. спектральные максимумы различных порядков. Эти изображения можно наблюдать непосредственно, вынув окуляр или установив вместо него длиннофокусный окуляр, предназначенный для наблюдения зрачка микрообъектива.

Изображение объекта $A'B'C'$ возникает благодаря интерференции лучей, идущих от каждого спектрального максимума в каждую точку изображения. Полное подобие между предметом и его изображением имеется тогда, когда весь дифрагированный структурой препарата свет воспринимается объективом и участвует в создании изображения.

Но такого явления достигнуть нельзя, так как световое отверстие объектива ограничено. Как доказал Аббе, изображение подобно предмету, если в выходном зрачке умещаются, кроме нулевого, как минимум первые спектральные максимумы (± 1 ; см. рис. 1.3). Тогда можно говорить о том, что штрихи решетки видны раздельными и разрешение микроскопа равно d .

По формуле (1.20)

$$d = \frac{\lambda}{\sin \beta_1}.$$

Угол β_1 есть апертурный угол объектива, поэтому формула для разрешающей способности при параллельном освещении, т. е. когда апертура освещающего пучка близка к нулю, приобретает вид

$$d = \frac{\lambda}{A_{об}}, \quad (1.21)$$

где $A_{об}$ — числовая апертура микрообъектива.

В том случае когда максимум первого порядка не попадает в объектив из-за его малой апертуры и штрихи решетки не разрешаются, следует изменить наклон освещающего пучка к оптической оси так, чтобы нулевой спектральный максимум сдвинуть к краю зрачка и уместить там первый максимум. Такой способ освещения как бы расширяет апертуру объектива, а в действительности увеличивает разрешающую способность благодаря суммированию апертур конденсатора A_k и микрообъектива $A_{об}$. Тогда разрешающая способность микроскопа с конденсором увеличивается до значения

$$d = \frac{\lambda}{A_k + A_{об}}. \quad (1.22)$$

Переходя к наблюдению реальных объектов и помня, что обычно $A_k = A_{об} = A$, формула для разрешающей способности микроскопа имеет окончательный вид:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A}. \quad (1.23)$$

Нормальным увеличением микроскопа называют такое увеличение, при котором его разрешающая способность полностью используется глазом. На рис. 1.4 схематически показан ход лучей через зрачок глаза при наблюдении в микроскоп.

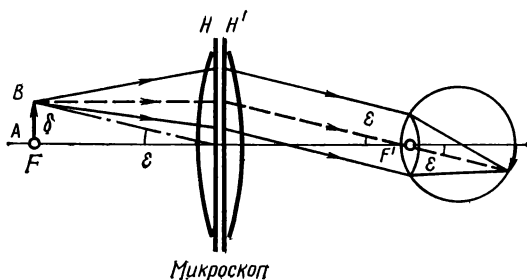


Рис. 1.4. К выводу формул нормального увеличения микроскопа

Пусть расстояние между точками A и B равно пределу разрешения δ . Тогда угловое расстояние между ними в пространстве изображений равно

$$\varepsilon = \frac{\delta}{f'}. \quad (1.24)$$

Чтобы глаз увидел точки A и B раздельно, величина ε должна быть не менее предела разрешения глаза (максимальной остроты зрения). Тогда нормальное увеличение микроскопа, применяя формулы (1.3) и (1.24), можно записать как

$$\bar{\Gamma}_n = \frac{250\varepsilon}{\delta} \quad (1.25)$$

Подставив в формулу (1.25) значение $\delta = \frac{\lambda}{2A}$ и $\varepsilon = 0,0003$ рад, а также приняв $\lambda = 0,55$ мкм, получим

$$\bar{\Gamma}_n \approx 250A. \quad (1.26)$$

Увеличение меньше $\bar{\Gamma}_n$ не дает возможности различать те детали объекта, которые разрешены объективом, но слишком малы для разрешения глазом (предел разрешения определяет глаз).

Увеличение больше $\bar{\Gamma}_n$ не позволяет выявить новых деталей объекта (предел разрешения определяет объектив), но позво-

ляет наблюдать эти детали под углом больше $1'$. Такое повышение угла ε до $2-4'$ следует считать полезным, так как у большинства биологических препаратов контраст мал и разрешающая способность $\varepsilon = 1'$ в таких условиях не достигается. По этой причине полезным увеличением микроскопа считается такое увеличение, которое в $2-4$ раза превышает нормальное:

$$500A \leq \bar{\Gamma}_n \leq 1000A. \quad (1.27)$$

Увеличение больше $1000A$ не только бесполезно, но скорее вредно, так как при нем выходной зрачок микроскопа настолько мал, что качество изображения ухудшается.

Существует иное понятие нормального увеличения микроскопа, определяемое по формуле (1.12) при условии, что выходной зрачок микроскопа равен зрачку глаза. Этот критерий страдает некоторой неопределенностью, поскольку зрачок глаза является переменной величиной.

1.4. ОБЪЕКТИВЫ МИКРОСКОПОВ

Современные микрообъективы достигли высокой степени совершенства: числовая апертура их близка к предельной, разрешающая способность в центре поля мало отличается от теоретической.

Объектив и окуляр микроскопа участвует в создании изображения неодинаково. Объектив — наиболее сложная и ответственная часть микроскопа — действует в широких пучках (с большой апертурой), но с малым наклоном этих пучков к оптической оси (малое поле). Окуляр действует в узких пучках, но с большим их наклоном к оптической оси (большое поле). При расчете объективов и окуляров это различие проявляется в коррекции соответствующих aberrаций.

К aberrациям широкого пучка относятся сферическая aberrация, кома и хроматизм положения; **к полевым aberrациям** — астигматизм, кривизна изображения, дисторсия и хроматизм увеличения.

Микрообъектив — система апланатическая. Это означает, что для пары сопряженных точек на оси устранена сферическая aberrация и выполнено условие синусов. Таких апланатических точек для каждого объектива только две. Поэтому любые нарушения расчетного положения объекта и изображения приводят к ухудшению коррекции aberrаций.

Объективы микроскопов делятся:

1. По степени коррекции aberrаций: ахроматы, полуахроматы (флюоритовые), апохроматы, монохроматы, планахроматы и планапохроматы.

2. По длине тубуса микроскопа: а) 160 мм для проходящего света с покровным стеклом толщиной 0,17 мм и более; б) 190 мм

для отраженного света без покровного стекла; в) тубус — бесконечность для проходящего и отраженного света.

3. По свойствам иммерсии: а) безиммерсионные (сухие); б) иммерсионные (масляная, водная, глицериновая и др. иммерсия).

4. По оптическому устройству: линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

5. По апертуре и увеличению (деление условное): а) слабые $A \leq 0,2$ и $\beta \leq 10\times$; б) средние $A \leq 0,65$ и $\beta \leq 40\times$; в) сильные $A > 0,65$ и $\beta > 40\times$.

У объективов-ахроматов соблюдено условие апланатизма и уничтожен хроматизм положения для двух цветов. Астигматизм внеосевых точек поля зрения не превышает допустимой величины (—4 дптр). Остается неисправленным вторичный спектр.

Слабые ахроматы с апертурой 0,1—0,15 обычно состоят из одного компонента, склеенного из двух линз. Ахроматы с апертурой до 0,2 имеют два ахроматических компонента. Для увеличения апертуры до 0,3 вводится плоско-выпуклая фронтальная линза. Эта фронтальная линза определяет фокусное расстояние объектива, а остальные линзы исправляют aberrации ее плоской и сферической поверхностей. Aberrации плоской поверхности в сильных объективах устраняют применением иммерсии.

Иммерсионные объективы-ахроматы больших увеличений, как правило, состоят из четырех компонентов: фронтальной линзы, мениска и двух дуилинзовых компонентов. На рис. 1. 5 приведен объектив $90\times 1,25$ (М-101) масляной иммерсии. Для устранения дефектов деталей и сборки оправа менисковой линзы посажена в корпус с радиальным зазором; перемещением ее поперек оси добиваются требуемого качества изображения. Такая система юстировки применяется во всех сильных объективах. Здесь же на рисунке видна пружина. Она предохраняет фронтальную линзу от выдавливания, а покровное стекло от разрушения при наводке на резкость, так как рабочие отрезки сильных объективов очень малы.

В объективах-апохроматах почти отсутствует вторичный спектр, выполнено условие синусов по меньшей мере для двух цветов, исправлен хроматизм увеличения. Весьма совершенное исправление хроматизма для точки на оси достигается применением особых марок стекол и кристаллов.

Сухой объектив-апохромат $40\times 0,95$ (ОМ-16) имеет апертуру, близкую к пределу, и поэтому он снабжен коррекционной оправой. При вращении оправы меняется второй воздушный промежуток между компонентами, чем компенсируются aberrации, вызванные покровным стеклом, толщина которого не равна 0,17 мм.

Планахроматы и планапохроматы — это объективы с дополнительно исправленной кривизной изображения, применяемые для важных визуальных наблюдений и для цветной фотографии.

Высокое качество изображения достигается усложнением оптической системы объектива и применением сверхтяжелых кронов и особых флинтов. На рис. 1.6 показан объектив — планапохромат $100\times 1,25$ (ОПА-5), входящий в комплект биологического микроскопа МБИ-15. Усложнение конструкции планаобъективов привело к увеличению стандартного размера от плоскости предмета до опорного торца объектива с 33 мм до 45 мм.

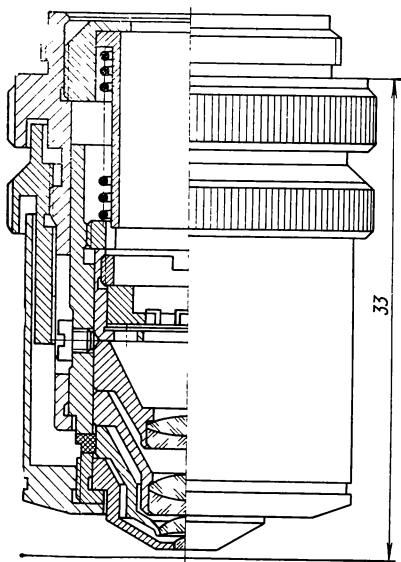


Рис. 1.5. Объектив-ахромат $90\times 1,25$ масляной иммерсии (М-101)

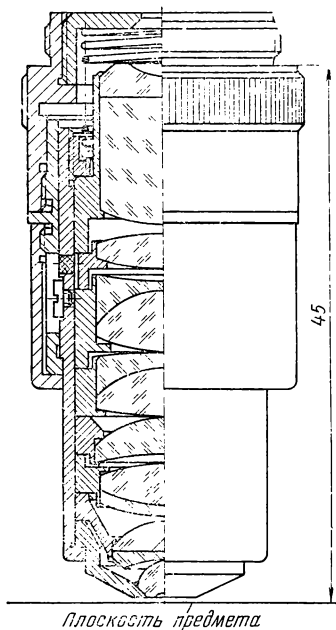


Рис. 1.6. Объектив планапохромат $100\times 1,25$ (ОПА-5)

Объективы-монокроматы используют в ультрафиолетовой области спектра в отдельных ее участках шириной не более 20 нм. Эти объективы состоят из набора одиночных линз, выполненных из кварца, флюорита или фтористого лития. Для видимой области спектра монокроматы применять нельзя.

Для многих исследований необходимы объективы, работающие в широкой области спектра (УФ, видимая и ИК) и не требующие перефокусировки, т. е. не обладающие заметным хроматизмом.

Такие объективы разработаны в виде зеркальных и зеркально-линзовых систем. Основной недостаток таких систем — центральное экранирование значительной части пучка (до 25% по площади зрачка). В новых зеркально-линзовых системах, у которых остаточные aberrации двух концентрических зеркал взаимно компенсируются и числовая апертура увеличивается линзовы-

ми компонентами, этот недостаток значительно уменьшен благодаря применению полупрозрачных зеркал и склеенной конструкции объектива, которая позволяет исключить экранирующие свет оправы зеркал. Достигнуто центральное экранирование не выше 4% по площади зрачка при удовлетворительной коррекции системы до апертуры $A=1,4$.

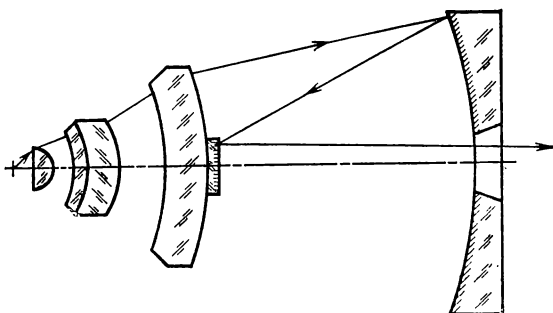


Рис. 1.7. Оптическая схема зеркально-линзового объектива $1,25 \times 1,1$ (ОНЗ-125)

На рис. 1.7 приведена оптическая схема зеркально-линзового объектива $125 \times 1,1$ (ОНЗ-125), применяемого в ультрафиолетовых микроскопах МУФ-5М и МУФ-6М для работы в УФ и видимой областях спектра.

Кроме названных, отечественной промышленностью выпускаются объективы для фазового контраста, контактные, фотографические проекционные, эпиобъективы и некоторые др.

1.5. ОКУЛЯРЫ МИКРОСКОПОВ

Окуляры Гюйгенса применяются для объективов-ахроматов. Они состоят из двух плоско-выпуклых линз — коллективной и глазной, обращенных выпуклыми поверхностями к объективу. На рис. 1.8 дана схема микроскопа с окуляром Гюйгенса и показано положение окуляра в нормальном тубусе. С изображением I' , которое дает объектив, совмещен передний фокус окуляра $F_{ок}$. Особенностью окуляра Гюйгенса является то, что этот фокус находится между линзами, а не впереди них, как во всех других окулярах. Изображение I' является мнимым предметом для коллектива O_1 . Коллектив дает действительное изображение I'' в переднем фокусе F_2 глазной линзы O_2 . Здесь же находится диафрагма поля зрения окуляра.

При расчете окуляра Гюйгенса можно использовать только три конструктивных параметра: два радиуса кривизны и расстояние между линзами. При заданном увеличении окуляра, т. е. при заданном его фокусном расстоянии, остаются два пара-

метра. Один используется на исправление хроматизма увеличения, а другой на частичную коррекцию астигматизма и комы. Сферическую aberrацию и хроматизм положения в данной схеме исправить нельзя, но поскольку окуляр работает в узких пучках, то эти aberrации почти не влияют на качество изображения всего микроскопа.

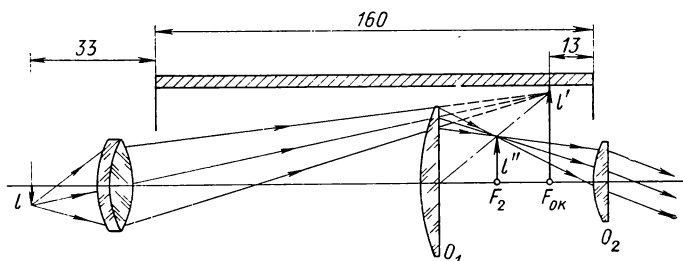


Рис. 1. 8. Ход лучей в микроскопе с окуляром Гюйгенса:

O_1 —коллектив; O_2 —глазная линза

Удаление выходного зрачка окуляра Гюйгенса составляет примерно одну треть его фокусного расстояния. Этого удаления достаточно для удобного наблюдения, если увеличение не превышает $15\times$. Наиболее распространены окуляры с увеличением $7\times$ и $10\times$. Угловое поле зрения окуляра не превышает 30° .

Окуляр Гюйгенса уменьшает продольные размеры микроскопа и (см. рис. 1. 8) имеет линзы, которые по диаметру меньше изображения, создаваемого объективом. Это основной окуляр наблюдательных микроскопов. Для измерительных целей окуляр Гюйгенса применяют редко, так как он дает изображение сетки одной глазной линзой.

Окуляр Кельнера также состоит из двух плоско-выпуклых линз — одиночной коллективной, повернутой плоскостью к объективу, и склеенной глазной, повернутой плоскостью к глазу. Aberrации хорошо исправлены для поля $40\text{—}50^\circ$. Передний фокус окуляра Кельнера находится впереди коллектива на расстоянии $\sim 0,3f'_{\text{ок}}$, поэтому световой диаметр коллектива значительно больше, чем в окуляре Гюйгенса. Общая длина окуляра составляет $1,25f'_{\text{ок}}$.

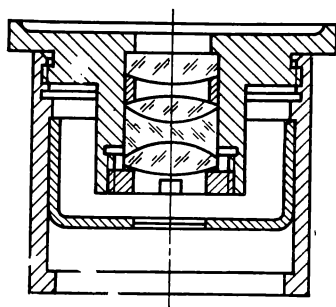


Рис. 1. 9. Ортоскопический окуляр

Ортоскопические окуляры употребляются в соединении с объективами-ахроматами средних апертур в тех случаях, когда

желательно иметь большое окулярное увеличение и угловое поле зрения до 50° . На рис. 1.9 показан ортоскопический окуляр $\overline{Г}_{ок}=28\times$ (АМ-20).

Компенсационные окуляры применяются в соединении с объективами апохроматами, планобъективами и ахроматами больших увеличений. Эти окуляры компенсируют хроматизм увеличения применяемых с ними объективов. Компенсационные окуляры по своей схеме аналогичны усложненному окуляру Гюйгенса или ортоскопическому окуляру.

Гомалы — это оптические системы с отрицательным фокусным расстоянием, применяемые в микроскопах вместо окуляров для компенсации кривизны изображения и хроматической разности увеличения, даваемых апохроматами. Выходной зрачок гомалов расположен внутри системы и поэтому они применяются не для наблюдения, а для фотографирования. Линейное поле зрения гомалов сокращено до 8—15 мм.

1.6. МЕТОДЫ ОСВЕЩЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ.

Осветители светлого и темного поля

Подавляющее большинство объектов, исследуемых под микроскопом, несамосветящиеся. Такие объекты следует освещать посторонним источником света. Важная роль специального осветителя объясняется тем, что от его апертуры зависит разрешающая способность микроскопа (1.22), а от его схемы — контраст и равномерность освещения препарата.

Микропрепараты делятся на две большие группы: прозрачные (тонкие срезы, жидкости, тонкие шлифы минералов и т. п.) и непрозрачные (травленные шлифы металлов и др.). Соответственно имеются две группы осветительных устройств для проходящего и отраженного света.

При микроскопических исследованиях широко используют освещение объектов по методу **светлого и темного поля**.

При освещении по методу **светлого поля** лучи из осветителя, пройдя объект (проходящий свет) или зеркально отразившись от его поверхности (отраженный свет), попадают непосредственно в объектив, создавая позитивный амплитудный контраст, т. е. изображая поглощающие или плохо отражающие участки объекта темными на общем светлом фоне (поле).

При освещении по методу **темного поля** лучи из осветителя непосредственно в объектив не попадают и общий фон (поле) получается достаточно темным. На этом фоне светлыми выглядят те участки объекта, которые рассеивают свет (или диффузно отражают) или наклон которых меняет направление света. Таким образом, в темном поле образуется негативный контраст изображения, а в светлом — позитивный. Темное поле достигается применением осветителей, апертура которых обязательно больше апертуры объектива.

Осветители для проходящего света

Чаще всего в микроскопии применяют схему нормального освещения в **проходящем свете и светлом поле**, которая называется схемой Келера (рис. 1. 10). Коллектор 2 проецирует источник света 1 в плоскость апертурной диафрагмы 4 конденсора 5. Апертурная диафрагма установлена в передней фокальной плоскости конденсора и проецируется им в бесконечность. Как известно, входной зрачок микроскопа также находится в бесконечности, поэтому схема Келера обеспечивает правильное соединение осветителя и микроскопа. После объектива 7 микро-

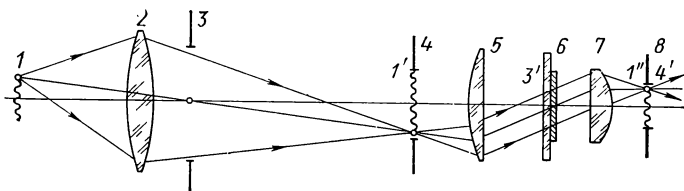


Рис. 1. 10. Схема нормального освещения по Келеру (светлое поле):

1—источник света; 2—коллектор; 3—полевая диафрагма; 4—апертурная диафрагма; 5—конденсор; 6—объектив; 7—микрообъектив; 8—выходной зрачок микрообъектива

скопа изображение апертурной диафрагмы образуется в его выходном зрачке 8. Полевая диафрагма 3 проецируется конденсором в плоскость объекта 6.

Схема Келера характеризуется тем, что через каждую точку объекта проходят лучи, вышедшие из всех точек источника. Это означает, что объект освещен равномерно. Кроме того, освещаемая часть поля зрения ограничивается с помощью полевой диафрагмы. Такая регулировка уменьшает количество рассеянного света и повышает контраст изображения. И наконец, с помощью апертурной диафрагмы изменяется апертура конденсора. Теоретически апертуры конденсора и объектива должны быть равны, однако для ослабления рассеянного света апертуру конденсора всегда устанавливают несколько меньше апертуры объектива.

На рис. 1. 11 приведен поперечный разрез конденсора ОИ-22. Он предназначен для прямого освещения объектов в проходящем свете. Фокусное расстояние конденсора $f' = 15$ мм. При использовании масляной иммерсии конденсор имеет числовую апертуру $A_k = 1,4$. Оправы фронтальной 1 и нижней линзы 2 с асферической поверхностью выполнены свинчивающимися. При снятии фронтальной линзы конденсор имеет числовую апертуру 0,4. Ирисовая апертурная диафрагма регулируется рычагом 4. В оправу 3 может устанавливаться светофильтр.

При переходе от светлого к темному полю применяется метод косого освещения. Косое одностороннее освещение получается при частичном закрытии апертурной диафрагмы до $1/2 \div 1/3$ ее диаметра и смещения ее с оптической оси. Такое освещение заметно повышает контраст изображения, особенно при наблюдении штрихов, царапин и т. д., направление которых перпендикулярно падающему свету.

Осветитель темного поля создает в центральной части поля зрения полый конус лучей с апертурой, превышающей апертуру объектива. Причем, чем меньше по глубине освещенное пространство, тем качественнее изображение. Причиной этого является малая глубина резкого изображения микроскопа.

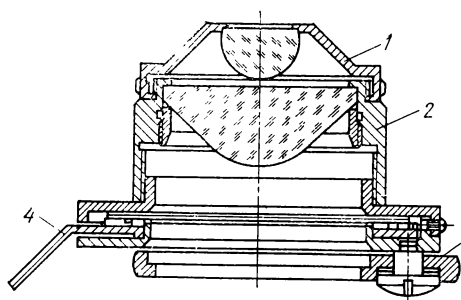


Рис. 1.11. Конденсор ОИ-22:

1—фронтальная линза в оправе; 2—нижняя линза в оправе; 3—оправа светофильтра; 4—рычаг апертурной диафрагмы

В настоящее время для наблюдения прозрачных объектов в темном поле применяются линзовые и зеркальные (параболоидные и кардиоидные) конденсоры.

На рис. 1.12 приведена оптическая схема трехлинзового конденсора, освещающего

лучи которого имеют апертуру от 1 до 1,4. Центральная часть параллельного пучка задерживается диафрагмой. Такие конденсоры обладают большими aberrациями и применяются редко.

На рис. 1.13 приведена оптическая схема параболиконденсора. Сплошное стеклянное тело (линза) 4 с боков ограничено поверхностью парабоида вращения, а снизу и сверху — плоскостями. Параллельный пучок лучей собирается в фокусе парабоида, совмещенном с центром препарата. Препарат находится между покровным 1 и предметным 2 стеклами. Иммерсионный слой 3 соединяет конденсор и предметное стекло в однородную среду. Центральная часть пучка вырезается диафрагмой 5. В параболиконденсоре отсутствуют сферическая и хроматическая aberrации, но не выполняется условие синусов. Апертура осветителя от 1,1 до 1,4.

Кардиоидконденсоры дают апланатическое изображение и являются наиболее совершенными из всех зеркальных конденсоров. Ход лучей в кардиоидконденсоре ОИ-10 показан на рис. 1.14. Пучок лучей (на рисунке заштрихован) сначала отражается на выпуклой сфере, затем — на вогнутой кардиоидной поверхности. В современных кардиоидконденсорах асферическая поверхность заменена сферой ближайшего радиуса без значительного ущерба для качества изображения. Конденсор ОИ-10

имеет также линзу, освещающую препарат по методу светлого поля. Переход от светлого поля на темное осуществляется уста-

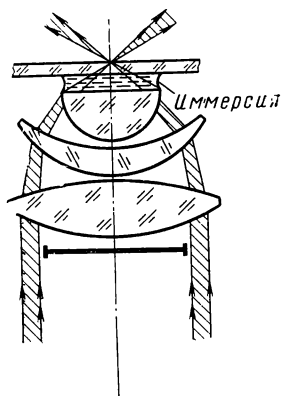


Рис. 1. 12. Трехлинзовый конденсор темного поля

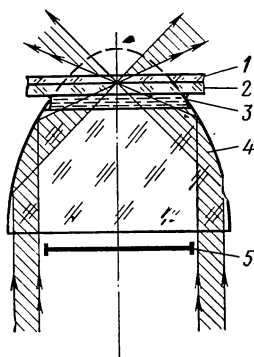


Рис. 1. 13. Параболоид-конденсор:

1—покрывное стекло; 2—предметное стекло; 3—иммерсия; 4—линза; 5—кольцевая диафрагма

новкой перед апертурной диафрагмой прозрачного кольца, которое экранирует линзу светлого поля, но пропускает свет в кар-

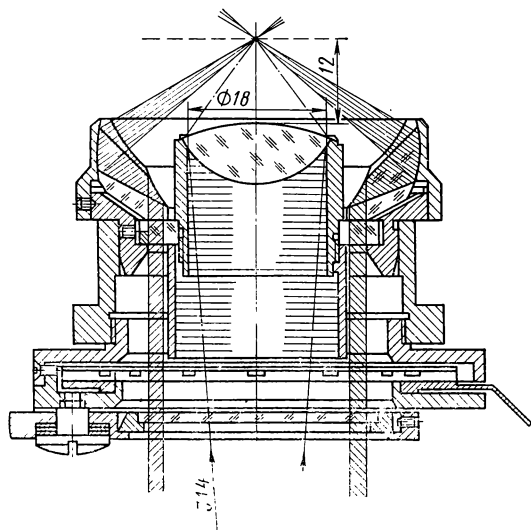


Рис. 1. 14. Конденсор ОИ-10

диоидконденсор. Апертурная диафрагма при методе темного поля открывается полностью.

Конденсор ОИ-10 безиммерсионный и его апертура в темном поле равна 0,7, а в светлом поле 0,6. Кардиоидконденсор ОИ-13 применяется с иммерсией и имеет апертуру 1,2.

Осветители для отраженного света

На рис. 1.15 приведена принципиальная оптическая схема осветительного устройства металлографического микроскопа по методу светлого *а* и темного *б* полей. Схема светлого поля обеспечивает нормальное освещение по Келеру. Источник света *1* изображается коллектором *I* на апертурной диафрагме АД, ко-

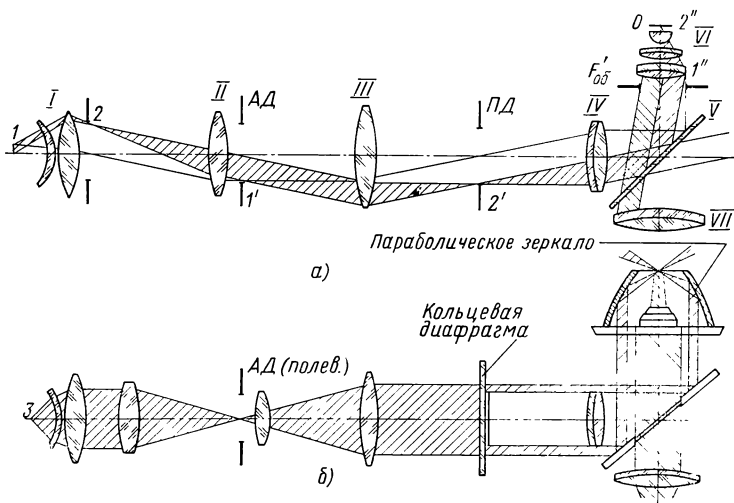


Рис. 1.15. Осветительная система металлографического микроскопа:

а—светлое поле; *б*—темное поле:
1—источник света; I—коллектор; 2—оправа коллектора; II, III, IV—линзы оборачивающей системы; V—полупрозрачная пластинка; VI—объектив; VII—ахроматический объектив; АД—апертурная диафрагма; ПД—полевая диафрагма; О—объект

торая находится в переднем фокусе линзы III. Линзы III и IV действуют как оборачивающая система и проектируют апертурную диафрагму в выходной зрачок объектива VI, совпадающий с его задним фокусом $F'_{об}$. Объектив VI рассчитан на тубус-бесконечность и работает совместно с ахроматическим объективом VII. Линзы II и III действуют аналогично оборачивающей системе и изображают оправу 2 коллектора I в плоскости полевой диафрагмы ПД. Эта диафрагма установлена в фокусе линзы IV и проектируется ею и объективом VI в плоскость объекта О.

На рис. 1.15 светоделительное устройство показано в виде полупрозрачной пластинки V. В других приборах устанавливается

светоделительный кубик. Такой способ освещения носит название **схемы Бека**. В **схеме Нашё** вместо пластинки, действующей по всей ширине пучка, установлена призма полного внутреннего отражения, перекрывающая половину светового пучка микроскопа.

В схеме Бека нет ограничения апертуры объектива, но используется не более 25% падающего из осветителя света и образуются вредные рефлексy, уменьшающие контраст изображения.

В схеме Нашё апертура объектива уменьшена экранирующим действием призмы, но используется 50% света (с учетом перекрытия половины пучка) и нет рефлексов. Эту схему чаще всего применяют при микрофотографировании.

При методе темного поля источник света проектируется на апертурную диафрагму АД. Параллельный пучок лучей ограничивается кольцевой диафрагмой, отражается от кольцевого зеркала и собирается параболическим зеркалом на объекте. Это означает, что апертурная диафрагма одновременно выполняет роль полевой диафрагмы, так как ограничивает освещенный участок объекта.

1.7. МИКРОПРОЕКЦИЯ И МИКРОФОТОГРАФИЯ

В основе приборов как для микропроекции, так и для микрофотографии лежит одна и та же принципиальная оптическая схема (рис. 1.16). Препарат 1 и его изображение $1'$ остаются как и при наблюдении в апланатических точках микрообъектива 2 .

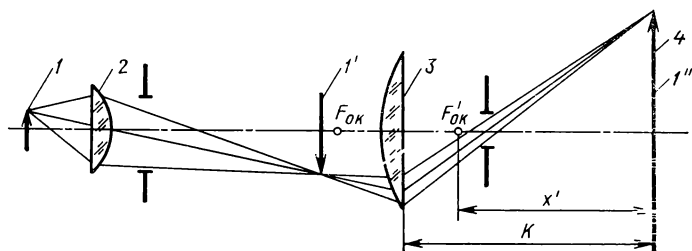


Рис. 1.16. Принципиальная схема микропроектора:

1—препарат; 2—микрообъектив; 3—окуляр; 4—экран или фотопластинка

Любые нарушения этого положения приводят к потере качества изображения и потому нежелательны. Окуляр 3 действует не как лупа, а как проекционный объектив. Для этого его приходится выдвигать из тубуса на такую величину, чтобы промежуточное изображение $1'$ оказалось перед фокусом $F_{ок}$ и действительное изображение $1''$ получилось с заданным увеличением

на экране или фотопластинке 4. Увеличение окуляра в этом случае определяется по известной формуле (без учета знака)

$$\beta_{\text{ок}} = \frac{x'}{f'_{\text{ок}}},$$

где x' — расстояние от заднего фокуса окуляра до экрана;
 $f'_{\text{ок}}$ — фокусное расстояние окуляра.

После подстановки $f'_{\text{ок}}$ из формулы (1.6) получаем

$$\beta_{\text{ок}} = \frac{x'}{250} \bar{\Gamma}_{\text{ок}}. \quad (1.28)$$

Так как расстояние x' обычно много больше, чем $f'_{\text{ок}}$, то его можно заменить величиной K — расстоянием от окуляра до экрана, которое в микрофотографии называется **длиной камеры**. Тогда окончательно формула для линейного увеличения микропроектора или **масштаба изображения** имеет вид:

$$\beta = \beta_{\text{об}} \bar{\Gamma}_{\text{ок}} \frac{K}{250}. \quad (1.29)$$

Воспользуемся известной формулой для освещенности на экране при микропроекции

$$E = \pi \tau B \frac{A^2}{\beta^2}, \quad (1.30)$$

где τ — коэффициент пропускания осветителя, препарата и микроскопа;

B — яркость источника света;

A — апертура объектива;

β — увеличение микроскопа при проекции.

Коэффициент пропускания осветителя и микроскопа не превышает $\tau = 0,5$. В сложных микроскопах потери могут быть еще больше. Коэффициент пропускания препаратов колеблется от единицы до одной десятой, а иногда и меньшей величины.

В конечном счете выходящий из прибора световой поток оказывается значительно ослабленным. Компенсировать это, как видно из формулы (1.30), можно лишь повышением яркости источника, если апертура объектива и масштаб изображения определены условиями опыта. Масштаб изображения при микрофотографировании обычно близок или ненамного превышает видимое увеличение микроскопа, тогда как при микропроекции он может быть очень большим.

Оптическая система микропроектора должна удовлетворять самым высоким требованиям. Для устранения кривизны изображения при работе ахроматических и апохроматических объекти-

вов применяют вместо окуляров гомалы. Наилучший результат достигается с планобъективами, которые образуют плоское изображение по всему полю зрения.

К осветительным системам микропроекторов предъявляются два повышенных требования: источник света должен иметь высокую яркость и юстировка системы должна быть безукоризненной. Последнее достигается особо тщательной настройкой осветительной системы по способу Келера. Это дает возможность получить в высокой степени равномерную освещенность по всему полю зрения, а количество рассеянного света свести до минимума.

1.8. МЕХАНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ МИКРОСКОПОВ

Из назначения микроскопа — исследовать различные микропрепараты при больших увеличениях (до $1500\times$) с предельно возможными апертурами объективов — вытекают основные требования, предъявляемые к конструкции штативов микроскопов и точности выполнения его механизмов.

Глубина изображения микроскопа с объективом $90\times 1,30$ и окуляром $15\times$ равна $T=0,24$ мкм. Жесткость штатива и предметного столика должна быть такова, чтобы после точной фокусировки и снятия усилий с рукоятки резкость изображения не нарушалась, т. е. чтобы взаимное перемещение объектива и препарата не превышало 0,24 мкм.

Кинематическая чувствительность механизма точной фокусировки равна глубине изображения, деленной на величину предельного углового поворота рукоятки микромеханизма, который еще может быть установлен наблюдателем и принимается равным одному градусу. Таким образом, кинематическая чувствительность микромеханизма должна быть равной 0,24 мкм на один градус поворота рукоятки.

При больших увеличениях поле зрения микроскопа не превышает 0,12 мм в плоскости объекта. Если принять, что ошибка приведения препарата к центру поля зрения не должна превышать 0,1 радиуса поля зрения, то кинематическая чувствительность механизмов перемещения столика должна быть не хуже 0,006 мм на градус поворота рукоятки.

Малое поле зрения микроскопа требует высокой точности центровки гнезд револьвера и объективов, равной 0,01 мм. Достаточно жесткие требования предъявляются также к перпендикулярности предметного столика оси микроскопа и опорного торца тубуса к его оси, к параллельности перемещения тубуса или столика при грубой и тонкой фокусировке и т. д.

Как следует из приведенных цифр, штатив микроскопа должен обладать большой жесткостью, высокой точностью механизмов и хорошей плавностью их ходов.

Основными узлами штатива микроскопа являются:

- 1) основание (башмак), которое служит опорой всего микроскопа и несет всю конструкцию штатива;
- 2) тубусодержатель, несущий наблюдательный тубус;
- 3) механизм грубого перемещения тубуса или столика;
- 4) механизм точной фокусировки столика или тубуса;
- 5) тубус микроскопа с окуляром и револьвером для крепления объективов;
- 6) предметный столик;
- 7) осветительная система.

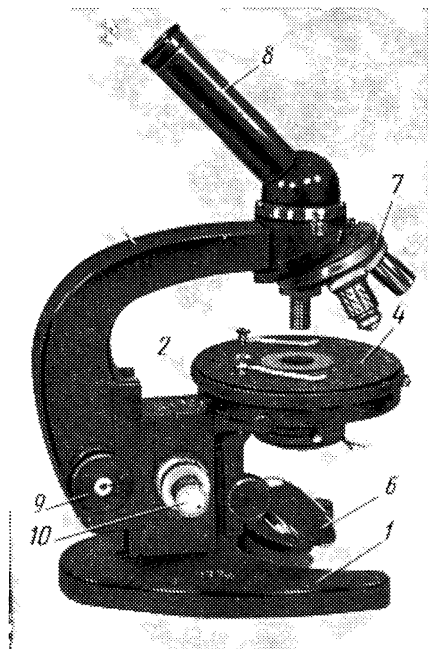


Рис. 1. 17. Рабочий биологический микроскоп МБР-1:

1—основание; 2—коробка микромеханизма; 3—тубусодержатель; 4—предметный столик; 5—конденсатор; 6—зеркало; 7—револьвер; 8—тубус; 9—рукоятка грубой наводки; 10—рукоятка тонкой наводки

Существует три основных компоновки механизмов штатива. В старом штативе С-образной формы механизмы грубого и точного перемещения расположены в тубусодержателе и воздействуют непосредственно на тубус.

В новом штативе Г-образной формы механизмы установлены в специальной коробке, укрепленной на основании, и перемещают тубусодержатель вместе с тубусом.

На рис. 1. 17 показан биологический микроскоп МБР-1 с Г-образным штативом, который является сейчас основной формой штативов микроскопов. На основании 1 укреплена коробка микромеханизма 2, на которой расположены тубусодержатель 3, предметный столик 4, конденсор 5 с апертурной диафрагмой и поворотное зеркало 6. На тубусодержателе укреплены револьвер 7 с объективами и монокулярный на-

клонный тубус 8 с окуляром. Фокусировка микроскопа осуществляется грубо рукояткой 9, точно — рукояткой 10.

В новых универсальных микроскопах Г-образный тубусодержатель жестко закреплен на основании, а механизмы перемещения воздействуют на предметный столик микроскопа. Неподвижный Г-образный тубусодержатель лучше двух предыдущих, так как из-за отсутствия направляющих у него больше жесткость и его можно нагружать различными принадлежностями, причем фокусировка нарушаться не будет.

Механизм грубого перемещения воздействует либо на тубус или тубусодержатель, либо на предметный стол. Чтобы устанавливать на тубус специальные осветители или на стол толстые предметы, величина грубого перемещения тубуса или столика должна быть не менее 30 мм. Направляющие для грубого перемещения обычно выполняются из латуни в виде ласточкина хвоста. Механизм привода составляют стальная трибка и латунная косозубая рейка. Передаточное отношение ось — рейка равно 0,05 мм/град.

Механизм точной фокусировки устанавливается на микроскопах со средним и большим увеличением, когда глубина резкого изображения становится меньше кинематической чувствительности механизма грубой фокусировки. Кроме прямого назначения — точной наводки на резкое изображение препарата — механизм иногда используют для измерения протяженности препарата вдоль оптической оси. Точность наведения на отдельные плоскости объекта зависит от глубины резкости T . Расчет показывает, что для глубинных измерений с ошибкой не выше 1 мкм необходим объектив с апертурой не ниже 0,75.

Величина точного перемещения тубуса или предметного столика обычно не превышает 2—2,5 мм.

Основными элементами механизма точной фокусировки являются направляющие и собственно механизм.

Направляющие чаще всего выполняются в виде ласточкина хвоста.

В микроскопах повышенной точности применяются шариковые или роликовые направляющие.

Во всех современных микроскопах принято соотношение, при котором перемещению тубуса или столика на 0,1 мм соответствует полный оборот рукоятки микромеханизма. Это означает, что кинематическая чувствительность микромеханизма, равная 0,3 мкм/град, обеспечивает необходимую точность фокусировки при использовании самых высокоапертурных объективов.

В отечественных микроскопах применяют зубчато-рычажные, винто-рычажные и винтовые микромеханизмы. В биологических микроскопах распространен зубчато-рычажный микромеханизм Мейера (рис. 1. 18). Вращение отсчетного барабанчика 1 через систему зубчатых колес передается на сектор 2, качающийся на призме 3. В лунку сектора вставлен штифт 4 с коническими концами, его верхний конец упирается в направляющую 5 и передает ей поступательное движение. Направляющая соединена с тубусом или с предметным столиком.

Передаточное отношение механизма таково, что при повороте рукоятки 1 на одно деление тубус перемещается на 0,002 мм. На рукоятке таких делений 50, а механизм рассчитан на 25 оборотов рукоятки, поэтому общее перемещение тубуса от микромеханизма равно 2,5 мм.

Мертвый ход устраняется пружиной 7, установленной между упором корпуса 6 и направляющей. Эта пружина действует через штифт на сектор и прижимает его к призме.

Винто-рычажный микромеханизм применяется в металлографическом микроскопе МИМ-7 и микроинтерферометрах типа МИИ (рис. 1. 19). Перемещения направляющей h и винта H связаны линейной зависимостью

$$h = \frac{H}{L} l,$$

где l и L — длины малого и большого рычагов.

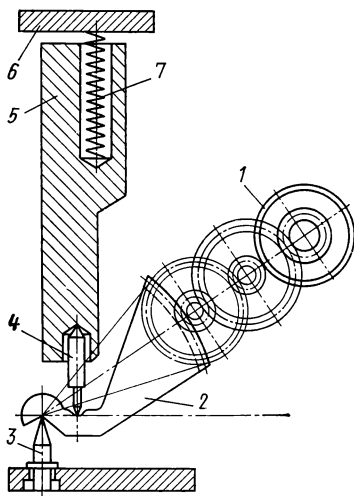


Рис. 1. 18. Микромеханизм Мейера:

1—отсчетный барабанчик с рукояткой тонкой наводки; 2—сектор; 3—призма; 4—штифт; 5—направляющая; 6—корпус; 7—пружина

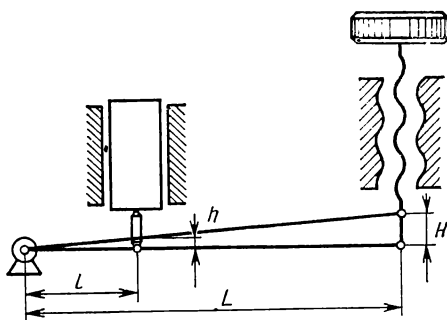


Рис. 1. 19. Винто-рычажный микро-механизм

Этот наиболее перспективный микромеханизм не имеет теоретической ошибки, выдерживает большие нагрузки, стабилен в работе и длительное время не дает расфокусировки.

В последних моделях отечественных и зарубежных микроскопов рукоятки механизмов грубой и точной фокусировки выведены на одну ось, причем действуют независимо, а для обоих механизмов применена одна высококачественная направляющая. Таким путем удалось упростить управление и значительно повысить жесткость микроскопа. В коаксиальном механизме с одной направляющей, разработанном Р. М. Рагузиным, механизм грубой фокусировки выполнен винтовым, а точной фокусировки — винто-рычажным.

Тубус микроскопа бывает прямым (часто выдвижным) или наклонным (см. рис. 1. 17). Механическая длина тубуса равна 160 ± 1 мм. Верхняя часть тубуса имеет наружный диаметр $25 - 0,14$ мм, а внутренний $23,2 + 0,14$ мм. В нижней части укреплен револьвер с объективами. Резьба для крепления объективов

дюймовая: угол профиля 55°, диаметр 4/5" (от 19,825 до 19,909 мм) и шаг 1/36"

Предметные столики микроскопов отличаются большим разнообразием: от простейшего прямоугольного плоского до сложнейшего столика Федорова, позволяющего поворачивать препарат вокруг нескольких осей.

Наиболее распространен круглый вращающийся столик (см. рис. 1. 17) с верхней поворотной частью, которая может к тому же перемещаться двумя винтами, установленными в неподвижной части столика.

В новых исследовательских микроскопах успешно применяется большой крестообразный столик с коаксиальной подачей, расположенной под столиком перпендикулярно к его поверхности. Такие столики имеют большую опорную площадь, удобный препаратоводитель, но не могут поворачиваться.

Разнообразные принадлежности к микроскопам предназначены либо для расширения возможностей исследования, либо для улучшения условий работы наблюдателя. Например, конденсоры темного поля и фазово-контрастные устройства повышают контраст изображения. Объект-микрометры, окулярные микрометры и интеграторы позволяют проводить измерения. Люминесцентные принадлежности помогают исследовать специальные препараты. Спектральные и фотометрические насадки дают возможность выделить малые участки препарата и провести спектрофотометрический анализ. Фотографические насадки, рисовальные аппараты, насадки сравнения служат целям документальных исследований. Бинокулярные насадки и препаратоводители создают лучшие условия наблюдения и удобства при работе.

Большинство принадлежностей, выпускаемых отдельно, входит в комплекты больших и универсальных моделей микроскопов. Подробное описание принадлежностей можно найти в монографии по микроскопам [14].

1.9. БИОЛОГИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ

Все биологические микроскопы делятся на три группы.

1. **Микроскопы биологические упрощенные.** Служат для простейших исследований и учебных целей в школах и техникумах.

2. **Микроскопы биологические рабочие.** Предназначены для стандартных исследований. Выпускаются модели МБР-1 (см. рис. 1. 17), МБР-3, дорожный МБД-1, «Биолам-70» и др.

3. **Микроскопы биологические исследовательские.** Применяются для научных работ. Выпускаются модели МББ-1А, МБИ-11, МБИ-1,5, МБИ-6.

Биологический микроскоп МБИ-15 является универсальной исследовательской моделью и позволяет проводить визуальное наблюдение и фотографирование объектов.

Фотографирование ведется пленочной камерой с размером кадра 24×36 мм или пластиночной камерой 9×12 см.

В комплект микроскопа входят объективы: а) планахромат $3,5 \times 0,1$ (ОМ-3); б) ахромат $90 \times 0,6 \div 1,25$ (О6М-90); в) планапохроматы $10 \times 0,30$ (ОПА-1), $16 \times 0,40$ (ОПА-2), $40 \times 0,65$ (ОПА-3), $60 \times 0,85$ (ОПА-4), $100 \times 1,25$ (ОПА-5); г) ахроматы для люминесценции $10 \times 0,40$ (ОМ-33Л), $30 \times 0,90$ (О5В-30Л), $40 \times 0,75$ (ОМ-23Л), $70 \times 1,23$ (ОМ-25Л); д) ахроматы для фазового контраста $10 \times 0,30$ (ФОМ-5Л), $20 \times 0,40$ (ФОМ-27), $40 \times 0,65$ (ФМЩ-Л); е) окуляры: Гюйгенса $8 \times$ (АМ-8), компенсационный $K10 \times$ (АМ-14), широкоугольные компенсационные $8 \times$ (АКШ-8) и $16 \times$ (АКШ-16).

Набор объективов и окуляров позволяет получать увеличения: при наблюдении от 28 до $1900 \times$, при фотографировании на пленку от 23 до $2600 \times$ и на пластинку от 42 до $4800 \times$.

На рис. 1. 20 приведена оптическая схема микроскопа. Осветитель выполнен по принципу Келера. **Работа осветителя в проходящем свете:** коллектор 3 совместно с осветительными линзами 10, 12 и 14 проектирует источник света 1 в плоскость апертурной ирисовой диафрагмы 15. Основным источником света является лампа накаливания ОП12-100 (12 В, 100 Вт). Полевая ирисовая диафрагма 11 линзами 12, 14 и панкратическим конденсором 17 (ПК-3) проектируется в плоскость объекта 20. Вместо панкратического конденсора могут применяться конденсор темного поля 47 (ОИ-13) и конденсор 19 ($A=1,2$ и $A=0,3$). При смене конденсора ПК-3 апертурная диафрагма 15 вместе с линзой 14 выключаются и на их место устанавливается телесистема 16.

Оптическая длина тубуса микроскопа равна 190 мм. Поэтому при использовании объектива 21, рассчитанного на длину тубуса 160 мм, применяется ахроматическая линза 22, увеличивающая общий масштаб изображения в 1,2 раза.

Работа осветителя в отраженном свете: по методу светлого поля в ход лучей включается зеркало 8 и светоделительная пластинка 25. Тогда источник света 1 проектируется коллектором 3 и линзой 49 в плоскость ирисовой апертурной диафрагмы 48 и дальше бифокальной линзой 43 в выходной зрачок эпиобъектива 46. Одновременно бифокальная линза 43 и эпиобъектив 46 изображают полевую диафрагму 44 в плоскости объекта 20. По методу темного поля в ход лучей включается кольцевая диафрагма 42 и кольцевое зеркало 24, а пластинка 25 выводится из хода лучей. Бифокальная линза 43 склеена из двух простых плоско-выпуклых центрированных линз. Пучок лучей, прошедший малую линзу, используется для создания светлого поля, а большую линзу с апертурной диафрагмой 48 — для создания темного поля. Светоделительная пластина 9 с интерференционным покрытием применяется для смешанного освещения препаратов.

Исследование объектов в свете их люминесценции проводится с ртутной лампой 2 (ДРШ-250) при включенном коллекторе 4.

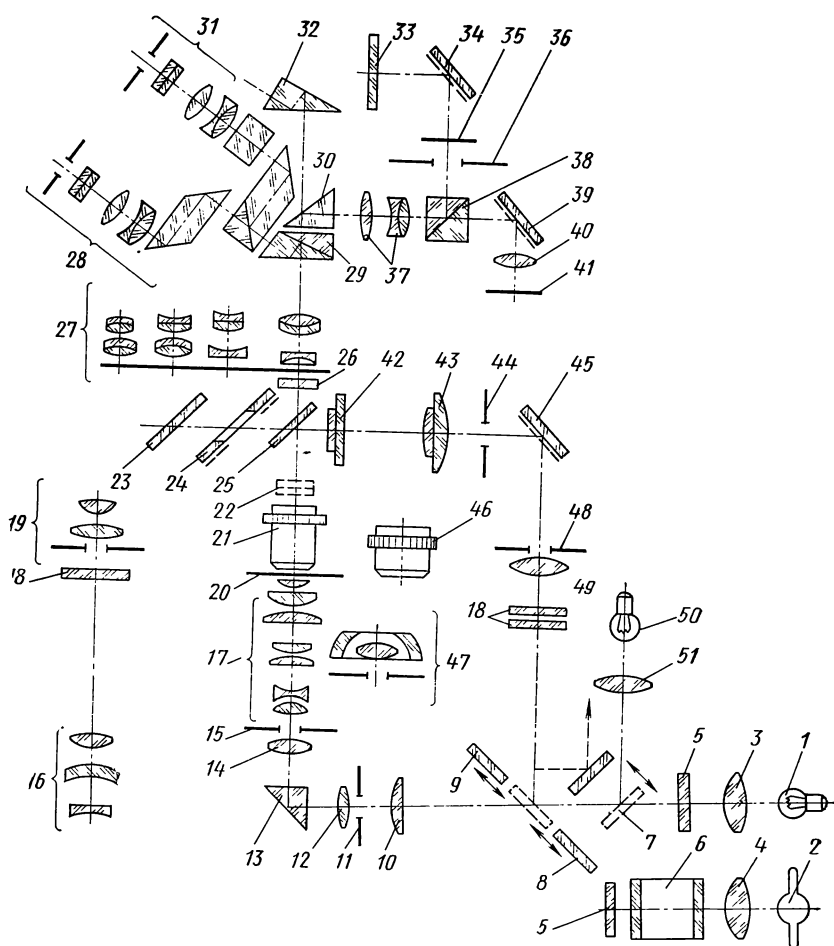


Рис. 1. 20. Оптическая схема биологического микроскопа МБИ-15:

1—лампа накаливания; 2—ртутная лампа; 3, 4, 51—коллекторы; 5, 18, 26—светофильтры; 6—теглопоглотитель; 7, 9, 23, 25—полупрозрачные пластинки; 8, 34, 39, 45—зеркала; 10, 12, 14, 40, 49—осветительные линзы; 11, 44—полевые диафрагмы; 13, 30, 32—призмы; 15, 48—апертурные диафрагмы; 16—телескопическая система; 17, 19—конденсоры; 20—объект; 21—микрообъектив; 22—ахроматический объектив; 24—кольцевое зеркало; 27—«оптовар»; 28—бинокулярный тубус; 29—светоделитель; 31—окуляр; 33—фотопластинка; 35—фотоэмульсия; 36—фотозатвор; 37—фотоокуляр; 38—призма-куб; 41—катод ФЭУ; 42—кольцевая диафрагма; 43—бифокальная линза; 46—эпиобъектив; 47—конденсор темного поля; 50—импульсная лампа

Светофильтры 5 выделяют определенные участки из спектра ртутной лампы. При работе в проходящем свете используются светофильтры 18 для возбуждения люминесценции и светофильтр

26. При работе в отраженном свете светофильтры 18 устанавливаются перед осветительной линзой 49 и в ход лучей включается полупрозрачная пластинка 23, избирательно пропускающая свет люминесценции из эпиобъектива 46 в визуальный тубус.

В визуальной части микроскопа находится блок переключающихся призм: призма 32 направляет весь свет в бинокулярный тубус 28, содержащий окуляры 31; призма 29 часть света направляет в тот же бинокулярный тубус, а другую часть — к призме 30. Далее свет попадает в фотоокуляр 37, который проектирует изображение объекта на фотопленку 35 или на фотопластинку 33. Призма-куб 38 со светоделительным слоем часть света ($\sim 15\%$) пропускает к зеркалу 39 и линзе 40, которая дает изображение объекта на катоде фотоэлектронного умножителя 41. В зависимости от освещенности изображения ФЭУ совместно с соответствующим блоком автоматически открывает фотозатвор 36 на необходимое время экспозиции. При фотографировании с импульсным источником света 50 (лампа ИФТ-200) в ход лучей дополнительно включаются светоделительная пластинка 7 и коллектор 51. В этом случае часть лучей от источника 1 или 2 попадает в систему и освещает объект в интервалах между вспышками импульсной лампы.

Перед призмённым блоком установлена система 27 «оптовар», позволяющий быстро менять увеличение микроскопа без смены объектива и окуляра.

При работе с ртутной лампой в осветитель может быть установлена теплопоглотительная кювета 6, наполненная дистиллированной водой или 4%-ным раствором медного купороса.

1.10. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ

Стереоскопические микроскопы дают прямое и объемное изображение объекта. Они предназначены для наблюдения двумя глазами мелких предметов и рельефов в биологии, медицине, минералогии, приборостроении и т. п.

Существующие стереоскопические микроскопы делятся на две группы: микроскопы с двумя объективами и микроскопы с одним объективом. Наиболее распространены стереоскопические микроскопы второй группы.

Стереоскопический микроскоп МБС-3

Оптическая схема МБС-3 приведена на рис. 1.21. При работе в проходящем свете коллектор 2 и отражатель 3 направляют свет от источника 1 (лампа накаливания) на объект 4, лежащий на стеклянной пластине предметного столика. За основным несъемным объективом 5 расположены две идентичные ветви оптических систем, каждая из которых содержит пару вращающихся

телескопических систем Галилея 6 и 11 с собственными увеличениями $2,5\times$; $1/2,5\times$; $1,6\times$; $1/1,6\times$, тубусную ахроматическую линзу 7 с фокусным расстоянием 160 мм, призму Шмидта 8 с крышей, отклоняющую оптическую ось от вертикали на 45° , и призму-ромб 9, раздвигая которую совместно с такой же призмой другого тубуса можно установить окуляры 10 по базе глаз наблюдателя в пределах от 56 до 72 мм, не нарушая параллельности оптических осей в бинокулярном тубусе.

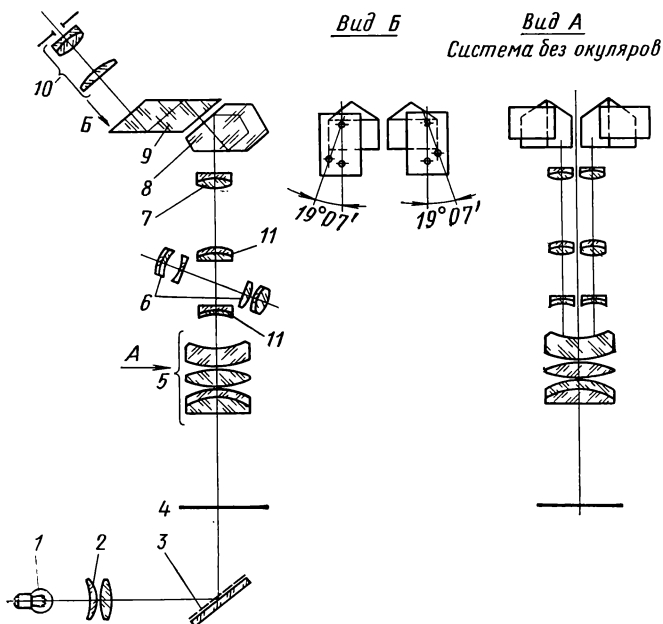


Рис. 1. 21. Оптическая схема микроскопа МБС-3:

1—источник света; 2—коллектор; 3—зеркало; 4—объект; 5—объектив;
6, 11—телескопические системы; 7—тубусные линзы; 8, 9—призмы;
10—окуляры

Исследуемый предмет находится в фокальной плоскости объектива 5. Галилеевские системы 6 и 11 установлены в параллельных пучках, поэтому действительные изображения предмета получаются в задних фокальных плоскостях ахроматических линз 7. Общее увеличение стереоскопического микроскопа вычисляют по формуле

$$\bar{\Gamma}_m = \frac{f'_l}{f'_{об}} \Gamma \bar{\Gamma}_{ок},$$

где f'_l и $f'_{об}$ — фокусные расстояния тубусной линзы и объектива микроскопа;

Γ и $\bar{\Gamma}_{ок}$ — увеличение галилеевской системы и окуляра.

При минимальном увеличении $4\times$ максимальное поле зрения микроскопа равно 44 мм, при максимальном увеличении $100\times$ — минимальное поле зрения 1,9 мм.

1. 11. УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ И ИНФРАКРАСНЫЕ МИКРОСКОПЫ

Ультрафиолетовая микроскопия широко применяется в биологии и медицине. Известно, что основные вещества клеток имеют максимум поглощения в ультрафиолетовой области спектра, а в видимой области спектра эти кислоты совершенно прозрачны. Применяя абсорбционный микроспектрофотометрический метод сканирования живой клетки, можно определить распределение и концентрацию нуклеиновой кислоты, имеющей большое значение в жизнедеятельности клетки.

Для микроспектрофотометрических работ в ультрафиолетовой области спектра разработаны два прибора: МУФ-6, основанный на фотографическом методе, и МУФ-5, основанный на фотоэлектрическом методе. Эти стационарные установки предназначены для научных исследований и работа на них требует специальной подготовки.

Упрощенный ультрафиолетовый микроскоп МУФ-3М предназначен для визуального исследования препаратов, имеющих избирательное поглощение в ультрафиолетовой области спектра. Микроскоп позволяет проводить наблюдения в проходящем ультрафиолетовом и видимом свете, а также исследовать люминесценцию препаратов. Микроскоп снабжен специальной зеркально-линзовой оптикой, прозрачной для ультрафиолетовых лучей. Кроме того, микроскоп имеет дополни-

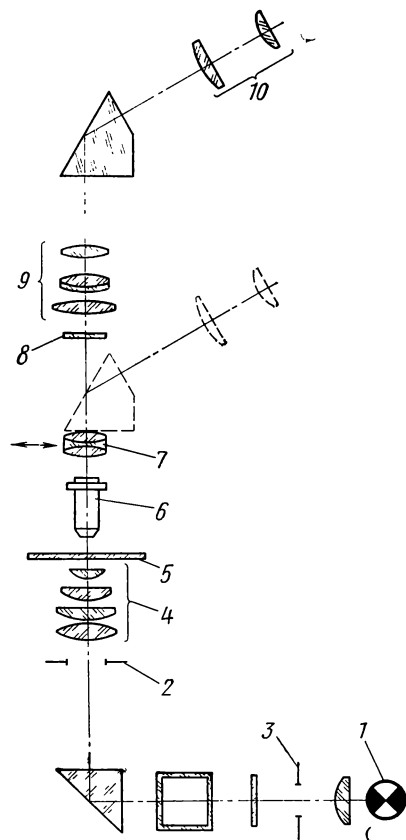


Рис. 1. 22. Оптическая схема ультрафиолетового микроскопа МУФ-3М:

1—источник света; 2—апертурная диафрагма; 3—полевая диафрагма; 4—конденсор; 5—препарат; 6—микрообъектив; 7—ахроматическая линза; 8—экран; 9—объектив; 10—окуляр

тельную микрофотонасадку для фотографирования препаратов.

Оптическая схема микроскопа (рис. 1. 22) при наблюдении в ультрафиолетовых лучах состоит из двух частей: системы освеще-

щения и проектирования и системы, преобразующей ультрафиолетовое изображение в видимое с последующим доведением его до наблюдателя.

Источник света 1 (ртутная кварцевая лампа ДРШ-100-2) проектируется коллектором в плоскость апертурной диафрагмы 2, полевая диафрагма 3 проектируется конденсором 4 в плоскость препарата 5. Для выделения необходимой длины волны света в осветителе устанавливаются стеклянные и газовые светофильтры. Микрообъектив 6 и дополнительная ахроматическая линза 7 проектируют изображение препарата на люминесцирующий экран 8, который превращает невидимое изображение в видимое. Это видимое изображение рассматривается при помощи дополнительного микроскопа, состоящего из объектива 9 и окуляра 10.

При работе в видимой области спектра линза 7 и экран 8 включаются, а призма и окуляр устанавливаются в положение, показанное пунктиром. Общее увеличение микроскопа при наблюдении в ультрафиолетовом свете меняется от 96 до $672\times$, при наблюдении в видимом свете от 70 до $1350\times$, при наблюдении в свете люминесценции от 70 до $600\times$. При наблюдении люминесценции препаратов в оптическую систему вводят светофильтры, которые отделяют свет люминесценции препарата от света, возбуждающего люминесценцию. Для наблюдения люминесценции в отраженном свете на микроскопе может быть установлен специальный opak-иллюминатор, входящий в комплект прибора.

Для наблюдения в ультрафиолетовых лучах светофильтры выделяют длины волн 254 и 213 нм, а для возбуждения люминесценции 313 и 365 нм.

Фотографический метод исследования препаратов в ультрафиолетовых лучах заключается в определении плотностей почернения на фотопленках или фотопластинках.

Обычно это делается с помощью микрофотометров типа МФ, но есть и другой способ расшифровки негативов. По методу **цветовой трансформации** три негатива, сфотографированные в различных участках спектра (например, на длинах волн 254, 313 и 365 нм), устанавливаются в три проектора с цветными светофильтрами (обычно это основные цвета: красный, зеленый и синий) и их изображения совмещаются на одном экране. Цветовой контраст изображения дает наглядное представление о взаимодействии ультрафиолетовых лучей и препарата.

Применение инфракрасных лучей открывает новые возможности исследования органических и неорганических микрообъектов. **Инфракрасный микроскоп МИК-4** предназначен для исследования полупроводников, темных стекол, зоологических, палеонтологических и других объектов в инфракрасных лучах с длиной волны от 0,75 до 1,2 мкм.

С помощью микроскопа МИК-4 можно наблюдать и фотографировать в инфракрасных проходящих и отраженных неполяри-

зованных лучах в светлом и темном полях; в проходящих поляризованных инфракрасных лучах при ортоскопическом и коноскопическом ходе лучей; в видимом проходящем и отраженном неполяризованном свете в светлом и темном поле; в видимом проходящем поляризованном свете при ортоскопическом ходе лучей.

Преобразование инфракрасного изображения в видимое достигается с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) типа П-4.

Фотографирование изображения объекта на пленку осуществляется микрофотонасадкой МФН-12 с камерой «Зоркий-4»; на фотопластинку размером 6,5×9 см — камерой, входящей в комплект микроскопа.

В качестве источника света применяется лампа с иодным циклом КИМ-10×90.

Микроскоп МИК-4 по своей схеме и конструкции похож на биологический микроскоп МБИ-15. Основное отличие заключается в дополнительной инфракрасной системе, состоящей из проекционного окуляра, электронно-оптического преобразователя и объектива. Проекционный окуляр переносит инфракрасное изображение, даваемое микрообъективом, на фотокатод ЭОП, а объектив проектирует видимое изображение с экрана ЭОП в переднюю фокальную плоскость окуляра микроскопа.

В комплект микроскопа входят поляризаторы и анализаторы, работающие в инфракрасной и видимой областях спектра, а также блок питания ЭОП и лампы КИМ-10×90.

В табл. 1.1 приведены увеличения микроскопа МИК-4.

Таблица 1.1

Способ приема энергии	Проходящий свет		Отраженный свет	
	инфракрасный	видимый	инфракрасный	
Визуальное наблюдение	44—5260	20—1080	94—5520 ₁	—
Фотографирование с насадкой МФН-12	20—657	10—250	46—648	22—315
Фотографирование без насадки	12—261	16—540	26—275	36—712

Примечание. Увеличение при фотографировании с насадкой МФН-12 с экрана ЭОП 3—4[×] Увеличение системы при наблюдении экрана ЭОП 6—33,6[×]

Для биологических и поляризационных микроскопов МБР-1, МББ-1, МБИ-11, МИН-8 и других разработаны две инфракрасные насадки. Первая из них НИК-1 — упрощенная — применяется для визуального просмотра. Вторая насадка НИК-3 — универ-

сальная — предназначена главным образом для исследования оптических кристаллов. Преобразование изображения из невидимого в видимое осуществляется, как и в МИК-4, с помощью ЭОП типа П-4.

В инфракрасных микроскопах и насадках используется обычная линзовая и зеркально-линзовая стеклянная оптика, которая прозрачна не только в видимой, но и в ближней инфракрасной области спектра.

Разрешающая способность инфракрасных микроскопов определяется теоретическим пределом, который вдвое больше, чем у обычных микроскопов, и аберрациями ЭОП. При наблюдении в проходящем свете довольно толстых кристаллов качество изображения заметно падает, если используются высокоапертурные микрообъективы с малой глубиной резкого изображения.

1.12. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МИКРОСКОПЫ

Металлографические микроскопы предназначены для контроля качества металлов и сплавов и исследования их структуры. Так как металлы непрозрачны, то конструкция металлографических микроскопов существенно отличается от конструкции биологических микроскопов.

Для удобства в работе микроскопы обычно имеют верхнее расположение предметного столика (над микрообъективом). Так как на столике могут устанавливаться тяжелые объекты, то механизм точной фокусировки перемещает не столик, а микрообъектив. Чтобы это перемещение не приводило к изменению длины тубуса, микрообъектив рассчитывают на длину тубуса, равную бесконечности, а для создания действительного изображения в схему вводится тубусная линза с фокусным расстоянием 200 или 250 мм.

Все металлографические микроскопы работают в отраженном свете. Введение осветителя внутрь микроскопа приводит к значительным потерям света. Кроме того, многие исследуемые объекты плохо отражают свет, поэтому осветители металлографических микроскопов должны иметь мощные источники света.

Для уменьшения рассеянного внутри прибора света на оптические детали наносят просветляющие покрытия, на объект не помещают никаких покровных стекол, внутренние поверхности микроскопа делают такой формы, чтобы в окуляр не попадали вредные рефлексы.

Для всесторонних исследований металлов как в металлургии, так и в машиностроении требуются универсальные исследовательские металлографические микроскопы, позволяющие применять все существующие методы (МИМ-8М, МИМ-9 и др.).

Для контроля и исследования больших деталей, а также для быстрых прикидочных проверок могут использоваться упрощен-

ные металлографические микроскопы с нижним расположением столика и без фотокамеры.

Упрощенный микроскоп ММУ-3 предназначен для визуального наблюдения непрозрачных объектов в светлом и темном поле и в поляризованном свете.

На рис. 1. 23 приведена оптическая схема микроскопа. Осветитель имеет упрощенную конструкцию. При работе в светлом поле источник света 1 (лампа накаливания СЦ61) коллекто-

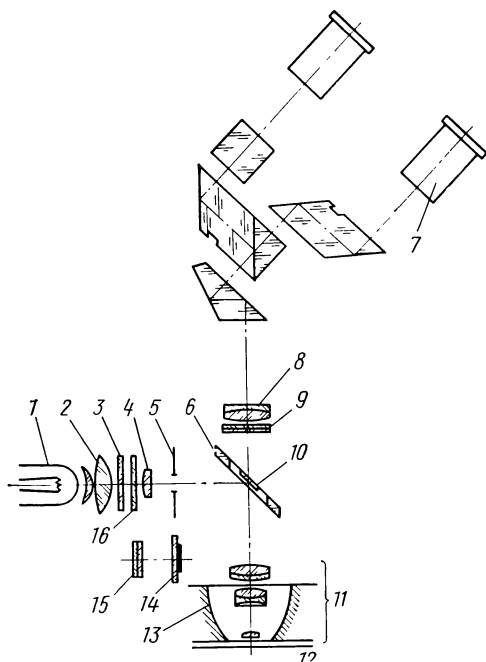


Рис. 1. 23. Металлографический микроскоп ММУ-3:

1—источник света; 2—коллектор; 3—теплофильтр; 4—линза; 5—диафрагма; 6—пластинка; 7—окуляр; 8—тубусная линза; 9—анализатор; 10—полупрозрачная пластинка; 11—эпиобъектив; 12—объект; 13—параболический отражатель эпиобъектива; 14—кольцевая диафрагма; 15—поляризатор; 16—светофильтр

ром 2 и линзой 4 проектируется в выходной зрачок эпиобъектива 11, т. е. объект 12 освещается параллельными пучками.

Свет, отразившись от объекта, проходит объектив, полупрозрачную пластинку 10, тубусную линзу 8 и дает изображение объекта в фокальной плоскости окуляров 7 бинокулярной насадки. Ирисовая диафрагма 5 выполняет функцию апертурной диафрагмы. При работе в темном поле включается пластинка 6 и на место линзы 4 и диафрагмы 5 устанавливается кольцевая диафрагма 14. Из осветителя на параболический отражатель 13 поступает полый цилиндрический пучок, который фокусируется на объекте. Для работы в поляризованном свете в ход лучей вводятся поляризатор 15 и анализатор 9. Теплофильтр 3 защищает микроскоп от нагрева, а светофильтры 16 повышают контраст в изображении объекта.

ОБЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

2.1. ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Шкалой называется совокупность ряда отметок (штрихов) и проставленных, у некоторых из них, чисел отсчета, соответствующих значениям или отклонениям измеряемой величины.

Расстояние между серединами двух соседних отметок (штрихов) шкалы называется **интервалом деления** или просто **делением** (*a*). Для большинства приборов интервал деления постоянный по всей шкале (равномерная шкала).

Интервалы делений шкал измерительных приборов выбираются в пределах 0,9—2,5 мм. При таких интервалах делений обеспечивается наилучший результат визуальной оценки долей деления при расположении стрелки (указателя) прибора между штрихами шкалы.

Значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы, называется **ценой деления** (*c*). Цена деления не должна быть меньше погрешности показаний прибора.

По ГОСТу 5365—70 цена деления прибора должна быть кратной цифрам 1, 2 или 5 (рис. 2. 1, *a*, *б*, *в*). Ширина штрихов шкал выбирается в пределах 0,1—0,2 мм. Разность ширины штрихов в пределах одной шкалы не должна быть более 0,05 мм.

Длина коротких штрихов принимается равной 2—2,5 интервала деления, а длинных 3—3,5 интервала. Ширина конца стрелки, располагающегося над штрихами шкалы, не должна превышать ширину штрихов. Конец стрелки должен перекрывать 0,3—0,8 длины коротких штрихов.

Значение измеряемой величины, соответствующее всей шкале прибора, называется **пределом измерения по шкале прибора**.

Пределами измерения прибора называются наибольшая и наименьшая величины, которые могут быть измерены прибором.

Измерительным усилием *P* называется сила, создаваемая прибором и действующая на измеряемый объект в направлении линии измерения.

Погрешностью показания Δ прибора называют разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины.

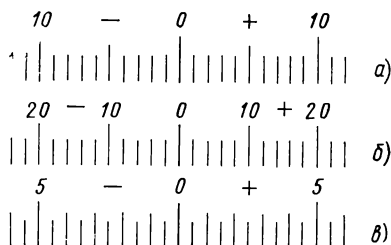


Рис. 2. 1. Шкалы измерительных приборов

Чувствительность прибора есть свойство прибора реагировать на изменения измеряемой величины. Чувствительность измерительного прибора оценивается передаточным отношением.

Передаточное отношение прибора i есть отношение линейного или углового перемещения указателя к изменению измеряемой величины. Оно численно равно отношению интервала деления к цене деления:

$$i = \frac{a}{c} \quad (2.1)$$

Порог чувствительности есть наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать малейшее заметное изменение показаний прибора.

Точность отсчета называют точность, достигнутую при отсчете по шкале прибора. Она зависит от качества штрихов шкалы, толщины стрелки (указателя), расстояния между шкалой и стрелкой (ошибка параллакса), цвета и освещенности шкалы, квалификации контролера.

Измеренная с помощью самого совершенного прибора величина всегда отличается от истинной. Под погрешностью измерения понимают разность между измеренным и действительным (истинным) значениями величин. Погрешность измерения характеризует главное качество измерения, а именно его точность.

По характеру возникновения погрешности измерений разделяют на три вида: систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематическими называются погрешности измерений, происходящие от постоянных источников и имеющие закономерный характер. Систематические погрешности чаще всего имеют инструментальный характер, т. е. связаны с недостатками схемы и конструкции приборов, их неправильной установкой, неточной градуировкой шкал и т. п.

К систематическим относятся погрешности, связанные с изменением внешней среды (температура, давление, влажность воздуха и др.). Сюда же можно отнести некоторые субъективные ошибки наблюдателя, например, асимметрия в оценке положения указателя относительно шкалы.

Систематические погрешности можно исключить введением поправок или устранить заранее с помощью юстировочных устройств.

Случайными называются погрешности, которые не могут быть устранены при обработке результатов измерений. Они неизбежны, не закономерны и для отдельного измерения не поддаются учету. К причинам случайных погрешностей относятся неизбежные и неучитываемые деформации и смещения деталей и узлов приборов (например, из-за зазоров), колебания температуры окружающей среды, остающиеся после юстировки и регулировки

незначительные перекосы подвижных узлов и, наконец, погрешности отсчета.

Случайные погрешности можно учесть и уменьшить их влияние при помощи многократных измерений и соответствующей математической обработки, основанной на законах теории вероятности.

Грубыми ошибками (промахами) называют те случайные погрешности, величины которых резко выходят за предельные значения и явно искажают результаты измерений. Причинами промахов могут быть недостаточная выверка и регулировка прибора, небрежность в работе наблюдателя, резкие изменения внешних условий.

Грубые ошибки необходимо выяснять при контрольных измерениях и устранять их причины.

2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Любой измерительный прибор состоит из трех основных частей:

1. **Чувствительный элемент**, при помощи которого в прибор поступает значение измеряемой величины.

2. **Преобразователь**, изменяющий поступившую величину по форме и количественно.

3. **Регистратор**, фиксирующий значение измеряемой величины. Оптико-механическими называют приборы, имеющие в одной из трех частей оптическую систему.

Чувствительный элемент может быть контактным и бесконтактным. Из большого числа бесконтактных чувствительных элементов выделяют два вида оптических чувствительных элементов:

А. Пучок световых лучей, формирующий интерференционную картину. Этот чувствительный элемент входит в принципиальную схему интерферометров.

Б. Пучок световых лучей, формирующий изображение измеряемого объекта. Этот чувствительный элемент входит в принципиальную схему микроскопов и проекционных приборов.

Преобразователь может быть неоптическим (механическим, электронным и т. п.), оптическим и смешанным (оптико-механическим и фотоэлектрическим).

Оптические преобразователи делят на два вида:

А. **Интерференционные**. Воспринимаемая при помощи механического контакта измеряемая величина преобразуется в интерференционную картину.

Б. **Проекционные**. Последние делят также на два вида:

1) окулярные, проектирующие измеряемый объект в фокальную плоскость окуляра;

2) экранные, проектирующие объект, а также и отсчетную систему на экран.

Приборы с экранными преобразователями все шире внедряются в практику измерений, вытесняя окулярные.

Оптико-механический преобразователь построен на принципе сочетания оптического рычага с механическим или с пружиной, например, преобразователь оптиметра.

Регистратор оптико-механических приборов чаще всего имеет две части: основную шкалу и отсчетное устройство.

А. Основная шкала (линейная или круговая) имеет точные деления.

Б. Отсчетное устройство позволяет измерять дробные части интервалов основной шкалы.

Точность измерений, проводимых с помощью оптико-механических приборов, зависит от чувствительности последних. Чувствительность определяется свойствами используемого света, свойствами оптической системы прибора и способом регистрации изображения.

Большинство оптико-механических измерительных приборов работает в видимой области спектра с визуальной регистрацией изображения, а следовательно, при сравнении чувствительности приборов определяющим является тип оптической системы.

2.3. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Микроскоп

Микроскопы широко применяются в оптико-механических измерительных приборах как для наводки на заданные точки объекта (визирные микроскопы), так и для точного отсчета по линейным и круговым шкалам (отсчетные микроскопы).

Оптическая схема микроскопа и его основные характеристики рассмотрены в гл. 1. Здесь приведены некоторые особенности микроскопов измерительных приборов.

Как известно, микроскоп дает перевернутое изображение объекта. Это неудобство во многих измерительных микроскопах устраняют с помощью призмной оборачивающей системы.

В металлографических микроскопах увеличение, значительно превышающее нормальное, не применяют. Это позволяет повысить поле зрения и освещенность изображения.

В измерительных микроскопах увеличение больше нормального также нецелесообразно. Это объясняется тем, что погрешность измерения величины перемещения объекта значительно больше, чем погрешность наводки микроскопа на точки объекта даже при малом увеличении.

Зрительная труба

Зрительная труба служит для наблюдения далеко расположенных объектов и в измерительных приборах ею пользуются главным образом для различных угловых измерений.

Принципиальная оптическая схема зрительной трубы Кеплера приведена на рис. 2. 2. Основными оптическими узлами трубы являются объектив 1 и окуляр 3. Задний фокус объектива F'_1 и передний фокус окуляра F_2 совмещены. В их общей фокальной

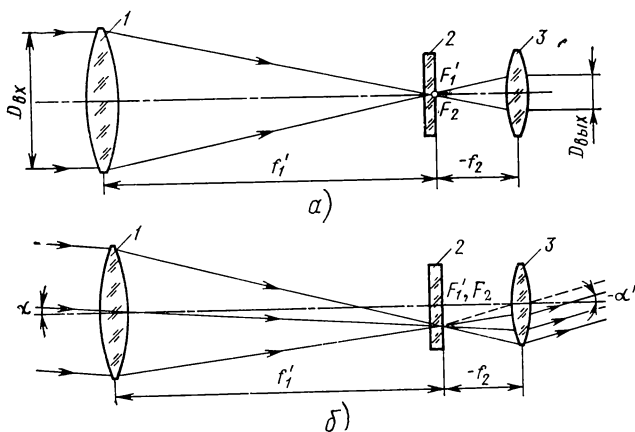


Рис. 2. 2. Оптическая схема зрительной трубы:

a —ход лучей от точки на оси; b —ход лучей от точки вне оси;
1—объектив; 2—сетка; 3—окуляр

плоскости установлена стеклянная пластинка 2, на которой обычно нанесено перекрестие или шкала. В этой плоскости получается действительное перевернутое изображение бесконечно удаленного объекта.

Другой тип простейшей зрительной трубы состоит из положительного объектива и отрицательного окуляра и называется зрительной трубой Галилея. В отрицательном окуляре передний фокус F_2 расположен позади окуляра и объектив дает здесь мнимое изображение. Преимущество системы Галилея заключается в получении прямого изображения и в меньших по сравнению с системой Кеплера габаритах.

В измерительной технике распространена труба Кеплера. В фокальной плоскости объектива такой трубы можно поместить реальную сетку, шкалу или марку, чего нельзя сделать в трубе Галилея. В отдельных случаях, когда надо иметь прямое изображение в трубе Кеплера, между объективом и окуляром помещают линзовую или призмennую оборачивающую систему. Такую систему Кеплера называют земной трубой.

Параллельный пучок лучей, падающий в зрительную трубу под углом α к ее оптической оси (рис. 2. 2, б), по выходе образует с осью угол — α'

Отношение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (2. 2)$$

называется **видимым увеличением** зрительной трубы.

Из рис. 2. 2, б и 2. 2, а

$$\Gamma = \frac{f_1'}{f_2} \quad \text{и} \quad |\Gamma| = \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вых}}} \quad (2. 3)$$

где f_1' — заднее фокусное расстояние объектива;

f_2 — переднее фокусное расстояние окуляра;

$D_{\text{вх}}$ и $D_{\text{вых}}$ — диаметры соответственно входного и выходного зрачков трубы.

По ряду причин фокусное расстояние большинства окуляров не бывает меньше некоторого предела (около 10 мм), поэтому, как видно из формулы (2. 3), большие увеличения зрительных труб можно получить, применяя объективы с большими фокусными расстояниями.

Разрешающей способностью зрительной трубы называют то наименьшее угловое расстояние φ между двумя удаленными точками, при котором эти точки еще видны раздельно. Теоретический предел разрешающей способности определяется диаметром входного зрачка объектива $D_{\text{вх}}$. По критерию Рэля при длине волны $\lambda = 0,55$ мкм имеем

$$\varphi = \frac{140''}{D_{\text{вх}}} \quad (2. 4)$$

где диаметр зрачка $D_{\text{вх}}$ выражен в мм.

Относительным отверстием объектива зрительной трубы называется отношение диаметра его входного зрачка к фокусному расстоянию. В трубах, используемых в измерительных приборах, это отношение лежит в пределах от 1/5 до 1/15. В большинстве случаев объективы зрительных труб представляют собой сравнительно простые системы из двух линз, положительной и отрицательной, которые склеены между собой или (у объективов значительного диаметра) разделены малым воздушным зазором.

Для уменьшения габаритов труб с длиннофокусными объективами в некоторых случаях (например, в гснмометрах или автоколлиматоре АК-0,25) применяют так называемые **телеобъективы**. Принципиальная схема телеобъектива приведена на рис. 2. 3.

Между положительной линзой 1 и ее задним фокусом F_1' установлена отрицательная линза 2. Задняя главная плоскость всего телеобъектива H' находится впереди первой линзы, благодаря чему расстояние между этой линзой и задним фокусом

объектива F' может быть сделано значительно меньшим, чем фокусное расстояние объектива f' . В действительности телеобъективы довольно сложны и их применение ограничено.

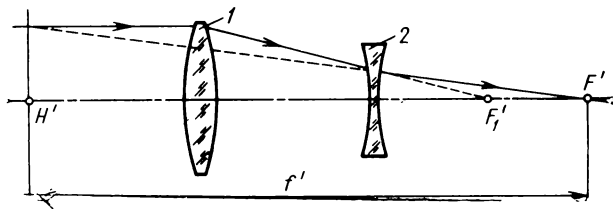


Рис. 2.3. Оптическая схема телеобъектива:

1—положительная линза; 2—отрицательная линза

Коллиматор

Коллиматоры используют в измерительных приборах для искусственного создания бесконечно удаленной точки визирования. Оптическая система коллиматора (рис. 2.4) состоит из ахроматизированного объектива 2 и сетки с маркой 1, помещенной в его передней фокальной плоскости и освещаемой с помощью осветителя (на рисунке не показан).

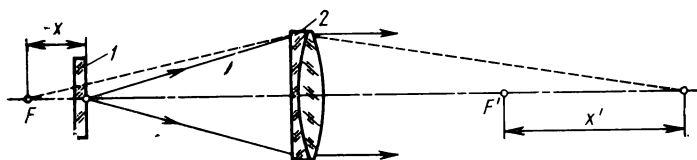


Рис. 2.4. Оптическая схема коллиматора:

1—сетка с марк 2—объектив

В качестве марки часто используют непрозрачную диафрагму с малым круглым отверстием или узкой щелью. Применяют также стеклянные пластинки с нанесенными на них штрихами (сетки). Со стороны осветителя на некотором расстоянии от сетки обычно устанавливается матовое стекло для получения равномерного рассеянного освещения по всему полю зрения.

Коллиматор входит составной частью в целый ряд контрольных и измерительных приборов (гониометр, оптиметр, измерительная машина, оптическая скамья и др.). Величины фокусных расстояний объективов коллиматоров колеблются от сотни миллиметров до нескольких метров.

Универсальные коллиматоры можно использовать в качестве зрительной трубы. Для этого со стороны сетки помещается окуляр.

Сетка и окуляр закреплены в подвижном по отношению к объективу патрубке. Отсчет перемещения осуществляется по миллиметровой шкале.

Перемещая сетку коллиматора, можно менять величину отклонения лучей от параллельности. При работе коллиматора в качестве зрительной трубы это смещение сетки и окуляра компенсирует отклонение от параллельности лучей, входящих в трубу.

Смещение сетки из фокуса F на величину x вызывает сходимость (расходимость) лучей на расстоянии x' от фокуса F'

$$x' = -\frac{f'^2}{x}, \quad (\text{формула Ньютона})$$

где f' — фокусное расстояние объектива коллиматора.

Сходимость (расходимость) лучей часто выражают в диоптриях. Цена деления миллиметровой шкалы в диоптриях определяется по формуле

$$c_D = \frac{1000}{f'^2}, \quad (2.5)$$

где f' — выражено в мм.

Пример. Смещение сетки из фокуса на 1 мм в коллиматоре с $f' = 1000$ мм вызовет сходимость лучей на расстоянии 0,001 дптр или 1000 м; смещение на 2 мм увеличит сходимость до 0,002 дптр, т. е. уменьшит расстояние x' до 500 м и т. д.

Расчет интервала l между двумя штрихами на сетке коллиматора, если задана угловая цена его деления α , ведут по формуле

$$l = f' \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.6)$$

Если установить перед коллиматором зрительную трубу, то в поле зрения окуляра будет видно изображение марки, причем резкость изображения не зависит от расстояния между трубой и коллиматором (если, конечно, нет значительного виньетирования наклонных пучков лучей).

Изображение марки остается неподвижным при параллельном смещении коллиматора (или зрительной трубы), т. е. таком смещении, когда их оси остаются параллельными, но поворот коллиматора (или трубы) вызывает сдвиг этого изображения. Измерив смещение изображения марки, можно с высокой точностью определить угол взаимного поворота зрительной трубы и коллиматора.

С помощью коллиматора и зрительной трубы можно измерить малые углы поворота зеркала, углы отклонения лучей призмой (клином) и осуществить многие другие аналогичные измерения.

Интерферометр

Интерферометры применяют при высокоточных измерениях, в частности, для измерения длин и контроля формы и чистоты обработки поверхностей.

В интерферометрах используют интерференцию (сложение) двух или большего числа когерентных пучков лучей, т. е. пучков, сохраняющих разность хода неизменной в течение времени, достаточного для наблюдения.

Существуют разные способы получения когерентных пучков. Наиболее распространенный способ основан на разделении одного пучка на два и более пучков с помощью светоделительного устройства, например, полупрозрачной пластины с последующим соединением этих пучков и образованием интерференционной картины.

На рис. 2.5 показано явление интерференции в воздушном промежутке между поверхностями P_1 и P_2 двух стеклянных пластин. Падающий параллельный пучок лучей разделяется поверхностью P_1 на два пучка, один из которых отражается от этой поверхности, а другой проходит через нее. Часть прошедшего пучка затем отражается от поверхности P_2 и, пройдя через P_1 , идет по одному направлению с первым пучком и интерферирует с ним. На рисунке показаны лучи a_1 и a_2 , отраженные в точках A_1 и A_2 .

Если I_1 и I_2 — интенсивности первого и второго пучков, то в результате интерференции суммарная интенсивность

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta,$$

где δ — разность фаз световых колебаний в первом и втором пучках. В частном случае, когда $I_1 = I_2$, последнее соотношение принимает более простой вид

$$I = 2I_1(1 + \cos \delta) = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (2.7)$$

Для нахождения δ надо знать разность хода Δ интерферирующих лучей, т. е. разность оптических длин пути лучей от точки их разделения до точки соединения. Величины δ и Δ связаны между собой зависимостью

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda}, \quad (2.8)$$

где λ — длина волны света.

Если разность хода равна нулю или четному числу полуволен, то суммарная интенсивность максимальна $I_{\max} = 4I_1$ при $\Delta = 2N \frac{\lambda}{2}$, где N — целое число.

Если разность хода равна нечетному числу полуволн, то суммарная интенсивность минимальна

$$I_{\min} = 0 \text{ при } \Delta = (2N + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Таким образом, интерференция света приводит к тому, что в одном месте интерференционного поля интенсивность света больше средней интенсивности, равной $2I_1$, а в другом — меньше. Другими словами, интерференция, не нарушая закона сохранения энергии, приводит к перераспределению интенсивности света.

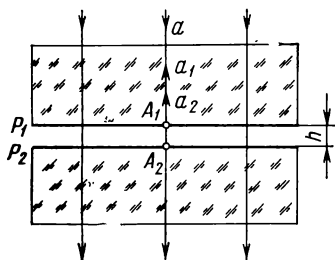


Рис. 2.5. Интерференция в плоскопараллельном воздушном слое между двумя пластинками

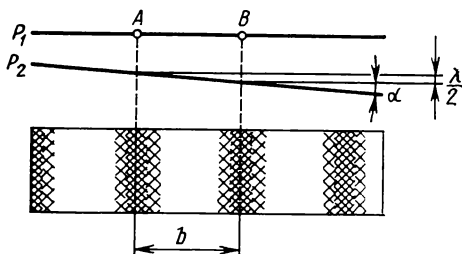


Рис. 2.6. Интерференция в клине

В общем случае интерференции в пластине разность хода определяется по формуле

$$\Delta = 2hn \cos r, \quad (2.9)$$

где h — толщина пластины;

n — показатель преломления пластины;

r — угол преломления падающих лучей в пластине.

Если пучок лучей падает по нормали к поверхностям P_1 и P_2 (как показано на рис. 2.5), то $\Delta = 2h$ (только для воздуха).

При параллельности поверхностей P_1 и P_2 величина разности хода одинакова для всей пластины. Этот случай равномерного освещения интерференционного поля называется **бесконечно широкой полосой**.

Если же толщина пластины различна в разных точках поверхности, то на последней будут видны светлые и темные интерференционные полосы, каждая из которых является геометрическим местом точек одинаковой толщины h между поверхностями P_1 и P_2 . Такие интерференционные полосы, полученные в результате изменения толщины пластины при постоянном угле падения лучей, называются **полосами равной толщины**.

Например, на поверхности малого воздушного клина с углом α между плоскостями P_1 и P_2 (рис. 2.6) наблюдаются прямые

равноотстоящие полосы равной толщины, параллельные ребру клина.

Шириной полосы b называется расстояние между серединами соседних темных (точки A и B) или светлых полос.

Разность хода от одной полосы к другой изменяется на λ , а толщина пластины на $\lambda/2$. Из рис. 2.6 следует

$$b = \frac{\lambda}{2\alpha}. \quad (2.10)$$

Например, полосы шириной $b=1$ мм при $\lambda=0,6$ мкм наблюдаются в клине $\alpha=1'$, а шириной 10 мм в клине $6''$.

Полосы равной толщины могут иметь различный вид. В зазоре между плоскостью и сферой наблюдаются кольца, между плоскостью и цилиндром — прямые, но не равноотстоящие полосы и т. д.

Рассмотренный пример интерференции в воздушном слое между двумя пластинами показывает две основные возможности применения полос равной толщины для высокоточных измерений.

Первое применение заключается в измерении линейных перемещений. Так, изменение расстояния между поверхностями P_1 и P_2 (см. рис. 2.6) на величину $\lambda/2$ вызывает смещение интерференционной картины на одну полосу. Это смещение легко измерить визуально с точностью 0,1 ширины полосы (если видимая ширина полос не менее 2—3 мм), что соответствует величине $0,05 \lambda$ или 0,03 мкм в линейной мере.

Применение усовершенствованных визуальных отсчетных устройств или фотоэлектрической регистрации полос позволяет повысить точность на один-два порядка.

Второе применение полос равной толщины состоит в контроле формы поверхности P_2 с помощью эталонной поверхности P_1 . По числу наблюдаемых колец или по стрелке прогиба изогнутых полос измеряют общие и местные отступления контролируемой поверхности от плоскости эталона. Аналогичным способом, но с помощью более сложного прибора — микроинтерферометра — измеряют микропрофиль поверхности.

Реальные схемы интерферометров могут отличаться от расчетной схемы пластины (см. рис. 2.5), но с целью единообразия в расчетах легко сводятся к ней путем оптических преобразований. Например, широко известна классическая схема интерферометра Майкельсона (рис. 2.7).

Изображение P'_2 зеркала P_2 , даваемое светоделительной пластиной M , и зеркало P_1 образуют для наблюдателя мнимую пластину. В отличие от реальной, такая «пластина» может быть нулевой толщины, т. е. поверхности P_1 и P'_2 могут пересекаться на оптической оси и давать здесь нулевую интерференционную полосу. Кроме того, такая схема дает только два интерферирующих луча и картина точно соответствует расчету. В реальных

пластинах этого добиться трудно благодаря многократному отражению света.

Интерференционные полосы, полученные в результате изменения угла падения лучей на пластину при постоянной ее толщине, называют полосами равного наклона. Полосы равного наклона чаще всего наблюдают при нормальном падении сходящегося пучка света на пластину, т. е. при условиях, когда полосы переходят в кольца равного наклона.

Кольца равного наклона в измерительных приборах применяются редко из-за сложности визуальной регистрации картины. В лабораторной исследовательской практике этот метод успешно используется при применении специальных отсчетных устройств.

Во всех предыдущих рассуждениях предполагалось, что интерференционная картина наблюдается в строго монохроматическом свете, т. е. свете одной определенной длины волны λ . Теоретически в этом случае возможно наблюдение интерференции при сколь угодно большой разности хода. В действительности строго монохроматического света не существует и в реальном пучке присутствует свет с длинами волн, лежащими в некотором интервале спектра.

В соответствии с формулой (2.10) возникает большое число систем интерференционных полос разной ширины b . При значительной разности хода светлые полосы одних систем накладываются на темные полосы других, в результате чего контраст суммарной картины падает до нуля и наблюдается равномерно освещенное поле.

При работе в белом свете видна центральная ахроматическая (черная или белая) полоса, по сторонам от которой расположено по 4—5 цветных полос убывающего контраста. Таким образом, в белом свете можно наблюдать интерференцию лишь при разности хода, не превышающей 5λ , т. е. ~ 3 мкм. Зато важным преимуществом интерференционной картины в белом свете является наличие ахроматической нулевой полосы, которая резко отличается от остальных окрашенных полос. Ахроматическая полоса используется в качестве индекса при измерении как смещения полос, так и их формы.

Разность хода, при которой наблюдаются интерференционные полосы убывающего до нуля контраста, связана с шириной спектрального интервала источника света $\delta\lambda$ зависимостью

$$\Delta = \frac{\lambda^2}{\delta\lambda}. \quad (2.11)$$

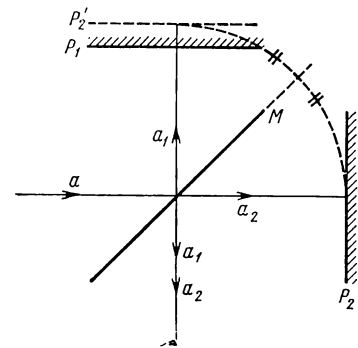


Рис. 2.7. Схема интерферометра Майкельсона

С помощью цветного фильтра можно выделить из белого света интервал $\delta\lambda$ порядка 0,1 мкм, с помощью интерференционного фильтра $\sim 0,01$ мкм. Еще уже интервал выделяется цветным фильтром из линейчатого спектра газоразрядных ламп: ртутных, кадмиевых, натриевых и др. Рабочая разность хода в этом случае достигает десятков миллиметров. Практически монохроматическим можно считать свет газовых лазеров. Они позволяют получать качественную картину при разности хода в несколько метров, а в особых режимах работы лазера эти значения могут быть значительно большими.

Все ранее сказанное о распределении света в интерференционном поле относится к случаю сложения двух лучей (пучков). Особый случай представляет многолучевая интерференция. Специальное светоделительное устройство путем многократного отражения и пропускания света образует большое число когерентных лучей. В результате интерференции этих лучей возникает картина с резко выделяющимися максимумами (в проходящем свете) и минимумами (в отраженном свете). Измерения с помощью такой картины повышают точность визуальных методов до 0,01 λ , а фотоэлектрических до 0,001 λ .

2.4. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Системы, проектирующие изображение объекта при помощи отражающего устройства в плоскость самого объекта, называются автоколлимационными.

Автоколлиматор представляет собой зрительную трубу со специальным окуляром, который называется автоколлимационным. Сущность автоколлимации заключается в объединении в одном приборе коллиматора и зрительной трубы.

Наибольшее применение получили три системы автоколлимационных окуляров: 1) система Аббе; 2) система Гаусса и 3) окуляр с кубиком.

Автоколлиматор с окуляром Аббе

В фокальной плоскости объектива 1 (рис. 2.8) установлена сетка 2, склеенная с призмой 3 прямоугольного сечения со углом под углом 45°. На сетке 2 награвированы в горизонтальном и вертикальном направлениях штрихи с цифрами. Деления сетки могут быть выражены в секундах или минутах.

В плоскости склейки призма 3 покрыта слоем металла. По этому слою прорезан прозрачный крестик, высота которого укладывается в проекции наклонной грани призмы 3. Наружные грани этой призмы, кроме торца, покрыты черным матовым лаком, а на наклонную отражающую грань перед лакировкой нанесен слой алюминия или серебра.

Кроме указанных деталей в систему входит лампочка подсветки сетки 4 и собственно окуляр 5.

Если зеркало перед объективом установлено строго перпендикулярно оптической оси, то изображение прозрачного креста смещено от геометрического центра сетки кверху на такую же величину a , на какую смещен сам крест книзу. Это положение изображения креста принято за начальное (нулевое). При других положениях зеркала изображение креста смещено относи-

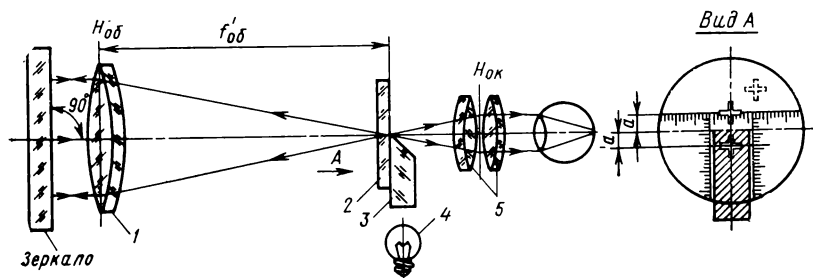


Рис. 2. 8. Оптическая схема автоколлиматора с окуляром Аббе:

1—объектив; 2—сетка; 3—призма; 4—лампа подсветки; 5—окуляр

тельно нуля (показано пунктиром). Сетка во всех автоколлиматорах рассчитывается по формуле (2. 6), где $\alpha/2$ — угол поворота зеркала и α — соответствующий угол наклона отраженного параллельного пучка.

Преимуществом окуляра Аббе является его большая светосила. Потери яркости у него всего 15—20%. Поэтому окуляр Аббе рекомендуется применять для получения автоколлимационного блика от слабо отражающих поверхностей, а также от поверхностей малых размеров (значительно меньше диаметра объектива).

Недостатком окуляра Аббе является экранирование части поля зрения призмой подсветки.

Автоколлиматор с окуляром Гаусса

Автоколлиматор (рис. 2. 9) состоит из объектива 1, сетки с перекрестием и делениями 2, установленной в фокальной плоскости объектива, полупрозрачной плоскопараллельной пластинки 3, установленной к оптической оси под углом 45° , окуляра 5 и осветителя 4.

Преимущество окуляра Гаусса — незатененность поля зрения. Недостатками этой системы являются: большая потеря яркости (55—80%), присутствие посторонних бликов, вносимых наклонной пластинкой и нерабочей гранью сетки, и длиннофокусность окуляра. Нежелательными являются также aberrации, вносимые наклонной пластинкой (астигматизм, кома).

Влияние бликов уменьшают применением компенсационного окуляра, показанного на рисунке. С этой же целью стеклянную

сетку заменяют простым перекрестием нитей толщиной 0,06—0,08 мм, толщину полупрозрачной пластинки доводят до 0,2—0,25 мм, внутренние поверхности трубы и оправ делают черными и глубокоматовыми.

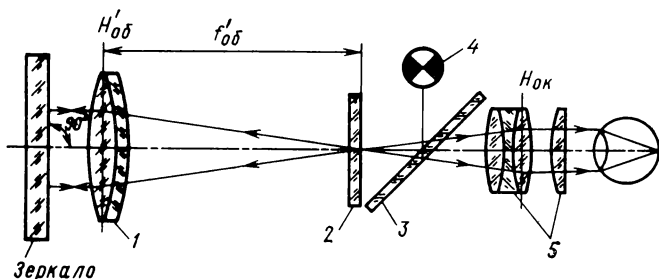


Рис. 2.9. Оптическая схема автоколлиматора с окуляром Гаусса:

1—объектив; 2—сетка; 3—полупрозрачная пластинка; 4—лампа подсветки; 5—окуляр

Длиннофокусный окуляр Гаусса применяется тогда, когда сетка 2 имеет крупные минимальные деления и когда нет необходимости в большом увеличении автоколлиматора.

Автоколлиматор с окуляром с кубиком и двумя сетками

Автоколлиматор (рис. 2.10) состоит из объектива 1, светодетельного кубика 2, склеенного из двух прямоугольных призм, причем в плоскости склейки одна из гипотенузных граней полу-

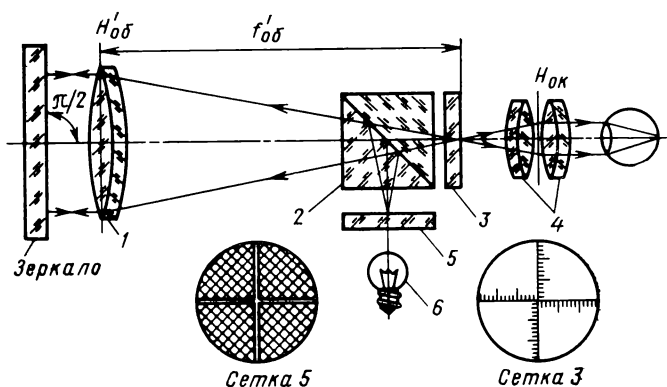


Рис. 2.10. Оптическая схема автоколлиматора с окуляром с кубиком:

1—объектив; 2—призма-куб; 3 и 5—сетки; 4—окуляр; 6—лампа подсветки

прозрачна (тонкий слой алюминия). За кубиком в фокальной плоскости объектива установлена сетка 3 с перекрестием и делениями, за сеткой находится окуляр 4.

Между осветителем 6 и кубиком установлена строго в фокальной плоскости объектива вторая сетка 5. На этой сетке сделан прозрачный крест в слое алюминия или непрозрачном слое, изготовленном фотографическим методом.

Окуляр с кубиком нашел широкое применение в практике. Его преимущества: незатененность поля зрения и малое фокусное расстояние окуляра, дающее возможность получить большие увеличения у автоколлиматоров, и особо высокую точность измерения.

К недостаткам окуляра следует отнести значительные потери яркости (80—85%) и сложность юстировок двух сеток. Кроме того, наличие в системе двух сеток чаще приводит к их разъюстировкам из-за механических и температурных деформаций.

Все рассмотренные автоколлиматоры можно использовать в качестве зрительных труб при выключенном осветителе и в качестве коллиматора при наблюдении со стороны объектива.

2.5. ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Оптические отсчетные устройства делят на следующие группы.

1. Устройства прямого отсчитывания:

- с отсчетом путем деления интервала на глаз;
- с отсчетом по нониусной шкале;
- с отсчетом по шкале поперечного масштаба.

Под прямым отсчитыванием подразумевается снятие отсчета по шкалам без предварительного совмещения изображений штрихов. Преимущество способа — высокая производительность, недостаток — относительно малая точность отсчета. Оптические системы в таких устройствах предназначены только для увеличения видимых размеров делений шкал. Шкалы устанавливают как в плоскости предмета, так и в плоскости изображения.

Примеры устройств прямого отсчитывания:

а) по шкале визирного микроскопа МИР-2 (рис. 2.11) производят непосредственное измерение объектов небольшого размера, изображение которых не превышает длины шкалы. Если размер изображения объекта равен N делениям шкалы, то величина самого объекта равна cN , где c — цена деления шкалы, которая зависит от фокусного расстояния объектива и длины тубуса микроскопа и определяется по таблице, прилагаемой к прибору, или более точно с помощью объект-микрометра, т. е. эталонной меры длины. На глаз размер изображения, т. е. число N , можно определить с точностью до 0,1 деления. Так, например, если $c=0,04$ мм, то погрешность отсчета равна 0,004 мм.

Наилучшая точность оценки доли деления обеспечивается при видимой ширине деления 1,5 мм с расстояния 250 мм. Практически хорошие результаты дают шкалы с интервалом 1—2 мм. Кроме того, видимая толщина штрихов основной шкалы и индекса должна быть порядка 0,1 интервала (т. е. от 0,1 до 0,2 мм).

На рис. 2.12 приведено поле зрения отсчетного микроскопа оптической делительной головки ОДГ-60. Здесь длинные штрихи представляют собой изображения градусных штрихов лимба. Неподвижная окулярная шкала имеет 60 малых делений, причем

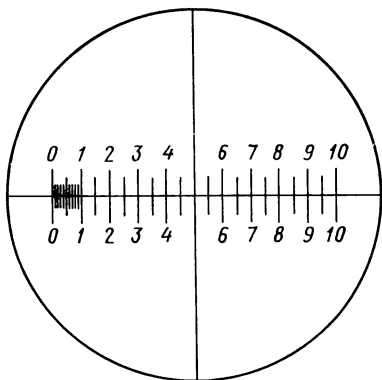


Рис. 2.11. Поле зрения микроскопа МИР-2

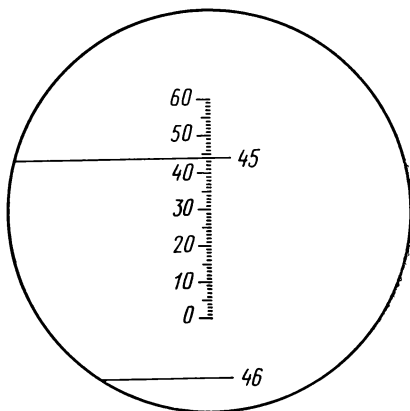


Рис. 2.12. Поле зрения отсчетного микроскопа делительной головки ОДГ-60

длина этой шкалы равна расстоянию между изображениями соседних градусных штрихов, т. е. цена одного малого деления равна $1'$. На рис. 2.12 отсчет равен $45^{\circ}44'$;

б) нониусной называется шкала, имеющая деления несколько большие или меньшие делений основной шкалы, что позволяет по номеру совмещенного штриха шкалы нониуса производить оценку части деления основной шкалы. В основе отсчета по нониусу лежит способность глаза более точно определять совпадение или несовпадение штрихов двух сомкнутых шкал (рис. 2.13, б), чем оценивать долю d деления a шкалы (рис. 2.13, а);

в) устройство шкалы поперечного масштаба, называемой также трансверсальной сеткой, приведено на рис. 2.14. Здесь длинные штрихи есть изображения штрихов миллиметровой шкалы. Большой миллиметровый интервал разделен биссекторами по горизонтали на десять частей с ценой одного деления 0,1 мм. В свою очередь, каждый малый интервал с ценой 0,1 мм разделен также на десять частей с помощью одиннадцати биссекторов, разнесенных по вертикали и сдвинутых по горизонтали на оди-

а—шкала с указателем; б—
шкала с нониусом

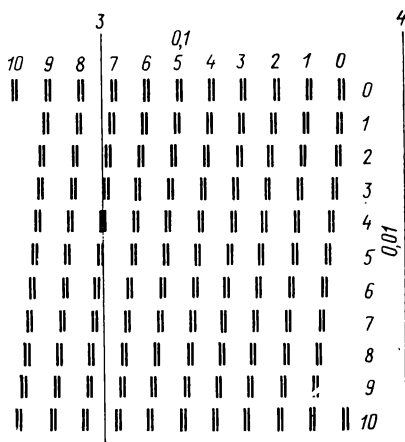


Рис. 2.14. Вид отсчетной шкалы
ИЗП-36М для станков

Трансверсальные сетки употребляются в катетометрах, отсчетных устройствах станков и других приборах.

2. Отсчетные устройства с микрометрами

Оптико-механические микрометры

Оптико-механическим микрометром называют такое устройство со смещаемой шкалой, с помощью которого измеряют величину объекта по числу делений шкалы, расположенной в плоскости предмета или в плоскости его изображения.

Оптико-механический микрометр называют **окулярным**, если он установлен в плоскости сетки окуляра, **экраным**, если он установлен в плоскости экрана, на который проектируется изображение объекта, и **объектным**, если он установлен в плоскости самого измеряемого объекта.

Измеряемые с помощью микрометра объекты могут быть концевыми (обычные предметы) или штриховыми (шкалы). При их измерении возникает необходимость наведения марки на некоторые точки предмета или штрихи шкалы.

Простейшей маркой, предназначенной для визирования на выбранную точку измеряемого конечного изделия, является перекрестие. На рис. 2.15 показаны два способа установки перекрестия. В случае *a* окулярная сетка установлена так, что линии перекрестия N_1 и N_2 составляют углы 45° с направлением x перемещения изделия. Такой способ установки удобен в том случае, когда требуется измерить расстояние Δx между двумя прямоли-

нейными и параллельными краями A и B изделия. Точность такого совмещения перекрестия с краем изделия получается выше, чем при установке линии перекрестия N_1 или N_2 параллельно краю изделия. В последнем случае точность равна разрешающей способности глаза, работающего совместно с оптической системой.

Если требуется измерить, например, разность координат центров двух малых отверстий A и B (рис. 2.15, б), то поворотом окулярной сетки устанавливают одну из линий перекрестия параллельно направлению x перемещения изделия (или сетки) и поочередно совмещают центры отверстий с другой линией.

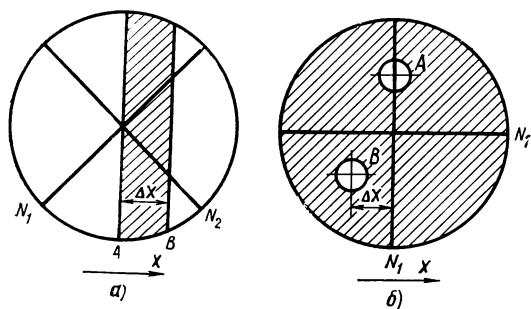


Рис. 2.15. Примеры наведения окулярной сетки:

а—наклонное перекрестие; б—прямое перекрестие

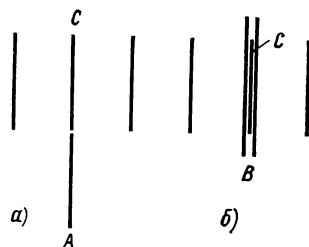


Рис. 2.16. Совмещение штриха шкалы и марки:

а—нониальное; б—биссекторное

Для наводки на изображение штриха или деление шкалы обычно применяют марку, выполненную в виде одиночного штриха — индекса A (рис. 2.16, а) или биссектора B (рис. 2.16, б), который представляет собой две тонкие, близкие друг к другу параллельные линии. В первом случае изображение выбранного штриха C шкалы устанавливают так, чтобы этот штрих казался продолжением индекса A (нониальное совмещение штрихов). Во втором случае изображение штриха C вводят внутрь биссектора B и устанавливают по его оси симметрии. В обоих случаях достигается высокая точность наводки, равна 0,1—0,2 разрешающей способности глаза, работающего совместно с оптической системой. Некоторым преимуществом по точности все же обладает биссекторный способ, который чаще реализуется в приборах.

Разрешающая способность глаза в оптимальных условиях, а именно при освещенности 50—75 лк, контрасте изображения близком к единице, правильно выбранной ширине штрихов и зрачке глаза 2 мм, достигает 60", что в линейной мере составляет 0,075 мм с расстояния наблюдения 250 мм.

При работе глаза совместно с оптической системой, увеличение которой равно Γ , точность наводки принято считать в Γ раз

больше точности, определяемой разрешающей способностью глаза. Таким образом, точность наводки нониального способа можно считать равной $\left(\frac{10-12}{\Gamma}\right)''$ или $\left(\frac{0,013-0,015}{\Gamma}\right)$ мм, а биссекторного $\left(\frac{6-8}{\Gamma}\right)''$ или $\left(\frac{0,007-0,009}{\Gamma}\right)$ мм.

В отечественных измерительных приборах применяют два типа оптико-механических микрометров: винтовой окулярный микрометр МОВ-1-15 $\times$ (в усовершенствованном варианте МОВ-5-15 $\times$) и спиральный окулярный микрометр ОМС.

Винтовой окулярный микрометр МОВ-1-15 $\times$

Этот микрометр предназначен для непосредственных линейных измерений объектов, изображения которых не превышают предела перемещения шкалы микрометра.

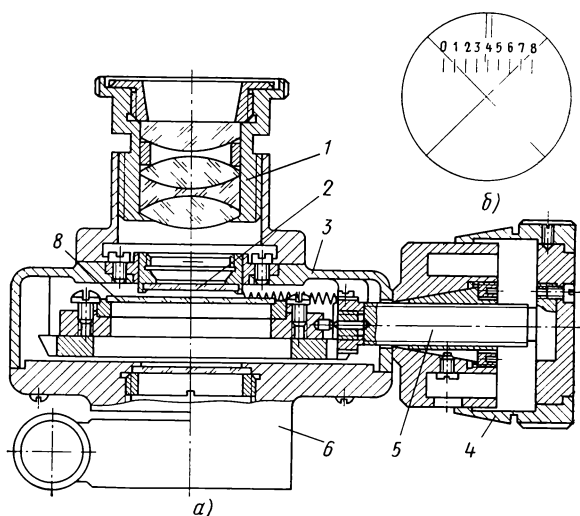


Рис. 2. 17. Винтовой окулярный микрометр МОВ-1-15 $\times$:

а—общий вид; б—поле зрения окуляра;
1—окуляр; 2—неподвижная сетка; 3—корпус; 4—барабан;
5—микрометрический винт; 6—хомут; 7—защитная пластинка;
8—подвижная сетка

Конструкция винтового окулярного микрометра МОВ-1-15 $\times$ (ГОСТ 7865—56) приведена на рис. 2. 17, а. На корпусе 3 микрометра установлен компенсационный окуляр 1 с увеличением 15 $\times$, имеющий перемещение вдоль оси ± 5 дптр. Корпус снабжен хомутиком 6, с помощью которого микрометр крепится на стандартном тубусе микроскопа диаметром 25 мм. Внутри корпуса,

в фокальной плоскости окуляра находится неподвижная сетка 2 с восемью миллиметровыми делениями и почти вплотную с ней — подвижная сетка 8, на которой нанесены перекрестие и биссектор (рис. 2. 17, б). Линии перекрестия составляют углы 45° с направлением его перемещения. Перемещение сетки 8 осуществляют вращением барабана 4 микрометрического винта 5 с шагом 1 мм. Барабан винта имеет 100 делений, следовательно, цена одного деления равна 0,01 мм. Со стороны объектива микроскопа микрометр закрыт защитной стеклянной пластинкой 7.

В окуляре должны быть видны одновременно резкими три изображения: двух сеток и измеряемого объекта. Изображение объекта обычно располагают между сетками, а зазор между ними во избежание параллакса выдерживают равным 0,04—0,06 мм.

Для нахождения истинной цены деления барабана c , т. е. цены, отнесенной к самому предмету, а не его изображению, используют объект-микрометр ОМП. Он представляет собой точную стеклянную шкалу длиной 1 мм с делениями через 0,01 мм и устанавливается строго в плоскости измеряемого изделия. Измерив с помощью окулярного микрометра расстояние между k штрихами этой шкалы и получив по барабану разность отсчетов N , найдем цену деления, выраженную в мм:

$$c = \frac{0,01k}{N} . \quad (2. 12)$$

Погрешность измерений с помощью винтового окулярного микрометра определяется главным образом ошибками шага пары винт — гайка. Технические требования допускают ошибку одного шага не более 0,005 мм, а всех восьми шагов не более 0,01 мм.

Оптико-механической промышленностью освоен выпуск нового винтового окулярного микрометра МОВ-5-15 $\times$ и некоторых его модификаций. На рис. 2. 18, а приведена принципиальная схема микрометра МОВ-5-15 $\times$. Отличительной особенностью нового микрометра является возможность одновременного грубого (1 мм) и тонкого (0,01 мм) отсчета в одном поле зрения. С этой целью измерительный механизм устроен таким образом, что при повороте рукоятки-гайки 3 дисковая шкала 1 вращается без осевого смещения относительно корпуса 2, а микровинт 4 смещается без поворота.

Микрометр снабжен также системой подсветки 5 и проекции 6 шкалы 1 в плоскость подвижной 7 и неподвижной 8 сеток. На подвижной сетке нанесено визирное перекрестие и миллиметровая шкала длиной 8 мм, а на неподвижной — отсчетный штрих-индекс и кадровая рамка, ограничивающая наблюдаемый участок шкал. Цена деления дисковой шкалы равна 0,01 мм. Вид поля зрения микрометра МОВ-5-15 $\times$ показан на рис. 2. 18, б.

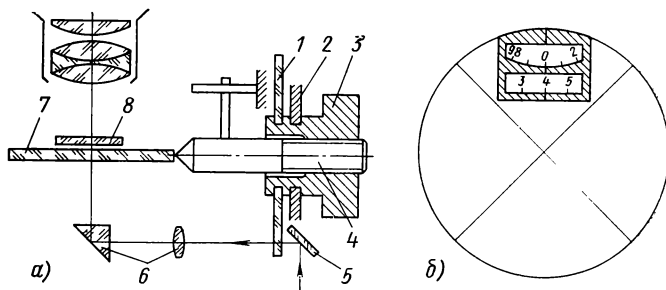


Рис. 2.18. Винтовой окулярный микрометр МОВ-5-15 $\times$:

а—принципиальная схема; *б*—поле зрения окуляра;
 1—дисковая шкала; 2—корпус; 3—рукоятка; 4—микровинт; 5—система подсветки шкалы; 6—система проекции шкалы; 7—подвижная сетка; 8—неподвижная сетка

Спиральный окулярный микрометр ОМС

Этот микрометр является частью отсчетных микроскопов и служит для точного отсчета по линейным шкалам в длиномерах, компараторах, универсальных измерительных микроскопах и других приборах.

На рис. 2.19, *а* приведена конструкция отсчетного микроскопа с микрометром ОМС. Микроскоп имеет объектив 8 с номинальным увеличением $5\times$ и окуляр 4 с увеличением $12,5\times$. На неподвижной окулярной сетке 3 нанесены линейная шкала (10 делений) и индекс. На сетке 2, поворачиваемой от маховика 1, нанесены одиннадцать витков двойной спирали Архимеда и круговая шкала, разделенная на 100 частей. Осью вращения сетки 2 служит стальной шарик диаметром 3 мм. Снизу сетка прижимается двумя подпружиненными роликами 6 к регулируемым роликам 5.

Винтом 7 окуляр вместе с нониусным механизмом может перемещаться в поперечном направлении для настройки на нулевой отсчет.

Поле зрения окуляра показано на рис. 2.19, *б*. Здесь длинные оцифрованные штрихи представляют собой изображение миллиметровой шкалы, даваемое объективом микроскопа (штрихи «11», «12» и «13»). При юстировке микроскопа изменением длины тубуса добиваются такого увеличения объектива, при котором расстояние между изображениями двух соседних миллиметровых штрихов равно расстоянию между первым и последним витками спирали. В этом случае цена одного витка спирали и цена одного деления неподвижной шкалы равны 0,1 мм, а цена малого деления круговой шкалы — 0,001 мм.

Для проведения отсчета необходимо поворотом маховичка 1 установить шкалу 2 так, чтобы штрих миллиметровой шкалы, находящийся в зоне витков, оказался точно посередине между

линиями ближайшего к нему витка спирали. Индексом для отсчета миллиметров служит нулевой штрих неподвижной шкалы. На рис. 2. 19, б штрих «12» прошел нулевой штрих шкалы десятых долей, а штрих «13» еще не дошел до него. Отсчет равен 12 мм плюс отрезок от штриха «12» до нулевого штриха. В данном случае число десятых в этом отрезке равно двум. Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитывают по круговой шкале. Окончательно отсчет равен 12,2725 мм.

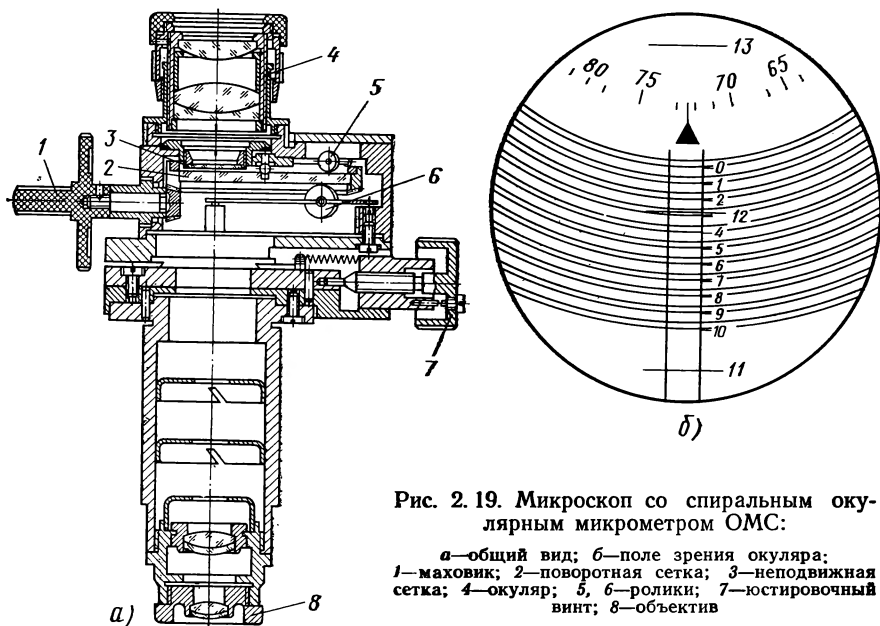


Рис. 2. 19. Микроскоп со спиральным окулярным микрометром ОМС:

а—общий вид; б—поле зрения окуляра;
1—маховик; 2—поворотная сетка; 3—неподвижная сетка; 4—окуляр; 5, 6—ролики; 7—юстировочный винт; 8—объектив

Отсчет десятитысячных долей проводится вполне уверенно, но надежным считать его нельзя. Двойная спираль с шагом 0,5 мм выполняется фотографическим путем и имеет погрешность не более 0,003 мм, что с учетом увеличения микрообъектива приводит к погрешности измерения до 0,0006 мм. Сюда же добавляется погрешность 0,0001 мм, вызванная эксцентриситетом поворотной сетки. Неподвижная шкала погрешностей практически не вносит.

Оптические микрометры (компенсаторы)

В оптических микрометрах точное измерение отрезка от окулярной марки до соседнего с ней штриха шкалы или выбранной точки кондового объекта осуществляется при перемещении этого штриха или объекта до совпадения с неподвижной маркой. Ука-

занное перемещение выполняется оптическим способом, т. е. изменением положения соответствующих оптических деталей.

В оптико-механических измерительных приборах часто применяются три типа компенсаторов.

Компенсатор с плоскопараллельной пластиной использует свойство наклонной пластины смещать прошедший через нее луч. Поворачивая пластину в сходящемся пучке лучей с помощью микрометричного механизма, поочередно совмещают с неподвижной маркой в поле зрения окуляра изображения тех точек объекта, расстояние между которыми измеряется. Разность отсчетов по шкале компенсатора дает расстояние между этими точками.

В оптической делительной головке ОДГ-1 пластина компенсатора жестко связана с подвижной сеткой окуляра отсчетного микроскопа. При повороте пластины происходит смещение изображений градусных делений лимба относительно неподвижной окулярной шкалы с ценой деления $10'$ и одновременно смещение подвижной сетки относительно индекса. При смещении изображения лимба на $10'$ подвижная сетка смещается на 60 делений. Таким образом, цена одного деления подвижной сетки равна $10''$.

Компенсатор с подвижными клиньями применяют в гониометрах ГС-10, ГС-5 и других точных приборах.

Два клина устанавливают в сходящийся пучок лучей, который дает изображение лимба гониометра. В плоскости изображения находится шкала компенсатора, жестко связанная с одним из клиньев. При осевом смещении клина изображение лимба передвигается на малую величину, а шкала компенсатора — на большую. Например, компенсатор гониометра ГС-5 рассчитан так, что поворот изображения лимба на $10'$ достигается передвижением клина и шкалы на 600 делений. Следовательно, цена деления шкалы компенсатора равна $1''$. Неподвижный клин установлен в световом пучке таким образом, чтобы вместе с подвижным образовать эквивалентную плоскопараллельную пластину, которая не влияет на качество изображения лимба.

Линзовый компенсатор. Основной частью этого отсчетного устройства является длиннофокусная линза, которую можно перемещать перпендикулярно оптической оси. Линзу устанавливают в сходящемся пучке лучей, и при перемещении она вызывает смещение изображения измеряемого объекта (обычно это основная шкала прибора).

С подвижной линзой жестко связана вспомогательная шкала тонкого отсчета, которая изображается вместе с основной шкалой в поле зрения окуляра. Как и в предыдущем компенсаторе, большое смещение оптической детали (линзы) вызывает малое смещение изображения основной шкалы. В результате цена деления вспомогательной шкалы может быть во много раз меньше

цены деления основной шкалы. Например, цены делений шкал автоколлиматора АКТ-250, имеющего линзовый компенсатор, соответственно равны 2" и 1'. Точное значение цены деления вспомогательной шкалы устанавливают в процессе юстировки компенсатора.

Глава 3

ПРИБОРЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Линейные и угловые измерения осуществляются приборами, снабженными эталонными мерами. Поэтому все измерительные приборы действуют по принципу сравнения эталонной и контролируемой меры. Однако различие самих эталонных мер позволяет разделить приборы на две большие группы.

Первая группа — приборы для относительных линейных измерений (оптиметры, пружинно-оптические головки, контактные интерферометры и др.) — предназначены для определения малых отклонений измеряемого изделия от размера концевой меры или эталонной детали.

Вторая группа — приборы для абсолютных линейных измерений (компараторы, длиномеры, измерительные машины, универсальные микроскопы, гониометры и др.) предназначены для непосредственных измерений изделий сравнением их с эталонными штриховыми мерами.

3.1. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Оптиметры

Наиболее распространенными представителями рычажно-оптических приборов являются оптиметры. В зависимости от расположения линии измерения, оптиметры делятся на вертикальные и горизонтальные. В зависимости от устройства оптиметра шкала и указатель могут наблюдаться в окуляр или проектироваться на экран.

ГОСТ 5405—64 устанавливает следующие типы оптиметров с ценой деления 0,001 мм:

ОВО-1 — вертикальный оптиметр с окуляром;

ОВЭ-1 — вертикальный оптиметр с проекционным экраном;

ОГО-1 — горизонтальный оптиметр с окуляром;

ОГЭ-1 — горизонтальный оптиметр с проекционным экраном.

Этим же стандартом предусмотрен выпуск вертикальных оптиметров с проекционным экраном типа ОВЭ-02 и ценой деления 0,0002 мм.

Таблица 3.1

Параметр	Тип прибора		
	ОВО-1; ОВЭ-1	ОВЭ-0,2	ОГО-1; ОГЭ-1
Цена деления в мм	0,001	0,0002	0,001
Пределы измерения по шкале в мм	$\pm 0,1$	$\pm 0,025$	$\pm 0,1$
Пределы измерения наружных размеров в мм	0—180	0—160	0—500
Пределы измерения внутренних размеров в мм:			
диаметров	—	—	13,5—150
длин	—	—	13,5—400
Измерительное усилие в сН	200	50—150	200
Колебания измерительного усилия в сН, не более	20	10	20
Погрешность показаний в мм на участке шкалы:			
от 0 до $\pm 0,06$ мм	$\pm 0,0002$	—	$\pm 0,0002$
свыше $\pm 0,06$	$\pm 0,0003$	—	$\pm 0,0003$
от 0 до $\pm 0,015$ мм	—	$\pm 0,00007$	—
свыше $\pm 0,015$ мм	—	$\pm 0,00010$	—
Вариации показаний в мм	0,0001	0,00002	0,0001

Основные параметры и нормы точности оптиметров (по ГОСТу 5405—64) приведены в табл. 3.1.

Главной частью оптиметра является измерительное устройство или трубка. Принцип действия трубки оптиметра основан на сочетании оптического и механического рычагов. Оптическая система состоит из коленчатой автоколлимационной зрительной трубки по схеме Аббе (рис. 2.8) и качающегося зеркала, механически связанного с измерительным стержнем.

На рис. 3.1 приведена принципиальная оптическая схема трубки оптиметра. Дневной свет или свет от лампочки направляется шарнирно закрепленным зеркалом и прямоугольной призмой подсветки 2 на левую часть сетки 3, где нанесена шкала с делениями и цифрами. Шкала расположена в фокальной плоскости объектива 5, поэтому автоколлимационное изображение шкалы располагается в этой же плоскости, но в правой части сетки. Зеркало 6 наклоняется в небольших пределах под действием измерительного стержня 7. Нижний конец стержня находится в контакте с измеряемым изделием 8.

Поворот зеркала *б* вызывает вертикальное смещение изображения шкалы, которое наблюдается в окуляр *1* и отсчитывается по неподвижному указателю.

Пусть ось измерительного стержня отстоит от оси вращения зеркала на расстоянии *L* (рис. 3.2). Перемещение стержня на величину *h* приведет к повороту зеркала на угол α и к наклону отраженного пучка на угол 2α , в результате чего изображение шкалы сместится на величину *y*.

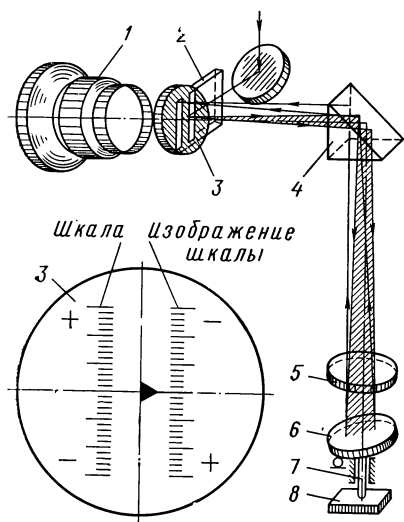


Рис. 3.1. Схема трубки оптиметра:

1—окуляр; 2—призма подсветки; 3—сетка; 4—призма; 5—объектив; 6—зеркало; 7—стержень; 8—измеряемое изделие

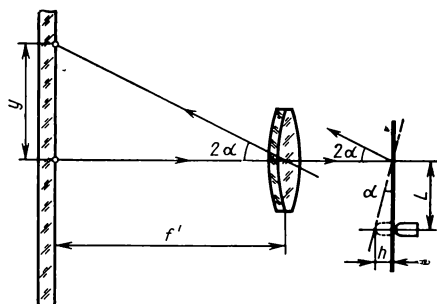


Рис. 3.2. Передаточное отношение оптиметра

Передаточное отношение оптиметра

$$i = \frac{y}{h} = \frac{f' \operatorname{tg} 2\alpha}{L \operatorname{tg} \alpha} = \frac{2f'}{L} \cdot \frac{1}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (3.1)$$

При $\alpha=0$ получаем расчетное передаточное отношение

$$i_p = \frac{2f'}{L}. \quad (3.2)$$

У отечественных оптиметров $f'=200$ мм и $L=5$ мм; тогда $i_p=80$. Зная цену деления оптиметра $c=0,001$ мм и передаточное отношение, находим интервал шкалы

$$a = ci_p = 0,08 \text{ мм.}$$

Для наблюдения шкалы используется 12-кратный окуляр, поэтому видимый интервал равен $0,08 \cdot 12 = 0,96$ мм, что соответствует нормам (0,9—2,5 мм).

Замена действительного переменного передаточного отношения *i* на постоянное расчетное i_p упрощает прибор, но приводит к систематической погрешности измерения (погрешности схемы

прибора). Перемещение измерительного стержня из нулевого положения на величину h вызывает смещение шкалы, равное hi . Но шкала градуирована по расчетному передаточному отношению и поэтому перемещению h соответствует точка шкалы hi_p . Разность $hi - hi_p$, деленная на передаточное отношение i , определяет погрешность схемы:

$$\Delta h = \frac{hi - hi_p}{i} = L \operatorname{tg}^3 \alpha \approx L \alpha^3. \quad (3.3)$$

Максимальный угол α равен отношению половины предела измерения по шкале к длине малого рычага L , т. е.

$$\alpha = \pm \frac{0,1}{5} = \pm 0,02 \text{ рад.}$$

Наибольшая погрешность схемы оптиметра

$$\Delta h = \pm 5 \cdot 0,02^3 = \pm 0,04 \text{ мкм,}$$

что в 25 раз меньше цены деления прибора.

Остальные узлы оптиметра (основание, колонка, кронштейн, столик) предназначены для жесткого крепления трубки в выбранном положении и для установки измеряемого изделия. Многие из этих узлов унифицированы и применяются в других приборах (оптикаторах, интерферометрах и др.).

Ультраоптиметры

Оптиметры повышенной точности называют ультраоптиметрами. На рис. 3.3, а приведена схема ультраоптиметра модели ИКП-2 (ОВЭ-02 в табл. 3.1). Свет лампы 1 через конденсор, светофильтр и призму 2 проходит к сетке 3, отражается зеркалом на объектив 4 и параллельным пучком лучей падает на зеркальный оптический умножитель 5, 6. Зеркало 6 связано рычажной передачей с измерительным стержнем 7 и отклоняется при перемещении последнего. Свет после многократного отражения в оптическом умножителе (рис. 3.3, б) возвращается в объектив 4, проходит через сетку 3 и проекционный объектив 8. С помощью зеркал 9, 10 и 12 изображение шкалы проектируется на экран 11.

Большое передаточное отношение ультраоптиметра определяется числом отражений N луча от подвижного зеркала и действием дополнительной проекционной системы с увеличением $\beta_{пр}$:

$$i_p = \frac{2Nf'}{L} \beta_{пр} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 200}{5} \cdot 17 = 6800.$$

При таком передаточном отношении интервал шкалы на экране равен $0,0002 \cdot 6800 = 1,4 \text{ мм.}$

Пружинно-оптические измерительные головки (оптикаторы)

Оптикаторы являются наиболее совершенными рычажно-оптическими приборами, в механизме которых вместо обычных шарниров с опорами качения и скольжения применены пружинные шарниры.

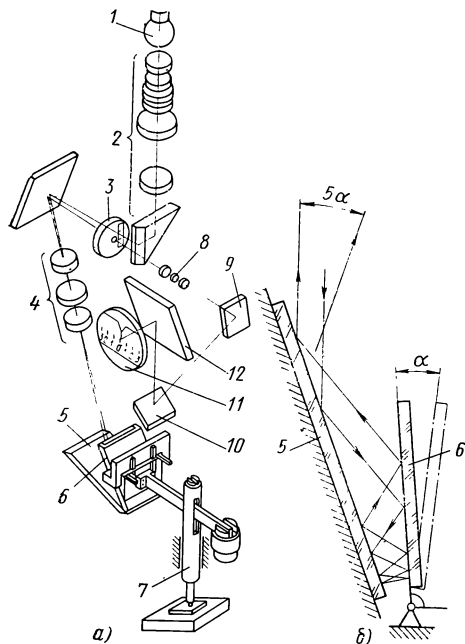


Рис. 3.3. Схема ультраоптиметра:

1—источник света; 2—система подсветки; 3—сетка; 4—объектив; 5, 6—зеркала умножителя; 7—стержень; 8—объектив; 9, 10, 12—зеркала; 11—экран

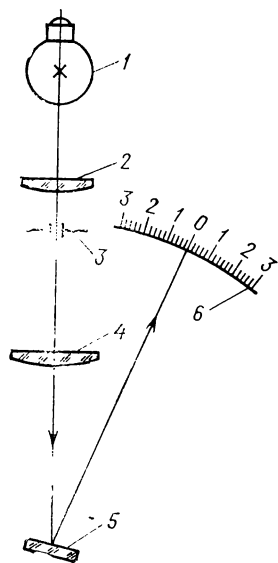


Рис. 3.4. Оптическая схема оптикатора:

1—источник света; 2—конденсор; 3—щель; 4—объектив; 5—зеркало; 6—шкала

Принципиальная оптическая схема оптикатора приведена на рис. 3.4. Лампа 1 с помощью конденсора 2 освещает прямоугольную щель 3 с тонкой нитью посередине. Объектив 4 и поворотное зеркало 5 проектируют щель на коническую поверхность шкалы 6, где изображение нити служит индексом для отсчета.

Зеркало 5 закреплено на средней части спиральной пружины, один конец которой закреплен, а другой перемещается под действием измерительного стержня с наконечником. Растяжение спирали приводит к ее раскручиванию и повороту зеркала 5 на угол, пропорциональный величине перемещения наконечника. Поворот зеркала вызывает перемещение изображения щели по шкале.

Измерительный стержень перемещается в трубке, наружный диаметр которой равен 28 мм. Это позволяет устанавливать оптикометры на стойках от оптиметров, интерферометров и других измерительных приборов.

Основные характеристики оптикометров (ГОСТ 10593—63) приведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Параметр	Оптикометр			
	01П	02П	05П	1П
Цена деления в мкм	0,1	0,2	0,5	1
Пределы измерения в мкм	± 12	± 25	± 60	± 120
Измерительное усилие в сН	150	150	150	150
Колесование измерительного усилия в сН, не более	30	30	50	60
Допускаемая погрешность на участке в пределах 100 делений	0,5 деления			
более 100 делений	1 деление			
Вариация показаний	1/3 деления			

Контактные интерферометры

Отечественная промышленность (ГОСТ 8290—57) выпускает два типа аналогичных по принципу действия контактных интерферометров — вертикальный ИКПВ и горизонтальный ИКПГ. В основу оптической схемы этих приборов положена схема интерферометра Майкельсона (см. рис. 2.3, рис. 2.7), подвижное зеркало которого жестко связано с измерительным наконечником. Оба интерферометра имеют одинаковые интерференционные трубки, оптическая схема которых приведена на рис. 3.5.

Свет от лампы 1 после конденсора 2 параллельным пучком направляется через диафрагму 3 на разделительную пластинку 6. В горизонтальной ветви свет отражается от поворотного зеркала 5, а в вертикальной — от подвижного зеркала 12, закрепленного на измерительном стержне 13.

Объектив 7 проектирует интерференционную картину полос равной толщины в плоскость сетки 8. Вертикально расположенные интерференционные полосы и нанесенная на сетку шкала наблюдаются через окуляр 10, который может поворачиваться вокруг горизонтальной оси шарнира 9 для наблюдения различных участков сетки.

Ширина полос (а тем самым цена деления шкалы) регулируется поворотом зеркала 5 вокруг вертикальной оси. Шкала

градуируется в монохроматическом свете при включенном свето-фильтре 4. Цена деления находится по формуле

$$c = \frac{\lambda}{2} \frac{k}{n},$$

где λ — длина волны, соответствующая максимуму пропускания светофильтра;

k — число интерференционных полос, совпадающих с n делениями шкалы.

Для измерений фильтр выключают. Наблюдаемая в белом свете картина содержит ахроматическую (черную) полосу и по сторонам от нее по 3—4 окрашенных полосы. Черная полоса служит подвижным указателем положения измерительного стержня.

При контакте наконечника с эталонной мерой черную полосу совмещают с нулевым штрихом шкалы. Для этого приходится смещать предметный стол (т. е. смещать полосы) или в небольших пределах сдвигать саму шкалу. Затем устанавливают на стол измеряемую деталь и по положению черной полосы отсчитывают искомую разность длин.

Контактные интерферометры применяются преимущественно с ценой деления 0,05 и 0,1 мкм. При цене деления 0,2 мкм интерферометр экономически не целесообразен, т. к. такую цену деления имеют более простые пружинные приборы.

Погрешность показаний интерферометра не должна превышать величины

$$\delta = \pm (0,03 + 0,0054nc) \text{ мкм},$$

где c — цена деления шкалы в мкм;

n — число делений шкалы от нулевого штриха.

В настоящее время осваивается производство контактных интерферометров с экраном, значительно облегчающим отсчет по шкале прибора. Цена деления экранных интерферометров переменная (от 0,02 до 0,2 мкм).

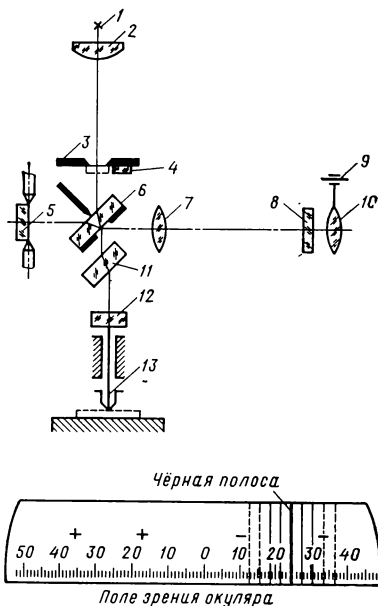


Рис. 3. 5. Схема трубки интерферометра:

1—источник света; 2—конденсор; 3—диафрагма; 4—светофильтр; 5—поворотное зеркало; 6—разделительная пластинка; 7—объектив; 8—сетка; 9—шарнир; 10—окуляр; 11—компенсационная пластинка; 12—подвижное зеркало; 13—стержень

3.2. ПРИБОРЫ ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Компараторы

Компараторами называют приборы, предназначенные для измерения штриховых и концевых объектов непосредственным сравнением их со штриховыми образцовыми шкалами.

Компаратор состоит из двух частей — объектной и отсчетной. К объектной части относится устройство для установки измеряемого объекта и наводящее устройство, например, визирный микроскоп или измерительный стержень. К отсчетной части отно-

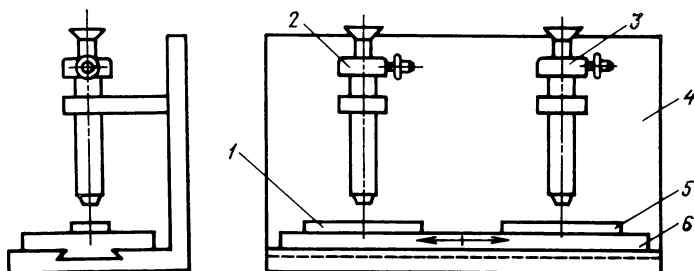


Рис. 3. 6. Принципиальная схема компаратора ИЗА-2:

1—объект; 2—визирный микроскоп; 3—отсчетный микроскоп; 4—стойка;
5—образцовая шкала; 6—каретка

сится отсчетный микроскоп и образцовая шкала. В процессе измерения два из четырех названных компонентов подвижны, а два других — неподвижны.

Наименьшими погрешностями обладает продольный компаратор Аббе (рис. 3. 6) с расположением линии измерения объекта 1 и образцовой шкалы 5 на одной прямой, причем объект и шкала находятся на каретке 6, перемещающейся вдоль линии измерения, а визирный 2 и отсчетный 3 микроскопы неподвижно установлены на стойке 4.

Именно по такой схеме устроен известный компаратор ИЗА-2, нашедший широкое применение в лабораториях НИИ, ВУЗов и заводов при измерениях различных объектов по одной координате, например, спектрограмм, шкал и сеток.

Пределы измерения компаратора ИЗА-2 0—200 мм, цена деления основной шкалы 1 мм, цена деления спирального окулярного микрометра в отсчетном микроскопе 0,001 мм. Увеличение визирного микроскопа 7—10,5 $\times$.

Погрешность измерения $\pm \left(0,9 + \frac{L}{300 - 4h} \right)$ мкм, где L — измеряемая длина в мм, h — высота плоскости измеряемого объекта над плоскостью шкалы в мм.

Длиномеры

Оптические длиномеры ИЗВ-1, ИЗВ-2 и ИКУ-2 предназначены для абсолютных (до 100 мм) и сравнительных (свыше 100 мм) измерений длин контактным методом. В этих компараторных приборах объект и отсчетный микроскоп неподвижны, а жестко связанные между собой измерительный стержень и образцовая шкала при измерении перемещаются.

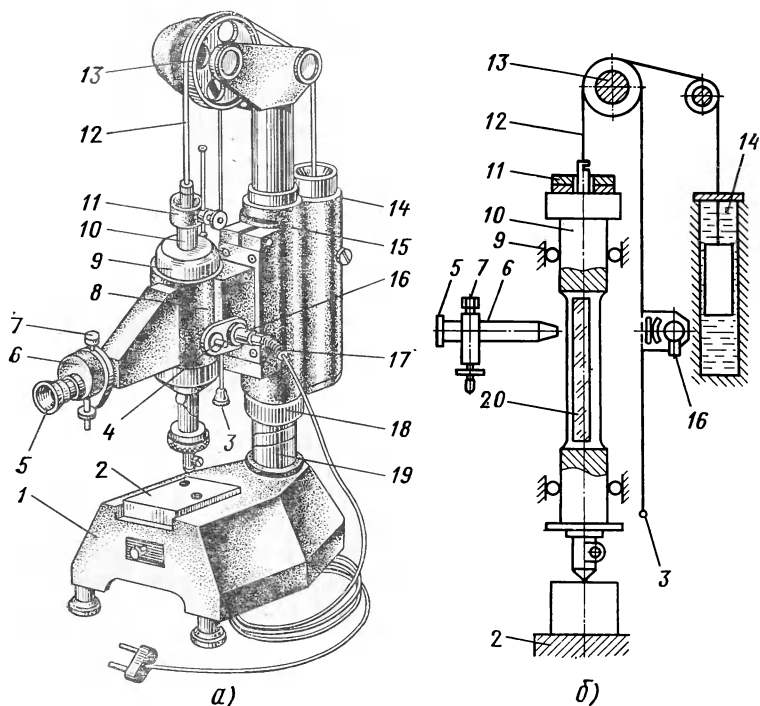


Рис. 3.7. Вертикальный длиномер ИЗВ-1:

а—внешний вид; *б*—кинематическая схема;
 1—основание; 2—стол; 3—рукоятка подъема плунжера; 4—винт; 5—окуляр; 6—микроскоп; 7—микрометр; 8—кронштейн; 9—направляющая; 10—плунжер; 11—грузовые шайбы; 12—лента; 13—блок; 14—демпфер; 15—винты; 16—осветитель; 17—корпус; 18—гайка; 19—колонка; 20—образцовая шкала

На рис. 3.7, *а* и *б* показано устройство и схема вертикального длиномера ИЗВ-1 (позиции общие). На массивном основании 1 закреплен ребристый стол 2 и колонка 19. По колонке гайкой 18 перемещается корпус прибора 17, закрепляемый в нужном положении винтами 15. На корпусе закреплен кронштейн 8 с осветителем 16, микроскопом 6 и направляющей 9 для измерительного плунжера 10 с образцовой шкалой 20.

Стальная лента 12, перекинутая через блок 13, соединяет плунжер с противовесом, помещенным в демпфер 14 с вазелино-

вым маслом. Демпфер обеспечивает малую скорость опускания плунжера и предохраняет измерительный наконечник от удара. Плунжер поднимается тросиком за рукоятку 3 и закрепляется винтом 4. Измерительное усилие прибора регулируется грузowymi шайбами 11 в пределах от 75 до 250 сН.

Образцовая шкала 20 имеет 100 миллиметровых делений. Эта шкала рассматривается в отсчетный микроскоп 6, снабженный спиральным окулярным микрометром с ценой деления 0,001 мм. Окуляр 5 может перемещаться в вертикальном направлении винтом 7 для установки на ноль.

Верхний предел измерения длиномера, ограниченный конструкцией стойки, равен 250 мм. При измерении размеров свыше 100 мм прибор настраивают по концевым мерам длиной 100 или 150 мм.

Вертикальные длиномеры ИЗВ-2 и ИЗВ-21 имеют те же основные характеристики, что и ИЗВ-1. В оптическую схему введены две призмы, позволяющие наклонить окуляр на угол 45° к вертикали. В новых длиномерах вместо демпфера применен механический регулятор скорости опускания измерительного стержня. Перемещение длиномеров по стойкам обеспечивается направляющими «ласточкин хвост» и реечным механизмом.

В комплект ИЗВ-2 и ИЗВ-21 входит центрировочный микроскоп. Он устанавливается на измерительном стержне и позволяет совместить выбранную точку изделия с линией измерения. Одновременно его можно использовать для бесконтактного измерения изделий по высоте.

Горизонтальный длиномер ИКУ-2 представляет собой сочетание длиномера компараторного типа и горизонтального оптиметра. Измерительный стержень имеет образцовую шкалу и заканчивается подвижным наконечником, связанным с поворотным зеркалом оптиметра.

Отсчет в длиномере и оптиметре осуществляется отдельно, но на одном экране. Для этого в его верхнюю часть проектируется подвижная основная шкала с ценой деления 1 мм и неподвижная отсчетная шкала с ценой деления 0,1 мм, а в нижнюю часть — шкала оптиметра с ценой деления 0,001 мм, по которой отсчитываются сотые и тысячные доли миллиметра.

Такой принцип раздельного отсчета используется и в других измерительных устройствах, например, в измерительных машинах.

Бесконтактный оптический микрометр ОБМ-2

Оптический микрометр ОБМ-2 предназначен для бесконтактного измерения толщин изделий. Прибор рекомендуется использовать в тех случаях, когда возникает опасность повредить изделие контактным наконечником (некоторые оптические детали, фольга, слюда и т. д.).

Пределы измерения микрометра 0—50 мм, предельная погрешность показаний $\pm 0,004$ мм.

Принцип действия ОБМ-2 основан на использовании двух двойных микроскопов (см. разд. 4. 4) с общим полем зрения. Оптическая схема микрометра приведена на рис. 3. 8. На ней условно пунктирными линиями выделены детали верхнего 1 и ниж-

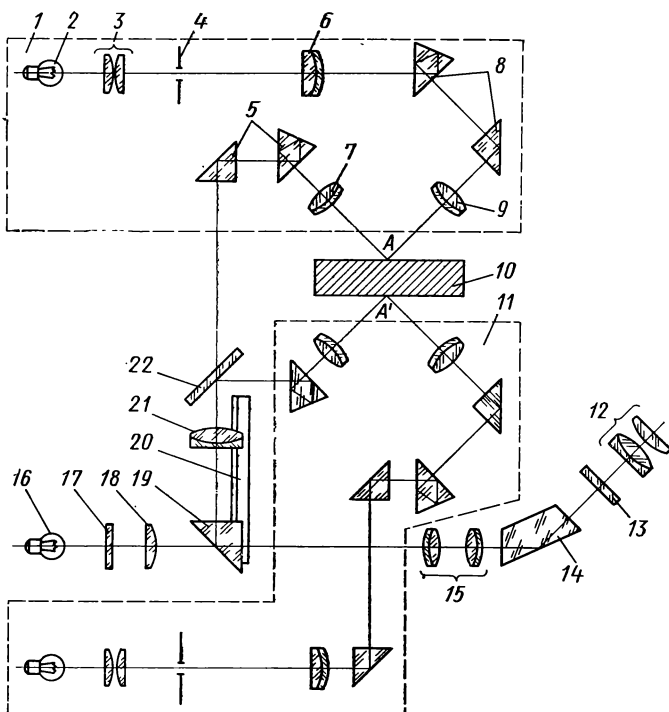


Рис. 3. 8. Оптическая схема микрометра ОБМ-2:

1—верхний микроскоп; 2, 16—источники света; 3, 18—конденсоры; 4—щель; 5, 8, 14, 19—призмы; 6, 7, 9, 15, 21—объективы; 10—измеряемое изделие; 11—нижний микроскоп; 12—окуляр; 13—сетка; 17—светофильтр; 20—шкала; 22—полупрозрачная пластина

него 11 микроскопов, которые отличаются только количеством и расстановкой призм. Поэтому схема нижнего микроскопа далее не рассматривается.

Нить лампы 2 конденсором 3 проектируется на горизонтальную щель 4. Выходящий из объектива 6 параллельный пучок лучей через призмы 8 падает на объектив 9, дающий изображение *A* светящейся щели 4 на верхней поверхности измеряемого изделия 10. Объектив 7 проектирует изображение *A* в бесконечность. Параллельные пучки лучей через призмы 5 и полупрозрачную пластину 22 попадают в объектив 21, который через призмы 14 и 19 дает окончательное изображение щели 4 в плоскости транс-

версальной сетки 13. В левой части поля зрения окуляра 12 видны изображения двух светящихся щелей. При точной наводке обоих микроскопов на противоположные поверхности изделия изображения щелей совмещены (являются продолжением одна другой).

В правую часть сетки 13 микрообъектив 15 проектирует изображение штрихов миллиметровой шкалы 20, жестко связанной с верхним микроскопом и освещаемой лампочкой 16 через светофильтр 17 и конденсор 18.

Перемещая микроскоп 1 по вертикали, в левой части поля зрения совмещают изображения щелей, а в правой — снимают отсчет по трансверсальной сетке (см. разд. 2.4). При небольших вертикальных смещениях измеряемого изделия изображения щелей взаимно не расходятся. Поэтому при установке изделия не требуется особо точной фокусировки изображения щели, что значительно облегчает работу на микрометре.

3.3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ

Сферометры

Сферометры предназначены для измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых сферических поверхностей.

Принципиальная схема кольцевого настольного сферометра приведена на рис. 3.9. В своей измерительной части он мало отличается от вертикального длинмера ИЗВ-1.

Внутри массивного корпуса 3 по точным направляющим перемещается измерительный стержень 5 со встроенной миллиметровой шкалой и контактным шариком на конце. Положение шкалы отсчитывается при помощи микроскопа 6 со спиральным окулярным микрометром. Шкала подсвечивается осветителем 2.

Противовес 4 стремится поднять измерительный стержень вверх до касания шарика с измеряемой поверхностью линзы. На верхнюю часть корпуса насаживают сменные опорные стальные кольца 1.

Контактным сферометром непосредственно измеряется высота шарового сегмента h , а по ней и радиусу опорного кольца r рассчитывают радиус кривизны поверхности R . Значение

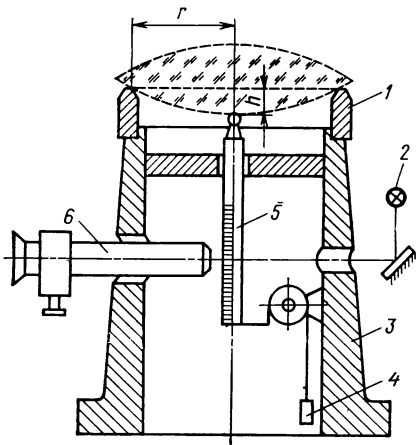


Рис. 3.9. Принципиальная схема настольного сферометра:

1—опорное кольцо; 2—осветитель; 3—корпус;
4—противовес; 5—измерительный стержень;
6—микроскоп

радиуса кольца r приводится в аттестате на прибор. Имеется ряд конструктивных вариантов колец: со сплошной ленточной ножевой кромкой, с фаской, с шариковыми опорами и т. п. Кольца с шариками, установленными под углом 120° , долговечнее обычных колец, так как по мере износа шарики можно повернуть в опоре и заставить работать другие участки.

При измерении радиуса кривизны R отдельной сферической поверхности на прибор устанавливают сначала пластину с плоской поверхностью, а затем контролируемую деталь. Разность полученных отсчетов по шкале дает некоторую условную стрелку прогиба h поверхности. Величина R вычисляется по формуле

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2} \pm q,$$

где r — радиус кольца и q — радиус шарика указаны в аттестате. Для вогнутой поверхности перед q ставят знак «+», для выпуклой — знак «—».

Относительно высокая точность, большие пределы измерения при высокой стабильности и надежности обусловили широкое распространение сферометров.

ГОСТ 11194—65 предусматривает выпуск кольцевых контактных сферометров трех типов:

ССО — настольный сферометр (деталь устанавливается на прибор, измерительное устройство оптическое);

СНО — накладной сферометр (прибор устанавливается на деталь, измерительное устройство оптическое);

СНМ — накладной сферометр (измерительное устройство механическое, измерение R ведется сравнением с образцовой сферой или с концевой мерой).

Указанные сферометры промышленностью выпускаются под шифрами ИЗС-7, ИЗС-8 и ИЗС-9.

Основные данные и нормы точности сферометров приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметр	ССО	СНО	СНМ
Пределы измерения радиусов в мм	10—1000	80—40000	80—40000
Пределы отсчета по шкале в мм	0—30	0—30	0—1
Пределы допускаемой основной погрешности в процентах от измеряемого радиуса при радиусах:			
от 10 до 37,5 мм	$\pm 0,07$	—	—
от 37,5 до 80 мм	$\pm 0,04$	—	—
от 80 до 750 мм	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$

Параметр	ССО	СНО	СНМ
от 750 до 1000 мм	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$
от 1000 до 5000 мм	—	$\pm 0,15$	$\pm 0,30$
от 5000 до 40000 мм	—	$\pm 0,50$	$\pm 2,0$
Вариация показаний в мм	0,0003	0,0005	0,0005
Цена деления шкалы в мм	1	1	0,1
Цена деления шкалы отсчетного устройства в мм	0,001	0,001	0,001

3.4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ПРИЗМ И КЛИНЬЕВ

Гониометры

Гониометрами называют оптические приборы для измерения углов между плоскими полированными гранями различных деталей, а также для измерения углов отклонения лучей, проходящих через призмы и клинья, изготовленные из стекла или других прозрачных материалов. В оптическом производстве гониометры применяют для измерения углов и пирамидальности призм и для измерения показателя преломления и дисперсии прозрачных материалов.

Измерение углов на гониометрах осуществляется абсолютным методом, т. е. сравнением с точно градуированным лимбом (круговой шкалой).

Гониометры (гониометры-спектрометры) типа ГС-30, ГС-10, ГС-5, ГС-2 и ГС-1 (числа в обозначениях показывают допустимую погрешность измерения углов в секундах) выпускаются по ГОСТ 10021—62.

Оптическая схема гониометра ГС-10 приведена на рис. 3. 10, а. Коллиматор 18 и зрительная труба 17 имеют одинаковые телеобъективы, фокусируемые перемещением компонентов 16 и 19.

В фокальной плоскости объектива коллиматора установлена регулируемая щель, освещаемая монохроматическим светом. Автоколлимационный окуляр 15 сменный.

Отсчетная система прибора состоит из осветительной и проекционной частей. Лампочка 1 через зеленый светофильтр и призму 4 освещает участок лимба 3. Освещенные штрихи лимба проектируются объективом 5 через призмы 2 и 6 на диаметрально противоположный участок лимба в перевернутом виде (рис. 3. 10, б).

Объектив 8 через призмы 7, 12 и 10 дает изображение рядом расположенных штрихов обоих участков лимба в плоскости ди-

афрагмы поля зрения, нанесенной на выходной грани призмы 10, и через призмы 11 и 14 рассматриваемой в отсчетный микроскоп 13. Между призмами 12 и 10 помещены две пары клиньев оптического компенсатора 9.

При перемещении клиньев вдоль оптической оси изображения противоположных участков лимба смещаются поперек опти-

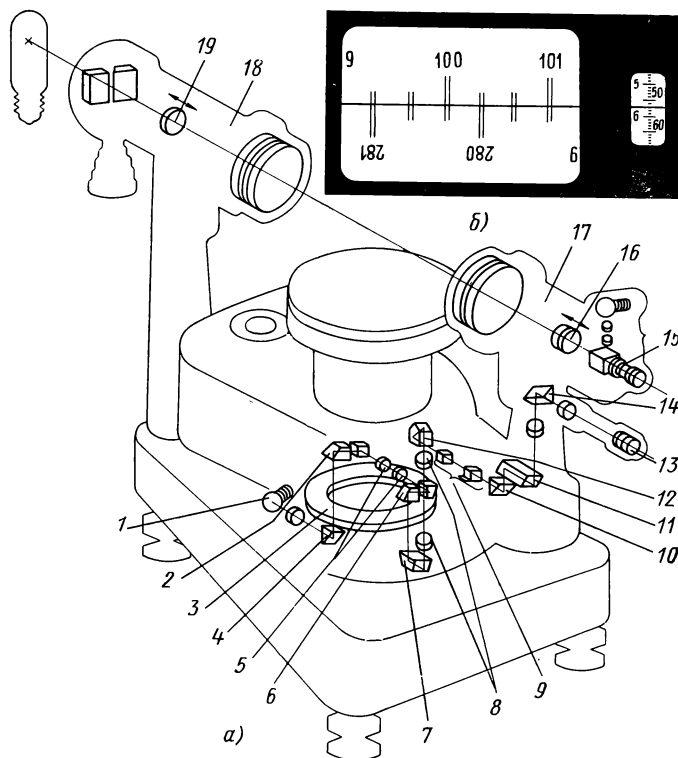


Рис. 3. 10. Гониометр ГС-10:

1—источник света; 2, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 14—призмы; 3—лимб; 5, 8—объективы; 9—клиновыи компенсатор; 13—отсчетный микроскоп; 15—автоколлимационный окуляр; 16, 19—подвижные оптические компоненты; 17—зригельная труба; 18—коллиматор

ческой оси и в противоположных направлениях. Каждое последующее совмещение штрихов обоих изображений лимба происходит при повороте лимба на $10'$, хотя он разделен на 20-минутные интервалы, что объясняется движением обоих изображений в разные стороны с одинаковой скоростью.

Шкала компенсатора нанесена на стеклянную пластинку и имеет 600 делений. Она механически связана с одним из клиньев, причем взаимному перемещению изображений лимба на $10'$

соответствует полное перемещение шкалы. Таким образом, цена одного деления компенсатора равна $1''$

Изображение делений лимба и шкала компенсатора расположены в одной плоскости и рассматриваются через отсчетный микроскоп (рис. 3. 10, б). Число градусов определяется по прямому изображению лимба. Число десятков минут определяется по числу интервалов между оцифрованными градусными делениями, различающимися на 180° (в данном примере 100° и 280°).

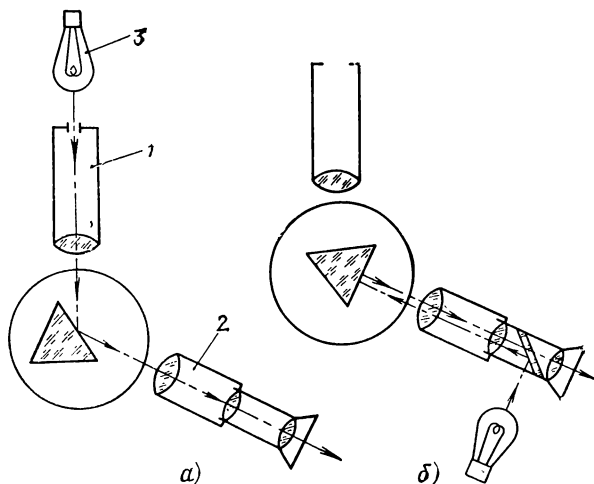


Рис. 3. 11. Измерение углов на гониометре:

а—коллимационное; б—автоколлимационное;
1—коллиматор; 2—зрительная труба; 3—осветитель колли-
матора

Цена деления $10'$ Единицы минут и секунды отсчитываются по шкале компенсатора и риску в малом окне. На рис. 3. 10, б полный отсчет составляет $100^\circ 15' 57''$

Углы на гониометрах измеряются коллимационным (рис. 3. 11, а) и автоколлимационным (рис. 3. 11, б) методами. В первом случае столик с призмой повернут так, чтобы параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора 1, отразившись от грани призмы, попал в зрительную трубу 2. Изображение щели коллиматора совмещают с перекрестием зрительной трубы и берут первый отсчет по лимбу. Затем столик с лимбом поворачивают так, чтобы совместить изображение цели с перекрестием после отражения света от другой грани призмы. Разность отсчетов равна углу поворота лимба β . Измеряемый угол $\alpha = 180^\circ - \beta$.

Во втором случае коллиматор не используют, а на зрительную трубу устанавливается автоколлимационный окуляр. Столик с призмой поворачивают так, чтобы автоколлимационное изобра-

жение марки совпало с перекрестием окуляра, т. е. чтобы грань призмы была перпендикулярна падающему пучку. Последовательная установка двух граней в указанное положение дает разность отсчетов, равную углу β . Измеряемый угол призмы $\alpha = 180^\circ - \beta$.

Возможны другие способы измерения, основанные на том, что зрительная труба или автоколлиматор могут поворачиваться вокруг стола, поворачивая отсчетную систему гониометра вокруг лимба.

Автоколлиматоры

Автоколлиматоры предназначены для измерения малых угловых перемещений плоских зеркально отражающих поверхностей. Выше были рассмотрены схемы автоколлиматоров (см. разд. 2.4) и примеры их применения в оптиметре (см. разд. 3.1) и гониометре (см. разд. 3.4). Автоколлиматор, как самостоятельный прибор в сочетании с плоским зеркалом используется для проверки прямолинейности изделий и т. д. В сочетании с

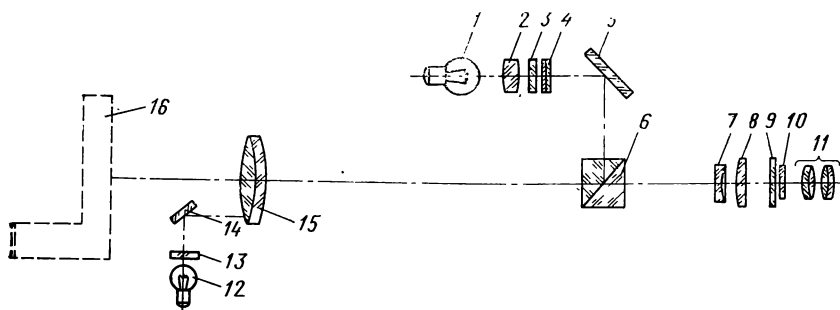


Рис. 3.12. Оптическая схема автоколлиматора АКТ-250:

1, 12—источники света; 2—конденсор; 3, 13—светофильтры; 4—сетка (марка); 5, 14—зеркала; 6—светоделительный кубик; 7, 8—линзовый компенсатор; 9—подвижная сетка; 10—неподвижная сетка; 11—окуляр; 15—объектив; 16—плоское зеркало

эталонированными призмами (многогранниками) автоколлиматоры применяют для проверки оптических делительных головок и других угломерных приборов. С их помощью контролируют взаимную параллельность зеркал, расположенных в пределах пучка лучей автоколлиматора, и прозрачных поверхностей, расположенных друг за другом и т. д. Широкое применение автоколлиматоры находят при сборке и юстировке оптических приборов.

Отечественная промышленность выпускает четыре визуальных автоколлиматора АК-0,25; АК-0,5; АК-1, МГА и фотоэлектрический автоколлиматор АФ-2. Основные характеристики визуальных автоколлиматоров приведены в табл. 3.4.

На рис. 3.12 приведена оптическая схема автоколлиматора АКТ-250, нашедшего широкое применение в цехах и оптических лабораториях и по своим характеристикам близкого к АК-1.

Таблица 3.4

Параметр	Шифры автоколлиматоров			
	АК-0,25	АК-0,5	АК-1	МГА
Цена деления шкалы компенсатора в угловых секундах	0,25	0,5	1	1
Предел измерения по минутной шкале в угловых минутах при расстоянии до зеркала до 2 м	6	10	12	6
Погрешность показаний в с:				
при измерении в одной координатной плоскости	$\pm(0,25 + \frac{\varphi}{100})$	$\pm(0,5 + \frac{\varphi}{100})$	$\pm(1 + \frac{\varphi}{100})$	$\pm(1 + \frac{\varphi}{100})$
при измерении в двух координатных плоскостях	—	—	—	$\pm(1 + \frac{\varphi}{50})$
φ —величина измеряемого угла в с				
Фокусное расстояние в мм	1000	400	250	500
Поле зрения	0,8°	1°	2°	1,1°
Увеличение	50×	30×	20×	25×
Диаметр входного отверстия в мм	55	40	30	50

Свет от лампочки 1 проходит через конденсор 2 и светофильтр 3 и освещает сетку 4 (прозрачное перекрестие в слое серебра нанесенного на поверхность пластинки). Зеркало 5 направляет поток лучей на светоделительную диагональ кубика 6. Сетка 4 помещена в фокусе объектива 15, поэтому параллельный пучок лучей, отраженный от плоского зеркала 16, вновь соберется объективом 15 в его фокальной плоскости. Полученное здесь автоколлимационное изображение сетки наблюдают в окуляр 11, в поле зрения которого видны неподвижное перекрестие и две шкалы: минутная шкала, нанесенная на неподвижной сетке 10, и шкала с ценой деления 2", нанесенная на подвижной сетке 9.

Линзы 7 и 8 составляют линзовый компенсатор. Подвижная линза 8 жестко связана с сеткой 9 и перемещается от микрометричного винта до совмещения вертикальной линии сетки с ближайшим штрихом минутной шкалы. Отсчет ведется по обоим шкалам.

Лампа 12 со светофильтром 13 и зеркалом 14 служит для подсветки шкал.

ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ И ЧИСТОТЫ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

4.1. ПРОБНЫЕ СТЕКЛА

Сферические и плоские пробные стекла являются основным контрольным инструментом при изготовлении оптических деталей с поверхностями определенного радиуса.

При наложении на контролируемую поверхность пробного стекла наблюдаются интерференционные полосы равной толщины. При симметричном осевом распределении воздушного зазора они имеют вид колец, по числу которых определяют отступление радиуса контролируемой поверхности от радиуса пробного стекла.

Выпускаются сферические и плоские пробные стекла трех типов (ГОСТ 2786—62): РПС — рабочие пробные стекла для проверки деталей; КПС — контрольные пробные стекла для проверки рабочих пробных стекол; ОПС — основные пробные стекла для проверки контрольных пробных стекол.

Номинальные значения радиусов кривизны пробных стекол должны соответствовать ГОСТ 1807—57.

Диаметр пробного стекла не должен быть меньше диаметра проверяемого участка детали. Максимальный диаметр пробных стекол равен 130 мм. В отдельных случаях пробные стекла можно изготовить диаметром 150, 180 и 220 мм.

Пробные стекла изготавливаются трех классов точности: 1, 2 и 3. Отклонение радиусов кривизны измерительных поверхностей ОПС от номинальных значений не должны превышать значений, указанных в табл. 4. 1:

Интерференционную картину между пробным стеклом и деталью наблюдают в белом (не более 5—6 цветных колец) или монохроматическом свете (одноцветные кольца медленно падающего контраста).

По числу колец определяют толщину воздушного промежутка между двумя стеклами:

$$h = N \frac{\lambda}{2},$$

где N — число отсчитанных колец Ньютона;

λ — длина волны света.

По найденной толщине h и диаметру D , на котором отсчитывались кольца, рассчитывают отступление радиуса кривизны детали от радиуса пробного стекла:

$$\Delta R = \frac{4N\lambda}{D^2} R^2,$$

где R — радиус кривизны пробного стекла.

Таблица 4.1

Класс точност	Сферические стекла с номинальными значениями радиусов кривизны R в мм						Плоские стекла $R = \infty$
	от 0,5 до 2	свыше 2 до 10	свыше 10 до 37,5	свыше 37,5 до 250	свыше 250 до 1000	свыше 1000 до 4000	Допустимые отклонения от плоскостности в интерференционных полосах
	допускаемые отклонения радиусов $\pm$						
	в мкм			в % от величины номинального радиуса			
1	0,5	1,0	2,0	0,01	0,02	$\frac{0,02\% R}{1000}$	0,05
2	1,0	3,0	5,0	0,03	0,05	$\frac{0,05\% R}{1000}$	0,07
3	2,0	10,0	15,0	0,10	0,15	$\frac{0,15\% R}{1000}$	0,10

Если кольца не круглой формы, то разность их чисел ΔN по двум взаимно перпендикулярным направлениям характеризует разность радиусов и астигматичность поверхности — отклонение ее от правильной сферы.

На чертежах большинства оптических деталей допуск на форму сферической или плоской поверхности задается не окончательной величиной отклонения радиуса, а числом интерференционных колец N и их искажением ΔN . Такое задание допуска подразумевает интерференционный способ контроля формы поверхности (в частности применение пробных стекол).

Контроль асферических поверхностей сферическими пробными стеклами является длительной и трудоемкой операцией, неудобной для применения непосредственно на рабочем месте, кроме того, необходимо применять специальные измерительные устройства. Поэтому этот метод годен только для измерения и паспортизации асферических пробных стекол.

Контроль асферических поверхностей на рабочем месте при помощи асферических пробных стекол принципиально не отличается от контроля сфер и плоскостей, но при этом необходимо обеспечить соосность пробного стекла и контролируемой детали. Оси совмещают вручную, при этом наблюдая концентричность расположения интерференционных колец на поверхности детали.

Применение асферических пробных стекол значительно упрощает оценку изготавливаемых деталей, так как в сотни раз сокращает время контроля по сравнению с любыми универсальными методами измерения.

4. 2. ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Интерферометры предназначены для бесконтактного контроля плоских, сферических и асферических оптических поверхностей.

Интерферометр ИПП-15 предназначен для контроля плоскостности и плоскопараллельности оптических деталей диаметром до 140 мм. Оптическая схема прибора изображена на рис. 4. 1. Ртутная лампа 1 освещает щель 2 переменной ширины (входной зрачок), установленную в фокальной плоскости объектива 6. Между щелью и объективом свет проходит через полупрозрачную пластину 5.

Параллельный пучок лучей освещает пластину 7 с нижней эталонной плоскостью и контролируемую деталь 8, установленную на столе 9 с зазором между пластинами 1—3 мм. Пучки лучей, отразившись от двух пластин, интерферируют и образуют картину полос равной толщины, локализованную на верхней поверхности контролируемой детали.

Пучки интерферирующих лучей проходят объектив 6, отражаются от пластины 5 и собираются в плоскости диафрагмы 10, образуя выходные зрачки. Здесь располагается глаз наблюдателя, рассматривающий картину полос через объектив 6.

Ширину и направление полос устанавливают наклоном и поворотом столика вместе с деталью. Столик может вращаться вокруг вертикальной оси и наклоняться в двух плоскостях при помощи микрометрических винтов.

Если отступление N контролируемой поверхности от плоскости составляет одно кольцо и более, то целесообразно картину делать осесимметричной, т. е. эталонную пластину и деталь устанавливать параллельно друг другу.

Если отступление N менее одного кольца, то между пластинами следует создать клин такой величины, чтобы наблюдалось 3—4 полосы. Для измерения искривления этих полос между объективом и эталонной пластиной натянута нить, помогающая в отсчете величины стрелки прогиба полос. Пусть ширина полос равна b , а стрелка прогиба Δb . Тогда отступление контролируемой поверхности от плоскости составляет $N = \frac{\Delta b}{b}$ или в

линейной мере $\frac{\Delta b}{b} \frac{\lambda}{2}$. Погрешность визуального измерения плоскостности не превышает $0,1 b$ или $0,05 \lambda$.

Светофильтр 3, выделяющий зеленую линию ртути ($\lambda = 546,1$ мм), включают в ход лучей в том случае, если надо увеличить воздушный зазор или надо знать точное значение λ .

Измерение плоскопараллельности осуществляется при наблюдении колец равного наклона, полученных от поверхностей контролируемой пластины, при перемещении стола с деталью в горизонтальной плоскости. Для этого включается линза 4, про-

ектирующая совместно с объективом 6 входной зрачок на контролируемую пластину, эталонная пластина наклоняется на угол $2-3^\circ$, а кольца наблюдаются на сетке 11 в окуляр 12. Изменение толщины пластины на $\lambda/2n$, где n — показатель преломления материала, вызывает появление или исчезновение в центре картины одного кольца.

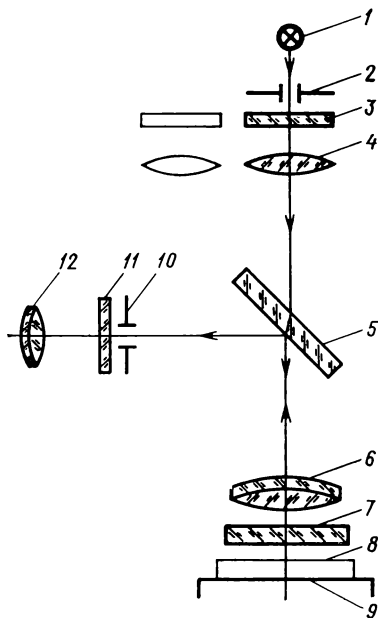


Рис. 4. 1. Интерферометр для контроля плоскостности:

1—источник света; 2—щель; 3—светофильтр; 4—линза; 5—полупрозрачная пластина; 6—объектив; 7—эталонная пластина; 8—контролируемая деталь; 9—стол; 10—диафрагма; 11—сетка; 12—окуляр

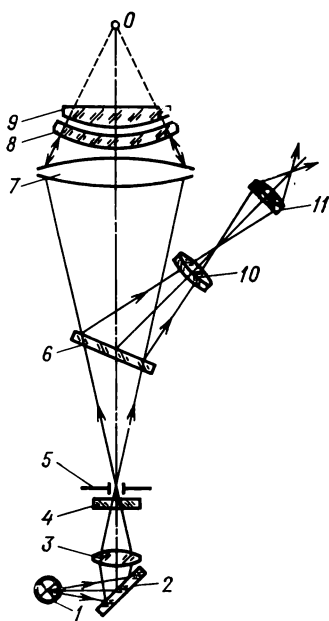


Рис. 4. 2. Интерферометр для контроля выпуклых сфер:

1—источник света; 2—зеркало; 3—конденсор; 4—светофильтр; 5—диафрагма; 6—полупрозрачная пластина; 7—объектив; 8—эталонный мениск; 9—контролируемая линза; 10—объектив; 11—окуляр

Эталонная пластина в некоторых интерферометрах делается клинообразной. Это позволяет исключить действие пучка света, отраженного от ее верхней поверхности, и несколько повысить контраст полос. Действие нижней поверхности контролируемой детали во многих случаях можно значительно уменьшить, смазав ее вазелином с сажей.

Рассмотренная схема (интерфероскоп Физо) лежит в основе всех схем интерферометров для контроля плоскостности (ИТ-40, ИТ-87, ИТ-70 и др.). В новых приборах для уменьшения погрешности отсчета вводятся дополнительные визуальные приспособления или применяется фотоэлектрическая регистрация кривиз-

ны полос. Особо высокая точность ($\sim 0,001 \lambda$) достигнута на таких приборах при применении многолучевой интерференции.

Интерферометр КЮ-153 (рис. 4. 2) предназначен для контроля выпуклых сфер радиусом 8—55 мм. Наибольшее относительное отверстие участка поверхности, контролируемого за один прием, составляет 1:0,8. Точность измерения радиусов кривизны до 0,5 кольца, а местных ошибок до 0,1 полосы.

Свет ртутной лампы 1 отражается от зеркала 2 и конденсором 3 собирается на круглой диафрагме 5. Зеленый светофильтр 4 выделяет узкий спектральный интервал, необходимый для наблюдения интерференции при значительной разности хода.

Далее свет через полупрозрачную пластину 6 попадает в объектив 7 и направляется в точку О оптической оси. За объективом установлен сменный мениск 8 с верхней эталонной сферой и контролируемая линза 9. Интерференционная картина полос равной толщины, локализованная на сфере линзы 9, наблюдается в телескопическую лупу, которая состоит из объектива 10 и окуляра 11.

При исходной настройке прибора необходимо получить бесконечно широкую полосу. Такая картина возникает при совмещении центров кривизны эталонной сферы мениска и сферы линзы с точкой О.

Для исходной настройки обычно используется линза с радиусом, близким к номинальному. Такая линза является образцовой и с ее сферой сравниваются поверхности других линз.

При установке на опорное кольцо линзы, радиус которой отличается от образцового, наблюдаются кольца. Их число, как при методе пробного стекла, является мерой отступления измеряемого радиуса от образцового, а искажение их формы характеризует местные ошибки.

Если отступление радиуса линзы меньше одного кольца, то необходимо вводить полосы конечной ширины (3—4 полосы) и измерять их искривление. Эта настройка означает клинообразность воздушного зазора и достигается смещением опорного кольца с линзой перпендикулярно оси на величину в несколько микрон.

В комплект прибора входит пять сменных менисков. Они обеспечивают измерение сфер различных радиусов при незначительных изменениях толщины воздушного зазора.

Анализ измерений на приборе КЮ-153 показал, что наибольшие трудности возникают при контроле «крутых» сфер (диаметр линзы равен или больше радиуса сферы). Расчет показывает, что такая сфера должна быть установлена на опорном кольце так, чтобы ее боковое смещение не превышало 0,5 мкм, а осевое — 2 мкм.

В серийном производстве применяют также интерферометр КЮ-210 для проверки выпуклых сфер с радиусами от 15 до

330 мм и вогнутых от 80 до 330 мм и КЮ-211 для контроля вогнутых сфер с радиусами от 18 до 68 мм.

По аналогичному принципу устроен интерферометр ИТ-67, позволяющий контролировать не сферы, а асферические поверхности. Сложная интерференционная картина ограничивает возможности метода, не позволяет измерять асферические поверхности со значительными отступлениями от сферы. Для прибора ИТ-67 отступление измеряемого профиля от сферы ближайшего радиуса не превышает 5 мкм на одном мм дуги поверхности.

Интерферометры для контроля асферических поверхностей

На рис. 4.3 показаны две принципиальные схемы интерферометров. В обоих случаях используется видоизмененная схема интерферометра Майкельсона, включающая в одну из ветвей автоколлимационную систему с контролируемой поверхностью.

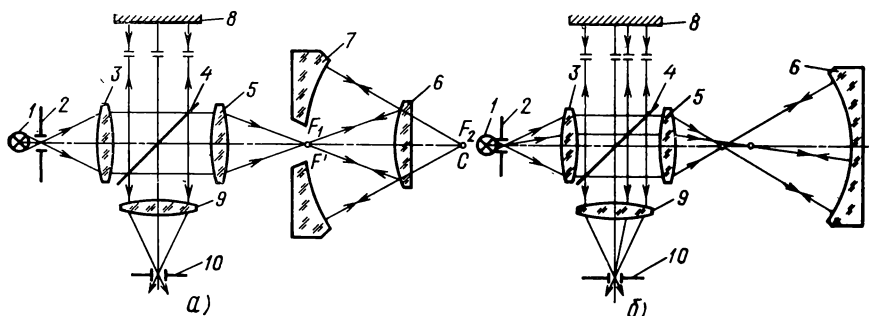


Рис. 4.3. Принципиальные схемы интерферометров для контроля асферических поверхностей:

а—метод анаберрационных точек; *б*—компенсационный метод;
1—источник света; 2—точечная диафрагма; 3, 5, 9—объективы; 4—светоделитель; 6—контролируемая деталь; 7—эталонное сферическое зеркало; 8—эталонное плоское зеркало; 10—диафрагма

Первая схема основана на использовании анаберрационных точек (фокусов) отражающих асферических поверхностей второго порядка. На рис. 4.3, *а* приведена схема интерферометра для контроля выпуклого гиперболоида. В выходном зрачке 10 установлен глаз наблюдателя.

Анаберрационность фокусов F_1 и F_2 асферической поверхности означает, что точечный источник света, помещенный в точку F_1 , идеально изображается в другом фокусе F_2 , который является центром сферического волнового фронта.

Если испытуемая поверхность имеет идеальную форму, а центр кривизны C сферического зеркала 7 и задний фокус F' объектива 5 совмещены с геометрическими фокусами F_1 и F_2 , то волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, должен быть

плоским. Плоская волна из рабочей ветви интерферирует с плоской эталонной волной и образуется картина полос равной толщины. По виду этих полос судят о качестве асферической поверхности.

При незначительных схемных перестройках прибор позволяет контролировать выпуклые и вогнутые эллиптические, гиперболические и параболические поверхности диаметром до 250 мм с относительным отверстием 1,3 с точностью до 0,2 мкм.

В приборе предусмотрены юстировочные повороты и перемещения основного блока (линзы 6 и зеркала 7), зеркала 8 и поступательное перемещение объектива 5.

Вторая схема (рис. 4.3, б) основана на компенсационном методе. В рабочей ветви интерферометра установлен компенсационный объектив 5. С его помощью плоский волновой фронт преобразуется в волновой фронт, который совпадает с теоретическим профилем контролируемой поверхности. После отражения и вторичного прохождения через компенсационный объектив волновой фронт остается плоским. Остальная часть интерферометра работает по предыдущей схеме.

Совпадение скомпенсированного фронта волны и профиля контролируемой поверхности возможно в том случае, если все лучи, выходящие из компенсационного объектива, совпадают с нормальными к поверхности. Другими словами, это совпадение соблюдается тогда, когда сферическая aberrация объектива равна продольной aberrации нормали к контролируемой поверхности.

Интерферометр с компенсатором дает возможность контролировать асферические поверхности любого порядка. Даже в тех случаях, когда не удастся подобрать компенсационный объектив, дающий волновой фронт, полностью совпадающий с профилем поверхности, можно заранее рассчитать вид интерференционной картины при имеющемся объективе и сравнить ее с реальной картиной. Отличие картин укажет ошибки асферической поверхности.

4.3. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ И ТЕНЕВЫЕ ПРИБОРЫ

Автоколлимационные приборы применяются для бесконтактного измерения радиусов сфер в пределах от 37,5 до 5000 мм с точностью 0,005—0,01 %.

Во ВНИИГК стандартов разработана установка для измерения радиусов пробных стекол в пределах 37,5—1000 мм. В ЛОМО подобная установка имеет пределы 10—6000 мм. В этих установках для наведения на центр кривизны сферы и на ее поверхность используется автоколлимационный микроскоп.

Оптическая схема автоколлимационной установки показана на рис. 4.4. Основу установки составляет измерительная машина, действующая как компаратор.

По направляющим станины машины перемещается передняя бабка 1 с визирным 3 и отсчетным 2 микроскопами. Визирный микроскоп снабжен автоколлимационным окуляром, а отсчетный — спиральным окулярным микрометром. Заднюю бабку 5 закрепляют на направляющих и в ее держатель устанавливают устанавливаемую деталь 4. Радиус кривизны определяется как раз-

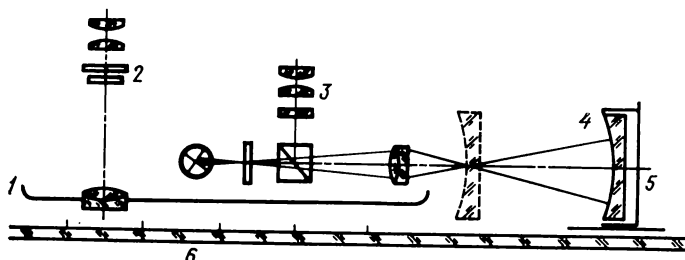


Рис. 4.4. Схема автоколлимационной установки:

1—передняя бабка; 2—отсчетный микроскоп; 3—визирный микроскоп;
4—измеряемая деталь; 5—задняя бабка; 6—горизонтальная шкала

ность отсчетов по горизонтальной шкале 6 станины с помощью отсчетного микроскопа 2 при наведении визирного микроскопа 3 на центр кривизны сферы и на ее поверхность, причем в моменты наведения достигается наибольшая резкость автоколлимационного изображения сетки (см. рис. 4.4).

Каждому типу применяемой измерительной машины соответствуют свои пределы измерения: ИЗМ-1 — до 1000 мм, ИЗМ-2 — до 2000 мм, ИЗМ-4 — до 4000 мм и ИЗМ-6 — до 6000 мм.

Теневые методы применяются для бесконтактного измерения формы поверхностей и aberrаций оптических систем. Они высоко чувствительны, но применяются в большинстве случаев для качественных измерений.

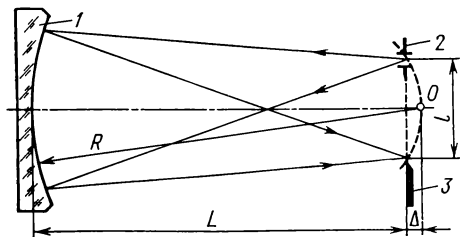


Рис. 4.5. Схема теневой установки:

1—контролируемая деталь; 2—щель;
3—нож

Схема теневой установки для измерения радиусов кривизны вогнутых сфер приведена на рис. 4.5.

Собственно теневой прибор состоит из светящейся точки или щели 2 и ножа 3, непосредственно за которым находится глаз или вспомогательная наблюдательная система, сфокусированные на контролируемую поверхность 1.

Теневой прибор имеет возможность перемещаться, а его расстояние L до сферы точно измеряется с помощью калибров и микрометричного механизма.

Измерение радиуса сводится к фокусировке теневого прибора в положение, при котором исчезает рельеф у теневой картины. Как известно, перекрывание ножом части пучка перед изображением щели или после него наблюдатель видит как неодинаковую яркость частей сферы. Перекрывание ножом самого изображения приводит к равномерному изменению яркости всей сферы.

Радиус вычисляется по формуле

$$R = L + \Delta,$$

где поправка Δ определяется выражением $\Delta \approx \frac{l^2}{4R}$.

В сфокусированном положении теневого прибора может наблюдаться некоторый яркостный рельеф в отдельных участках сферы. Эта картина вызывается местными ошибками сферы и почти не отражается на качестве фокусировки.

Теневые приборы среднего качества при операторе средней квалификации обеспечивают измерение с погрешностью

$$\Delta R \approx \pm 0,2 \frac{R^2}{D^2} \text{ мкм},$$

где D — диаметр измеряемой вогнутой поверхности радиуса кривизны R .

Теневые приборы рекомендуется использовать для измерения радиусов крупногабаритных деталей с радиусом кривизны больше 5 м.

4.4. ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧИСТОТЫ ОБРАБОТКИ

Контроль шероховатости поверхностей

Под шероховатостью поверхности согласно ГОСТу 2789—73 понимается совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности и рассматриваемых в пределах участка, длина которого выбирается в зависимости от характера поверхности и равна базовой длине.

Оценка шероховатости осуществляется качественными и количественными методами. Качественный метод оценки основан на сравнении обработанной поверхности с образцами шероховатости. Количественный метод оценки основан на измерении неровностей специальными приборами.

Бесконтактные измерения проводятся на оптических приборах — двойных микроскопах и микроинтерферометрах.

Действие двойного микроскопа основано на принципе светового сечения, предложенным акад. В. П. Линником в 1929 г.

Горизонтально расположенная щель 3 (рис. 4.6), освещенная с помощью конденсора 2 лампой 1, проектируется микро-

объективом 4 на поверхность проверяемой детали 5. Там, где на поверхности имеются неровности, изображение щели искривляется, образуя световое сечение профиля. Изображение щели рассматривается в микроскоп, состоящий из объектива 6 и винтового окулярного микроскопа 7. Изображение щели в увеличенном масштабе повторяет профиль поверхности в выбранном се-

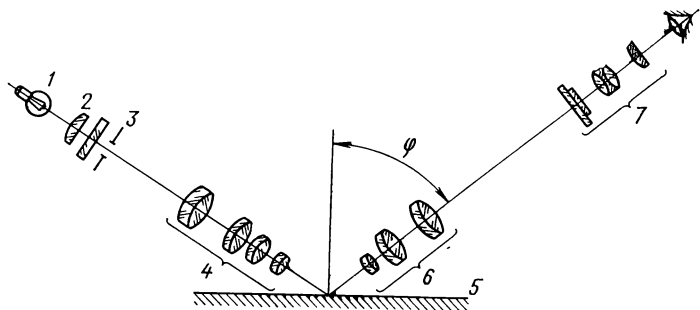


Рис. 4.6. Оптическая схема двойного микроскопа МИС-11:
1—источник света; 2—конденсор; 3—щель; 4—микрообъектив; 5—конт-
ролируемая деталь; 6—объектив; 7—окуляр

чении. Величина искривления изображения щели H пропорциональна высоте h неровностей и связана с ней соотношением

$$H = 2h\beta \sin \varphi,$$

где β — увеличение микрообъектива;

φ — угол наклона наблюдательного микроскопа.

В МИС-11 оптические оси осветительного и наблюдательного микроскопов расположены под углом 45° к вертикали. Тогда

$$h \approx 0,7 \frac{H}{\beta}.$$

Величину H измеряют с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-1-15 $\times$.

Согласно ГОСТ 9847—61 приборы светового сечения должны выпускаться под шифром ПСС, а подобные им приборы теневое сечения — под шифром ПТС. Характеристики двойных микроскопов ПСС и ПТС, в зависимости от применяемых объектов, приведены в табл. 4.2.

Микроинтерферометры предназначены для измерения шероховатости поверхностей высоких классов чистоты 10—14. Они применяются также при измерении глубины и профиля штрихов, высоты ступенек, толщины пленок и т. д. Основные характеристики микроинтерферометров приведены в табл. 4.3.

Основным прибором этой группы является МИИ-4. По своей оптической схеме (рис. 4.7) МИИ-4 представляет собой соче-

Таблица 4.2

Апертура объектива	Поле зрения прибора в мм	Рабочий участок поля зрения прибора в мм	Пределы измерения (классы чистоты) по ГОСТ 2789—73	
			от	до
	не менее			
0,03	10	8	1	3
0,11	3,5	2,5	4	5
0,30	1,0	0,8	6	7
0,40	1,0	0,8	7	8
0,45	0,3	0,25	9	

тание интерферометра Майкельсона с микроскопом. Нить лампы 1 конденсором 2 с междулинзовым светофильтром проектируется в плоскость апертурной диафрагмы 3. Объектив 5 с помощью полупрозрачной плоскопараллельной пластины 8 переносит изображение диафрагмы 3 в плоскости входных зрачков двух

Таблица 4.3

Параметры	Прибор			
	МИИ-4	МИИ-5	МИИ-9*	МИИ-10*
Классы чистоты контролируемых поверхностей	10÷14	10÷14	10÷14	6÷12**
Увеличение прибора при визуальном наблюдении	490*	490*	500 и 700*	375 и 500*
То же при фотографировании	260*	Нет	125*	200*
Размеры поля зрения при визуальном наблюдении в мм	0,32	0,32	0,35 и 0,25	0,48 и 0,36
То же при фотографировании в мм	0,10	Нет	0,19×0,29	0,12×0,18
Апертура микроробъектива	0,65	0,65	0,50	0,50
Габариты прибора в мм	300×340×380	—	300×340×380	320×370×400
Масса прибора в кг	23	22	23	30

* Опытный образец.

** По ГОСТ 2789—73.

одинаковых микрообъективов 7 и 10, а изображение полевой диафрагмы 4 — в бесконечность. Микрообъективы 7 и 10 дают действительные изображения полевой диафрагмы соответственно на проверяемой поверхности 6 и на плоском эталонном зеркале 11. Плоскопараллельная компенсационная пластина 9 выравнивает длины хода в стекле двух интерферирующих пучков лучей.

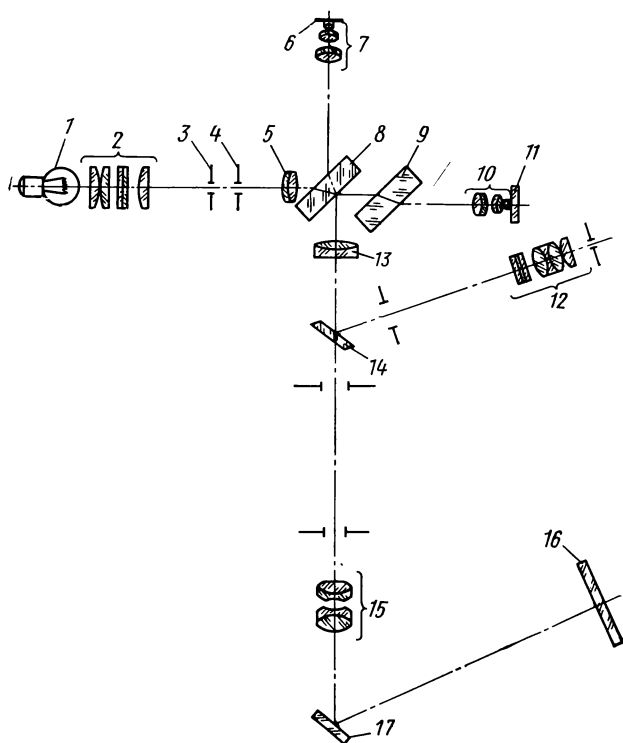


Рис. 4.7. Оптическая схема микроинтерферометра МИИ-4:

1—источник света; 2—конденсор; 3—апертурная диафрагма; 4—полевая диафрагма; 5, 13, 15—объективы; 6—контролируемая поверхность; 7 и 10—микрообъективы; 8—светоделительная пластина; 9—компенсационная пластина; 11—эталонное зеркало; 14, 17—зеркала; 12—окулярный микрометр; 16—фотоплатинка

Изображение проверяемой поверхности и интерференционные полосы равной толщины, локализованные на ней, переносятся объективами 7, 10, 13 и зеркалом 14 в плоскость сеток винтового окулярного микрометра 12. Строго говоря, здесь одновременно наблюдается изображение зеркала 11, но оно обычно настолько качественно, что не мешает наблюдению основных картин.

Интерференционные полосы в большом масштабе воспроизводят профиль контролируемого участка поверхности. Ширину и направление полос можно менять, смещая объектив 10 перпендикулярно оптической оси и поворачивая его в смещенном положении вокруг неподвижной оптической оси системы. В результате настройки интерференционные полосы устанавливают перпендикулярно следам обработанной поверхности.

Величину искривления полос оценивают на глаз или измеряют окулярным микрометром.

Высоту или глубину неровности вычисляют по формуле

$$h = \frac{\lambda}{2} \frac{a}{b},$$

где λ — средняя длина волны используемого участка спектра;

a — величина искривления полосы;

b — ширина полосы.

Если неровность имеет профиль ступеньки, то интерференционные полосы претерпевают разрыв. Для измерения высоты такой неровности светофильтр выключают и наблюдают полосы в белом свете. Как указывалось в разд. 2.3, выделяющаяся среди цветных полос одна ахроматическая полоса используется в качестве индекса, по которому отсчитывают смещение одной системы полос относительно другой.

В 1963 г. изготовлен опытный образец микроинтерферометра МИИ-10, предназначенного для измерения шероховатости сравнительно грубых поверхностей в пределах от 6 до 12-го классов чистоты. В МИИ-10 контролируют не саму поверхность, а ее отпечаток (реплику) на прозрачной пленке, помещенный в специальную камеру с иммерсионной жидкостью. Благодаря этому могут быть испытаны внутренние поверхности, а также поверхности трудно доступных участков изделия. Иммерсионно-репличковым методом контролируют поверхности 6—11 классов чистоты. При контроле поверхностей 10—12 классов прибор МИИ-10 используют как обычный микроинтерферометр.

Основные требования к микроинтерферометрам установлены ГОСТ 9847—61. Главное из них — чувствительность прибора. Она должна быть не хуже 0,05 полосы. За чувствительность прибора принята величина изгиба интерференционной полосы на ступени, напыленной на стеклянной плоской пластине, выраженная в долях полосы, которая может быть видима в поле зрения прибора и измерена с помощью отсчетного устройства.

Поверхности с шероховатостью 8—9 классов чистоты измеряются двойными микроскопами с большой ошибкой (до 50% от измеряемой величины), а микроинтерферометры здесь уже не дают качественной картины.

Поэтому был разработан новый растровый измерительный микроскоп ОРИМ-1, измеряющий шероховатость 8—11 классов

чистоты. В приборе измеряется искривление муаровых полос, вызванное неровностями поверхности.

Если штрихи растров не параллельны друг другу, то возникают муаровые полосы с шагом

$$\tau = \frac{t}{\theta},$$

где t — шаг раstra;

θ — малый угол между растрами.

Смещение раstra на один шаг перпендикулярно штрихам вызывает смещение муаровых полос тоже на один шаг, причем шаг муаровых полос значительно больше шага раstra.

При местной ошибке поверхности (ее неровности) смещение муаровых полос имеет локальный характер и наблюдается в виде их искривления. Искривление полос измеряют окулярным микрометром или экранным отсчетным устройством. Ошибка при измерении 9 класса не превышает 5%.

Контроль чистоты поверхностей оптических деталей

Для определения чистоты полированных поверхностей оптических деталей, кроме шероховатости поверхности, установлены 12 классов: 3 класса чистоты (1—10; 1—20 и 1—40) для поверхностей деталей, расположенных в плоскости действительного изображения или в плоскости предмета оптической системы, из 9 классов (I—IX) чистоты для поверхностей деталей, расположенных вне плоскости изображения (ГОСТ 11145—65).

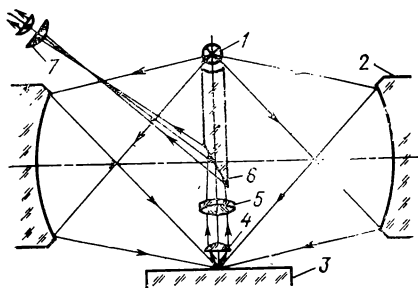


Рис. 4.8. Оптическая схема прибора для контроля чистоты полированных поверхностей оптических деталей:

1—источник света; 2—зеркальный отражатель; 3—измеряемый объект; 4, 5, 6, 7—детали микроскопа

Для первых трех классов чистота поверхности нормируется по трем зонам, ограниченным окружностями в $1/3$ и $2/3$ светового диаметра. В центральной зоне царапины, точки, пузыри и выколки не допускаются.

Подсчет и оценка дефектов по всем зонам на деталях первых трех классов должны проводиться при помощи лупы с увеличением, под которым деталь будет рассматриваться в приборе (но при увеличении не менее $6\times$), в косом пучке проходящего или отраженного света на темном фоне.

Для проведения указанных измерений разработан прибор, основную часть которого составляет широкоапертурный круговой осветитель темного поля 1, 2 со встроенным в него микро-

скопом 4—7 (рис. 4.8). Большой диапазон θ (42° — 76°) углов падения лучей, освещающих объект 3, круговое освещение и возможность наблюдения в темном поле под различными увеличениями позволяют обнаруживать дефекты размером в доли микрометра при любом их строении и ориентации.

Прибор работает по принципу построения просмотра любых зон поверхности.

Глава 5

ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

5.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Основными оптическими характеристиками стекла являются показатель преломления n_D для линии D спектра натрия ($\lambda_D = 589,3$ нм) и средняя дисперсия — разность показателей преломления для линий F ($\lambda_F = 486,0$ нм) и C ($\lambda_C = 656,3$ нм) спектра водорода (ГОСТ 3514—67). В каталогах на оптическое стекло кроме n_D и $n_F - n_C$ приводятся другие оптические постоянные: коэффициенты дисперсии, частные дисперсии, относительные частные дисперсии и показатели преломления n_λ для ряда длин волн, начиная от ультрафиолетовой и кончая ближней инфракрасной областью спектра.

Оптическое стекло изготавливается следующих марок: легкие кроны (ЛК), фосфатные кроны (ФК), кроны (К), баритовые кроны (БК), тяжелые кроны (ТК), сверхтяжелые кроны (СТК), кронфлинты (КФ), баритовые флинты (БФ), тяжелые баритовые флинты (ТБФ), легкие флинты (ЛФ), флинты (Ф), тяжелые флинты (ТФ) и особые флинты (ОФ).

Оптическое бесцветное стекло делят на классы по следующим показателям качества:

- допускаемые отклонения n_D и $n_F - n_C$ от значений, установленных для стекла каждой марки;
- однородность партии заготовок стекла по n_D и $n_F - n_C$;
- оптическая однородность;
- двойное лучепреломление;
- коэффициент светопоглощения;
- бессвильность;
- пузырность.

5.2. РЕФРАКТОМЕТРЫ

Рефрактометр ИРФ-23 типа Пульфриха нашел широкое применение в лабораториях и цехах. Принцип действия его основан на измерении предельного угла (рис. 5.1).

Лучи света, скользющие вдоль плоскости соприкосновения образца и призмы рефрактометра, входят в призму под углом полного внутреннего отражения и выходят под предельным углом выхода i (см. рис. 5.1). Показатель преломления n испытуемого образца стекла вычисляют по формуле

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 i},$$

где N — измеренный показатель преломления призмы.

Рассмотренный метод измерения на рефрактометре показателей преломления стекла с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ и дисперсий с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ регламентирован ГОСТом 3516—56.

На рис. 5.2 приведена оптическая схема рефрактометра ИРФ-23. Свет от источника линейчатого спектра 1 с помощью осветительной системы 2 направляется

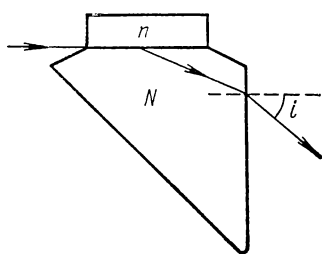


Рис. 5.1. Измерение предельного угла выхода

вдоль горизонтальной грани измерительной призмы 7. На эту грань устанавливают образец, имеющий две плоские взаимно перпендикулярные грани с точностью до $10'$. Оптический контакт между образцом и призмой обеспечивается тонким слоем жидкости с показателем преломления не меньшим, чем у образца. Клиновидность слоя жидкости между образцом и призмой не должна превышать двух интерференционных полос.

Граница светотени рассматривается через зрительную трубу, состоящую из объектива 8, призмы 9 и окуляра 13. Зрительная труба может поворачиваться относительно оси II . В фокальной плоскости окуляра 13 имеется сетка с перекрестием нитей 10, устанавливаемым при измерении на границу светотени.

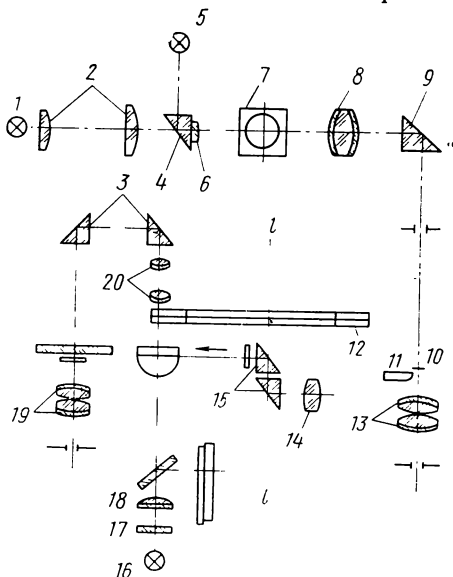


Рис. 5.2. Оптическая схема рефрактометра ИРФ-23:

1 и 5—источники света; 2, 18—конденсоры; 3, 4, 6, 9, 11, 15—призмы; 7—измерительная призма; 8, 20—объективы; 10—сетка; 12—лимб; 13—окуляр; 14—линза; 16—лампочка подсветки; 17—светофильтр; 19—окулярный микроскоп

Величину предельного угла отсчитывают по лимбу 12, жестко связанному со зрительной трубой. Шкала лимба освещается лампочкой 16 через светофильтр 17 и конденсор 18 и наблюдается в отсчетный микроскоп небольшого увеличения, состоящий из объектива 20, призм 3 и спирального окулярного микроскопа 19.

Призмменно-линзовая система 4, 6 перекрывает свет от источника 1 и направляет на призму 7 свет от источника 5.

Правильная установка призмы 7 и нулевой отсчет контролируется зрительной трубой, которую перестраивают в автоколлиматор. Перекрестие сетки 10 освещается от источника 16 с помощью призм 15, линзы 14 и призмы подсветки 11.

При измерениях на рефрактометре применяют натриевую лампу (желтая линия *D*), гелиевую разрядную трубку (желтая линия *d*), водородную разрядную трубку (красная линия *C*, голубая линия *F*) и ртутную лампу (фиолетовая линия *g* и зеленая линия *e*).

Рефрактометр ИРФ-25 мало отличается от ИРФ-23, но измеряет показатели преломления с точностью до $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Показатели преломления и дисперсию можно измерить любым интерферометром, но более широкое применение получили двухлучевые интерферометры, в которых измеряются разности показателей преломления двух веществ, помещенных в interfering пучки.

Промышленность выпускает интерферометры ИТР-1 и ИТР-2, измеряющие показатели преломления твердых, жидких и газообразных объектов методом сравнения.

На рис. 5.3 приведена оптическая схема ИТР-1, основу которой составляет схема Рэлея, где интерференционная картина возникает в результате дифракции света на двух щелях.

Источник света 1 конденсором 2 проектируется в плоскость первичной щели 3, расположенной в фокальной плоскости объектива 4. За объективом 4 в параллельных пучках установлены две щели 5. Между окнами 6 и 8 в верхней части пучка находятся жидкостные кюветы 7 или другие объекты измерения.

В пучках лучей, проходящих исследуемое и эталонное вещество, расположены две плоскопараллельные пластины: неподвижная 9 и подвижная компенсационная 10, наклоняемая при помощи рычажной передачи с микровинтом 13. На пути лучей, проходящих в нижней части схемы по воздуху, находится пластина 11, разграничивающая две интерференционные картины.

Эти две картины наблюдаются в фокальной плоскости объектива 12 с помощью окуляра большого увеличения, состоящего из цилиндрической линзы 15 и глазной линзы 16.

Неподвижная интерференционная картина, образованная нижними пучками, используется как нониальный индекс. Верх-

ние пучки, пройдя объекты с различными показателями преломления, приобретают разность хода

$$\Delta = (n_{\text{и}} - n_{\text{э}})l,$$

где $n_{\text{и}}$ и $n_{\text{э}}$ — показатели преломления исследуемого и эталонного объектов; l — длина объектов.

В результате этого верхняя интерференционная картина смещается относительно нижней. Наклоном компенсационной пластины 10 эту картину возвращают назад до совмещения с непо-

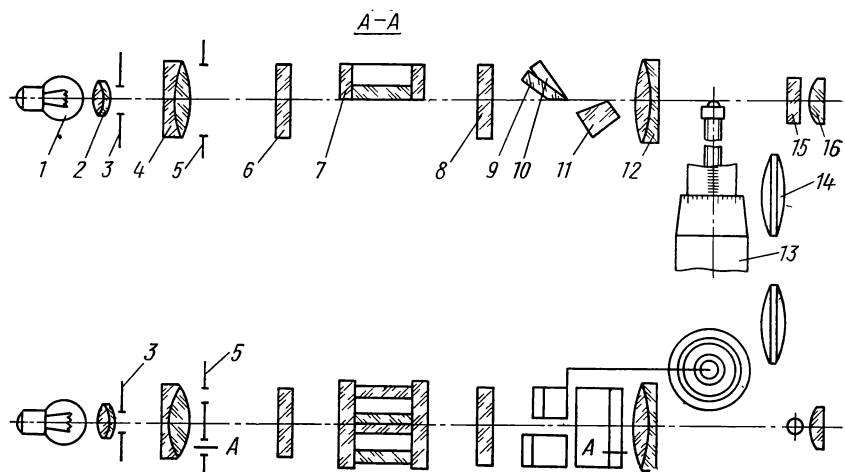


Рис. 5.3. Оптическая схема интерферометра ИТР-1:

1—источник света; 2—конденсор; 3, 5—щели; 4, 12—объективы; 6, 8—защитные окна; 7—кюветы; 9—неподвижная пластина; 10—наклонная пластина; 11—пластина, разграничивающая поля; 13—микровинт; 14—лупа; 15—цилиндрическая линза; 16—глазная линза

движной. Отсчет по барабану микромеханизма компенсатора с помощью лупы 14 определяет разность хода Δ , а через нее и разность показателей преломления.

ИТР-1 отличается малой чувствительностью к внешним воздействиям: деформации прибора приводят к смещению обеих картин, но не меняют их взаимного положения. В ИТР-1 достигается повышенная точность совмещения картин, равная $1/30$ — $1/40$ ширины полосы, что объясняется применением отсчета по нониусу.

Основное отличие интерферометра ИТР-2 от ИТР-1 в том, что он построен по автоколлимационной схеме и поэтому меньше по габаритам.

Двухлучевые интерферометры позволяют измерять показатель преломления сравниваемых образцов стекла одной марки с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Иммерсионный метод акад. И. В. Обреимова относится к интерференционным и в отличие от рассмотренных ранее является быстрым и удобным для измерения показателей преломления стекла в форме небольших осколков (или линзочек), что особенно важно для стекловаренных заводов.

Метод основан на явлении исчезновения видимости границ стекла, погруженного в иммерсионную жидкость, при длине волны монохроматического света, для которой показатели преломления жидкости и стекла между собой уравниваются (рис. 5.4). Метод сводится к измерению интерференционным способом разности показателей преломления измеряемой пробы стекла и образца сравнения. Образец и пробу помещают в кювету с иммерсионной жидкостью и с помощью монохроматора сначала определяют длину волны λ_0 , при которой исчезает видимость границ образца, а затем — длину волны λ , при которой исчезает видимость границ пробы стекла.

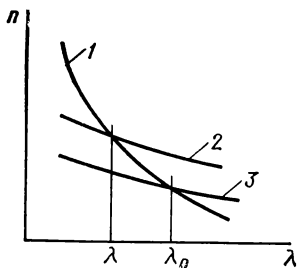


Рис. 5.4. Кривые дисперсии метода Обреимова:

1—жидкость; 2—проба; 3—образец

С изменением длины монохроматического света наблюдаются передвигающиеся через ребро образца интерференционные полосы. Разность показателей преломления пробы и образца вычисляют по формуле

$$\Delta n = n_{\text{пр}} - n_{\text{об}} = \frac{N\lambda}{S},$$

где N — число полос, прошедших через ребро образца при переходе от λ_0 к λ ;

S — толщина образца;

$n_{\text{об}}$ и $n_{\text{пр}}$ — показатели преломления образца и пробы.

Схема установки по методу Обреимова приведена на рис. 5.5. Прямоугольная кювета 3 с жидкостью, образцом 1 и пробой 2 устанавливается на пути лучей, выходящих из монохроматора 5. В качестве образца применяется плоскопараллельная пластина $2 \times 10 \times 10$ мм со скошенным углом (фаской), причем ее малая грань с фаской параллельна выходной щели 4 монохроматора. Кювета и образующаяся в ней картина наблюдаются в окуляр.

Метод Обреимова обеспечивает точность измерения показателя преломления $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ при разности показателей преломления пробы и образца не более $5 \cdot 10^{-3}$ (ГОСТ 5421—56).

Из других методов необходимо упомянуть метод призмы. При этом методе исследуемому веществу придается призматическая форма, а затем измеряются углы падения и преломления лучей, по которым вычисляется показатель преломления веще-

ства призмы. Обычно этот метод сводится к измерению преломляющего угла призмы и угла отклонения лучей, прошедших призму в минимуме отклонения.

Чтобы измерять n стекла с точностью $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ (ГОСТ 5723—51), требуется иметь гониометр-спектрометр, измеряющий углы с ошибкой не более $2''$.

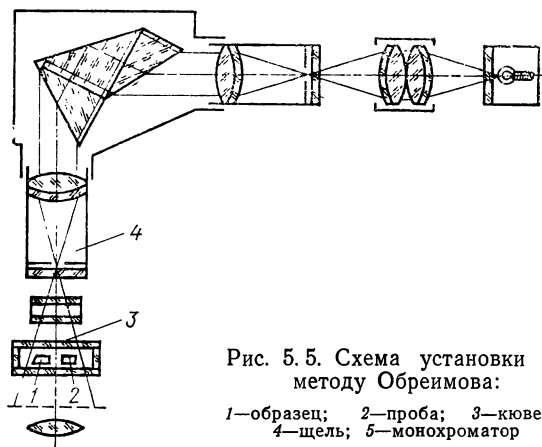


Рис. 5.5. Схема установки по методу Обреимова:

1—образец; 2—проба; 3—кювета;
4—щель; 5—монохроматор

На методе призмы основан новый рефрактометр ИФ-24. Он предназначен для измерения показателей преломления и дисперсии оптических материалов в области $0,2—15$ мкм. В частности, с помощью ИФ-24 измерены стекла, вошедшие в новый ГОСТ 13659—68.

Рефрактометр ИФ-24 представляет собой секундный автоколлимационный гониометр-спектрометр с фотоэлектрической регистрацией сигнала. Он состоит из гониометра и жестко связанного с ним инфракрасного монохроматора, причем выходная щель монохроматора является входной щелью гониометра.

5.3. УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТА СВЕТОПОГЛОЩЕНИЯ И ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

Оптическая однородность стекла измеряется на коллиматорной установке (ГОСТ 3518—69). Ее схема приведена на рис. 5.6. Установка состоит из коллиматора и зрительной трубы, снабженных объективами 3 и 6. Их фокусные расстояния не менее 600 мм, а относительные отверстия не более $1:9$. В фокальной плоскости объектива коллиматора установлена штриховая мира 2, освещенная лампочкой накаливания. Для работы в монохроматическом свете в ход лучей в осветителе включаются зеленые светофильтры. Коллиматор снабжен пятью сменными штриховыми мирами с № 1 по 5 и тремя точечными диафрагмами

диаметром от 0,007 до 0,1 мм. Зрительная труба снабжена сменными окулярами 7 с увеличением $7\times$, $10\times$ и $25\times$.

Испытуемый образец в виде круглого диска или прямоугольной плитки с полированными с двух сторон гранями и с клиновидностью не более $2'$ устанавливается на столик 5 в параллельный пучок лучей. Диаметр диафрагмы 4, установленной перед коллиматором, должен быть равен размеру проверяемого образца.

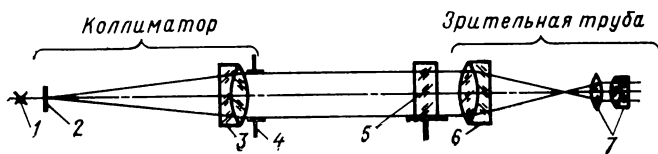


Рис. 5. 6. Схема коллиматорной установки для измерения оптической однородности:

1—источник света; 2—мира; 3, 6—объективы; 4—диафрагма; 5—образец на столике; 7—окуляр

Стекло со шлифованными поверхностями просматривают с накладными пластинами, смоченными иммерсионной жидкостью.

Штриховая мира для коллиматора подбирается в зависимости от диаметра проверяемого образца. При диаметре диафрагмы, равном диаметру образца, измеряют наименьший угол разрешения φ коллиматорной установки с испытуемым образцом и угол фактического разрешения φ_1 установки без образца. По отношению φ/φ_1 устанавливают категорию стекла.

Коллиматорная установка считается пригодной для работы, если угол φ_1 отличается от расчетного теоретического угла φ_0 не более чем на один элемент миры. Теоретический угол разрешения рассчитывают по формуле

$$\varphi_0 = \frac{120''}{D},$$

где D — диаметр диафрагмы коллиматора в мм, соответствующий диаметру светового отверстия детали.

Для стекол первой категории, кроме определения угла разрешения, который должен быть равен теоретическому углу разрешения, требуется просматривать дифракционное изображение точечной миры. Для просмотра используют микроскоп с увеличением $100\times$, устанавливаемый вместо окуляра. Дифракционное изображение точки должно состоять из светлого круглого пятна, окруженного концентрическими кольцами без разрывов и хвостов.

Точность метода измерения коэффициента светопоглощения оптического стекла равна $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ (ГОСТ 3520—51). Коэффициентом светопоглощения K называется отношение потока бе-

лого света, поглощенного в слое стекла толщиной 1 см, к потоку, вступившему в этот слой:

$$K = \frac{1}{l} \left\{ 2 \ln \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] - \ln \tau \right\},$$

где l — длина испытуемого образца стекла в см;

n — показатель преломления стекла для линии D ;

τ — коэффициент пропускания образца, равный отношению светового потока F_1 , прошедшего через образец, к падающему на него световому потоку F .

Измерение τ можно проводить на любом фотометре, обеспечивающем точность $\pm 0,5\%$, что при длине образца 10 см соответствует точности вычисления коэффициента светопоглощения, равной $\pm 0,05\%$ или $\pm 0,0005$.

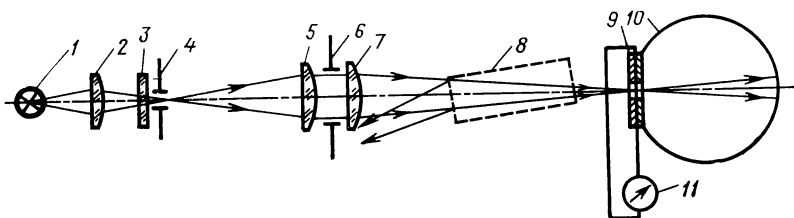


Рис. 5.7. Схема фотометрической установки для измерения светопоглощения стекла:

1—источник света; 2—конденсор; 3—светофильтр; 4—диафрагма; 5, 7—объективы; 6—диафрагма; 8—образец стекла; 9—фотоэлемент; 10—фотометрический шар; 11—микроамперметр

Образцы стекла для измерения должны иметь форму параллелепипеда $100 \times 25 \times 25$ мм, клиновидность торцев не должна превышать 2° . Длина каждого образца измеряется с точностью $\pm 0,5$ мм.

Рекомендуется измерять коэффициент пропускания с помощью объективного фотометра прямого отсчета (см. разд. 7.4), схема которого приведена на рис. 5.7.

Лампа накаливания 1, работающая от стабилизированного источника питания, через конденсор 2 освещает диафрагму 4, которая установлена в фокусе объектива 5. Перед диафрагмой находится зеленый светофильтр 3. Около объектива 5 расположена ирисовая диафрагма 6, регулирующая ширину светового пучка.

Дополнительная линза 7 изображает диафрагму 4 в своем заднем фокусе. Испытуемый образец стекла 8 устанавливают на столике так, чтобы отраженный от него свет не попадал в линзу 7.

В качестве приемника света используется фотометрический полый шар 10 диаметром 100 мм с белой матовой внутренней поверхностью. В стенку шара встроен селеновый фотоэлемент 9

площадью 10 см², имеющий в центре отверстие диаметром около 15 мм. Для измерения фототоков рекомендуется микроамперметр 11 с теневой стрелкой, типа М-91, с пределами 0—10 мА.

В комплект прибора входят четыре нейтральных образца светопропускания ($\tau=0,9; 0,8; 0,7; 0,6$), снабженных паспортом точных значений τ .

При измерении τ на фотометре прямого отсчета определяют величины двух фототоков: с образцом стекла и без него. Между фототоком и световым потоком существует линейная зависимость, поэтому τ находится как отношение указанных фототоков или отношение соответствующих показаний микроамперметра.

По измеренному τ и известным l и n по формуле рассчитывают коэффициент светопоглощения K .

По рассмотренной принципиальной схеме построен промышленный одноканальный фотометр прямого отсчета ИФ-16, обеспечивающий точность 0,05% на сантиметр образца. В последние годы появились новые стекла с поглощением меньше 0,05% на сантиметр, поэтому возникла потребность в фотометре повышенной точности.

В новом двухканальном фотометре ФМ-94 измеряется разность фототоков, прошедших через гальванометр. Фототоки соответствуют двум световым потокам, поступающим на два приемника, представляющих собой фотометрические шары с селеновыми фотоэлементами. Один поток, неизменный по величине, является потоком сравнения. Второй поток, прошедший через образец или через градуированный ослабитель (вращающиеся калиброванные секторы), меняется по величине. Так как разность фототоков на порядок меньше самих потоков, а в гальванометре используется весь предел измерения, то надежность измерения малых изменений рабочего потока возрастает. Фотометр ФМ-94 характеризуется точностью измерений светопоглощения 0,01% на сантиметр образца.

Метод измерения двойного лучепреломления на поляриметре определен ГОСТ 3519—69. Двойное лучепреломление в стекле вызывается напряжениями, возникающими от термических и механических воздействий. Двойное лучепреломление заключается в том, что луч света, входящий в образец стекла, разлагается на два луча — обыкновенный и необыкновенный, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны, а скорости распространения различны.

Для стекла скорость обыкновенного луча v_0 меньше скорости v_e необыкновенного, а показатель преломления $n_0 > n_e$. Величина двойного лучепреломления определяется разностью хода δ обыкновенного и необыкновенного лучей и выражается в мм на 1 см пути луча в стекле.

Двойное лучепреломление измеряют на поляриметре, принципиальная схема которого приведена на рис. 5.8. Осветитель

состоит из лампы накаливания 1 и матового стекла 2. Между поляризатором 3 и анализатором 6 находится образец испытуемого стекла 4 и компенсационная пластинка 5. Для наблюдения в монохроматическом свете используется зеленый светофильтр 7. Поляризатором и анализатором могут служить поляризационные призмы, поляроиды и зеркала из черного стекла, поставленные под углом полной поляризации. Компенсатор разности хода представляет собой слюдяную пластинку с разностью хода между обыкновенными и необыкновенными лучами $\lambda/4$ при $\lambda=550$ нм.

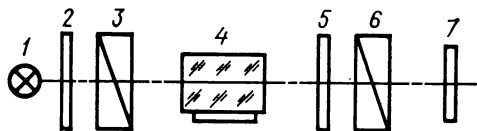


Рис. 5. 8. Схема поляриметра для измерения двойного лучепреломления:

1—источник света; 2—матовое стекло; 3—поляризатор; 4—образец стекла; 5—компенсационная пластинка; 6—анализатор; 7—светофильтр

До начала измерений плоскости поляризации анализатора и поляризатора перпендикулярны. Для этого вращают анализатор и устанавливают его на темноту, что соответствует отсчету по лимбу анализатора 0° . В пучок лучей вводят образец стекла, причем если последний обладает двойным лучепреломлением, то при наблюдении в анализатор в середине и по краям образца видны области просветления, разделенные двумя темными полосами.

Поворачивают анализатор до тех пор, пока обе темные полосы не переместятся в середину образца и не сольются в одну. По лимбу отсчитывают угол поворота анализатора. Указанная методика применяется, если разность хода в образце меньше 100 нм.

Если разность хода находится в пределах от 100 до 540 нм, то с помощью зеленого светофильтра устраняют цветовой тон в середине образца, мешающий установке анализатора на минимум освещенности.

Если разность хода больше 540 нм, то при наблюдении без светофильтра видны ряд цветных полос и две ахроматические, черные или серые. В этом случае поворот анализатора меняет окраску середины образца, но не дает полного затемнения. В ход лучей необходимо ввести светофильтр, тогда поворот анализатора приведет к перемещению полос. Отсчитывают угол поворота анализатора, соответствующий максимальному потемнению в середине образца, затем, установив анализатор на 0° и заметив без фильтра положение ахроматической полосы, вновь вводят фильтр и подсчитывают число темных полос N , расположенных между ахроматической полосой и серединой образца.

По результатам измерений вычисляют разность хода

$$\delta = 3 \frac{180N + \theta}{l},$$

где θ — угол поворота анализатора в градусах;

N — число темных полос между ахроматической полосой и серединой образца;

l — толщина образца в направлении просмотра в см.

Отечественной промышленностью выпускаются поляризископы-поляриметры ПКС-56 и ПКС-125. Они построены по принципиальной схеме рис. 5.8 и обеспечивают высокую точность измерения двойного лучепреломления до ± 3 нм на всей толщине образца.

Глава 6

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Спектральные приборы широко применяются в металлургии, химии, астрономии, биологии и многих других областях науки и техники для анализа состава вещества измерением спектра излучения, испускаемого или поглощаемого веществом. При помощи спектрального прибора измеряют и регистрируют спектраль-

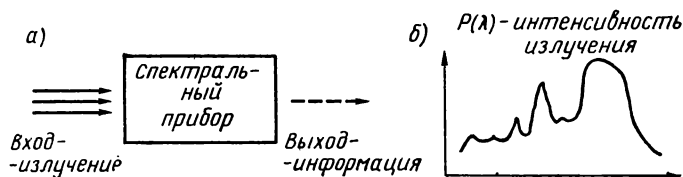


Рис. 6.1. Принципиальная схема спектрального прибора:

а — блок-схема спектрального прибора; б — зависимость интенсивности излучения от длины волны

ный состав излучения, т. е. зависимость интенсивности излучения от длины волны (рис. 6.1, а, б).

Принцип работы оптического спектрального прибора основан на упорядоченном расположении в пространстве света различных длин волн. Это достигается с помощью дисперсионных или интерференционных элементов, используемых в спектральном приборе. Спектральные приборы радиодиапазона построены по принципиально иной схеме, использующей генератор электромагнитных колебаний с плавноперестраиваемой частотой. С созданием лазеров этот принцип начинает переноситься и в оптическую (инфракрасную, видимую, ультрафиолетовую) область. Однако в данной книге мы ограничимся рассмотрением только оптических спектральных приборов, работающих по классической схеме.

Разнообразие спектральных приборов во многом связано с разнообразием видов спектрального анализа. Рассмотрим их кратко.

6.1. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРАЛЬНОГО ПРИБОРА

Оптическая схема спектрального прибора приведена на рис. 6.2.

Входная щель 1, освещаемая исследуемым излучением, находится в фокальной плоскости коллиматорного объектива 2, направляющего лучи в диспергирующее устройство 3. Последнее отклоняет лучи на различные углы β в зависимости от длины волны излучения λ , превращая параллельный пучок от каж-

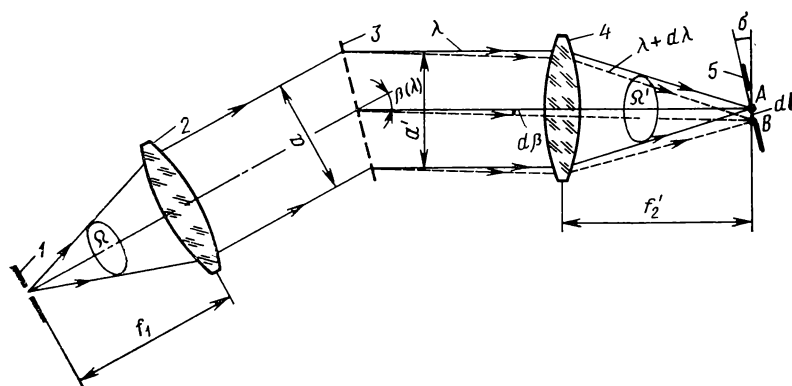


Рис. 6.2. Оптическая схема спектрального прибора:

1—входная щель; 2—объектив входного коллиматора; 3—диспергирующая система; 4—объектив выходного коллиматора; 5—фокальная поверхность объектива выходного коллиматора

дой точки щели в «веер» монохроматических параллельных пучков. Основными диспергирующими элементами в спектральных приборах являются призма, дифракционная решетка и эталон Фабри-Перо. В последнее время вместе с решетками начал применяться интерферометр Майкельсона. Фокусирующий объектив 4 создает в своей фокальной плоскости 5 монохроматические изображения щели, совокупность которых и образует спектр. Поверхность изображения 5 может быть плоской или цилиндрической.

Для приборов с ахроматизированной фокусирующей оптикой фокальная плоскость или касательная к фокальной поверхности расположена под углом ϵ к оптической оси, близким к 90° . В остальных случаях угол ϵ значительно отличается от 90° .

В некоторых случаях отдельные элементы оптической схемы могут отсутствовать. Иногда диспергирующий элемент устанавливается не в параллельных, а в расходящихся или сходящихся

пучках лучей. Тогда отсутствуют соответственно объектив 2 или объектив 4. В приборах с вогнутой дифракционной решеткой неги коллиматорного, ни фокусирующего объектива, так как их функции выполняются самой решеткой. Наконец, может отсутствовать входная щель (бесщелевые спектрографы).

В оптическую систему спектрального прибора входит осветительная часть с источником излучения и приемно-регистрирующая с приемником лучистой энергии. Осветительная система обычно представляет собой линзовый или зеркальный конденсор, проектирующий изображение источника на входную щель коллиматора.

Конденсорные системы бывают чаще всего однолинзовые и трехлинзовые. В качестве однолинзовых конденсорных систем используются сферические, цилиндрические и сфероцилиндрические линзы. Недостаток этого способа освещения — неравномерность освещения щели по высоте. Поэтому

однолинзовые системы используются при качественном спектральном анализе. Более широкое распространение получила трехлинзовая конденсорная система (рис. 6.3), которую применяют при источнике света с неравномерной яркостью. Поэтому однолинзовые системы используются при качественном спектральном анализе. Более широкое распространение получила трехлинзовая конденсорная система (рис. 6.3), которую применяют при источнике света с неравномерной яркостью.

Источник излучения 1 линзой 2 проектируется на линзу 4, перед которой установлена диафрагма 3. Назначение линзы 4 — дать изображение линзы 2 на щели 6, равномерно ее освещая.

Для устранения диафрагмирования внутри спектрального прибора служит антивиньетирующая линза 5, расположенная непосредственно перед щелью 6 и дающая изображение диафрагмы 3 на объективе коллиматора. Трехлинзовая конденсорная система применяется при количественном спектральном анализе, где необходимо соблюдение условия равномерного освещения щели и ее изображения по всей площади.

Для инфракрасной области спектра, а в последние годы также для видимой и ультрафиолетовой областей применяют зеркальные осветительные системы.

Схема приемной части прибора определяется методом регистрации спектра. При визуальной регистрации приемная часть представляет собою зрительную трубу; при фотографической — фотокамеру. При фотоэлектрическом методе регистрации в выходной фокальной поверхности устанавливаются одна или несколько щелей, за которыми располагаются приемники излучения, чаще всего фотоэлементы, фотоумножители, фотоспротив-

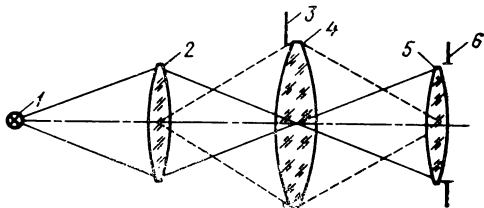


Рис. 6.3. Оптическая схема трехлинзовой конденсорной системы:

1—источник излучения; 2, 4, 5—линзы; 3—диафрагма; 6—входная щель спектрального прибора

ления, болометры или термоэлементы. Возникающий в фотоприемнике фототок, пропорциональный интенсивности падающего на него светового потока, подается на усилитель и измеряется стрелочным прибором или записывается самописцем.

6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Спектральные приборы различаются: 1) по способу регистрации спектра (визуальный, фотографический, фотоэлектрический); 2) по способу спектрального разложения излучения (призменные, дифракционные, интерференционные); 3) по рабочей области спектра (ультрафиолетовая, видимая, инфракрасная); 4) по назначению (приборы для эмиссионного спектрального анализа, для исследования комбинационного рассеяния и т. д.).

Конструкция и схема спектрального прибора определяются способом регистрации. В приборах с фотографической регистрацией — спектрографе в фокальной поверхности фокусирующего камерного объектива размещается фотопластина или фотопленка, на которой одновременно регистрируется вся исследуемая область спектра.

Длинноволновая граница работы спектрографов (~ 1 мкм) определяется пределом спектральной чувствительности современных фотоэмульсий.

Приборы для визуального наблюдения спектров (спектроскопы) могут использоваться лишь в области длин волн 380—760 нм, причем на краях этой области применение их малоэффективно ввиду слабой чувствительности глаза в фиолетовой и красной частях спектра.

Спектральные приборы с фотоэлектрическими или тепловыми приемниками энергии излучения называют спектрометрами или спектрофотометрами. Последние служат для абсорбционного количественного анализа и являются двухлучевыми приборами. В спектрофотометре сравниваются два монохроматических пучка, один из которых проходит через исследуемое вещество, а другой — через эталон. Основная часть спектрометра или спектрофотометра, включающая входную щель, коллиматорный и фокусирующий объективы, диспергирующее устройство и выходную щель, представляет собой монохроматор.

Монохроматор выделяет одновременно только одну спектральную линию или один достаточно узкий спектральный интервал. Поэтому для проведения измерений в широком участке спектра необходимо последовательное изменение длины волны излучения, направляемого на выходную щель (сканирование спектра). Это осуществляется разворотом диспергирующего устройства (призмы или дифракционной решетки) относительно падающего пучка лучей.

6.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Увеличение оптической системы

В спектральном приборе входная щель расположена вертикально. Горизонтальная плоскость симметрии, перпендикулярная направлению щели, называется меридиональной плоскостью [12].

Вертикальная плоскость, содержащая ось щели, будет сагитальной. Пусть ширина пучка, входящего в диспергирующее устройство (призму, дифракционную решетку), в меридиональном сечении равна a . В общем случае из диспергирующего устройства 3 выходят монохроматические пучки шириной $a' \neq a$ (см. рис. 6. 2).

В этом сечении призма или решетка действуют как телескопическая система с угловым увеличением

$$\Gamma = \frac{a}{a'}, \quad (6. 1)$$

которое называется меридиональным увеличением.

Линейное увеличение оптической системы спектрального прибора в сечениях меридиональном (в направлении дисперсии призмы или решетки) и в сагитальном. (в направлении высоты щели) неодинаково. Если f_1 и f_2' — фокусные расстояния коллиматорного и фокусирующего объективов, s_1 и h_1 — ширина и высота входной щели 1, то ширина s_1' и высота h_1' ее изображения в фокальной плоскости объектива 4 равны соответственно:

$$\begin{aligned} s_1' &= \frac{\Gamma s_1 f_2'}{f_1}; \\ h_1' &= \frac{h_1 f_2'}{f_1} \end{aligned} \quad (6. 2)$$

Поле зрения

Условия работы двух объективов спектрального прибора неодинаковы: через коллиматорный объектив проходит не разложенное в спектр излучение, а на фокусирующий объектив направляется веер параллельных пучков различных длин волн. Входная щель 1, помещенная в фокальной плоскости объектива 2, изображается им в бесконечности (см. рис. 6. 2). Этот объектив обладает полем зрения только в сагитальном сечении. Если высота щели h_1 , то угол поля зрения коллиматорного объектива равен $2W_1 = h_1/f_1$. При $h_1 \ll f_1$ допустимо считать $\text{tg } W_1 \cong W_1$. Так как ширина щели $s_1 \ll h_1$, то в меридиональном сечении можно считать $2\omega = 0$.

В спектральном приборе с неподвижной выходной щелью 5 фокусирующий объектив 4 также не обладает полем зрения в меридиональном сечении, а в направлении высоты щели его угол поля зрения

$$2W_2 = \frac{h'_1}{f'_2},$$

и, вследствие соотношения (6. 2), $W_2 = W_1$. Условия работы коллиматорного и фокусирующего объективов отличаются тем, что через объектив 2 излучение различных длин волн проходит одновременно, а через другой — поочередно, по мере изменения положения диспергирующей системы относительно падающего на нее пучка лучей. Поэтому в разные моменты времени на выходной щели находятся изображения входной щели, образованные лучами разных длин волн.

В спектральном приборе монохроматические изображения входной щели находятся в разных местах фокальной поверхности. В этих приборах фокусирующий (камерный) объектив обладает полем зрения и в меридиональном сечении. Пусть $2l_m$ — длина спектра, σ — угол наклона поверхности изображения (см. рис. 6. 2). Тогда угол поля зрения $2\omega_2$ фокусирующего объектива в меридиональном сечении определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{l_m \cos \sigma}{f'_2} \quad (6. 3)$$

Дисперсия

Дисперсия является величиной, характеризующей крутизну зависимости угла отклонения светового пучка в приборе от длины волны. Различают дисперсию угловую и линейную.

Угловая дисперсия есть характеристика диспергирующего устройства. Если лучи двух близких длин волн λ и $\lambda + d\lambda$ отклоняются этими устройствами на углы β и $\beta + d\beta$ соответственно, то угловая дисперсия определяется как отношение $\frac{d\beta}{d\lambda}$, где $d\beta$ — угол между лучами с длинами волн λ и $\lambda + d\lambda$. Линейная дисперсия является характеристикой прибора в целом. Пусть $AB = dl$ есть расстояние на поверхности изображения между двумя близкими спектральными линиями, разность длин волн которых равна $d\lambda$ (рис. 6. 2). Тогда линейная дисперсия находится как производная $\frac{dl}{d\lambda}$

Угловая и линейная дисперсии прибора связаны соотношением

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f_2'}{\cos \sigma} \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (6.4)$$

где f_2' — фокусное расстояние объектива выходного коллиматора.

Чаще всего пользуются понятием обратной линейной дисперсии $\frac{d\lambda}{dl}$, выражаемой в мкм/мм, нм/мм.

В инфракрасной спектроскопии нередко вместо длин волн излучения λ пользуются обратными величинами — волновыми числами

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda},$$

которые измеряются в см⁻¹.

Интервал волновых чисел $\Delta\tilde{\nu}$, соответствующий малому интервалу длин волн $\Delta\lambda$, равен

$$\Delta\tilde{\nu} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

или

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\tilde{\nu}}{\tilde{\nu}^2} \quad (6.5)$$

Угловую и линейную дисперсии также можно выражать в шкале волновых чисел:

$$\frac{d\beta}{d\tilde{\nu}} = \lambda^2 \frac{d\beta}{d\lambda}$$

и

$$\frac{dl}{d\tilde{\nu}} = \lambda^2 \frac{dl}{d\lambda}, \quad (6.6)$$

Предел разрешения и разрешающая способность

Чем больше дисперсия прибора, тем больше расстояние между изображениями щели для различных длин волн. Однако знания одной дисперсии еще недостаточно для того, чтобы определить будут ли две соседние линии наблюдаться раздельно. В приборе с размытым изображением линий они представляются в виде одной линии, тогда как в другом приборе с хорошим изображением они будут видны раздельно («разрешены»), хотя дисперсия этого прибора может быть значительно меньше.

Важной характеристикой спектрального прибора является **предел разрешения**, определяемый как наименьшая разность длин волн $\delta\lambda$ или волновых чисел $\delta\tilde{\nu}$ двух монохроматических спек-

ральных линий равной интенсивности, которые наблюдаются раздельно.

Предел разрешения $\delta\lambda$, обусловленный волновой природой света и физическими свойствами диспергирующего элемента, называется **теоретическим пределом разрешения**. Это определение справедливо для идеального спектрального прибора. Для такого прибора Рэлей предложил считать, что две спектральные линии одинаковой интенсивности находятся на пределе разрешения, если главный максимум дифракционного изображения одной из линий совпадает с первым минимумом в изображении

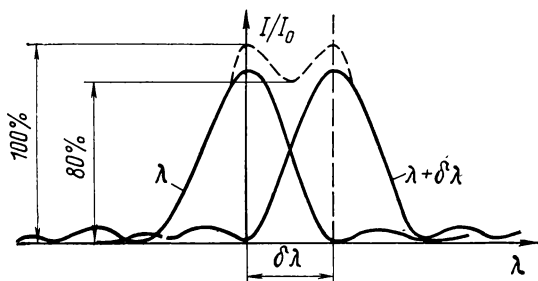


Рис. 6.4. Разрешение двух монохроматических линий

другой линии; при этом суммарная освещенность посередине между линиями равна 80% освещенности в главных максимумах (рис. 6.4).

Отношение

$$r = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\tilde{\nu}}{\delta\tilde{\nu}} \quad (6.7)$$

называют **разрешающей способностью** (или разрешающей силой) идеального спектрального прибора. Основные причины ухудшения качества изображения спектральных линий, влияющие на величину предела разрешения прибора:

- дифракция света;
- конечные размеры входной и выходной диафрагм;
- абберации оптической системы прибора;
- несовершенство изготовления оптических деталей и юстировки отдельных узлов и всего прибора в целом;
- инерционность приемно-регистрирующей системы (в сканирующих спектральных приборах).

Чем меньше размеры входной и выходной диафрагм (чем уже щели прибора), тем выше предел разрешения прибора. Однако минимальные размеры диафрагм ограничиваются дифракционными явлениями. Минимальное значение ширины входной щели, когда дифракционным уширением еще можно пренебречь, называется «нормальной» шириной щели s_H .

«Нормальная» ширина щели, определяющая линейный предел разрешения прибора, равна

$$s_n = \lambda \frac{f_1}{a}, \quad (6.8)$$

где λ — длина световой волны;

f_1 — фокусное расстояние коллиматорного объектива;

a — ширина входного действующего отверстия прибора*.

Линейный предел разрешения δl — расстояние, на котором две линии разрешаются, — равен ширине геометрического изображения нормальной щели s'_n и в общем случае определяется выражением

$$\delta l = s'_n = \frac{\lambda f'_2}{a' \cos \sigma}, \quad (6.9)$$

где a' — ширина выходного действующего отверстия прибора (ширина диспергированного пучка лучей).

Тогда спектральный предел разрешения равен

$$\delta \lambda = \frac{s'_n}{dl/d\lambda},$$

а разрешающая способность равна

$$r = \frac{\lambda}{\delta \lambda} = \frac{\lambda}{s'_n} \cdot \frac{dl}{d\lambda}.$$

Выражая s'_n и $dl/d\lambda$ по формулам (6.9) и (6.4), получим выражение разрешающей силы по Рэлею через ширину диспергированного пучка и угловую дисперсию

$$r = a' \frac{d\beta}{d\lambda}. \quad (6.10)$$

6.4. ПРИЗМЕННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В качестве диспергирующих элементов в спектральных приборах широко используются призмённые системы. Призма является основным элементом оптической части прибора, поэтому рассмотрим ее характеристики [1. 2].

Ход лучей в главном сечении призмы

Световой пучок, проходя через трехгранную призму и отклоняясь к ее основанию, разлагается на монохроматические составляющие. При этом пучки с меньшей длиной световой волны отклоняются сильнее. В основе этого явления лежит зависи-

* В спектральном приборе действующим отверстием является обычно рабочая грань призмы или заштрихованная часть дифракционной решетки.

мость показателя преломления материала призмы от длины световой волны, т. е. дисперсия материала.

В спектральном приборе каждая призма устанавливается так, чтобы линия пересечения ее преломляющих граней (преломляющее ребро) была параллельна щели. Плоскость, перпендикулярная преломляющему ребру призмы, называется **плоскостью главного сечения призмы**. Двугранный угол A , образуемый двумя рабочими гранями трехгранной призмы (рис. 6.5), называется **преломляющим углом призмы**.

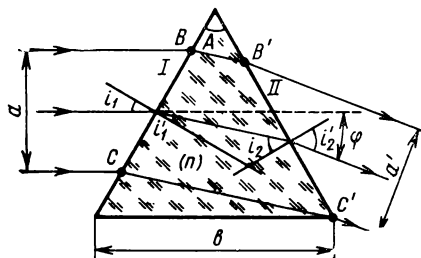


Рис. 6.5. Ход лучей в призме в главном сечении

Как правило призмы устанавливаются в параллельных пучках лучей. Поэтому для характеристики дисперсионных свойств призмы достаточно рассмотреть ход одного из лучей падающего на нее пучка.

Обозначим через i_1 и i_2 углы падения луча на грани I и II соответственно, через i_1' и i_2' — углы преломления на этих гранях. Угол φ , образованный направлением падающего и вышедшего из призмы луча, называется **углом отклонения**. Ход луча в главном сечении можно рассчитать по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sin i_1' &= \frac{\sin i_1}{n}; \\ i_2 &= A - i_1'; \\ \sin i_2' &= n \sin i_2, \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

где n — показатель преломления материала.

Луч после прохождения через призму отклоняется в сторону ее основания на угол φ , равный

$$\varphi = i_1 + i_2' - A. \quad (6.12)$$

Угол отклонения φ есть функция трех переменных: показателя преломления n , преломляющего угла A и угла падения i_1 на первую грань. При данном угле падения i_1 угол φ возрастает как с увеличением угла A , так и с увеличением n . Показатель преломления, в свою очередь, зависит от длины волны λ . Для всех прозрачных веществ он возрастает с уменьшением длины волны. Поэтому коротковолновое излучение сильнее отклоняется призмой, чем длинноволновое.

Для данных A и n угол отклонения принимает минимальное значение φ_0 при симметричном ходе лучей в призме, т. е. при

$$i_1 = i'_2 = i_0 \text{ и } i'_1 = i_2 = \frac{A}{2}. \quad (6.13)$$

Тогда

$$\varphi = \varphi_0 = 2i_0 - A, \quad (6.14)$$

где

$$\sin i_0 = n \sin \frac{A}{2}. \quad (6.15)$$

При данном φ_0 значение угла A может быть найдено из соотношения

$$\operatorname{tg} \frac{A}{2} = \frac{\sin(\varphi_0/2)}{n - \cos \frac{\varphi_0}{2}}$$

При установке призм в минимуме отклонения угловое увеличение $\Gamma = 1$ и поэтому нет дополнительного уширения изображения щели.

Угловая дисперсия призмы

Угловая дисперсия призмы определяется как производная угла отклонения φ по длине волны λ . Изменение угла φ от длины волны связано с изменением показателя преломления n материала призмы

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{dn} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (6.16)$$

где $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ — угловая дисперсия призмы.

Первый сомножитель $\frac{d\varphi}{dn}$ в первой части уравнения (6.16) — безразмерная величина, определяемая ходом луча в призме. Вторым сомножителем $\frac{dn}{d\lambda}$ называется дисперсией вещества и является характеристикой материала призмы. Величина $\frac{d\varphi}{dn}$ зависит от n , преломляющего угла A и от угла падения лучей на первую грань, но не зависит от линейных размеров призмы. Она равна

$$\frac{d\varphi}{dn} = \frac{\sin A}{\cos i'_1 \cos i'_2}. \quad (6.17)$$

Так как в соответствии с (6.13) $i'_1 = \frac{A}{2}$, то для минимума отклонения (6.17) дает

$$\left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_0 = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} . \quad (6.18)$$

Тогда угловая дисперсия призмы в минимуме отклонения

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{A}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{A}{2}}} \frac{dn}{d\lambda} . \quad (6.19)$$

Производная $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ возрастает с увеличением показателя n и угла A . Поэтому с целью получения большей угловой дисперсии выгоднее применять призмы с большими преломляющими углами из материалов с большими значениями n . Но преломляющий угол можно увеличить лишь в ограниченных пределах, т. к. при этом увеличиваются углы i_1 и i'_2 , что приводит к возрастанию потерь на отражение, и, кроме того, может произойти полное внутреннее отражение на второй грани призмы. Таким образом, значение угла A должно удовлетворять условию

$$\sin \frac{A}{2} < \frac{1}{n}$$

Показатель преломления для всех прозрачных материалов изменяется с длиной волны нелинейно. Поэтому угловая дисперсия одной и той же призмы в разных областях спектра имеет значения, сильно отличающиеся друг от друга. Если система состоит из нескольких одинаковых диспергирующих призм, установленных в минимуме отклонения, то дисперсия пропорциональна числу призм.

Разрешающая способность призмы

Как было указано ранее (ф-ла 6.10) разрешающая способность спектрального прибора с безабберационной оптикой определяется шириной диспергированного пучка a' и угловой дисперсией $\frac{d\beta}{d\lambda}$:

$$r = a' \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (6.20)$$

Пусть $BB' = b_1$ и $CC' = b_2$ — наименьшая и наибольшая длина пути лучей в главном сечении призмы (см. рис. 6.5). Тогда

$$a' = \frac{(b_2 - b_1) \cos i'_1 \cos i'_2}{\sin A} \quad (6.21)$$

Принимая во внимание (6.16) и (6.17), получим

$$r = (b_2 - b_1) \frac{dn}{d\lambda}.$$

Для призмы в минимуме отклонения, полностью заполненной светом, $b_1 = 0$, $b_2 = b$ и

$$r = b \frac{dn}{d\lambda}. \quad (6.22)$$

Таким образом, разрешающая способность призмы пропорциональна размеру основания призмы и дисперсии ее материала.

Материалы для спектральных призм

При выборе материала для призм решающую роль играют его оптические свойства: область прозрачности, показатель преломления n и дисперсия вещества $\frac{dn}{d\lambda}$. Так как последняя величина определяет угловую дисперсию призмы и ее теоретическую разрешающую способность, желательно иметь большие значения $\frac{dn}{d\lambda}$. С другой стороны, при больших n велики потери на отражение и нельзя делать призмы с большими углами A . Необходимо принимать во внимание и такие свойства материалов, как двойное лучепреломление, однородность, возможность механической обработки, влагоустойчивость.

В видимой области спектра прозрачны оптические стекла всех марок, но для изготовления призм применяют флинт и тяжелые флинты, которые обладают наибольшей дисперсией. Они прозрачны примерно от 0,36 мкм.

В ультрафиолетовой области чаще всего используют кристаллический и плавленый кварц (SiO_2), который прозрачен примерно от 0,2 мкм.

Фтористый литий (LiF) и флюорит (CaF_2) — дорогие искусственно выращиваемые кристаллы, при небольшой толщине прозрачны вплоть до 0,11—0,13 мкм. Они могут быть использованы в далекой ультрафиолетовой области.

В ультрафиолете прозрачны и другие щелочно-галогенидные кристаллы: каменная соль (NaCl), сильвин (KCl), бромистый калий (KBr). Все они гигроскопичны, мягки, трудно обрабатываются, менее однородны, чем кварц, фтористый литий и флюо-

рит, и применение их для изготовления призм в ультрафиолетовой области нецелесообразно.

В ближней инфракрасной области спектра также прозрачны все стекла, кварц и кристаллы:

LiF , CaF_2 , BaF_2 , NaCl , KCl , KBr , KRS-5 (смесь бромистого и иодистого таллия), CsI . Кроме фтористых солей, влагустойчив только KRS-5 , но он ядовит и вследствие высокого показателя преломления ($n=2,4$) дает большие потери на отражение. Кроме того, в инфракрасной области прозрачны до 10—15 мкм такие материалы, как кремний ($n=3,4$), германий ($n \approx 4$). Непрозрачность в видимой области этих материалов затрудняет юстировку приборов, очень высокие значения n и дороговизна таких кристаллов ограничивают их применение для изготовления оптических деталей.

При работе в широкой области длин волн использование какого-либо одного материала нецелесообразно: хорошая прозрачность и большая дисперсия — требования, которые одновременно трудно удовлетворить, так как кривая дисперсии имеет большую крутизну в той части спектра, где уже заметно поглощение, и наоборот, в области наибольшей прозрачности материала дисперсия его незначительна. Поэтому в конструкции прибора должна быть предусмотрена смена призм при переходе от одного участка спектра к другому.

Призменные приборы с фотографической и фотоэлектрической регистрацией

Рассмотрим в качестве примера спектрограф ИСП-30 — прибор с фотографической регистрацией спектра, предназначенный для количественного и качественного эмиссионного спектрального анализа и других спектроскопических исследований (рис. 6. 6).

Входная щель 1 установлена в фокусе объектива коллиматора 2, в качестве которого используется сферическое зеркало с $f_1=703$ мм, относительным отверстием $A_1=1:17,6$. Объектив 4 состоит из двух кварцевых менисков с общим фокусным расстоянием $f_2'=830$ мм при $\lambda=257,3$ нм (объектив камеры неахроматичен) и относительным отверстием $A_2=1:27$ при той же длине волны. Кварцевая призма 3 имеет преломляющий угол 60° , основание $b=47$ мм и высоту $H=30$ мм.

Линейное увеличение прибора $\beta = \frac{f_2'}{f_1}$ меняется от $1,2\times$ до $1,5\times$ вдоль спектра вследствие неахроматичности объектива камеры. Для сокращения габаритов прибора используется плоское зеркало 5. Фотопластинка 6 устанавливается в фокальной плоскости объектива 4 камеры и наклонена на 42° к оптической оси

прибора. Спектрограф снабжен реле времени, автоматически закрывающем затвор на входной щели после заданной экспозиции.

Рабочий диапазон длин волн $200 \div 600$ нм, длина спектра — 220 мм, диаметр объектива коллиматора — 40 мм, диаметр объектива камеры — 38 мм. Обратная линейная дисперсия $d\lambda/dl = 2,5$ нм/мм для $\lambda = 360$ нм.

Примером прибора с фотоэлектрической регистрацией спектра может служить призмный инфракрасный спектрометр

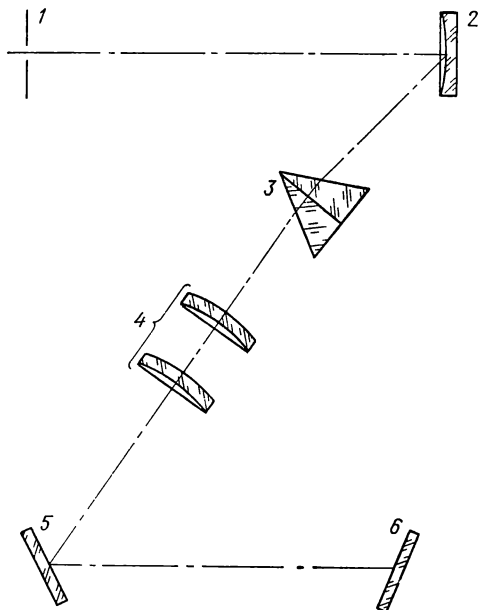


Рис. 6. 6. Оптическая схема спектрографа ИСП-30:

1—входная щель; 2—объектив коллиматора; 3—диспергирующая призма Корню; 4—объектив камеры; 5—плоское зеркало; 6—фотографическая пластинка

ИКС-21 (рис. 6. 7). Полный рабочий диапазон прибора $0,75 \div 45$ мкм. В коротковолновой области спектра (до 2,6 мкм) используется призма из стекла Ф-1. При работе в диапазоне $2 \div 15$ мкм вместо зеркала Литрова 19 в приборе устанавливается реплика (копия) дифракционной решетки с 200 штрих/мм, которая работает вместе с призмой из NaCl. Длинноволновая область спектра обеспечивается использованием призм из кристаллов КВг и CsI. Разрешение при $\tilde{\nu} = 1000$ см⁻¹ составляет $2,5 \div 3,2$ см⁻¹.

Монохроматор прибора построен по автоколлимационной схеме, в которой пучок лучей дважды проходит через призму 18 и объектив 16. Изображение источника 1, которым служит глобар, проектируется осветителем (3, 4, 5, 6, 7) на входную щель монохроматора 9 с увеличением $1,3\times$ и заполняет апертуру объектива 16.

Параллельный пучок лучей белого света от объектива 16 падает на призму 18, разлагается ею на монохроматические составляющие и, отражаясь от плоского зеркала 19 (или реплики), вновь проходит через призму 18, объектив 16 и попадает в выходную щель 11.

Изображение выходной щели 11 проектируется на приемник энергии излучения 14, в качестве которого используется висмутовый болометр. Пороговый поток приемника — $2 \cdot 10^{-10}$ Вт при

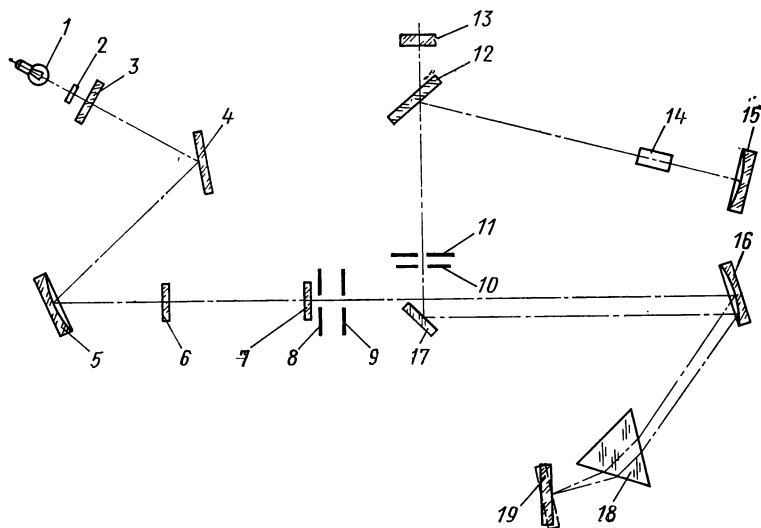


Рис. 6. 7. Оптическая схема спектрометра ИКС-21:

1—источник света; 2—модулятор; 3, 6—защитные окна осветителя; 5—сферическое зеркало; 7—входное защитное окно монохроматора; 8, 10—диафрагмы; 9, 11—входная и выходная щели монохроматора; 4, 12, 17—плоские зеркала; 13—защитное окно; 14—приемник энергии излучения; 15—эллиптическое зеркало; 16—объектив монохроматора (внеосевое параболическое зеркало); 18—диспергирующая призма; 19—зеркало Литрова или реплика эшелетты

ширине полосы пропускания усилительного тракта 1 Гц и частоте модуляции 9 Гц. Усиленный фототок регистрируется электронным потенциометром ЭПП-09.

Спектр сканируется поворотом автоколлимационного зеркала (или реплики) 19. Для снижения влияния рассеянного света на результаты измерений излучение источника 1 промодулировано модулятором 2, частотой 9 Гц (в диапазоне 4,0—12,0 мкм в качестве модулятора используются пластины из стекла, в области 12—45 мкм — из флюорита). В приборе устанавливаются фильтры 7 из стекла (в области 5—8 мкм), LiF (10—17 мкм), NaCl (17—30 мкм) и KCl (30—45 мкм).

Основные достоинства автоколлимационной схемы — ее простота и хорошее качество изображения спектра, так как объективом 16 служит внеосевое параболическое зеркало с фокусным

расстоянием 270 мм и действующим относительным отверстием $1:4,5$. В этом случае точка щели 9, находящаяся на оси параболоида 16, изображается без аберраций. Ширина параллельных пучков до и после дисперсии одинакова $a=a'$ (см. рис. 6. 5), так что меридиональное увеличение призмы $\Gamma=1$, и аберрации оптической системы равны удвоенным аберрациям зеркала 16 для параллельных пучков, а диспергирующая призма 18 вызывает лишь искривление спектральных линий.

Для компенсации кривизны спектрального и аберрационного уширения щели конструктивные элементы оптики монохроматора выбраны таким образом, чтобы для определенной длины волны дисперсионная и аберрационная кривизны были одинаковы по величине, но противоположны по знаку. При этом одна кривизна компенсируется другой, и при этой длине волны получается симметричное изображение щели. Знаки обоих видов кривизны зависят от взаимного положения призмы и внеосевого зеркала: они противоположны, если основание призмы ближе к оси параболоида, чем ее вершина (см. рис. 6. 7).

6.5. ПРИБОРЫ С ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

Получение спектров с помощью дифракционной решетки

Приборы с дифракционными решетками получили большое распространение, особенно в далеких ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, где трудно подобрать (а иногда и вовсе невозможно) прозрачные материалы для изготовления призм. Решетки бывают прозрачные и отражательные, плоские и вогнутые.

Наибольшее распространение получили ступенчатые отражательные плоские решетки — эшелетты, позволяющие концентрировать максимум дифрагированного света в заданном направлении. Отражательная решетка — эшелетт представляет собой совокупность узких равноотстоящих параллельных зеркальных полосок с треугольным профилем штриха (рис. 6. 8). Такие решетки устанавливаются, как правило, в параллельных пучках лучей, выходящих из коллиматорного объектива.

При падении на эшелетт параллельного пучка лучей на каждой зеркальной площадке происходит дифракция, как на узкой щели. Пучки лучей, дифрагированные на всех элементах решетки, интерферируют между собой, так как имеют разность хода. При этом световой пучок сложного спектрального состава превращается во множество монохроматических пучков различных длин волн, каждый из которых имеет свое направление. Дифракционная картина от одного зеркального элемента накладывается на распределение, получающееся при интерференции света от N рабочих элементов решетки. Дифракционная картина наблюдается в фокальной поверхности выходного объектива.

Рассмотрим случай, когда параллельный пучок лучей падает на плоскую отражательную решетку (см. рис. 6.8). На рисунке введены следующие обозначения: P — нормаль к поверхности решетки, P' — нормаль к рабочей грани, δ — угол нарезки (угол «блеска»).

Определим разность хода лучей Δ' на одном рабочем элементе решетки. Лучи 1 падающего волнового фронта приходят

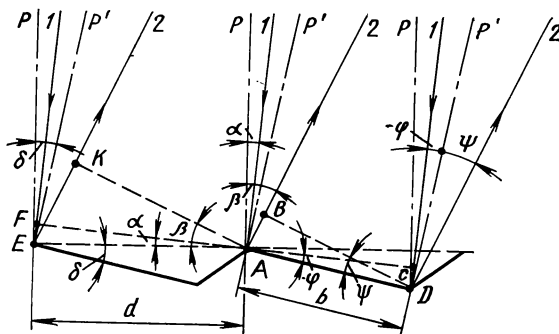


Рис. 6.8. Дифракция на плоской отражательной дифракционной решетке

в точку D позднее, чем в точку A . Разность хода между ними, определяемая отрезком CD , равна

$$\Delta'_1 = b \sin(-\varphi) = -b \sin \varphi, \quad (6.23)$$

где b — ширина рабочей грани решетки;

φ — угол падения лучей на рабочую грань зеркального элемента решетки.

Лучи 2 дифрагированного волнового фронта для точек A и B приобретают разность хода

$$\Delta'_2 = b \sin \psi, \quad (6.24)$$

где ψ — угол дифракции лучей на рабочей грани решетки. Углы падения и дифракции будем считать положительными, если они получаются вращением нормали P' по часовой стрелке.

Суммарная разность хода между падающими и дифрагированными лучами в точках A и D равна

$$\Delta' = \Delta'_1 - \Delta'_2 = -b(\sin \varphi + \sin \psi). \quad (6.25)$$

Разность хода лучей $\Delta = EF + EK$, дифрагированных от двух соседних зеркальных элементов, равна

$$\Delta = d(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (6.26)$$

где d — расстояние между соседними штрихами (постоянная решетки);

α и β — углы падения и дифракции соответственно на поверхности решетки (отсчитываются от нормали P).

Формула (6.26) определяет характерные углы дифракции β , соответствующие главным дифракционным максимумам. Эти максимумы получаются из условия

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = \pm k\lambda, \quad (6.27)$$

где $k=1, 2, 3 \dots$

Соотношение (6.27) является основным уравнением дифракционной решетки. Как видно из этого соотношения, каждому углу β при постоянных α и k соответствует определенная длина волны λ . Поэтому имеет место спектральное разложение.

Если на решетку падает монохроматическое излучение, в фокальной плоскости выходного коллиматорного объектива получается ряд монохроматических изображений, соответствующих различным значениям k . Если же падающее излучение имеет сложный спектральный состав, то, как видно из формулы (6.27), при данном угле падения α для каждого k угол дифракции β есть функция длины волны. Таким образом, каждому значению k соответствует отдельный спектр k -го порядка.

Только для $k=0$ получается не разложенное в спектр изображение щели, называемое спектром нулевого порядка. В этом случае, независимо от длины волны, $\beta = -\alpha$, что соответствует отражению от решетки как от плоского зеркала.

Порядок k будем считать **положительным**, если дифрагированные в данном порядке лучи образуют с нормалью угол, который получается при вращении последней по часовой стрелке (рис. 6.9).

Существенно, что в отличие от призмы, которая дает только один спектр, дифракционная решетка дает одновременно несколько спектров различных порядков.

Поскольку при заданных углах α и β уравнению (6.27) удовлетворяют несколько значений длины волны λ , соответствующих разным k , спектры различных порядков (кроме нулевого) налагаются друг на друга: углы дифракции β одинаковы для всех спектральных линий, для которых произведение $k\lambda = \text{const}$, т. е. $k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$.

Этот недостаток устраняется двумя способами: 1) использованием светофильтров, отсекающих мешающее излучение; 2) при-

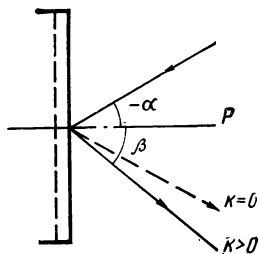


Рис. 6.9. Правило знаков для углов падения, дифракции и порядков спектра решетки

менением скрещенной дисперсии. К дифракционной решетке, разлагающей излучение в спектр в меридиональной плоскости, добавляют второй диспергирующий элемент, например призму, разлагающую это же излучение в спектр в сагиттальной плоскости. При этом налагающиеся линии разных длин волн разделяются теперь по вертикали и вместо одной строчки спектра получается несколько строчек, каждой из которых будет соответствовать свой порядок спектра.

При дифракции в направлении угла блеска δ (рис. 6.8) решетка дает максимальную интенсивность света. Условие зеркального отражения от ступеньки можно представить в виде

$$\delta - \alpha = \beta - \delta \text{ или } \alpha + \beta = 2\delta. \quad (6.28)$$

При автоколлимационной установке решетки, когда $\alpha = \beta$, условие (6.28) примет вид

$$\alpha = \beta = \delta, \quad (6.29)$$

Основное уравнение решетки при этом можно представить в виде

$$2d \sin \delta = k\lambda. \quad (6.30)$$

Если бы решетка имела произвольный профиль штрихов, то световая энергия распределялась бы на все дифракционные порядки. Это снизило бы светосилу прибора. Поэтому создают решетки с концентрацией энергии в нужном рабочем порядке спектра. Это обеспечивается заранее рассчитанным профилем штриха решетки.

Максимальная концентрация света современных решеток составляет 70—80%. Выбор d и δ ограничивается технологией изготовления решеток.

В серийных спектральных приборах используются главным образом отражательные решетки с 1200, 600, 300, 200, 100 штрих/мм для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра. Угол δ в таких решетках обычно не превышает 25—30°, в уникальных — достигает 60—65°.

Вогнутые решетки, которые одновременно служат и фокусирующим устройством, используются в дальней вакуумной и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Это позволяет исключить из спектрографа коллиматорный и камерный объективы.

Дисперсия решетки

Дифференцированием основного уравнения решетки (6.27) по длине волны λ , полагая угол падения лучей α постоянным

для всех длин волн, можно получить выражение для угловой дисперсии решетки:

$$d \cos \beta d\beta = k d\lambda$$

или

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \beta}. \quad (6.31)$$

Таким образом, в спектрах разных порядков решетка дает различную угловую дисперсию, тем большую, чем выше порядков спектра k . Дисперсия пропорциональна числу штрихов на 1 мм ($N_1 = 1/d$) и возрастает с увеличением угла дифракции β . С точки зрения повышения дисперсии выгодно работать в высоких порядках спектра, однако из-за наложения порядков это неудобно. Поэтому стремятся работать в низких порядках спектра, а для повышения дисперсии следует уменьшать постоянную решетки d при большом общем количестве штрихов N .

Линейная дисперсия прибора с дифракционной решеткой определяется зависимостью

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda} f'_2 = \frac{k}{d \cos \beta} f'_2. \quad (6.32)$$

Она мало меняется для различных участков спектра данного порядка, но существенно зависит от порядка спектра k . Для того чтобы работать в различных порядках спектра, которые налагаются друг на друга, необходимо определить «свободный спектральный интервал» $\Delta\lambda$ — диапазон длин волн, заключенный в интервале между двумя соседними порядками одной и той же длины волны. Из основного уравнения решетки (6.27) при постоянных значениях углов α и β имеем $\lambda \Delta k = k \Delta\lambda$, откуда при $\Delta k = 1$ получим

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k}. \quad (6.33)$$

Чем больше k , тем короче $\Delta\lambda$.

Разрешающая способность решетки

Разрешающая способность решетки

$$r = \frac{l}{\delta\lambda} = N = k \frac{B}{d}, \quad (6.34)$$

где $\delta\lambda$ — расстояние между двумя длинами волн λ_1 и λ_2 , при котором дифракционный максимум интенсивности для λ_1 совпадает с дифракционным минимумом для λ_2 (критерий Рэлея);

$B = Nd$ — база решетки.

Следовательно, разрешающая способность решетки пропорциональна порядку спектра k и общему числу штрихов решетки N .

ки N , участвующих в дифракции. Таким образом, увеличить разрешающую способность решетки можно, увеличивая размеры решетки B или используя большие углы падения и дифракции, т. е. работая в высоких порядках спектра.

Дифракционные монохроматоры и спектрофотометры

Рассмотрим в качестве примера дифракционный монохроматор МДР-2, предназначенный для выделения монохроматического излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Монохроматор построен по схеме Фасти с z -образным ходом лучей (рис. 6.10).

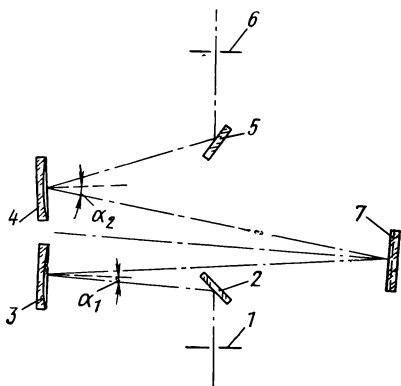


Рис. 6.10. Оптическая схема монохроматора МДР-2:

1—входная щель монохроматора; 2, 5—плоские зеркала; 3—объектив входного коллиматора; 4—объектив выходного коллиматора; 6—выходная щель монохроматора; 7—дифракционная решетка

Излучение от источника через осветительную систему (на рисунке не показана) попадает во входную щель 1 и, отразившись от плоского зеркала 2, заполняет апертуру объектива входного коллиматора 3.

Далее параллельный пучок лучей попадает на дифракционную решетку 7 и разлагается ею на монохроматические составляющие. Для данного положения решетки 7 излучение длиной волны λ фокусируется объективом выходного коллиматора 4 с помощью плоского зеркала 5 в плоскости выходной щели 6. Длина волны излучения, выделяемого монохроматором,

изменяется разворотом решетки.

Схемы монохроматоров с z -образным ходом лучей дают хорошее качество изображения спектра, так как зеркала 3 и 4 расположены таким образом, что их абберационные характеристики имеют разные знаки. При этом, если зеркала имеют одинаковые параметры, их абберации компенсируются.

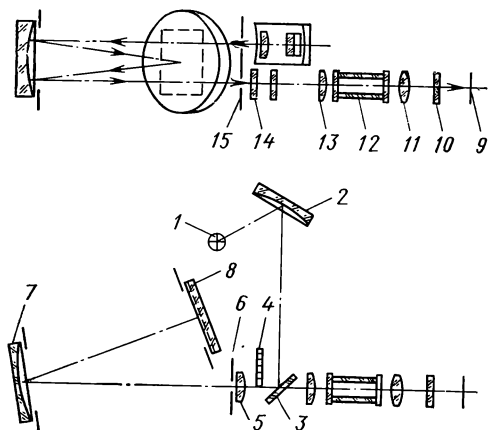
В монохроматоре МДР-2 в качестве объективов 3 и 4 используются параболические зеркала с фокусным расстоянием 400 мм. Применение параболических зеркал, у которых сферическая абберация для точек, находящихся на оси системы, отсутствует, дало возможность увеличить относительное отверстие прибора до 1:2,5. Спектральный диапазон работы монохроматора от 0,2 до 2,5 мкм обеспечивается тремя сменными дифракционными решетками с 1200, 600 и 300 штрих/мм. Обратная линейная дисперсия меняется от 2 до 8 нм/мм.

Для измерения зависимости пропускания или оптической плотности различных веществ от длины волны применяются спектрофотометры, в которых используется фотометрический метод с точностью отсчета до 0,1 %.

Сущность метода спектрофотометрии заключается в том, что монохроматические световые потоки, прошедшие через вещество, сравниваются с такими же потоками, прошедшими через эталон. Так, например, световой поток, прошедший через раствор, сравнивается при той же длине световой волны с потоком, прошед-

Рис. 6.11. Оптическая схема спектрофотометра СФД-2:

1—источник света; 2—эллиптический конденсор; 3—плоское зеркало; 4—сменные светофильтры; 5, 11, 13—кварцевые линзы; 6—входная щель монохроматора; 7—внеосевое параболическое зеркало (объектив); 8—реплика плоской дифракционной решетки; 9—фотоэлемент; 10, 14—защитные пластинки; 12—кювета; 15—выходная щель монохроматора



шим через растворитель. Отношение этих потоков численно равно светопропусканию T растворенного вещества при данной длине волны, а поглощение растворенного вещества $A = 1 - T$.

Спектрофотометр состоит из источника света со сплошным спектром, монохроматора, кюветной части, где устанавливаются исследуемый и эталонный образцы, и приемника энергии излучения. Все спектрофотометры делятся на однолучевые и двухлучевые, а также на нерегистрирующие и регистрирующие или автоматические.

В нерегистрирующих приборах определение поглощения производится «по точкам»: измеряются поочередно монохроматические световые потоки, прошедшие через исследуемое вещество и через эталон, изменяют длину волны проходящего света на некоторую небольшую величину, снова производят измерение и т. д.; по полученным точкам строят кривую поглощения. В приборах второго типа измерение длины волны и запись отсчетов производятся автоматически, обычно пером самописца на бумаге. Из нерегистрирующих спектрофотометров широко известен дифракционный спектрофотометр с зеркальной оптикой СФД-2 (рис. 6.11), который предназначен для измерения пропускания или оптической плотности жидких и твердых прозрачных веществ относительно эталона, в качестве которого используется

воздух. Отношение световых потоков, прошедших через образец и воздух при очередном помещении их в один и тот же пучок монохроматических лучей, определяется методом компенсации фототока на входе усилителя и отсчитывается по шкале пропускания отсчетного потенциометра.

Прибор построен по однолучевой автоколлимационной схеме и предназначен для работы в области 0,22—1,0 мкм.

Излучение от источника 1 фокусируется эллиптическим конденсором 2 на входной щели 6, отразившись предварительно от плоского зеркала 3 и пройдя кварцевую линзу 5. Осветительная система, включающая элементы 1, 2, 3, 5, имеет увеличение 5 $\times$. Входная щель 6 расположена в фокальной плоскости внеосевого параболического зеркала — объектива 7. Параллельные пучки лучей объективом 7 направляются на реплику плоской дифракционной решетки 8. Дифрагированные на реплике лучи объективом 7 собираются в его фокальной плоскости, где установлена выходная щель 15, за которой располагается защитная кварцевая пластина 14 и сменные светофильтры 4. Светофильтры служат для отсекаания спектров высоких порядков дифракционной решетки. Кроме того, уменьшается величина рассеянного излучения. Далее лучи проходят кварцевую линзу 13, кювету 12 с образцом или эталоном, линзу 11, защитную пластинку 10 и падают на катод фотоэлемента 9. Реплика (600 штрих/мм) концентрирует энергию в области 0,3 мкм. Переход от одной области спектра к другой осуществляется поворотом реплики. В области 0,22—0,65 мкм используется сурьмяно-цезиевый фотоэлемент Ф-4 с окном из увиолевого стекла, а в области 0,6—1,0 мкм — кислородно-цезиевый фотоэлемент Ф-5. Источниками излучения служат лампы: водородная, ртутная и накаливания. Относительное отверстие оптической системы монохроматора 1:10. Фокусное расстояние зеркального объектива 500 мм. Обратная линейная дисперсия монохроматора 3,2 нм/мм при работе в первом порядке спектра.

Глава 7

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

7.1. ОСНОВЫ ФОТОМЕТРИИ

Фотометрия представляет раздел физической оптики, охватывающий теорию и практику измерений интенсивности потоков излучения. При фотометрических измерениях наиболее широко используется область видимого излучения, т. е. свет. Основной характеристикой интенсивности света является световой поток, т. е. мощность световой энергии, а производными — яркость, сила света, освещенность и др.

В фотометрии интенсивность света обычно измеряется не в абсолютных, а в относительных единицах. Абсолютные световые измерения сложны тем, что требуют предварительной градуировки приемников света по эталонным источникам света, трудно воспроизводимым в измерительной лаборатории.

В соответствии с применяемыми приемниками света методы фотометрии и фотометры делятся на три группы: визуальные, фотографические и электрические (фотоэлектрические, термоэлектрические и др.).

В визуальных фотометрах в качестве приемника используется глаз наблюдателя, его способность сравнивать яркость двух световых полей, видимых одновременно. В фотографических методах фотометрии используется фотохимическое действие света при освещении фоточувствительного слоя. Сами фотометрические измерения связаны здесь со сравнением почернения эмульсий и осуществляются с помощью визуальных или электрических фотометров.

В электрических фотометрах используют приемники, реагирующие на световые потоки возникающими в их цепи электрическими токами или разностью потенциалов.

В настоящее время визуальные и фотографические методы применяются ограниченно. Они недостаточно точны и поэтому вытесняются электрическими методами.

В схему фотометра, кроме источника света, входят светофильтры или монохроматор, измерительные ослабители света, приемники света и индикаторы (гальванометры, осциллографы и др.).

Для точных фотометрических измерений источники света должны обладать стабильным излучением, приемники света должны иметь стабильные во времени фотометрические характеристики, не зависящие от интенсивности, частоты и состояния поляризации световых потоков, надежными в работе должны быть и другие узлы фотометра.

Светоослабляющие устройства предназначены для закономерного изменения интенсивности света по возможности без изменения его спектрального состава.

Наиболее точным является устройство, основанное на законе квадратов расстояний. Из этого закона следует, что освещенности двух поверхностей E_1 и E_2 , отстоящих от источника света на расстояниях r_1 и r_2 , обратно пропорциональны квадратам этих расстояний, т. е.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

Закон квадратов расстояний строго справедлив для точечных источников. Для реальных источников его точность достаточно высока, если поперечные размеры источника меньше расстоя-

ния до освещаемой поверхности в 10 и более раз. Указанное устройство не меняет спектрального состава света и отличается высокой точностью изменения интенсивности, которая зависит от точности измерения расстояний. Все остальные светоослабляющие устройства градуируют с помощью закона квадратов расстояний.

Простое светоослабляющее **устройство основано на законе косинусов**: освещенность прямо пропорциональна косинусу угла между направлением светового потока и нормалью к освещаемой поверхности. Это устройство обладает неравномерной чувствительностью по изменению интенсивности света и применяется в простых визуальных фотометрах. Применение совместно с некоторыми фотоэлементами недопустимо, так как их характеристики зависят от угла падения света.

Вращающиеся секторы применяют для ступенчатого или плавного изменения времени действия света на инерционный приемник (глаз) или фотопластинку. В первом случае изменяется кажущаяся яркость источника, наблюдаемого через секторный вырез вращающегося диска, а во втором — изменяется количество освещения.

При частоте прерывания света 100 Гц и более субъективно воспринимаемая яркость источника B связана с истинной яркостью B_0 соотношением

$$B = B_0 \frac{n\alpha}{360},$$

где α — угол секторного выреза в градусах;

n — число вырезов в диске.

Если частота прерывания выше 100 Гц, то точность светоослабляющего устройства с вращающимся диском зависит от точности выполнения вырезов и не зависит от стабильности его вращения. Такие устройства не меняют спектра источника и применяются в качестве эталонов, обладающих стабильным коэффициентом пропускания.

Устройство с поляризаторами применяется для плавного изменения интенсивности света и состоит из двух поляризационных призм или двух дихроичных поляроидов.

Интенсивность прошедшего через поляризаторы света определяется законом Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где I_0 — максимальная интенсивность прошедшего света;

φ — угол между оптическими осями призм или поляроидов.

Устройство характеризуется неравномерной чувствительностью к изменению интенсивности света, которая максимальна при $\varphi = 45^\circ$. Призмное устройство почти не меняет спектра источника, у поляроидов селективность пропускания достигает заметной величины.

Диафрагмы применяются для ослабления светового потока путем его ограничения. Диафрагмы устанавливаются непосредственно за источником света или в плоскости входного зрачка системы. Они позволяют плавно изменять световой поток пропорционально изменению площади диафрагмы.

Недостатком диафрагм является изменение геометрической структуры пучка света (его сечения). Поэтому лучшими считаются осесимметричные диафрагмы, например, круглые (ирисовые) и квадратные. На рис. 7.1 приведена симметричная штор-

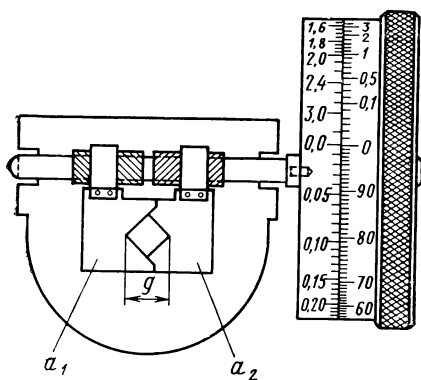


Рис. 7.1. Симметричная квадратная диафрагма

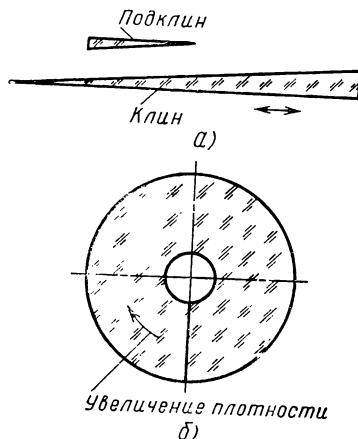


Рис. 7.2. Фотометрические клинья:
а—линейный; б—круговой

ковая диафрагма с квадратным сечением. Шторки a_1 и a_2 укреплены на микрометренном винте, имеющем правую и левую резьбу, благодаря чему сечение g отверстия меняется симметрично.

Общеизвестные ирисовые диафрагмы не получили широкого распространения для точного изменения потока, так как обладают большими ошибками, чем шторковые.

Фотометрические клинья ослабляют световой поток путем его поглощения. Широкое применение в фотометрии нашли линейные и круговые нейтральные клинья (рис. 7.2). Линейные клинья обычно выполняют из нейтрально серого стекла и они обладают постоянным приращением оптической плотности на единице длины клина.

Чтобы исключить неравномерность плотности по пучку света и превратить ослабитель в плоскопараллельную пластину, к подвижному большому клину добавляется неподвижный подклин из того же светопоглощающего стекла.

Круговые клинья выполняют методом напыления светопоглощающего слоя с равномерно меняющейся плотностью на стеклянную пластину.

7.2. ПРИБОРЫ ВИЗУАЛЬНОЙ ФОТОМЕТРИИ

Визуальный фотометр имеет одну или две испытательные пластинки, устройство для изменения освещенности этих пластинок, устройство для образования полей сравнения и зрительную трубу или окуляр для наблюдения этих полей.

Испытательная пластинка применяется для того, чтобы глаз наблюдателя не видел непосредственно источник света, а видел

равномерно освещенную этим источником поверхность. Пластика должна быть белой, матовой и равнорекостной по всем направлениям. Материалом для пластинок могут служить гипс, окись магния, углекислый магний и другие с коэффициентом отражения от 0,92 до 0,99.

Устройства для изменения освещенности рассмотрены в разд. 7.1.

Устройства для образования полей сравнения должны отвечать следующим требованиям:

сравниваемые поля должны разграничиваться тонкой линией, исчезающей при равенстве яркостей;

поля должны быть безструктурными, одноцветными и равномерно освещенными;

угловые размеры полей должны укладываться в пределах от $2,5$ до 3° при их яркости от 5 до 250 кд/м².

В качестве устройств для образования полей сравнения применяются кубики Льюмера — Бродхуна, бипризма Френеля, зеркала и др.

На рис. 7.3 показан один из вариантов кубика Льюмера — Бродхуна с контрастными полями сравнения. Нижняя призма кубика является обычной призмой полного внутреннего отражения. На диагональной грани верхней призмы сделаны выемки малой глубины: их контур заштрихован и обозначен цифрой II. Вне поля выемок диагональные грани призм имеют оптический контакт. Пучки света I и II, идущие от испытательных пластинок, проходят через кубик в местах оптического контакта, создавая поле I, и отражаются от диагональной плоскости, образуя поле сравнения II. На пути световых пучков, образующих трапециевидные участки полей сравнения, устанавливаются про-

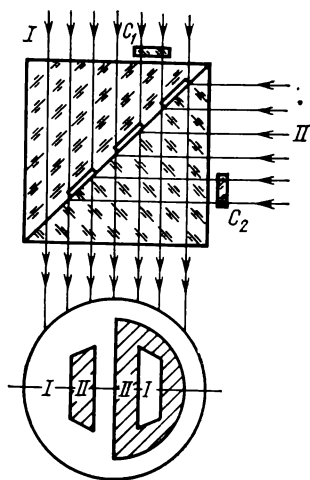


Рис. 7.3. Фотометрический кубик с контрастными полями сравнения

зрачные стеклянные пластинки C_1 и C_2 ($\rho=8-9\%$). Поэтому наблюдатель видит трапеции всегда несколько темнее своего поля сравнения.

Яркости полей сравнения равны тогда, когда исчезает граница между основными полями и когда в этих полях контраст трапеций одинаков. Такой кубик дает возможность провести измерения с ошибкой не более $\pm 0,25\%$.

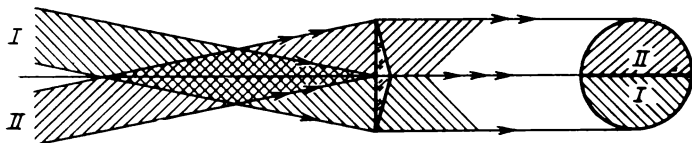


Рис. 7.4. Бипризма Френеля в параллельных пучках

На рис. 7.4 изображена бипризма Френеля и ход параллельных пучков через нее. Ребро тупого угла призмы создает линию раздела полей сравнения, поэтому здесь не должно быть фаски. На рис. 7.4 параллельные пучки на выходе из призмы идут соприкасаясь. Это положение пучков позволяет рассчитать их наклон до призмы по ее преломляющему углу или решить обратную задачу.

Визуально-фотоэлектрический фотометр ФМ-58

Фотометр ФМ-58 предназначен для измерения коэффициентов отражения, пропускания или оптической плотности твердых и жидких прозрачных сред, а также для колориметрических и спектрофотометрических работ как визуальным, так и фотоэлектрическим методами.

Оптическая схема фотометра приведена на рис. 7.5. Прибор состоит из двух частей: осветителя и фотометрической головки.

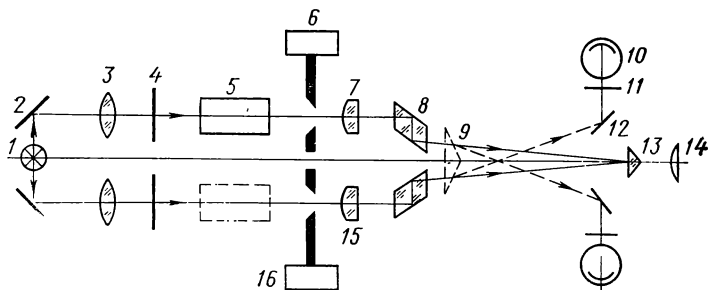


Рис. 7.5. Схема универсального фотометра ФМ-58:

1—источник света; 2, 12—зеркала; 3—конденсоры; 4—молочные стекла; 5—испытуемый образец; 6, 16—отсчетные барабаны диафрагм; 7, 15—объективы; 8, 9—призмы; 10—фотоэлементы; 11—матовые стекла; 13—бипризма Френеля; 14—окуляр

Осветитель состоит из лампы накаливания 1, двух зеркал 2 и двух конденсоров 3. В гнезда осветителя вставляются молочные или матовые стекла 4, создающие равномерно рассеянный свет. Фотометрическая головка представляет двойную зрительную трубу с полем зрения $1^{\circ}45'$. Перед объективами 7 и 15 помещены две переменные диафрагмы с квадратными отверстиями. Диафрагмы имеют отсчетные барабаны 6 и 16 с двумя шкалами. Черная шкала проградуирована от 0 до 100 и служит для отсчетов коэффициентов пропускания τ в %. Красная шкала оптической плотности D связана со шкалой τ соотношением:

$$D = -\lg \tau.$$

Два световых пучка, упавших на диафрагмы, сводятся оптической системой головки — объективами 7 и 15, ромбическими призмами 8 и бипризмой Френеля 13 в одно поле зрения в виде круга, разделенного ребром бипризмы пополам. Яркость левой половины поля зрения зависит от действия правой ветви прибора, а яркость правой половины — от действия левой ветви прибора. Глаз наблюдателя помещается за окуляром 14 в выходном зрачке трубы.

Перед измерением прибор настраивают на одинаковую яркость полей при одинаковых отсчетах на барабанах. Для этого вынимают молочные стекла 4 и регулировкой положения лампы и конденсоров добиваются равномерного заполнения полей сравнения изображениями нити лампы. Затем стекла 4 возвращают на место, а оба барабана устанавливают на отсчет 100 (почти полное открытие диафрагм).

В одну из ветвей помещается испытуемый образец 5, а в другую закрывают диафрагму до уравнивания яркостей полей. Отсчет по черной шкале дает τ_1 , а по красной D_1 . Затем измерение повторяют, но образец помещают в другую ветвь, и снимают отсчеты τ_2 и D_2 . Окончательные значения τ или D получают как средние двух отсчетов:

$$\tau = \sqrt{\tau_1 \tau_2} \text{ и } D = \frac{1}{2} (D_1 + D_2).$$

Измерение коэффициентов отражения ρ осуществляют сравнением потоков, отраженных от испытуемой поверхности и баритовой белой пластины с эталонным значением ρ_0 .

Для спектрофотометрирования, т. е. измерения $\tau = f(\lambda)$, применяется набор из 8 светофильтров, устанавливаемых перед окуляром, с длинами волн от 403 до 726 нм.

Для работы фотоэлектрическим методом в ход лучей включается преломляющая призма-клин 9, направляющая свет на зеркала 12, матовые стекла 11 и сурьмяно-цезиевые фотоэлементы 10. Фотоэлементы включены по дифференциальной схеме через усилитель на нулевой гальванометр. При измерении необхо-

можно привести стрелку гальванометра к нулю, изменяя величину световых потоков измерительными диафрагмами. Отсчеты, как и при визуальном методе, снимаются с барабанов диафрагм.

Погрешность измерения τ на фотометре ФМ-58 визуальным способом не менее $\pm 3\%$, а фотоэлектрическим способом $\pm 1\%$.

7.3. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФОТОМЕТРЫ

Фотоэлектрические фотометры по световой характеристике приемника делят на два типа. У фотометров первого типа световая характеристика приемника имеет хорошо выраженный линейный ход.

В простейшем случае фотометр первого типа («фотометр прямого отсчета») состоит из вентильного фотоэлемента и гальванометра, измеряющего фототок. Сила тока зависит от величины светового потока, его спектрального состава и спектральной чувствительности приемника.

В большинстве фотометров спектральный состав света при измерениях не меняется, а спектральная чувствительность приемника приведена к спектральной чувствительности глаза. Тогда между световым потоком и фототоком устанавливается пропорциональность и шкала гальванометра может градуироваться непосредственно в светотехнических единицах: люменах, канделах, люксах и др.

На рис. 7.6 приведена схема микрофотометра МФ-2, работающего по принципу прямого отсчета. Микрофотометры МФ-2 и МФ-4 (с дополнительной регистрирующей системой) широко применяются в лабораториях при измерении плотности почернения малых по размеру участков фотопластинок, на которые сфотографированы спектральные линии, интерференционные полосы, теневые картины и т. п.

МФ-2 имеет две части: фотометрическую и отсчетную. Фотометрическая часть проектирует световой пучок, проходящий через исследуемый участок фотопластинки, на приемную площадку фотоэлемента. Свет лампы накаливания 6, расположенной в кожухе 7, конденсором 5, призмой 4 и объективом 3 собирается на фотопластинке 1. Изображение фотопластинки объективом 2 и зеркалом 25 проектируется с увеличением $20\times$ на белый матовый экран, в центре которого установлена щелевая диафрагма 19. Объектив 17 через фотометрический круговой клин 20 переносит световой поток на приемную площадку фотоэлемента 18. Величина этого потока пропорциональна пропусканию того участка фотопластинки, который проектируется на щель 19.

Величина фототока измеряется зеркальным гальванометром, причем его зеркало 11 входит в отсчетную часть МФ-2. Шкала 9, нанесенная на сетке 10, освещается конденсором 8 и проектируется объективом 12, зеркалом гальванометра 11, призмой 13,

объективами 14, 15 и зеркалом 23 на матовый экран 24 с увеличением $20\times$.

При повороте зеркала гальванометра изображение шкалы на экране смещается относительно указателя. Смещение шкалы линейно связано с фототоком, а значит и с потоком. Поэтому шкала τ микрофотометра линейна, а шкала D — нелинейна.

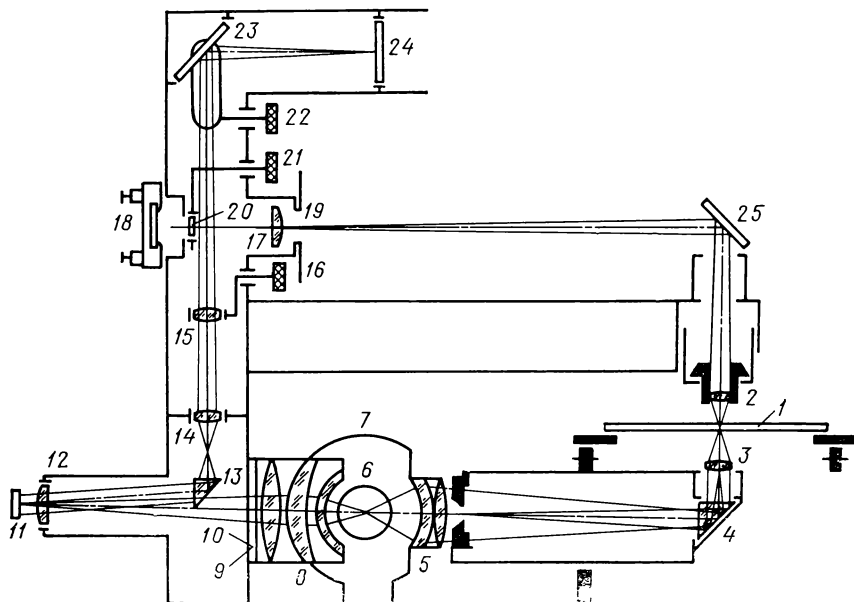


Рис. 7. 6. Схема микрофотометра МФ-2:

1—фотопластинка; 2, 3—микрообъективы; 4, 13—призмы; 5, 8—конденсоры; 6—источник света; 7—кожух; 9—шкала; 10—сетка; 11—зеркало гальванометра; 12, 14, 15, 17—объективы; 16, 21, 22—рукоятки; 18—фотоэлемент; 19—щель; 20—круговой клин; 23, 25—зеркала; 24—матовый экран

При настройке прибора световой поток регулируется фотометрическим клином 20, а положение шкалы на экране — рукоятками 16 и 22 (последние связаны с перемещением и наклоном оптических элементов отсчетной системы).

В фотометрах первого типа, к световой характеристике и чувствительности которых предъявляются жесткие требования, применяют вакуумные фотоэлементы и фотоумножители. У них световая характеристика линейна в широком диапазоне изменения светового потока; их выходное сопротивление велико, что удобно для последующего усиления фототока; они почти безынерционны до частот 10^8 Гц.

На рис. 7. 7 приведена оптическая схема фотометра прямого отсчета АФМ, предназначенного для фотометрирования постоянных источников света. Прибором измеряют силу света и на-

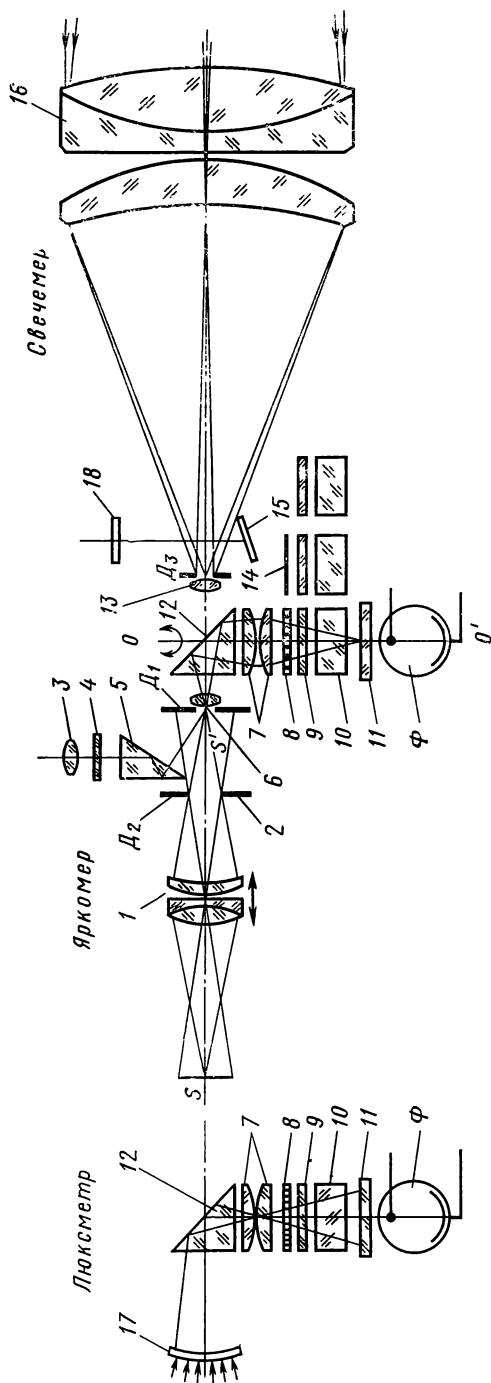


Рис. 7.7. Схема фотометра АФМ:

1—объектив яркомера; 2—диафрагма; 3—линза; 4—нейтральный светофильтр; 5—призма; 6, 13—коллективы; 7—кондensor; 8, 9—нейтральные светофильтры; 10—цветные светофильтры; 11—молочное стекло; 12—призма; 14—шторка; 15—зеркало; 16—объектив свечемера; 17—молочное стекло; 18—защитная пластинка; D_1 , D_2 , D_3 —диафрагмы; Φ —фотоэлемент

правленный световой поток источников, яркость светящихся и освещенных объектов, освещенность. Фотометр АФМ нашел широкое применение в лабораториях предприятий, НИИ, вузов.

Фотометр состоит из трех основных частей: свечемера, яркомера и люксметра. Все три части фотометра имеют общий приемник света — мультищелочной фотоэлемент *Ф*, а также общие призму *12*, конденсатор *7*, нейтральные *8*, *9*, цветные *10* светофильтры, молочное стекло *11* и шторку *14*. Конденсор *7* изображает диафрагму *Д*₁ объектива яркомера *1* и диафрагму *Д*₃ объектива свечемера *16* на молочном стекле *11*.

В свечемере свет от измеряемого источника проходит объектив *16*, установленную в его фокусе диафрагму *Д*₃, коллектив *13* и попадает в призму *12* общей системы и далее на фотоэлемент. Зеркало *15* с защитным стеклом *18* используется для наведения прибора на источник света.

Объектив *16* и диафрагма *Д*₃ обеспечивают телецентрический ход лучей со стороны источника света и постоянный телесный угол лучей, выходящих из каждой точки источника и проходящих через диафрагму *Д*₃, равный $\omega = \frac{\pi d^2}{4f'^2}$, где *d* — диаметр диафрагмы *Д*₃; *f'* — фокусное расстояние объектива *16*.

Световой поток, выходящий из диафрагмы и регистрируемый фотоэлементом, пропорционален силе света источника в направлении оптической оси и не изменяется при перемещении источника в пределах конуса с телесным углом ω , который опирается на объектив *16*. Для АФМ наибольшее удаление источника при сохранении пропорциональности составляет 5,3 м.

В яркомере за подвижным объективом *1* расположена апертурная диафрагма *Д*₂ и диафрагма *Д*₁ с отверстиями диаметром 0,2; 1 и 5 мм, которые определяют размер фотометрируемой площадки. Наведение на выбранный участок этой площадки осуществляется при помощи визирного устройства, состоящего из линзы *3*, ослабителя света *4* и призмы *5*.

Объектив *1* дает резкое изображение измеряемой площадки в плоскости диафрагмы *Д*₁. Расстояние между диафрагмами *Д*₂ и *Д*₁ равно фокусному расстоянию объектива, а именно 50 мм. При наводке на резкость объектив смещается на 50 мм, но апертурная диафрагма сохраняет постоянным конус лучей, проходящих через диафрагму *Д*₁, независимо от положения объектива. В результате сохраняется пропорциональность между яркостью и световым потоком, попадающим на фотоэлемент, которая необходима для правильной работы яркомера.

В люксметре свет проходит через молочное стекло *17* и попадает в призму *12*. Пропорциональность между освещенностью наружной поверхности молочного стекла, его светностью в сторону прибора и световым потоком, попадающим на фотоэлемент, обеспечивается постоянством всех конструктивных элементов этой схемы.

Для расширения пределов измерений примерно в 10, 100 и 1000 раз применяются нейтральные светофильтры с коэффициентами пропускания $\sim 0,1$; $0,01$ и $0,001$. В схеме также используется решетчатый поглотитель с $\tau=0,1$.

Верхний предел измеряемых на фотометре АФМ величин составляет $1 \cdot 10^3$ кд; $1,25 \cdot 10^8$ кд/м² и $1 \cdot 10^5$ лк.

Погрешность измерений в основном диапазоне не превышает 8%; максимальная погрешность достигает 20%.

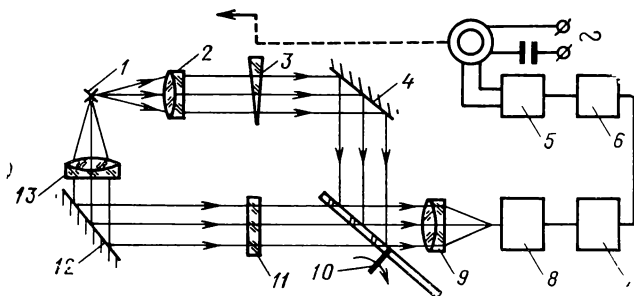


Рис. 7 8. Схема двухлучевого спектрофотометра:

1—источник света; 2, 9, 13—объективы; 3—ослабитель света; 4, 12—зеркала; 5—следящая система; 6—усилитель; 7—приемник света; 8—монохроматор; 10—переключатель световых потоков; 11—исследуемый образец

У фотометров второго типа приемник используется в качестве индикатора равенства падающих на него двух световых потоков.

В качестве примера фотометра второго типа ниже рассмотрена принципиальная схема двухлучевого спектрофотометра (рис. 7. 8).

Излучение от источника света 1 делится на два потока. Первый поток Φ_1 проходит через коллимирующий объектив 2, градуированный ослабитель 3, отражается от зеркала 4 и попадает на переключатель световых потоков 10. Второй поток Φ_2 проходит через объектив 13, отражается от зеркала 12 и через исследуемый образец 11 попадает на переключатель потоков 10. Переключатель через объектив 9 посылает поочередно потоки на входную щель монохроматора 8.

Монохроматическое излучение попадает на приемник света 7, возникающие фототоки усиливаются усилителем 6 и подаются на следящую систему 5. Если потоки Φ_1 и Φ_2 не равны, то в фототоке появляется переменная составляющая с частотой, равной частоте переключения потоков. В этом случае двигатель следящей системы перемещает ослабитель 3 так, чтобы потоки уравнились.

Во время сканирования по спектру следящая система непрерывно поддерживает равенство потоков Φ_1 и Φ_2 и перо само-

писца, жестко связанное с ослабителем, вычерчивает на диаграммной ленте зависимость $\tau = f(\lambda)$.

В качестве ослабителя чаще всего используют нейтральные ослабители гребеночного типа.

Рассмотренная принципиальная схема положена в основу целой группы промышленных спектрофотометров для видимой и инфракрасной области спектра. Например, спектрофотометр СФ-10 записывает спектры пропускания с погрешностью 0,2—0,3%.

Другие фотометры второго типа имеют два приемника света, установленных в двух ветвях и соединенных по дифференциальной схеме.

Фото- и киноприборы

Фото- и киноприборы широко применяются в различных областях деятельности человека.

Во-первых, они используются как средство изобразительного искусства, т. е. для получения фотоизображений предметов внешнего мира. С помощью фотоаппаратов получают единичные фотоизображения, называемые **фотоснимками** (фотоотпечатками). Киносъемочные аппараты служат для получения серий изображений, называемых **кинокадрами**, из которых состоит кинофильм. При проецировании кинокадров на экран зритель воспринимает заснятые предметы в движении. В зависимости от того, в каком соотношении находятся частота кинопроекций и частота киносъемки, скорость этого движения может отличаться от фактической скорости предметов съемки.

Частотой киносъемки (кинопроекции) называется число кадров, снимаемых на киноплёнку (проецируемых на экран) в одну секунду. Нормальная частота равна 24 кадр/с для 35-мм кинофильмов и 16 кадр/с — для 16-мм кинофильмов.

Во-вторых, фото- и киноприборы находят повсеместное применение как средство научного исследования при изучении разнообразных процессов и явлений. Для исследования быстропротекающих процессов (взрыв, электрический разряд и т. п.) применяются киноаппараты, позволяющие осуществлять киносъемку с очень большими частотами (до нескольких тысяч и даже миллионов кадров в секунду). При исследовании медленно развивающихся процессов (рост кристаллов, прорастание семян и т. п.) применяется замедленная киносъемка, которая осуществляется обычными киноаппаратами.

В-третьих, фототехника используется в некоторых производственных процессах для изготовления различного вида деталей: шкал, сеток, микроэлектронных схем и т. д.

Картографирование земной поверхности обязательно производится на основе измерений фотоснимков, полученных как наземными фотоустановками, так и с помощью аэрофотоаппаратов.

Фото- и киноаппаратура широко используется не только при исследовании нашей планеты, но и других небесных тел. В 1959 г. с помощью фототелевизионной системы, установленной на АМС «Луна-3», были впервые получены фотоснимки обратной (невидимой с Земли) стороны Луны.

В настоящее время почти все промышленные предприятия и научные учреждения нашей страны имеют лаборатории, оснащенные самыми разнообразными фото- и киноприборами.

Глава 8

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФОТОПРОЦЕССОВ

8.1. ФОТОМАТЕРИАЛЫ С ГАЛОИДНЫМИ СОЛЯМИ СЕРЕБРА

Светочувствительными компонентами большинства фотоматериалов являются соединения серебра (Ag) с галоидами: бромом (Br), хлором (Cl) и йодом (I), т. е. соли галоидного серебра AgBr , AgCl и AgI , которые далее обозначаются AgHal . На рис. 8.1 показан поперечный разрез фотопленки для получения черно-белых изображений. Микрористаллы AgHal , размеры которых не превышают 5 мкм, равномерно распределены в фотоэмульсионном светочувствительном слое 2, нанесенном на основу 4 (далее этот слой будет именоваться просто фотослоем). Составными частями фотослоя являются желатина (в качестве связующего вещества) и некоторые добавки, о роли которых будет сказано ниже. Основа (подложка) современных фото- и кинопленок изготавливается преимущественно из триацетилцеллюлозы, являющейся прозрачным трудновоспламеняющимся веществом (температура воспламенения выше 400°C). Триацетатные основы поэтому считаются негорючими основами. Между основой и фотослоем 2 находится соединительный слой 3. Сверху на фотослой нанесен защитный слой 1, а снизу на основу нанесен противоскручивающий слой 5, выполняющий иногда также роль противоореального слоя (он должен поглощать световые лучи, прошедшие сквозь фотослой и основу; эти лучи может поглощать также и основа). Верхний 1 и нижний 5 слой должны предохранять поверхности пленки от образования на них электрических зарядов.

Толщина фотоэмульсионного слоя 2 у фото- и кинопленок составляет от 10 до 30 мкм; толщина основы — от 0,10 до 0,125 мм; толщина вспомогательных слоев 1, 3 и 5 — около 1 мкм. Таким образом общая толщина пленки доходит до (0,13—0,15) мм.

В фотоэмульсию в качестве добавок вводят различные вещества, такие как дубители, пластификаторы, антисептики и сенсibilizаторы. Дубители (дубящие вещества) служат для повы-

шения термостойкости фотослоя. Пластификаторы предохраняют фотослой от образования трещин (увеличивают его пластичность). Антисептики служат для предотвращения появления бактерий и грибов. Наконеч, сенсibilизаторы предназначены для расширения спектральной (а, значит, и общей) светочувствительности фотоэмульсионного слоя. Следует отметить, что сенсibilизаторы в некоторых фотоэмульсиях отсутствуют. Современные фото- и киноплёнки изготавливаются различными по своим размерам (главным образом — по своей ширине). Ширина

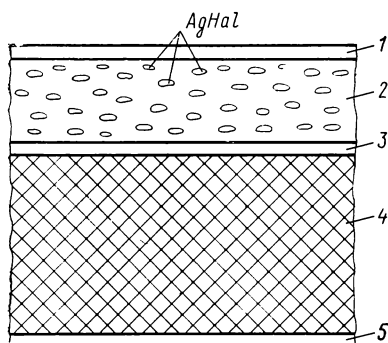


Рис. 8. 1. Поперечный разрез фото- и киноплёнки:

1—защитный слой; 2—светочувствительный слой; 3—соединительный слой; 4—основа; 5—противоскручивающий слой

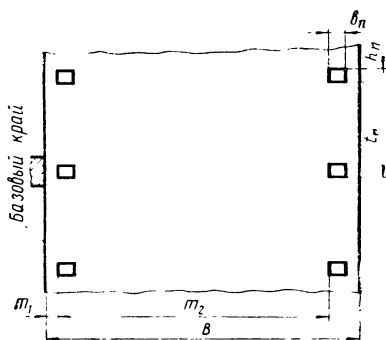


Рис. 8. 2. Киноплёнка

плёнки, используемой в профессиональной и любительской фотографии и кинематографии, находится в пределах от 8 до 70 мм. Ширина аэрофотоплёнки достигает 500 мм.

На рис. 8. 2 приведен внешний вид киноплёнки со стороны фотослоя. Киноплёнка с одной или двух сторон имеет специальные отверстия (перфорации), в которые входят зубья некоторых элементов лентопротяжного механизма (например, зубчатых барабанов). Расстояние между двумя соседними перфорациями (их центрами или одноименными краями) называется шагом перфораций t_p . Ширина и высота перфорации обозначены b_p и h_p . Базовым краем называется тот край киноплёнки, которым она прижимается к продольной направляющей фильмового канала киноаппарата.

В табл. 8. 1 приведены основные размеры перфорированных отечественных фото- и киноплёнок без указания допусковых отклонений (т. е. номинальные размеры). Для широкоформатных фотоаппаратов (с размерами фотоснимка более 24×36 мм) выпускается неперфорированная фотоплёнка шириною 61,5 мм (катушки тип «120» и тип «220» для 12 и 24 фотоснимков размером

6×6 см соответственно). Масса 1 м пленки равна для 70-мм пленки — 14 г; для 35-мм пленки — 7 г; 16-мм пленки — 3,2 г и для 8-мм пленки — 1,6 г.

Таблица 8.1

Пленка	Размеры в мм					
	B	m_1	m_2	b_{Π}	h_{Π}	t_{Π}
8-мм одинарная обычная	8,00	0,91	—	1,83	1,27	3,81
8-мм одинарная типа С	7,98	0,51	—	0,914	1,143	4,234
8-мм двойная обычная (2×8)	15,98	0,91	10,49	1,83	1,27	3,81
8-мм двойная типа С (2×8С)	15,95	0,51	13,10спр	0,914	1,143	4,234
16-мм одинарная	16,00	0,91	10,49	1,83	1,27	7,62
16-мм двойная (32-мм)	31,95	0,91	10,49	1,83	1,27	7,62
35-мм обычная	35,00	2,00	25,37	2,80	1,98	4,75
35-мм для широкоэкранных фильмов	35,00	2,18	26,65	1,98	1,98	4,75
70-мм для широкоформатных фильмов	69,95	5,47	53,40	2,80	1,98	4,75

Предельная одноразовая силовая нагрузка на перемычку между двумя перфорациями не должна превышать 8 Н для 70- и 35-мм пленок и 8 Н — для 16- и 8-мм пленок.

8.2. ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ЧЕРНО-БЕЛОГО ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯ

Для осуществления фотосъемки необходимо сначала на поверхности светочувствительного слоя фотоматериала получить оптическое изображение снимаемых предметов. Для этого съемочные аппараты снабжаются специальными оптическими системами, называемыми объективами. Затем в течение небольшого промежутка времени световые лучи должны оказывать непосредственное воздействие на микрокристаллы AgHal , присутствующие в фотослое. Этот процесс называется процессом экспонирования фотослоя, а его продолжительность — временем экспонирования или выдержкой.

Произведение освещенности E данного участка оптического изображения на время его экспонирования (выдержку) t называется **количеством освещения** или **экспозицией** H . Если выражать освещенность в люксах (лк), выдержку — в секундах (с), то экспозиция будет выражаться в люкс·секундах (лк·с).

В результате воздействия поглощенных квантов света на микрокристаллы AgHal в светочувствительном слое происходят фотохимические реакции, приводящие к восстановлению из солей

AgHal атомов Ag, которые отлагаются в определенных местах, называемых центрами светочувствительности. Из атомов Ag образуются микроскопические частички черного цвета, причем чем больше атомов Ag выделилось на данном участке фотослоя (чем выше концентрация атомов Ag), тем более темным воспринимается этот участок глазом человека.

Известно, что энергия квантов света неодинакова для различных длин волн λ и уменьшается с увеличением λ (уменьшается частота колебаний). Поэтому способностью к восстановлению атомов Ag из солей AgHal обладают не все кванты света, а только те, длина волны которых не превышает 500 нм.

Таким образом на микрокристаллы AgHal оказывают активное воздействие только фиолетовые, синие и голубые лучи видимого спектра. Фотоэмульсия, в которой содержатся только микрокристаллы AgHal (без сенсibilизаторов) обладает ограниченной спектральной чувствительностью и называется **несенсибилизированной** (имеющей естественную спектральную чувствительность).

Для расширения области спектральной чувствительности фотоэмульсии в нее добавляют специальные вещества, называемые оптическими сенсibilизаторами (очувствителями). По величине области спектральной чувствительности сенсibilизированные фотоэмульсии подразделяются на:

1) ортохроматические — чувствительны к зеленым и желтым лучам;

2) панхроматические — чувствительны к зеленым, желтым, оранжевым и красным лучам, т. е. ко всем длинам волн видимого спектра;

3) инфрахроматические — чувствительны к красным и частично к невидимым инфракрасным лучам.

Если фотоэмульсия обладает почти одинаковой чувствительностью ко всем длинам волн в области ее спектральной чувствительности, то к ее названию добавляется приставка «ИЗО» (например, изоортохроматическая, изопанхроматическая и др.).

Количество восстановленных атомов Ag прямо пропорционально величине экспозиции H , сообщаемой светочувствительному слою при фотосъемке. Атомарное серебро, образовавшееся в процессе экспонирования фотослоя, в своей совокупности образует так называемое «скрытое изображение». Центры светочувствительности, в которых отложились атомы Ag, принято называть центрами скрытого изображения. Это изображение называется скрытым потому, что оно незаметно для глаза человека вследствие незначительной концентрации атомов Ag в центрах скрытого изображения. Таким образом, в скрытом изображении как бы запечатлен результат воздействия световых лучей на фотослой в процессе его экспонирования.

Следует отметить, что по распределению светотеней в скрытом изображении оно является противоположным по сравнению с заснятым предметом, т. е. наиболее светлые участки предмета

будут получаться в скрытом изображении наиболее темными и наоборот. Такие изображения с обратным соотношением светотеней по сравнению с предметом принято называть негативными.

Для того чтобы скрытое изображение сделать видимым, его надо подвергнуть проявлению. При проявлении в центрах скрытого изображения количество атомов Ag увеличивается в миллион и более раз.

Эти дополнительно выделяемые атомы Ag образуются из микросталлов AgHal , которые находятся в фотослое, под воздействием проявляющего вещества, присутствующего в проявляющем растворе.

Процесс проявления протекает неравномерно по всему фотослою, а избирательно, а именно: чем больше атомов Ag отложилось на данном участке, тем больше атомов Ag выделяется дополнительно на этом участке в процессе проявления. Таким образом атомы Ag являются своего рода катализатором процесса проявления. После проявления (а также и после всех последующих операций) фотоматериал тщательно промывают в чистой воде, а затем — фиксируют с целью удаления из фотослоя оставшегося в нем AgHal . Фиксирующее вещество образует с AgHal химическое соединение (соль), которое растворяется в фиксирующем растворе. После фиксирования фотоматериал опять тщательно промывают в воде и сушат.

Рассмотренный процесс химико-фотографической обработки фотоматериала принято называть процессом прямого проявления (рис. 8.3, а). Этот процесс приводит к получению негативного фотоизображения (или просто негатива), отчего его называют также негативным процессом. Его применяют в профессиональной кинематографии и фотолюбители.

Для получения после химико-фотографической обработки фотоматериала сразу позитивного фотоизображения (или просто позитива) применяют процесс проявления с обращением (рис. 8.3, б). Его применяют главным образом кинолюбители и отчасти фотолюбители (при изготовлении диапозитивов).

Если негатив получился некачественным (или слишком темным, или слишком светлым), то его можно подвергнуть дополнительной обработке. Слишком темные (с избыточной оптической плотностью) негативы подвергают ослаблению, а слишком светлые (с недостаточной оптической плотностью) — усилению.

Для получения позитивного изображения с негативного (позитива с негатива) необходимо изображение негатива отпечатать на позитивном фотоматериале (например, фотобумаге) и подвергнуть последний процессу прямого проявления. Различают два способа печати позитивных изображений: **контактный и проекционный**.

При контактной печати негатив Н (рис. 8.4, а) накладывают на позитивный фотоматериал П и освещают в течение некоторого времени световыми лучами равномерно по всей поверхности нега-

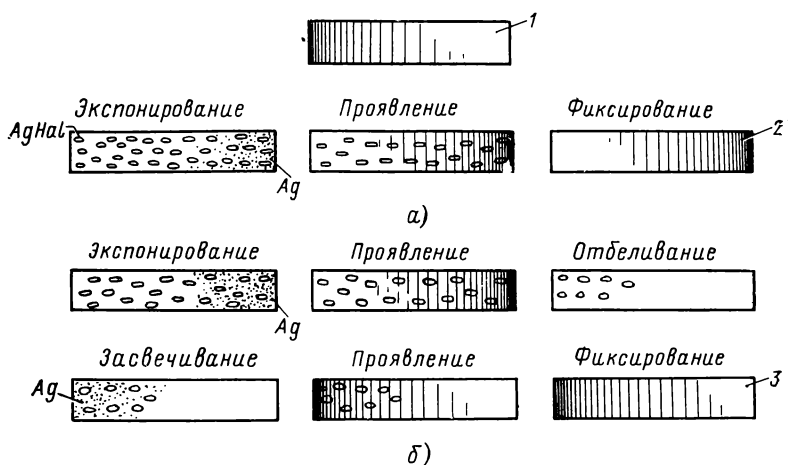


Рис. 8.3. Схемы процессов химико-фотографической обработки фото-материалов:

а—прямое проявление; б—проявление с обращением;
1—предмет; 2—негатив; 3—позитив

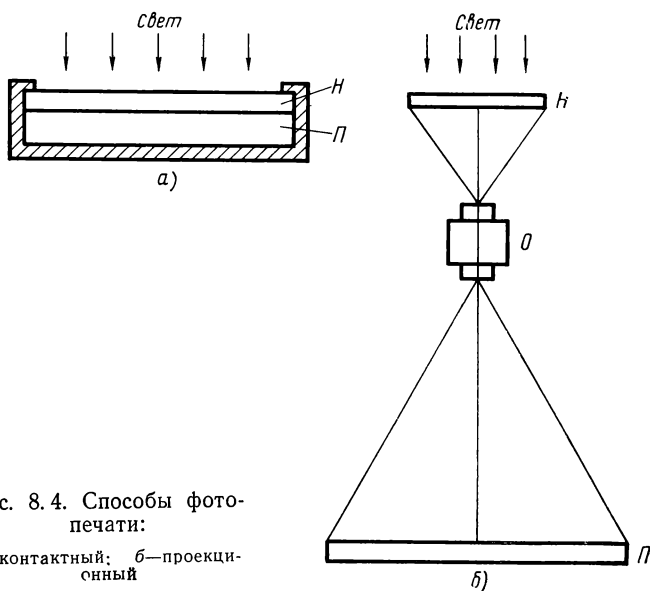


Рис. 8.4. Способы фото-печати:

а—контактный; б—проекционный

тива. Размеры изображения на позитиве получаются такими же, как и на негативе. Контактная печать преимущественно применяется в профессиональной кинематографии при изготовлении копий кинофильмов и при фотосъемке крупноформатными фотоаппаратами (размер кадра 6×6 см² и более).

При проекционной печати изображение с негатива Н объективом О проецируется с некоторым увеличением на позитивный фотоматериал П (рис. 8.4, б). Размеры изображения на позитиве отличаются от размеров негативного изображения. Для осуществления проекционной печати служат специальные приборы, называемые фотоувеличителями. Проекционная печать широко применяется фотолюбителями. Получаемые фотоотпечатки можно подвергать операциям тонирования (окрашивания), глянцеования, ретуширования и др.

8.3. ПОЛУЧЕНИЕ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА МНОГОСЛОЙНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛАХ

На основании теории о цветовом зрении человека любой цвет можно подразделить на три составляющие, которые называются основными компонентами или основными цветами: синюю, зеленую и красную. И, наоборот, любое цветовое ощущение можно получить путем «смешения» трех или менее основных цветов. Белый цвет обязательно содержит все три основных цвета, что условно можно записать так: $\bar{B} = C + Z + K$.

Каждому основному цвету существует дополнительный цвет, в сумме с которым он дает белый цвет. При этом дополнительный цвет является результатом сложения двух других основных цветов, а именно:

а) для синего цвета дополнительным является цвет, получаемый сложением зеленого и красного цветов, т. е. желтый цвет Ж;

б) для зеленого цвета — сложением синего и красного цветов, т. е. пурпурный цвет П;

в) для красного цвета — сложением синего и зеленого цветов, т. е. голубой цвет Г.

Все выше изложенное наглядно иллюстрируется цветовым треугольником (рис. 8.5).

Если на пути белого света установлен светофильтр, имеющий желтую, пурпурную или голубую окраску, то такой светофильтр будет задерживать «свой» основной цвет: например, светофильтр желтого цвета задерживает (вычитает из белого) синий цвет; пурпурного — зеленый; голубого — красный. Поэтому такие светофильтры называются **субтрактивными** (вычитающими).

Цветная съемка на многослойные фотоматериалы основана на принципах цветоделения (анализа света) и последующего сложения (синтеза цвета) составных цветовых компонент.

Для осуществления этих принципов применяются фотомате-

риалы, содержащие несколько (большей частью три) различных по своей спектральной чувствительности фотоэмульсионных слоев.

На рис. 8.6 приведен поперечный разрез цветной трехслойной негативной фотопленки. На прозрачную основу 7 цветной фотопленки нанесены три различных по своей спектральной чувствительности фотоэмульсионных слоя: слой 2, чувствительный к синим лучам; слой 4, чувствительный к синим и зеленым лучам, и слой 5, чувствительный к синим и красным лучам. Между слоями 2 и 4 находится промежуточный слой 3, выполняющий роль желтого светофильтра

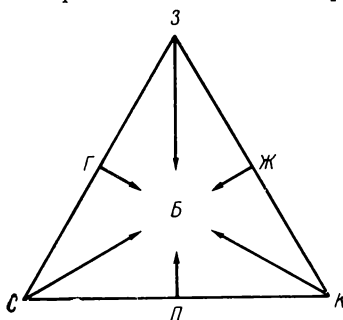


Рис. 8.5. Цветовой треугольник

тра и служащий для поглощения синих лучей (чтобы они не прошли к слоям 4 и 5). Слой 1, 6 и 8 являются вспомогательными и выполняют ту же роль, что и у черно-белых фотоматериалов.

При экспонировании такого трехслойного фотоматериала в каждом из слоев получается скрытое изображение, причем в слое 2 — в синих лучах, а в слоях 4 и 5 — в зеленых и красных соответственно. Таким образом, при съемке на трехслойный фотоматериал происходит цветоделение (анализ цвета) световых лучей, поступающих к его фотоэмульсионным слоям.

В каждом из этих слоев, кроме микрокристаллов AgHal , сенсibilизаторов и других составляющих, присутствуют специальные добавки, называемые **компонентами цветного проявления** (краскообразующими компонентами). Эти добавки, являющиеся бесцветными веществами, в процессе цветного проявления образуют с продуктами окисления проявляющегося вещества красители, молекулы которых осаждаются на атомарное серебро, выделяющееся при проявлении. При этом цвет красителя, образующегося в каждом из слоев, является дополнительным к основному цвету, в лучах которого получается скрытое изображение в данном

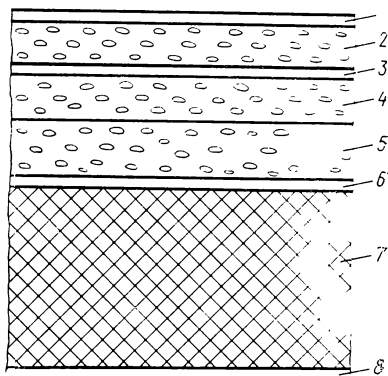


Рис. 8.6. Поперечный разрез цветной фотопленки:

1—защитный слой; 2, 4, 5—светочувствительные слои; 3—желтый фильтровый слой; 6—соединительный слой; 7—основа; 8—противоскручивающий слой

слое: изображение в слое 2 окрашивается в желтый цвет; в слое 4 — в пурпурный, а в слое 5 — в голубой.

Одной из операций химико-фотографической обработки цветного фотоматериала является отбеливание, заключающееся в удалении из его фотоэмульсионных слоев атомов Ag с одновременным обесцвечиванием желтого 3 и противоореального 8 слоев. В результате прямого цветного проявления получают фотоизображение, окрашенное в цвета, дополнительные к цветам предмета.

предмет

С	З	К	Ж	П	Г	Б	Ч

Ж				Ж	Ж	Ж	
	П		П		П	П	
		Г	Г	Г	Г	Г	
(затененная область)							

Ж	П	Г	С	З	К	Ч	Б

цветной негатив

Рис. 8.7. Цветной предмет и его негативное изображение

Для получения цветного позитивного изображения необходимо осуществить процесс фотопечати на цветной многослойный фотоматериал (цветную фотобумагу и т. п.). Цветные позитивные изображения можно получать также, применяя процесс проявления с обращением. Процессу проявления с обращением (как при черно-белой, так и при цветной фотосъемке) следует подвергать только специально предназначенные для этого обрабатываемые фотоматериалы.

8.4. СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ФОТОМАТЕРИАЛОВ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Сенситометрией называется наука об измерении фотографических свойств светочувствительных слоев. Совокупность способов, используемых в процессе испытания фотоматериалов, определяет понятие о сенситометрической системе. В настоящее время в различных странах существуют «свои» сенситометрические системы, отличающиеся друг от друга.

Познакомимся с сенситометрической системой, используемой с некоторыми изменениями в СССР с 1945 г. Различают интегральную и спектральную сенситометрию. Интегральная сенситометрия занимается измерением фотографических свойств светочувствительных слоев при воздействии на них света сложного спектрального состава (в основном — белого света). Спектраль-

ная сенситометрия устанавливает порядок определения свойств светочувствительных слоев по отношению к монохроматическим излучениям.

В процессе полного сенситометрического испытания определяются следующие величины:

светочувствительности: общая S (по отношению к белому свету); эффективные S_ϕ (по отношению к свету, пропускаемому цветными светофильтрами) и спектральные S_λ (по отношению монохроматических излучений) в виде зависимости $S_\lambda = f(\lambda)$;

фотографическая широта L ;

коэффициент контрастности γ ;

разрешающая способность R и резольвометрическая ширина L_R ;

фактор зернистости G .

Для полной сенситометрической оценки свойств данного фотоматериала обычно строят графики зависимостей некоторых сенситометрических величин от времени проявления $t_{пр}$;

$$S = f_1(t_{пр}); \quad \gamma = f_2(t_{пр}); \quad L = f_3(t_{пр}).$$

Графики указанных зависимостей позволяют найти наилучший режим химико-фотографической обработки данного фотоматериала, обеспечивающий достижение желаемого значения светочувствительности S или коэффициента контрастности γ .

Основным этапом испытания фотоматериала является процесс получения характеристической кривой (или характеристических кривых), являющейся графиком зависимости $D = f(\lg H)$, где: D — оптическая плотность фотопочернения, а H — экспозиция, сообщенная светочувствительному слою.

Под оптической плотностью D понимают величину, равную $\lg \frac{1}{\tau}$, где τ — коэффициент светопропускания. В свою очередь, $\tau = F/F_0$, где F — прошедший сквозь почернение световой поток, а F_0 — падающий на почернение световой поток. Таким образом $D = \lg F_0/F$.

Для сообщения различным участкам светочувствительного слоя испытуемого фотоматериала различных по своей величине экспозиций H служит прибор, называемый сенситометром. На рис. 8.8 приведена принципиальная схема отечественного сенситометра ФСР-4.

Световые лучи от источника света 1 (лампа накаливания 12 В, 100 Вт), пройдя через светофильтр искусственного солнечного света 2, затвор 3 с падающей шторкой и одно из отверстий в подвижной пластинке 4, поступают к испытуемому фотоматериалу 6, находящемуся в светонепроницаемой кассете 7. В пластинке 4 имеется пять отверстий: первое (без светофильтра) устанавливается в ходе лучей при определении общей светочувствительности; второе, третье и четвертое (содержат желтый, оранжевый и красный светофильтры соответственно)

устанавливаются в ходе лучей при определении эффективных светочувствительностей, пятое отверстие с нейтрально-серым светофильтром используется при испытании высоко чувствительных фотоматериалов.

Для создания на светочувствительном слое испытуемого фотоматериала различных освещенностей E служит оптический клин 5, сечение которого показано на рис. 8.8 (внизу). Клин

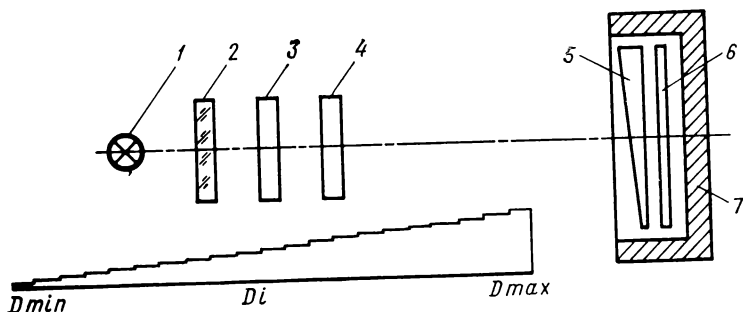


Рис. 8.8. Схема сенситометра ФСП-4:

1—источник света; 2—коррекционный светофильтр; 3—затвор; 4—пластина со светофильтрами; 5—ступенчатый оптический клин; 6—испытуемый фотоматериал; 7—кассета

имеет различные по своей толщине участки, оптическая плотность D которых отличается на постоянную величину, называемую константой K_c (такие оптические клинья носят название ступенчатых). Всего участков 21.

Оптическая плотность любого участка (ступени) клина определяется по формуле

$$D_i = D_{\min} + (i - 1) K_c,$$

где i — порядковый номер участка клина, отсчитываемый от участка с наименьшей оптической плотностью $D_{\min}$.

При $D_{\min} = 0,15$ и $K_c = 0,15$ $D_{\max} = 3,15$.

Затвор обрабатывает выдержку $t = 1/20$ с, одинаковую для всех участков испытуемого фотоматериала. Произведения постоянной выдержки t на разные значения освещенностей E образуют ряд экспозиций H , которые сообщаются светочувствительному слою фотоматериала.

После экспонирования в сенситометре испытуемый фотоматериал подвергают химико-фотографической обработке в соответствии с указаниями, содержащимися в нормативных документах относительно состава проявляющего раствора и его температуры, времени проявления и т. д.

После химико-фотографической обработки на фотоматериале получается ряд почернений, оптические плотности которых соответствуют ряду экспозиций, сообщенных фотослою в сенсито-

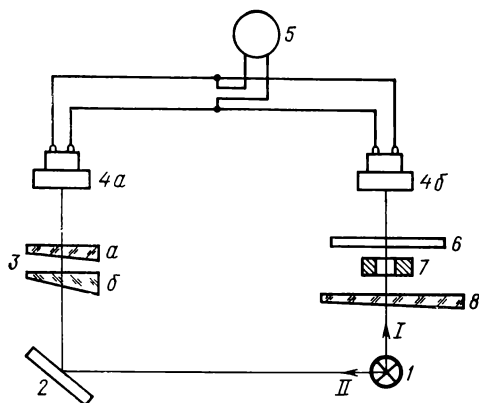
метре. Этот ряд почернений образует сенситограмму, причем при испытании получают несколько сенситограмм, отличающихся друг от друга только временем проявления $t_{\text{пр}}$.

Для измерения оптических плотностей D почернений различных полей сенситограммы служат приборы, называемые денситометрами. На рис. 8.9 приведена принципиальная схема фотоэлектрического денситометра ДФЗ-10.

Световые лучи от источника 1 (лампа накаливания 12 В 30 Вт) идут к фотоэлементам 4, а и 4, б по двум направлениям

Рис. 8.9. Схема денситометра ДФЗ-10:

1—источник света; 2—зеркало; 3—компенсационные оптические клинья; 4—фотоэлементы; 5—зеркальный гальванометр; 6—измеряемый образец; 7—диафрагма; 8—измерительный оптический клин



(ветвям): через основную (измерительную) ветвь I и вспомогательную (компенсационную) ветвь II. В основной ветви располагаются измерительный клин 8, диафрагма 7 и сенситограмма 6; во вспомогательной — зеркало 2, оптические клинья для грубой компенсации — 3, б и для точной — 3, а.

Фотоэлементы соединены по дифференциальной схеме, индикатором тока в которой является зеркальный гальванометр 5.

Перед измерением оптических плотностей почернений полей сенситограммы прибор устанавливают в нулевое положение, что осуществляется следующим образом. Сенситограмму выводят из измерительной ветви, а измерительный клин устанавливают в ходе лучей участком, имеющим максимальную оптическую плотность D_{max} .

В этом положении клина отсчет по его шкале равен нулю. Затем разворотом компенсационных клиньев (как измерительный, так и компенсационные клинья являются круговыми) уравнивают сигналы, получаемые с фотоэлементов, в результате чего электроток через гальванометр протекать не будет.

После установки в ходе лучей одного из полей сенситограммы разворотом измерительного клина опять добиваются уравнивания сигналов, получаемых с фотоэлементов, и по его шкале определяют величину оптической плотности почернения измеряе-

мого поля. Таким образом, в процессе измерения обеспечивается следующее равенство $D_x + D_{\text{кл}} = D_{\text{max}} = \text{const}$,
где D_x — измеряемая оптическая плотность;

$D_{\text{кл}}$ — оптическая плотность участка измерительного клина, введенного в ход лучей.

По известным значениям экспозиций H и оптических плотностей D на специальном сенситометрическом бланке вычерчивают график зависимости $D = f(\lg H)$, который называется характеристической кривой фотоматериала. Примерный вид этой

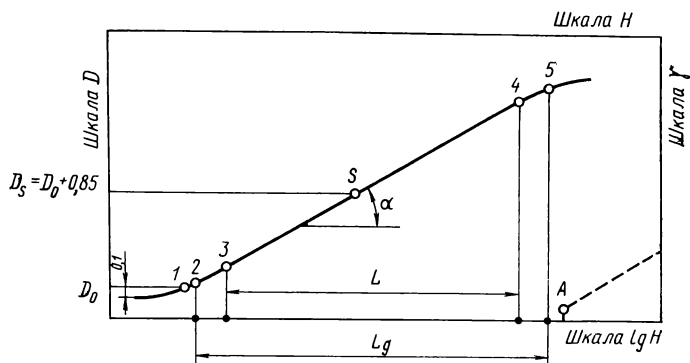


Рис. 8. 10. Характеристическая кривая негативного фотоматериала

кривой для негативной фотопленки приведен на рис. 8. 10. Характеристическая кривая наглядно показывает, как возрастает оптическая плотность D почернения фотослоя под воздействием постепенно увеличивающихся экспозиций H .

Характеристическую кривую можно разделить на три участка:

а) нижний участок — от начала характеристической кривой до точки 3. В начале характеристической кривой оптическая плотность почернения имеет минимальное значение, равное D_0 . Это минимальное почернение называется **фотографической вуалью**. В точке 1 оптическая плотность превышает величину D_0 примерно на 0,1, что визуально заметно для глаза человека. Поэтому эту точку называют **порогом почернения фотослоя**;

б) средний участок от точки 3 до точки 4. На этом участке, являющемся прямолинейным, оптическая плотность увеличивается пропорционально возрастанию экспозиции;

в) верхний участок — от точки 4 до конца характеристической кривой. На этом участке, соответствующем наибольшим значениям оптической плотности D , кривая начинает постепенно загибаться вниз.

Интервал экспозиций $\Delta \lg H$, ограниченный точками начала и конца прямолинейного участка характеристической кривой, на-

зывается интервалом нормальных экспозиций или фотографической шириной L . При фотосъемке необходимо стремиться к тому, чтобы экспозиции H , сообщаемые фотослою, находились в пределах фотографической ширины или полезного интервала экспозиций L_g . Последний соответствует точкам 2 и 5 на характеристической кривой, градиент оптической плотности в которых равен некоторой величине g_{mi} называемой минимальным полезным градиентом.

В противном случае фотоизображение будет получаться или слишком светлым (в области малых оптических плотностей — в области недодержек), или слишком темным (в области больших оптических плотностей — в области передержек).

Тангенс угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой к оси абсцисс (на рис. 8.10 угол α) называется коэффициентом контрастности γ фотоматериала. Чем больше величина γ , тем быстрее возрастает оптическая плотность D при увеличении экспозиции H , тем контрастнее фотоматериал. Однако с увеличением γ уменьшается фотографическая ширина L , т. е. интервал нормально регистрируемых экспозиций. Вот почему при проявлении негативных фотопленок рекомендуется режим проявления назначить таким, чтобы коэффициент γ не превышал 0,8. Для быстрого определения значения γ надо из точки A^* провести прямую, параллельную прямолинейному участку, до пересечения со шкалой γ , так это показано пунктирной прямой на рис. 8.10.

Величину светочувствительности S в различных сенситометрических системах определяют в условных единицах по формуле

$$S = \frac{K}{H_{D_S}}, \quad (8.1)$$

где K — постоянная величина;
 H_{D_S} — экспозиция, соответствующая критерию светочувствительности, принятому в данной сенситометрической системе.

В СССР численное значение величины светочувствительности в единицах ГОСТ черно-белых негативных фотоматериалов определяют по формуле

$$S = \frac{10}{H_{D_S} = D_0 + 0,85}, \quad (8.2)$$

т. е. за критерий светочувствительности принята плотность почернения D_S , превышающая плотность вуали D_0 на 0,85 (на рис. 10.10 эта точка отмечена буквой S).

Если в сенситометре испытуемый фотоматериал экспонируется светом, прошедшим через цветной светофильтр, то величи-

* На сенситометрических бланках буква A не ставится.

на эффективной светочувствительности S_{φ} будет всегда меньше величины общей светочувствительности S . Отношение S/S_{φ} принято называть кратностью светофильтра q . Величина q показывает, во сколько раз надо увеличить выдержку t при съемке со светофильтром, чтобы компенсировать поглощение света при прохождении лучей через данный светофильтр.

В процессе сенситометрического испытания фотоматериала получают несколько сенситограмм, отличающихся друг от друга временем проявления $t_{пр}$. Каждой сенситограмме будет соответствовать «своя» характеристическая кривая, а следовательно, и разные величины L , γ , S и D_0 . По полученным значениям ука-

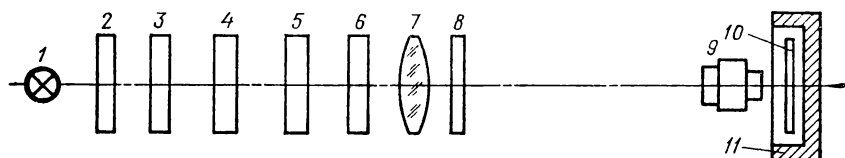


Рис. 8. 11. Схема проекционного резольвометра:

1—источник света; 2—коррекционный светофильтр; 3—светорассеиватель; 4—набор нейтрально-серых светофильтров; 5—набор цветных светофильтров; 6—затвор; 7—конденсор; 8—мира; 9—проекционный объектив; 10—испытуемый фотоматериал; 11—кассета

занных величин строят графики зависимостей этих величин от времени проявления $t_{пр}$, а затем определяют продолжительность проявления, при которой обеспечивается рекомендуемое значение коэффициента контрастности $\gamma_{рек}$. Светочувствительность S , соответствующая этому времени проявления, указывается на упаковке фотоматериала с округлением до значений рекомендуемого ряда.

Для определения разрешающей способности R фотослоев служат приборы, называемые резольвометрами. С помощью этих приборов на испытуемом фотоматериале получают фотоизображения специального испытательного образца, называемого миром. На рис. 8. 11 приведена принципиальная схема проекционного резольвометра. Микрообъектив 9 дает уменьшенное изображение мира 8 на фотослое испытуемого фотоматериала 10, помещенного в светонепроницаемую кассету 11. Для просвечивания мира служит источник света 1 и конденсор 7. Между источником света 1 и миром 8 расположены светофильтр искусственного солнечного света 2, молочное стекло (светорассеиватель) 3, набор нейтрально-серых светофильтров 4, набор цветных светофильтров 5 и затвор 6.

В процессе резольвометрического испытания на фотоматериале получают несколько фотоизображений мира при различных значениях экспозиции (для изменения экспозиции служат набор нейтрально-серых светофильтров). После экспонирования и хи-

мико-фотографической обработки испытуемого фотоматериала получают резольвограмму, которую рассматривают под микроскопом (с увеличением до $70\times$) и находят величину предельной разрешаемой частоты штрихов $f_{\text{пр}}$ на каждом из фотоизображений миры (участков резольвограммы). Затем на специальном бланке вычерчивают график изменения величины $f_{\text{пр}}$ при различных значениях оптической плотности $D_{\text{н.с}}$ нейтрально-серых светофильтров, т. е. — при различных значениях экспозиций H .

Этот график называют кривой разрешения фотоматериала, примерный вид которой приведен на рис. 8. 12.

Величина разрешающей способности фотоматериала R в лин/мм приравняется $f_{\text{пр max}}$, а резольвометрическая ширина L_R равна интервалу экспозиций $\Delta \lg H$, в пределах которого величина $f_{\text{пр}} \geq 0,8 R$.

Следует иметь в виду, что $f_{\text{пр}}$ имеет наивысшее значение только при фотосъемке высококонтрастных предметов (мира относится к объектам абсолютного контраста).

Зернистостью фотоизображения называют неравномерность структуры почернения равномерно экспонированного участка фотослоя. Зернистость легко обнаруживается при рассматривании фотоизображений при больших увеличениях. Фотоматериалы на зернистость исследуются с помощью проекционно-увеличительных приборов, называемых гранулометрами. Численная величина фактора зернистости G определяется по формуле

$$G = \frac{100}{\beta_{\text{пр}}}, \quad (8.3)$$

где $\beta_{\text{пр}}$ — предельное наибольшее линейное увеличение фотоизображения, при котором зернистость обнаруживается глазом человека.

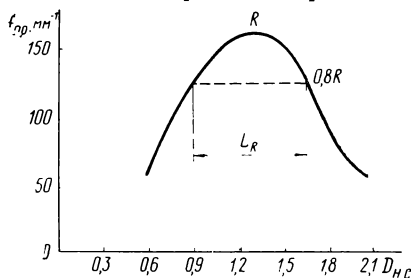


Рис. 8. 12. Кривая разрешения фотоматериала

Глава 9

ФОТО- И КИНООБЪЕКТИВЫ

9.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТИВОВ

Объективом принято называть оптическую систему, предназначенную для образования оптического изображения предмета (объекта) на светочувствительном слое фотоматериала, на экра-

не и т. д. Компоненты объектива находятся в механических оправах, собранных в единый блок. Свое название объектив получил потому, что почти всегда «обращен» к изображаемому им объекту.

Современные фото-и кинообъективы являются многокомпонентными оптическими системами. По степени коррекции аберраций большинство из них относятся к типу анастигматов.

Рассмотрим основные характеристики объективов, которые необходимы как для их оценки, так и для выбора их в зависимости от требований, предъявляемых к данному аппарату или прибору.

1. Фокусное расстояние — расстояние от задней главной плоскости до заднего фокуса *. При определенном расстоянии l_c между плоскостью фотослоя и предметом при съемке (или расстоянии $l_{пр}$ между предметом и плоскостью экрана при проекции) размер получаемого изображения $l_{из}$ на фотоматериале (или экране) зависит как от размера самого предмета l_n , так и от фокусного расстояния f' объектива. Взаимосвязь между указанными величинами можно представить следующими приближенными выражениями:

$$\frac{l_{из}}{l_n} \approx \frac{f'}{l_c - 2f'} \quad \text{и} \quad \frac{l_{из}}{l_n} \approx \frac{l_{пр} - 2f'}{f'} \quad (9.1)$$

Фокусное расстояние фото- или киносъемочного объектива можно сопоставлять с одним из размеров кадра (обычно его диагональю), получаемого на фотоматериале при съемке. В зависимости от соотношения между фокусным расстоянием f' и диагональю кадра l_k съемочные объективы принято условно делить на три группы:

1-я группа — объективы, у которых $f' \approx l_k$. Такие объективы называются нормальными;

2-я группа — объективы, у которых $f' < l_k$. Они называются короткофокусными;

3-я группа — объективы, у которых $f' > l_k$. Эти объективы называются длиннофокусными. В последнюю группу входят также и так называемые телеобъективы. Характерной особенностью последних является сравнительно небольшие их габариты при больших фокусных расстояниях. К ним относятся, например, зеркально-линзовые объективы типа МТО. Наряду с объективами, имеющими постоянную величину фокусного расстояния f' , в последнее время широкое применение находят объективы, имею-

* Каждый объектив имеет две главные плоскости (переднюю и заднюю) и два соответствующих фокуса. Поэтому каждый объектив имеет и два фокусных расстояния. Если объектив находится в однородной среде, то его фокусные расстояния равны друг другу. В паспорте объектива принято указывать величину только заднего фокусного расстояния f' , которое используется при определении увеличения (масштаба) изображения и др.

щие переменное фокусное расстояние (их называют также панкратическими объективами). Изменение фокусного расстояния таких объективов осуществляется двумя способами:

а) присоединением к объективу афокальных насадок с различными угловыми увеличениями Γ_n , причем фокусное расстояние системы объектив+насадка равно произведению $f\Gamma_n$. Применение насадок обеспечивает дискретное изменение фокусного расстояния объектива;

б) перемещением вдоль оптической оси некоторых компонентов объектива, осуществляемым вручную с помощью рукоятки, смонтированной на оправе объектива. У таких объективов фокусное расстояние плавно изменяется в определенных пределах.

2. Угол поля изображения

$2W$ — угол в пространстве изображений, в пределах которого даваемое объективом изображение удовлетворяет поставленным к нему требованиям. Размеры поля изображения определяют размеры кадрограничительной рамки, устанавливаемой перед фотоматериалом в съемочных аппаратах.

Угол $2W$ образуется главными лучами, проходящими через центр выходного зрачка объектива и два противоположных угла кадровой рамки (рис. 9.1). Величина угла $2W$ определяется по формуле

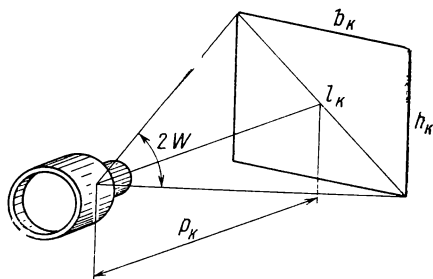


Рис. 9.1. Угол поля изображения $2W'$

$$2W = 2\arctg \frac{l_k}{2p'} = 2\arctg \frac{\sqrt{b_k^2 + h_k^2}}{2p'}, \quad (9.2)$$

где l_k — диагональ кадра;

b_k и h_k — ширина и высота кадра;

p' — расстояние от плоскости выходного зрачка объектива до фотослоя.

Для приближенных расчетов расстояние p' можно приравнять величине f' , т. е. значение $2W$ определять по формуле

$$2W \approx 2\arctg \frac{\sqrt{b_k^2 + h_k^2}}{2f'} \quad (9.3)$$

Углу поля изображения $2W'$ в пространстве предметов соответствует угол поля зрения.

В зависимости от величины угла $2W$ объективы принято подразделять на нормальные ($2W = 45^\circ - 60^\circ$), широкоугольные ($2W > 60^\circ$) и узкоугольные ($2W < 45^\circ$).

3. **Относительное отверстие объектива** равно отношению диаметра его входного зрачка $D_{\text{вх}}$ к фокусному расстоянию f'

$$\frac{D_{\text{вх}}}{f'} = 1 : n_r,$$

где n_r — знаменатель величины относительного отверстия или значение диафрагмы, наносимое на шкале диафрагм оправы объектива.

Чем больше относительное отверстие объектива, тем выше освещенность изображения, которое образует этот объектив, а следовательно, и его светосила, что следует из приближенной формулы для определения освещенности изображения $E_{\text{из}}$ в лк в центре кадра:

$$E_{\text{из}} \approx \frac{1}{4} \pi \tau B \left(\frac{1}{n_r} \right)^2 \quad (9.4)$$

где τ — коэффициент пропускания объектива;

B — яркость изображаемого предмета кд/м².

Светосилой принято называть отношение освещенности изображения E к яркости изображаемого предмета, т. е. величину, равную $\frac{1}{4} \pi \tau \left(\frac{1}{n_r} \right)^2$. Так как сомножитель $\frac{1}{4} \pi \tau$ является постоянной величиной для данного объектива, то его светосила пропорциональна квадрату относительного отверстия, т. е. $\left(\frac{1}{n_r} \right)^2$.

Различают геометрическое и эффективное относительное отверстия, которые определяют также геометрическую и эффективную светосилы, причем $n_{\text{эф}} = \frac{n_r}{\sqrt{\tau}}$. Шкалы диафрагм съемочных объективов градуируются иногда в значениях $n_{\text{эф}}$.

4. **Разрешающая сила объектива** N характеризует способность объектива давать отдельные изображения близко расположенных предметов: точек или линий. Численно величина N равна числу штрихов (линий), приходящихся на 1 мм оптического изображения специальной испытательной таблицы (миры) и получающихся в этом изображении отдельно.

Различают визуальную разрешающую силу N_v и фотографическую — $N_{\text{ф}}$. Визуальная разрешающая сила определяется посредством рассматривания оптического изображения миры, образуемого данным объективом. Фотографическая разрешающая сила определяется по фотоизображению миры, получаемому на светочувствительном слое фотоматериала (для этого используется киноплёнка типа КН-1). Фотографическая разрешающая сила $N_{\text{ф}}$ меньше визуальной разрешающей силы N_v , так как на качество фотоизображения оказывает существенное влияние и свойства фотослоя (в частности, его разрешающая способность R). Между величинами $N_{\text{ф}}$, N_v и R имеет место определенная

взаимосвязь, представляемая иногда в виде следующей эмпирической формулы:

$$\frac{1}{N_{\Phi}} = \frac{1}{N_{\text{в}}} + \frac{1}{R}$$

Оценка качества объектива только величиной его разрешающей силы N неполностью характеризует данный объектив, так как по величине N невозможно судить о соотношении между освещенностями светлых и темных участков изображения, т. е. о контрасте в изображении, даваемом объективом. Поэтому в последнее время интенсивно разрабатываются способы оценки объективов, позволяющие судить как о их разрешающей силе, так и о контрасте в изображениях, которые они дают. К этим способам относится оценка объективов с помощью частотно-контрастной характеристики (ЧКХ). Эта характеристика выражает зависимость между коэффициентом передачи контраста T в изображении испытательной таблицы (миры) и частотой ее штрихов f . Формула для определения ЧКХ имеет следующий вид:

$$T(f) = \frac{K_{\text{из}}}{K_{\text{п}}}, \quad (9.5)$$

где $K_{\text{из}}$ — контраст в оптическом изображении миры, определяемый из отношения $K_{\text{из}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}}$;

$K_{\text{п}}$ — контраст между яркостями штрихов миры и промежутков между ними, т. е.

$$K_{\text{п}} = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{max}}}$$

Обычно ЧКХ представляют в виде графика зависимости $T = f(f)$, примерный вид которого приведен на рис. 9.2 для двух объективов, имеющих одинаковую разрешающую силу N , равную f при $T=0$. Как видно из графиков ЧКХ объектив А образует более контрастное изображение, чем объектив Б, т. е. А является лучшим по качеству, чем Б.

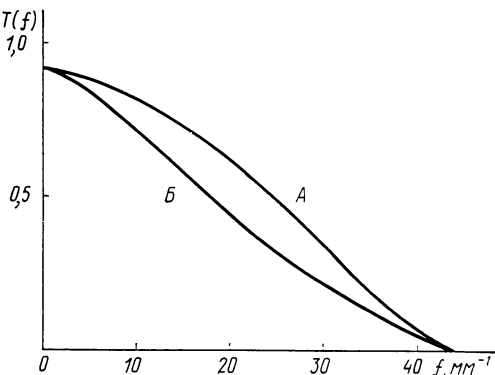


Рис. 9.2. Графики ЧКХ двух объективов

9.2. СПОСОБЫ ФОКУСИРОВКИ ОБЪЕКТИВОВ

Под фокусировкой объектива понимают операцию перемещения всего объектива или его отдельных компонентов вдоль оптической оси с целью совмещения оптического изображения снимаемого (проецируемого) предмета с плоскостью фотослоя (экрана).

Перед рассмотрением способов фокусировки объективов познакомимся с понятием о глубине резко изображаемого пространства. При фотосъемке на светочувствительном слое фотома-

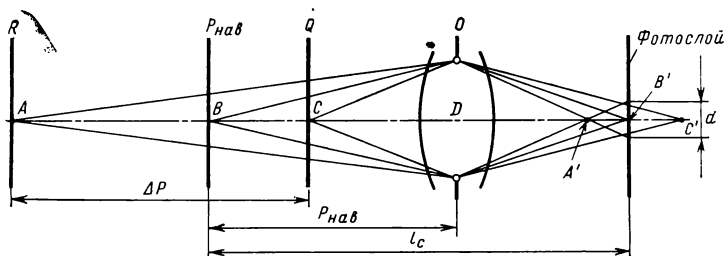


Рис. 9.3. Глубина резко изображаемого пространства

териала наиболее резко изображаются предметы, расположенные в плоскости наводки, т. е. в плоскости, на которую сфокусирован съемочный объектив. Изображения же предметов, расположенных перед или за плоскостью наводки, будут получаться на фотослое менее резкими, причем снижение резкости изображения пропорционально удалению предмета от плоскости наводки.

На рис. 9.3 показан ход главных лучей через объектив О с диафрагмой D от точек А, В и С, лежащих на оптической оси и находящихся в плоскостях, расположенных на разных расстояниях от объектива, сфокусированного на плоскость наводки $P_{нав}$. Если изображение точки В, находящейся в плоскости наводки, будет получаться на фотослое в виде точки В', то изображения точек А и С будут получаться на фотослое в виде размытых пятен (кружков нерезкости), имеющих диаметр d .

Человеческий глаз, рассматривая изображения с расстояния 25 см, способен замечать их нерезкость только тогда, когда величина d превышает 0,1 мм. Это следует из разрешающей способности глаза, которая в угловой мере равна $\sim 1'$. Таким образом фотоизображения предметов, не находящихся в плоскости наводки, человек будет видеть резкими (неразмытыми) при условии, если величина $d \leq 0,1$ мм. Пусть $d_A = d_C = 0,1$ мм. Тогда изображения предметов, расположенных в пространстве между плоскостями R и Q, будут получаться на фотослое с достаточной степенью резкости. Расстояние между этими плоскостями и называется глубиной резко изображаемого пространства. Для вычис-

ления величины можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\Delta p \approx 2 \frac{p_{\text{нав}}^2}{f'^2} n_r d_{\text{доп}}, \quad (9.6)$$

где $p_{\text{нав}}$ — расстояние от объектива до плоскости наводки, которое можно принимать равным расстоянию съемки l_c ;

f' — фокусное расстояние объектива;

n_r — знаменатель геометрического относительного отверстия (значение диафрагмы);

$d_{\text{доп}}$ — диаметр допустимого кружка нарезкости в фотоизображении, величина которого зависит от размера негатива и находится в пределах 0,020—0,075 мм.



Рис. 9.4. Шкала расстояний со шкалой для определения глубины резко изображаемого пространства

Из формулы (9.6) следует, что при всех прочих равных условиях величина Δp прямо пропорциональна значению знаменателя относительного отверстия n_r . Для быстрого определения расстояний до задней и передней границ резко изображаемого пространства на оправках съемочных объективов имеется специальная шкала, располагаемая около шкалы расстояний съемки. Примерный вид расположения указанных шкал показан на рис. 9.4. Буквой И обозначен индекс, который служит для отсчета величины l_c по шкале расстояний.

В фото- и кинотехнике расстояния до предмета съемки отсчитываются от плоскости фотослоя. Найдем выражение для определения величины перемещения объектива в процессе его фокусировки в зависимости от расстояния съемки l_c .

Напомним, что при расположении предметов съемки на больших расстояниях или, как принято говорить, — в бесконечности, их изображения получаются в задней фокальной плоскости объектива. По мере приближения предмета к объективу изображение будет смещаться за фокальную плоскость. Таким образом, перемещение объектива при фокусировке равно смещению изображения от его задней фокальной плоскости, обозначенное на рис. 9.5 буквой x' .

Величину перемещения объектива O в процессе совмещения изображения $И$ предмета $П$ с плоскостью фотослоя определяют по формуле

$$x' = \frac{l_c - C}{2} - \sqrt{\left(\frac{l_c - C}{2}\right)^2 - f'^2}, \quad (9.7)$$

где C — константа объектива, равная расстоянию между его передним F и задним F' фокусами;

f' — фокусное расстояние объектива.

Так как обычно в исходном положении объектива на фотоаппарате его задняя фокальная плоскость совмещена с фотослоем, то при съемке бесконечно удаленных предметов фокусиру-

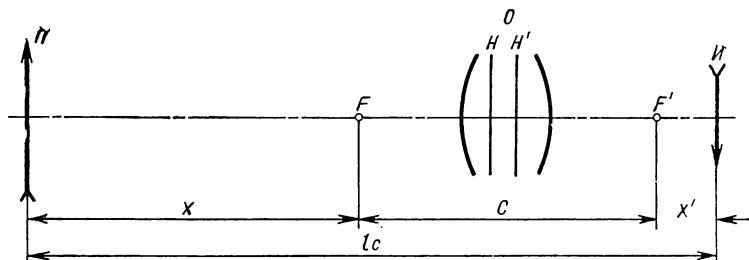


Рис. 9.5. Положение предмета $П$ и его изображение $И$

вать объектив не следует. Фокусировка объектива должна осуществляться тогда, когда изображение $И$ будет находиться от фотослоя на таком расстоянии, при котором оно получается на фотослое нерезким.

Наименьшее расстояние до предмета съемки, при котором еще нет необходимости в фокусировке объектива, называется **фотографической бесконечностью**. На шкале расстояний оно отмечается значком ∞ .

Фокусировка объектива по шкале расстояний является наиболее простым и надежным способом фокусировки. Операция фокусировки сводится к совмещению индекса $И$ с нужным делением на шкале расстояний (см. рис. 9.4), при этом объектив перемещается на величину x' в сторону снимаемого предмета. Это перемещение чаще всего осуществляется с помощью винтовой резьбы (рис. 9.6), которой снабжено кольцо 5 и блок 1 объектива. При повороте кольца 5 за поводок $П$ блок объектива будет перемещаться вдоль оптической оси.

Чтобы блок объектива не вращался, служит штифт 4, входящий в паз на оправе 2, которая присоединяется к корпусу съемочного аппарата 3. Шкала расстояний нанесена на цилиндрической поверхности 6, а индекс — на кольце 5 (индекс и шкалу можно поменять местами).

Деления шкалы наносятся в пределах угла $\alpha_{\text{ш}}^0$ от $l_{c \min}$ до l_{∞} . Численные значения расстояний l_c , наносимые на шкале, выбираются из нормированных рядов в соответствии с нормалью НО 3223—64.

Для перемещения блока объектива вместо резьбы можно использовать кулачки. Способ фокусировки по шкале расстояний требует предварительного измерения величины l_c , что не всегда

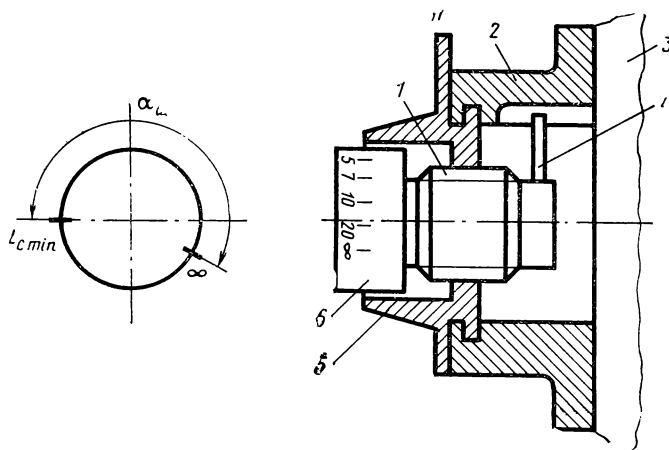


Рис. 9. 6. Схема узла фокусировки с использованием винтовой резьбы:

1—блок объектива; 2—оправа; 3—корпус аппарата; 4—штифт;
5—кольцо; 6—шкала расстояний

возможно и обычно затруднено. Поэтому этот способ фокусировки в настоящее время используется, как вспомогательный, дополняющий какой-либо из основных способов.

Фокусировка объектива по матовому стеклу сводится к получению на матированной поверхности резкого изображения снимаемого предмета, причем это изображение рассматривается или невооруженным глазом, или через окуляр (или лупу). Матированная поверхность может находиться или непосредственно в плоскости последующего расположения фотослоя, или в любой другой плоскости, оптически сопряженной с плоскостью фотослоя.

Для повышения точности фокусировки по матовому стеклу желательно, чтобы освещенность изображения на матированной поверхности была наибольшей, что получается только при полностью раскрытой диафрагме объектива. Так как фотосъемка может производиться при различных световых отверстиях диафрагмы (при разных установках n_T по шкале диафрагмы), а фокусировку желательно осуществлять при наибольшем световом

отверстии, то для обеспечения такой возможности стали применять специальные диафрагмы. Разновидностью таких диафрагм является так называемая «прыгающая» диафрагма, у которой световое отверстие быстро изменяется в промежуток времени между операциями фокусировки объектива и моментом спуска фотозатвора с помощью ранее взведенной пружины.

Фокусировка объектива по матовому стеклу с использованием фокусируемых клиньев позволяет осуществлять более точное совмещение оптического

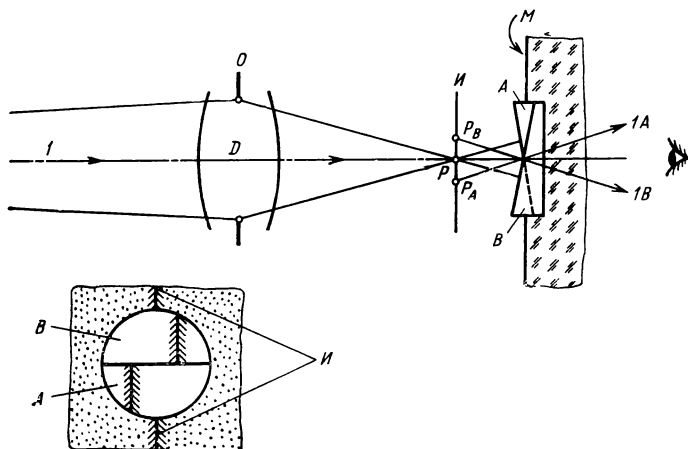


Рис. 9. 7. Схема действия фокусируемых клиньев

изображения с плоскостью фотослоя. Это обеспечивается за счет двух оптических клиньев A и B , помещенных в углублении, сделанном в матированной поверхности, навстречу друг другу (рис. 9. 7) *.

Световые лучи каждым клином отклоняются в сторону их оснований: лучи $1A$ и $1B$. Поэтому, рассматривая точку P изображения $И$ через клинья A и B , глаз будет видеть две точки: P_A и P_B , смещенные в противоположные стороны от точки P . Примерный вид картины, наблюдаемой через матовое стекло с клиньями, показан на рис. 9. 7 внизу. В процессе фокусировки фотографирующий, перемещая объектив O вдоль его оптической оси, добивается устранения двоения изображения, что получается только тогда, когда изображение $И$ совместится с матированной поверхностью M . В некоторых фотоаппаратах последних выпусков вместо двух оптических клиньев стали применять систему микропирамид.

* На рисунке клинья показаны повернутыми на 90° вокруг оптической оси объектива.

Фокусировка с помощью монокулярного дальномера основана на наблюдении одним глазом (отсюда и название — «монокулярный») двух изображений снимаемого предмета 4, образуемых световыми лучами, идущими через основную I и вспомогательную II ветви дальномера (рис. 9.8). Совмещение указанных лучей осуществляется посредством по-

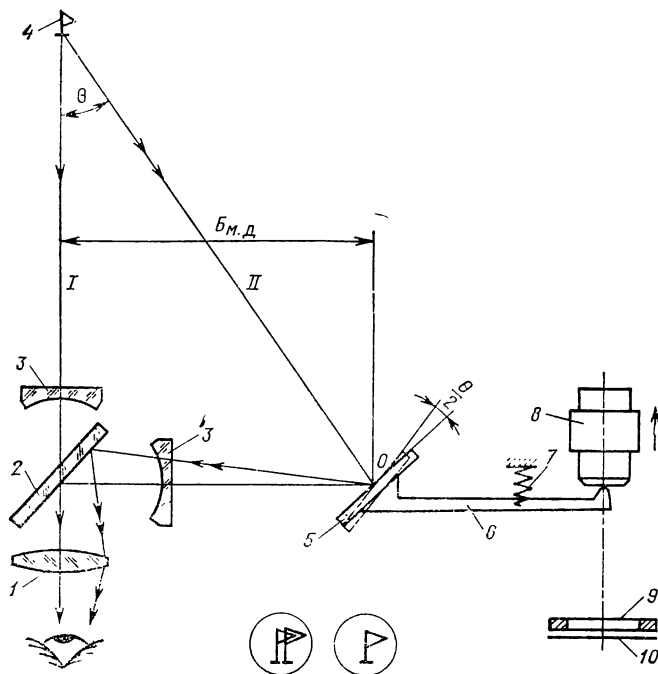


Рис. 9.8. Принципиальная схема фокусировки с помощью монокулярного дальномера:

1—окуляр; 2—полупрозрачное зеркало; 3—объективы; 4—предмет; 5—зеркало-компенсатор; 6—рычаг; 7—пружина; 8—съемный объектив; 9—кадровая рамка; 10—фотоматериал

лупрозрачной пластинки 2, которая пропускает лучи, идущие через основную ветвь, и отражает лучи, идущие через вспомогательную ветвь.

Зеркало 5 установлено от пластинки 2 на некотором расстоянии, называемой базой дальномера $B_{м.д.}$. Объектив 3 и окуляр 1 образуют визирную систему. При использовании дальномера для фокусировки объектива 8 между оправой объектива и узлом дальномера должна существовать кинематическая связь, обеспечивающая изменение направления хода световых лучей во вспомогательной ветви при перемещении объектива вдоль оптической оси в процессе его фокусировки (направление перемещения объектива показано стрелкой).

Узел дальномера, связанный с объективом и служащий для углового отклонения лучей, идущий через вспомогательную ветвь, называется оптическим компенсатором дальномера. В качестве такового, например, можно использовать зеркало 5, осуществляя его поворот вокруг оси *O*, перпендикулярной плоскости рисунка.

При перемещении объектива 8 в процессе его фокусировки под действием пружины 7 рычаг 6 будет поворачиваться вокруг оси *O* совместно с зеркалом 5. При повороте зеркала 5 на угол $\theta/2$, где θ — параллактический угол, зависящий от базы дальномера $B_{м.д}$ и расстояния до объекта съемки 4, вместо двух изображений глаз фотографирующего будет видеть одно слившееся изображение, как это показано на рис. 9. 8 внизу. В результате оптическое изображение объекта съемки будет совмещено с плоскостью светочувствительного слоя фотоматериала 10, находящегося за кадровой рамкой 9.

Рассмотренные способы фокусировки объективов не исчерпывают всех используемых на практике способов. Так, например, для ускорения и упрощения операции фокусировки применяется способ фокусировки по символам, наносимым на шкалу расстояний. Эти символы соответствуют наиболее характерным случаям съемки: съемка портрета, съемка группы людей и пейзажная съемка. Каждому случаю съемки соответствуют определенные расстояния до предмета или так называемые зоны съемки: (1—2) м — при съемке портрета, (2—5) м — при съемке группы и более 5 м — при съемке пейзажа. При фокусировке по символам объектив устанавливается в такие положения, когда глубина резко изображаемого пространства охватывает ту или иную зону съемки.

Короткофокусные объективы, у которых глубина резко изображаемого пространства находится в пределах от (1—2) м до ∞ , вообще не имеют устройств для их фокусировки. Они называются поэтому жестковстроенными объективами.

9.3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКЦИОННЫХ И АЭРОФОТОСЪЕМОЧНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

Проекционным (в частности, кинопроекционным) и аэрофото-съемочным объективам присущи некоторые особенности в части требований, предъявляемых к ним. Эти специфические требования определяются как условиями их применения, так и повышенными требованиями к качеству образуемого ими изображения.

Рассмотрим особенности проекционных объективов.

1. Для повышения яркости проецируемых на экраны изображений их освещенность должна быть наивысшей. Поэтому проекционные объективы должны иметь наибольшие по сравнению с другими объективами относительные отверстия. Так у боль-

шинства современных кинопроекционных объективов относительное отверстие достигает величины 1 1,5 и даже более.

2. В соответствии с требованиями стандартов неравномерность освещенности в пределах рабочего поля экрана не должна быть меньше 0,6 (освещенность на краях экрана по сравнению с освещенностью в его центре не должна понижаться более, чем на 40%). В связи с этим виньетирование наклонных световых пучков в проекционном объективе должно быть минимальным.

3. Проекционный объектив должен обеспечивать необходимое геометрическое подобие между изображением, получаемым на экране, и проецируемым оригиналом. Поэтому дисторсия у проекционных объективов не должна превышать 3%.

4. Проекционные объективы должны обладать достаточно высокой разрешающей силой, чтобы давать отдельные изображения близко расположенных предметов, которые человеческий глаз способен наблюдать отдельно. В связи с этим разрешающая сила кинопроекционных объективов в центральной зоне поля изображения должна быть не менее 80 лин/мм.

5. Для уменьшения световых потерь и увеличения светового потока, идущего в сторону экрана, коэффициент пропускания проекционных объективов должен быть наибольшим (не менее 0,7—0,75).

Таким образом проекционные (в особенности — кинопроекционные) объективы должны иметь тщательно скорректированные в отношении аберраций оптические системы, обладающие высокой разрешающей силой, наивысшей светосилой, повышенной ортоскопией и т. д.

Аэрофотосъемочные объективы являются составной частью аэрофотоаппаратов, служащих для осуществления воздушной съемки земной поверхности. Получаемые аэрофотоснимки обычно подвергаются высокоточным измерениям с целью определения истинных размеров и взаимного расположения предметов на местности. Так как точность этих измерений в большой степени зависит от качества фотоизображений на аэроснимках, то поэтому и к аэрофотосъемочным объективам тоже предъявляются повышенные требования. Остановимся на этих требованиях подробнее.

1. Разрешающая сила аэрофотосъемочных объективов в зависимости от их фокусного расстояния не должна быть менее (в центре поля): 50 лин/мм — при $f' \leq 100$ мм и 70 лин/мм — при $f' > 100$ мм.

2. Дисторсия не должна превышать 0,5% или в линейном измерении (0,02—0,03) мм.

3. В связи с большими размерами получаемых аэрофотоснимков (до 50×50 см²) аэрофотосъемочные объективы должны иметь или большие фокусные расстояния f' (более 1000 мм), или большие углы поля изображения $2W'$ (свыше 100°). В свя-

зи с этим повышаются требования к точности фокусировки аэрофотообъективов (при больших фокусных расстояниях) и равномерности освещенности по полю изображения (при больших углах поля изображения).

4. Для компенсации влияния изменения температуры и давления от высоты аэрофотосъемки на взаимное расположение плоскости изображения, даваемого аэрофотообъективом, и плоскости фотослоя (происходящее смещение плоскости изображения относительно фотослоя называется **термобарической расстраиваемостью**) аэрофотообъективы должны иметь специальные устройства. К ним относятся, например, термобарические компенсаторы, располагаемые в ходе световых лучей, проходящих через объектив. Некоторые аэрофотообъективы присоединяются к корпусу аэрофотоаппарата с помощью инварных * стержней.

5. Для выравнивания освещенности по полю изображения в широкоугольных аэрофотообъективах применяются светофильтры с переменной оптической плотностью. Светопропускание у таких светофильтров постепенно увеличивается от его центральной зоны к краям. Такие светофильтры называются оттенителями.

В широкоугольных объективах типа «Руссар» ** для выравнивания освещенности по полю изображения применено так называемое аберрационное виньетирование, суть которого заключается в увеличении размера входного зрачка для наклонных световых пучков. Это достигается специальным аберрационным расчетом оптической системы объектива.

6. Светофильтры, используемые при аэрофотосъемке, а также другие дополнительные оптические детали (выравнивающее стекло, защитное стекло фотолюка и др.) должны изготавливаться с высокой точностью. Так, непараллельность их поверхностей, т. е. клиновидность, не должна превышать $1'$, а отклонения от плоскостности — не более $\pm 0,005$ их диаметра.

7. Аэрофотообъективы обычно не имеют устройств для их фокусировки в зависимости от высоты полета самолета, т. е. они устанавливаются на корпусе аэрофотоаппарата в определенном фиксированном положении, когда их задняя фокальная плоскость (точнее, плоскость наилучшего изображения) совмещена с плоскостью фотослоя.

Такая установка осуществляется в лабораторных условиях с использованием специальных контрольно-юстировочных приспособлений. При установке аэрофотообъектива добиваются также того, чтобы оптическая ось была перпендикулярна плоскости фотослоя (плоскости прикладной рамки аэрофотоаппарата).

* Инвар обладает очень малым температурным коэффициентом линейного расширения.

** Рассчитаны проф. М. М. Русиновым.

9.4. ДИАФРАГМЫ ОБЪЕКТИВОВ

Диафрагмой называется механическое устройство, встраиваемое между линзами объектива и предназначенное для изменения его светового отверстия. Рабочие элементы диафрагмы (лепестки и т. п.) должны располагаться в плоскости апертурной (действующей) диафрагмы оптической системы объектива.

При изменении величины светового отверстия диафрагмы будут изменяться диаметры входного и выходного зрачков объек-

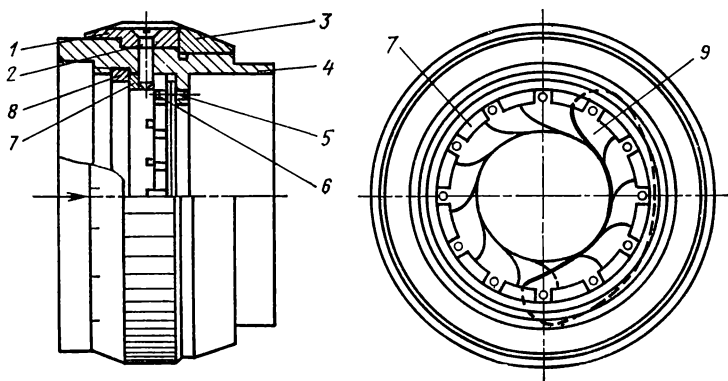


Рис. 9.9. Конструкция ирисовой диафрагмы:

1—установочное кольцо; 2—винт; 3—гайка; 4—оправа; 5—штифт; 6—штифт;
7—коронка; 8—гайка; 9—лепесток

тива (соответственно и значения входного и выходного апертурных углов), а следовательно, и величина освещенности изображения.

В фото- и кинообъективах применяется преимущественно ирисовая диафрагма, типовая конструкция которой приведена на рис. 9.9. Установочное кольцо 1 содержит винт 2, хвостовик которого проходит через дугообразный вырез в оправе 4 и входит в отверстие коронки 7. При развороте кольца 1 будет поворачиваться также и коронка 7, в прямолинейные пазы которой входят ведущие штифты 6 лепестков 9, образующих световое отверстие. Кольцо 1 фиксируется на оправе 4 гайкой 3. Штифты 5 лепестков входят в отверстия оправы 4 и служат осями, вокруг которых поворачиваются лепестки. Коронка 7 удерживается внутри оправы 4 гайкой 8. Так как относительное отверстие объектива зависит как от диаметра его входного зрачка (т. е. фактически — от светового отверстия диафрагмы), так и от фокусного расстояния объектива, то поэтому шкалы диафрагм должны градуироваться с учетом величины фокусного расстояния f' .

В киносъёмочных аппаратах с автоматической установкой светового отверстия диафрагмы применяются специальные одноплепестковые или двухлепестковые диафрагмы. Световое от-

верстие такой диафрагмы изменяется разворотом лепестков, в которых сделаны фигурные вырезы (большей частью капле-видной формы).

Кинопроекционные объективы диафрагмы не имеют, так как они используются всегда при наибольшем относительном отверстии.

В заключение познакомимся со способами присоединения объективов к корпусу фото- или киноаппарата. Наиболее распространено резьбовое соединение объективов с камерами, для чего оправа объектива и камера аппарата имеют резьбовые части, как это показано на рис. 9. 10.

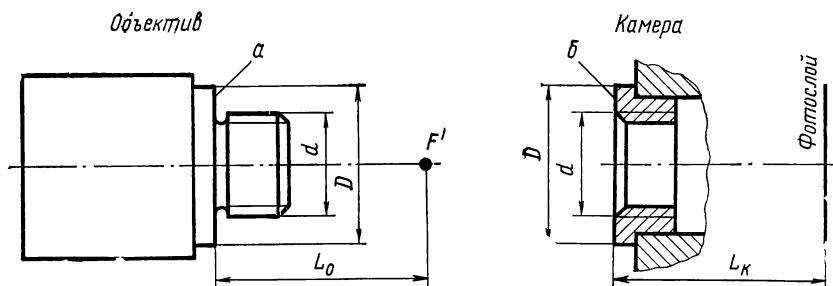


Рис. 9. 10. Резьбовое соединение объектива с камерой

Объектив ввинчивается в гнездо, закрепленное в камере, до тех пор, пока поверхность торца «а» оправы объектива не коснется поверхности торца «б» гнезда камеры. Это необходимо для того, чтобы задняя фокальная плоскость объектива совместилась с плоскостью фотослоя. Для этого необходимо, чтобы рабочий отрезок (расстояние) L_0 объектива был равен рабочему расстоянию L_K камеры. Возможные отклонения величины L_0 от номинального значения не должны превышать $\pm (0,02—0,1)$ мм в зависимости от относительного отверстия объектива*.

В табл. 9. 1 приведены значения основных конструктивных размеров, показанных на рис. 9. 10.

Менее распространено байонетное соединение объективов с камерами. Это соединение рекомендуется применять в фотоаппаратах, предназначенных для съемки на широкую (61,5 мм) фотопленку.

9.5. ВИЗИРНЫЕ УСТРОЙСТВА ФОТО- И КИНОАППАРАТОВ

Визирные устройства (видоискатели в фотоаппаратах) предназначены для наблюдения предметов съемки с целью определения границ снимаемого пространства и обеспечения желаемо-

* Рабочие расстояния L_K камер фотоаппаратов должны выдерживаться с точностью $\pm 0,02$ мм.

Таблица 9.1

Назначение объектива	Диаметр d и шаг присоединительной резьбы в мм	Рабочий отрезок L_0 в мм	Диаметр опорного торца Π в мм
Сменный для зеркальных фотоаппаратов	М 42×1	45,5	47 (минимальный)
Сменный для дальномерных фотоаппаратов	М 39×1	28,8	44 (минимальный)
Сменный для любительских киноаппаратов без зеркальных obturators	Сп. М 15,9×0,8	12,29±0,02	25
	Сп. М 25,4×0,8	17,53±0,02	30

Примечания. 1. Для несменных объективов указанные в таблице размеры являются рекомендуемыми.

2. В обозначении резьбы буквы Сп означают, что резьба специальная.

го расположения изображений снимаемых предметов в пределах поля кадра (т. е. для компоновки кадра), а также для контроля или осуществления фокусировки объектива. Таким образом, визирное устройство (далее, просто визир) является оптическим узлом съемочного аппарата, большей частью взаимосвязанным с его объективом.

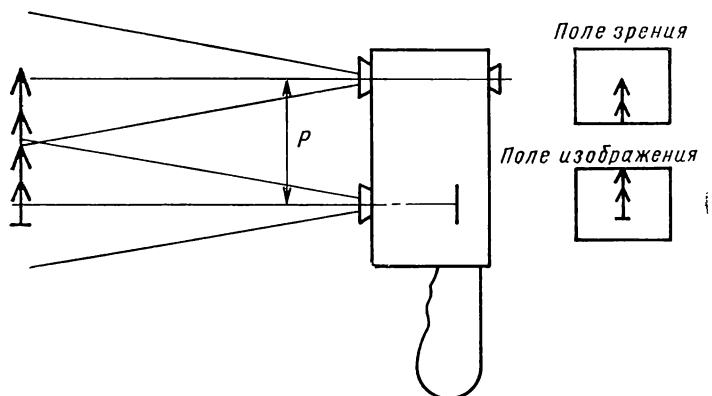


Рис. 9.11. Параллакс визирного устройства

Если линия наблюдения визирного устройства (линия визирования) смещена относительно оптической оси съемочного объектива, то такие визиры называются **параллаксными**. Основным недостатком параллаксного визира является то, что его поле зрения не совпадает с полем изображения съемочного объектива. На рис. 9.11 справа приведено различие в положении изображения предмета, наблюдаемого через визир и получающегося на кадре.

Исправить параллакс визира можно наклоном визирного устройства в сторону оптической оси объектива, причем угол наклона зависит как от величины параллактического смещения P , так и от расстояния до снимаемого предмета l_c . Наклон визира проще всего производить одновременно с фокусировкой объектива.

Визирные устройства, у которых их линия визирования совпадает с оптической осью съемочного объектива, являются **беспараллаксными**. В зависимости от конструктивного оформления визиры подразделяются на приставные (присоединяемые) и встраиваемые. Приставные визиры обычно являются параллаксными, а встраиваемые — беспараллаксными.

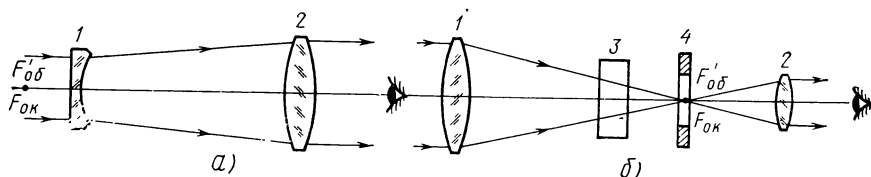


Рис. 9. 12. Телескопические визирные устройства:

а—система Галилея; б—система Кеплера;
1—объектив; 2—окуляр; 3—оборачивающая система; 4—пластинка с вырезом

Оптическая часть большинства визиров содержит объектив и окуляр, образующие между собой телескопическую оптическую систему.

Визиры дальномерных съемочных аппаратов обычно имеют отрицательный объектив и положительный окуляр, т. е. образуют перевернутую телескопическую систему Галилея (рис. 9. 12, а). Так как задний фокус $F'_{об}$ объектива 1 расположен перед ним (в пространстве предметов), то выходящие из объектива световые лучи из параллельных становятся расходящимися. В связи с этим изображение, образуемое объективом, будет мнимым, но прямым по отношению наблюдаемого предмета.

Для ограничения поля зрения в таких визирах используется оправа объектива, которая делается прямоугольной по своей форме. Поскольку указанная оправа, являющаяся диафрагмой поля зрения, не совпадает с плоскостью изображения наблюдаемых предметов, то она будет видна нарезкой, что является одним из недостатков такого типа визиров. Основное достоинство таких визиров — малые габариты.

В визирах профессиональных и некоторых любительских киноаппаратов, а также в зеркальных фото- и киноаппаратах применяется телескопическая система Кеплера, у которой и объектив 1 и окуляр (рис. 9. 12, б) являются положительными. Так как задний фокус $F'_{об}$ расположен за объективом (в пространстве изображений), то выходящие из объектива световые лучи из

параллельных становятся сходящимися. Поэтому изображение, даваемое объективом, будет действительным, но перевернутым по отношению наблюдаемого предмета.

В задней фокальной плоскости объектива установлена пластинка 4 с прямоугольным вырезом, выполняющим роль диафрагмы поля зрения. Поэтому глаз будет видеть одновременно и резко как изображения снимаемых предметов, так и вырез в пластинке 4. Так как изображение, даваемое объективом 1, является перевернутым по отношению предмета, то такие визиры должны иметь оборачивающую систему 3. Назначение последней — изменять направление хода лучей в обеих плоскостях так,

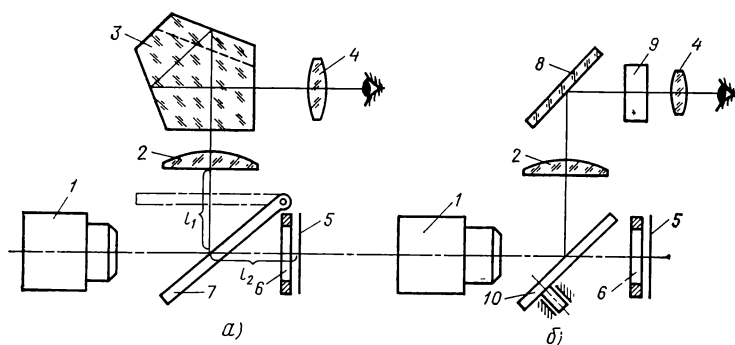


Рис. 9. 13. Оптические схемы зеркальных визирных устройств:

а—зеркального фотоаппарата; б—зеркального киноаппарата;
1—съемочный объектив; 2—коллектив; 3—пентапризма; 4—окуляр; 5—фото-
материал; 6—кадровая рамка; 7—откидное зеркало; 8—зеркало; 9—оборачи-
вающая система; 10—зеркальный obturator

чтобы изображения, наблюдаемые в окуляр 2, были прямыми. Рассмотренный визир имеет сложную оптическую схему и относительно большие габариты, что является его основным недостатком.

Для устранения параллакса телескопические визирные устройства часто сочетаются со съемочным объективом аппарата таким образом, чтобы этот объектив являлся также и объективом визира. Для направления световых лучей к окуляру обычно в таких визирах используется зеркало, отчего аппараты с ними получили название **зеркальных**.

На рис. 9. 13, а показана оптическая схема видоискателя зеркального фотоаппарата. За съемочным объективом 1 расположено откидное зеркало 7, которое при визировании занимает положение, показанное на рисунке. В этом положении оно направляет световые лучи в оптическую систему видоискателя, содержащую коллектив 2, пентапризму 3 с крышей и окуляр 4. Перед фотосъемкой зеркало 7 отводится вверх, как это показа-

но пунктиром, и световые лучи будут идти к фотопленке 5, расположенной за кадровой рамкой 6.

При визировании оптические изображения снимаемых предметов получаются на плоской поверхности коллектива 2, которая делается матированной в располагается в плоскости, оптически сопряженной с плоскостью фотослоя. Это обеспечивается установкой коллектива в такое положение, когда расстояния l_1 и l_2 будут равны друг другу. Коллектив 2 служит для приближения наклонных пучков световых лучей к оптической оси с целью уменьшения габаритов пентапризмы. Кроме того, коллектив оптически совмещает выходной зрачок объектива 1 с входным зрачком окуляра 4. Одна из рабочих граней пентапризмы 3 (на рисунке — верхняя) делается крышеобразной для поворота изображения в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка.

В киноаппаратах для направления световых лучей в сторону окуляра 4 (рис. 11.13, б) используется обтюратор 10, лопасть которого выполняет роль зеркала (такие обтюраторы называются зеркальными).

Так как в обеих схемах коллектив 2 расположен около плоскости изображения наблюдаемых предметов, то от его размеров зависят размеры видимого глазом пространства. Таким образом, оправка коллектива служит диафрагмой поля зрения визира и ее делают прямоугольной в соответствии с формой кадрового окна. В последнее время в зеркальных аппаратах вместо линзового коллектива стали устанавливать линзу Френеля, изготавливаемую из органического стекла. Рассмотренные оптические схемы визирных устройств являются наиболее распространенными (типовыми).

Глава 10

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТРАБОТКИ ВЫДЕРЖЕК (ФОТОЗАТВОРЫ)

10.1. РАЗНОВИДНОСТИ ФОТОЗАТВОРОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Фотозатворы предназначены для открывания доступа световым лучам к светочувствительному слою фотоматериала с целью его экспонирования в течение определенного заранее установленного промежутка времени, называемого выдержкой. Как правило, выдержка отрабатывается автоматически с помощью специального механизма, обеспечивающего возможность установки нескольких различных по своей величине значений выдержек. Затворы фотоаппаратов, кроме того, позволяют отмечать выдержки (обычно длительные) вручную.

Для выполнения своих функций фотозатворы включают следующие составные части:

1. Световые заслонки (лепестки, шторки, диски и др.), открывающие и закрывающие световое отверстие. С двигателем затвора световые заслонки связаны передаточным механизмом.

2. Механизм изменения продолжительности выдержки (механизм выдержек), устанавливаемый заранее в определенное положение, зависящее от длительности обрабатываемой выдержки.

3. Приводной двигатель, обеспечивающий перемещение как световых заслонок фотозатвора, так и механизма выдержек при работе фотозатвора.

В зависимости от вида световых заслонок и принципа их действия затворы фото- и киноаппаратов (включая и аэрофотоаппараты) подразделяют на:

Лепестковые затворы, световыми заслонками которых являются лепестки различной конфигурации. К ним относятся, например, центральные затворы, названные так потому, что световое отверстие у них открывается от центра к краям, а закрывается в обратном направлении. Центральный затвор, как правило, устанавливается внутри объектива около его апертурной диафрагмы, т. е. относится к апертурным затворам, которые можно разделить на межлинзовые, залинзовые и фронтальные.

Шторные затворы, световыми заслонками которых являются две (иногда одна) шторки, между которыми образуется щель переменной (при одной шторке постоянной) ширины. Шторный затвор располагается около фотоматериала в непосредственной близости от фокальной плоскости съемочного объектива, т. е. он относится к фокальным затворам.

Обтюраторные затворы (или просто обтюраторы) применяются преимущественно в киноаппаратах. Обтюраторы бывают дисковыми (плоскими), коническими и цилиндрическими. Они имеют один или несколько вырезов и вращаются с определенной скоростью в соответствии с частотой киносъемки. Обтюратор располагается между объективом и фотоматериалом.

Веерные затворы, световыми заслонками которых являются две складывающиеся в виде веера шторки, содержащие несколько секторов. По принципу действия схожи с обтюраторными затворами, а по месту своего расположения относятся к фокальным затворам.

Затворы типа «жалюзи», световыми заслонками которых являются несколько пластин, разворачивающихся вокруг собственных осей, параллельных друг другу. Применяются только в аэрофотоаппаратах, объективы которых имеют большие световые отверстия, и относятся к апертурным затворам.

Познакомимся теперь с некоторыми наиболее важными характеристиками фотозатворов. Одной из таких характеристик

является оптический коэффициент полезного действия затвора (ОКПД), который обозначим η_z . Для определения ОКПД затвора рассмотрим, как изменяется освещенность E оптического изображения в какой-либо его точке в процессе отработки выдержки фотозатвором.

На рис. 10.1 показан примерный график изменения освещенности E в зависимости от времени t (кривая освещенность — время). Затвор начинает открывать доступ лучам, идущим в точку оптического изображения, с момента t_1 и прекращает их доступ в эту же точку в момент t_2 .

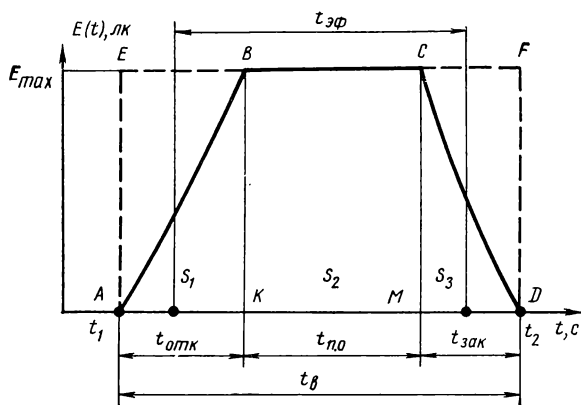


Рис. 10.1. График изменения освещенности при отработке затвором выдержки

Промежуток времени от момента t_1 до момента t_2 называется **полной выдержкой** t_b . В течение выдержки освещенность сначала возрастает (период открывания $t_{отк}$), затем остается неизменной (период полного открывания $t_{п.о.}$) и, наконец, убывает (период закрывания $t_{зак}$), причем $t_b = t_{отк} + t_{п.о.} + t_{зак}$.

Таким образом освещенность E в течение выдержки t_b является непостоянной по своей величине, что следует учитывать при расчете экспозиции H . Если фотозатвор открывает и прекращает доступ световым лучам почти мгновенно ($t_{отк} = t_{зак} = 0$), то такой затвор (его принято называть идеальным затвором) обеспечивает сообщение фотослою наибольшей экспозиции в течение выдержки t_b . Каждый реальный затвор в силу своей инерционности и других факторов за ту же выдержку t_b будет сообщать фотослою меньшую по сравнению с идеальным затвором экспозицию. ОКПД затвора численно равен отношению экспозиции H_p , сообщаемой фотослою реальным затвором, к эк-

спозиции $H_{\text{и}}$, сообщаемой фотослою идеальным затвором, за одну и ту же выдержку, т. е.

$$\eta_3 = \frac{H_p}{H_{\text{и}}} \text{ или } H_p = \eta_3 H_{\text{и}}.$$

Так как $H_{\text{и}} = E_{\text{макс}} t_{\text{в}}$, то $H_p = \eta_3 E_{\text{макс}} t_{\text{в}}$. Произведение $\eta_3 t_{\text{в}}$ называется **эффективной выдержкой** $t_{\text{эф}}$. Шкалы выдержек градуируются в эффективных их значениях, т. е. с учетом ОКПД фотозатвора.

Для определения ОКПД затвора можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\eta_3 \approx 1 - \frac{t_{\text{отк}}}{t_{\text{в}}}. \quad (10.1)$$

Другой характеристикой фотозатворов является значение наикратчайшей выдержки t_{min} , обрабатываемой данным затвором. Чем меньше t_{min} , тем шире диапазон автоматически обрабатываемых выдержек, тем выше эксплуатационные возможности затвора. В соответствии с ГОСТом 3268—57 для шкал фотозатворов установлен следующий ряд численных значений эффективных выдержек (вс): 30; 15; 8; 4; 2:1; 1/2; 1/4; 1/8; 1/15; 1/30; 1/60; 1/125; 1/500; 1/1000; 1/2000 и 1/4000.

Важным качественным показателем фотозатворов является характер экспонирования фотослоя в пределах поля кадра. Так, например, центральный затвор экспонирует фотослой в пределах всего поля кадра одновременно, а шторный затвор — последовательно участок за участком по мере перемещения шторок около кадрового окна.

В связи с указанными особенностями выдержка для различных участков поля кадра получается одинаковой только при применении центрального затвора и, как правило, различной при использовании шторного затвора (неравномерность выдержки).

Фокальные фотозатворы по сравнению с апертурными фотозатворами имеют безусловное достоинство при использовании сменных объективов.

10.2. ЦЕНТРАЛЬНЫЕ ФОТОЗАТВОРЫ

Световыми заслонками центрального затвора являются сложные по своей конфигурации лепестки, симметрично расположенные по отношению к оптической оси объектива. В процессе работы затвора его лепестки могут совершать как двухстороннее, так и одностороннее движение. Если при открывании светового отверстия центральным затвором его лепестки поворачиваются в одну сторону, а при закрывании — в другую, то такие

затворы называются реверсивными. К реверсивным затворам относятся центральные затворы фотоаппаратов. Если лепестки затвора совершают поворот в одном направлении как при открытии, так и при закрытии светового отверстия, то такие затворы называются ротативными. Такие затворы применяются преимущественно в аэрофотоаппаратах.

На рис. 10.2 показана принципиальная схема реверсивного затвора. Приводное кольцо 1 при срабатывании затвора под

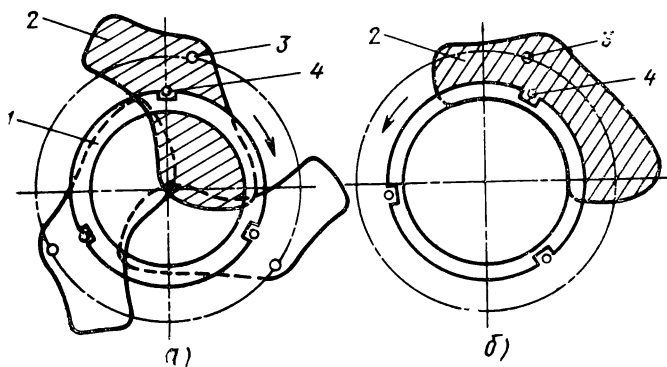


Рис. 10.2. Схема центрального затвора с реверсивным движением лепестков:

а—затвор закрыт; б—затвор открыт; 1—приводное кольцо; 2—лепесток; 3—ось; 4—штифт

воздействием ранее взведенной пружины (на рисунке не показана) сначала повернется на некоторый угол по часовой стрелке и через штифты 4 развернет лепестки 2 вокруг неподвижных осей 3. В конечном положении (рис. 10.2, б) лепестки полностью откроют световое отверстие. Затем, по истечении времени $t_{п.о}$ приводное кольцо повернется в противоположном направлении, что приведет к закрыванию светового отверстия (рис. 10.2, а).

На рис. 10.3 показана принципиальная схема ротативного затвора. Такой затвор имеет лепестки с двумя симметричными лопастями, причем при развороте лепестков 2 от приводного кольца 1 с помощью одних лопастей световое отверстие открывается, а с помощью других лопастей — оно закрывается. Штифты 4 и оси 3 выполняют ту же роль, что и в схеме рис. 10.2.

У некоторых центральных затворов (большшей частью в аэрофотоаппаратах) лепестки имеют форму дисков с вырезом, располагаемых так, как показано на рис. 10.4. Во время отработки выдержки диски, поворачиваясь вокруг осей 2, сначала открывают световое отверстие 3 (показано заштрихованным), а затем закрывают его. Такие затворы относятся к ротативным затворам.

Если обозначить через β угол поворота диска за время $t_{\text{отк}}$, угол светового выреза в диске через $\alpha_{\text{св}}$, то для определения эффективной выдержки $t_{\text{эф}}$ имеем:

$$t_{\text{отк}} = \frac{\beta}{\omega_{\text{д}}}; \quad t_{\text{в}} = \frac{\alpha_{\text{св}}}{\omega_{\text{л}}}; \quad \eta_{\text{ц}} = 1 - \frac{\beta}{\alpha_{\text{св}}}; \quad (10.2)$$

$$t_{\text{эф}} = \eta_{\text{ц}} t_{\text{в}} = \left(1 - \frac{\beta}{\alpha_{\text{св}}}\right) \frac{\alpha_{\text{св}}}{\omega_{\text{л}}} = \frac{\alpha_{\text{св}} - \beta}{\omega_{\text{л}}},$$

где $\omega_{\text{д}}$ — угловая скорость поворота дисков с вырезами.

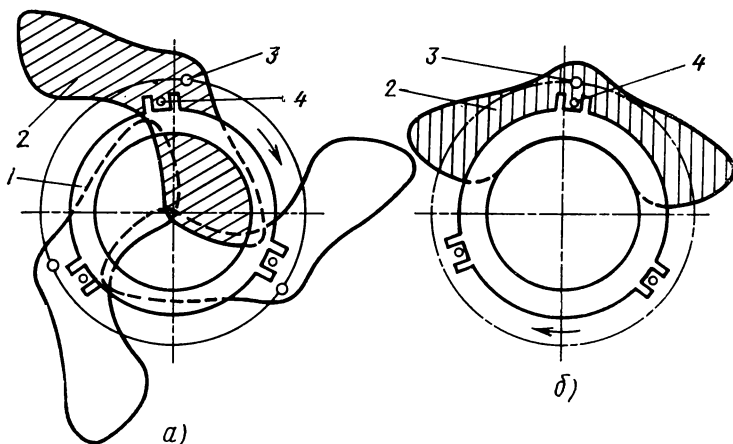


Рис. 10.3. Схема центрального затвора с односторонним движением лепестков:

а — затвор закрыт; б — затвор открыт;
1 — приводное кольцо; 2 — лепесток; 3 — ось; 4 — штифт

Для уменьшения продолжительности выдержек необходимо увеличивать скорость поворота дисков, что при импульсной работе затвора связано с большими ускорениями и ударными воздействиями. Поэтому в аэрофотоаппаратах находят применение дисковые затворы с непрерывным вращением их лепестков. Принципиальная схема такого типа затворов, называемых роторными, приведена на рис. 10.5. Два диска 3 с вырезами вращаются с одинаковой скоростью, но в различных направлениях, через приводные зубчатые колеса 2. При совпадении обоих вырезов открывается доступ световым лучам, идущим к фотослою. Для отработки выдержки служит диск 4, который посредством креста 1 мальтийского механизма периодически поворачивается, открывая и закрывая световое отверстие.

Центральные затворы, изготавливаемые отечественной промышленностью для фотоаппаратов, имеют следующие значения

диаметров их световых отверстий: 15; 18; 24; 29; 35; 40; 50 и 70 мм. Оптимальное число лепестков — (4—5) штук. Шкала выдержек равномерная с угловым расстоянием между соседними делениями, равным 6° . Минимальные выдержки у центральных затворов равны $1/250$ — $1/500$ с. ОКПД при коротких выдержках не превышает 0,60.

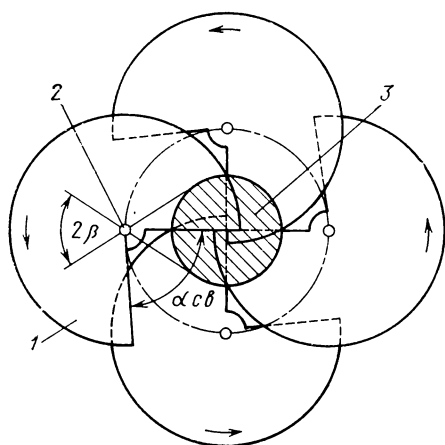


Рис. 10. 4. Схема секторного центрального затвора:

1—диск; 2—ось; 3—световое отверстие

В некоторых фотоаппаратах центральный затвор одновременно выполняет и роль диафрагмы, т. е. в нем лепестки открывают световое отверстие на различную величину. Такой затвор-диафрагма применяется только в фотоаппаратах, снабженных встроенным экспонометром.

К недостаткам центральных затворов следует отнести то, что при применении сменных объективов каждый из них должен быть снабжен затвором. Это удорожает сменные объективы.

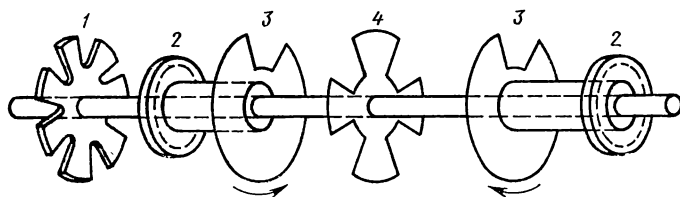


Рис. 10. 5. Схема роторного затвора:

1—мальтийский крест; 2—зубчатые колеса; 3—диски; 4—диск выдержек

10.3. ШТОРНЫЕ ФОТОЗАТВОРЫ

Принципиальная схема шторного затвора фотоаппарата показана на рис. 10. 6. Световыми заслонками затвора являются две шторы 5 и 14, между прямолинейными кромками 4 и 13 которых образуется щель шириною $b_{ш}$. При взводе шторного затвора, осуществляемом одновременно с перемоткой фотопленки, через зубчатое колесо 15 вращение передается барабану 1 и шкивам 2. При этом шторка 14 будет наматываться на барабан 1, а шторка 5 своими тесемками 3 — на шкивы 2. В результате такой принудительной перемотки шторок будут закручи-

ваться винтовые пружины 11 и 12, концы которых прикреплены к неподвижным осям 7 и 9 и подвижным втулкам 8 и 10.

При спуске фотозатвора сначала освобождаются шкивы 2 и шторка 5 под действием пружины 12 начнет перемещаться слева направо, последовательно открывая доступ световым лучам к фотоматериалу, расположенному за кадровым окном (оно показано заштрихованным). Спустя некоторое время, определяемое механизмом выдержек, освобождается барабан 1 и штор-

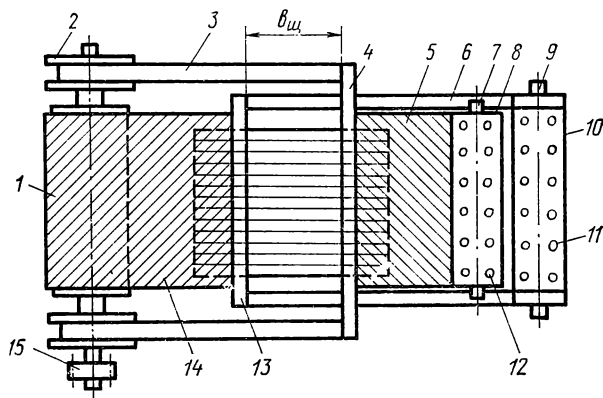


Рис. 10.6. Схема шторного затвора:

1—барабан; 2—шкив; 3, 6—тесемки; 4, 13—кромки; 5 и 14—шторки; 7, 9—неподвижные ось; 8, 10—подвижные втулки; 11, 12—винтовые пружины; 15—зубчатое колесо

ка 14 с тесемками 6, перемещаясь под действием пружины 11, начнет закрывать кадровое окно. Ширина щели $b_{щ}$ будет зависеть от промежутка времени между моментами начала движения шторок.

При экспонировании фотослоя в какой-либо его точке для открывания доступа световым лучам, идущим в эту точку, шторка должна пройти путь, равный диаметру d сечения пучка сходящихся лучей (рис. 10.7). Шторка 2 находится на некотором расстоянии c от фотопленки 4, расположенной за кадровой рамкой 3. Принимая расстояние от диафрагмы объектива 1 до фотопленки 4, равным фокусному расстоянию f' , для определения диаметра d имеем:

$$d = \frac{D}{f'} c = \frac{c}{n_r} \quad (10.3)$$

Для вычисления эффективной выдержки $t_{эф}$, обрабатываемой шторным затвором, имеем:

$$t_{отк} = \frac{d}{V_{шт}}; \quad t_{в} = \frac{b_{щ} + d}{V_{шт}}; \quad \eta_{шт} = 1 - \frac{d}{b_{щ} + d} = \frac{b_{щ}}{b_{щ} + d};$$

$$t_{эф} = \eta_{шт} t_{в} = \frac{b_{щ}}{b_{щ} + d} \cdot \frac{b_{щ} + d}{V_{шт}} = \frac{b_{щ}}{V_{шт}}, \quad (10.4)$$

где $V_{шт}$ — скорость перемещения шторы.

Из формулы (12.4) следует, что выдержку можно изменять как за счет изменения ширины щели $b_{щ}$ (что осуществляется в

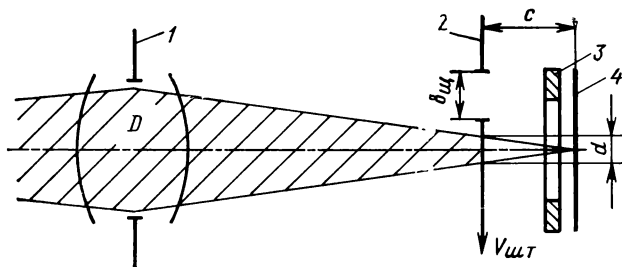


Рис. 10.7. К определению $t_{эф}$ шторного затвора:

1—диафрагма; 2—шторка; 3—кадровая рамка; 4—фотопленка

шторных затворах фотоаппаратов), так и за счет изменения скорости перемещения шторы (что осуществляется в шторных затворах аэрофотоаппаратов). Минимальная выдержка, обрабатываемая шторным затвором, равна 1/1000 и менее секунд. Шторные затворы имеют больший по сравнению с центральными затворами ОКПД. Однако их применение в аэрофотоаппаратах ограничено тем, что фотоизображения на аэрофотопленке получаются искаженными по сравнению с конфигурацией снимаемых предметов. Это происходит потому, что различные участки оптического изображения предмета фиксируются на фотослое в различное время, в течение которого оптическое изображение непрерывно смещается относительно фотослоя вследствие полета самолета.

10.4. ПРОЧИЕ РАЗНОВИДНОСТИ ФОТОЗАТВОРОВ

Обтюраторные затворы — применяются преимущественно в киносъёмочных аппаратах. Рассмотрим принцип действия обтюраторного затвора на примере дискового однолопастного обтюратора (рис. 10.8) со световым вырезом $\alpha_{св}$. Обтюратор вращается равномерно с угловой скоростью $\omega_{обт}$, соответствующей частоте киносъёмки W_c , причем $\omega_{обт} = 2\pi W_c$.

Для открытия доступа световым лучам, идущим в какую-либо точку кадра 1, лопасть 2 obtюратора должна повернуться на угол φ , соответствующий диаметру d сечения пучка сходящихся лучей плоскостью obtюратора (см. рис. 10.7).

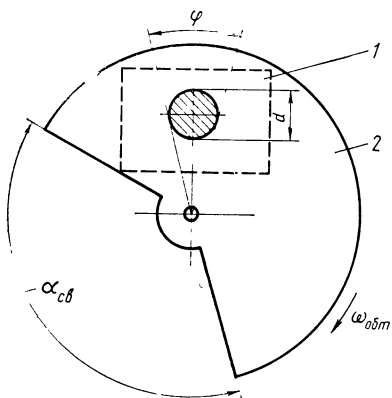


Рис. 10.8. Форма и расположение дискового obtюратора:
1—кадр; 2—лопасть obtюратора

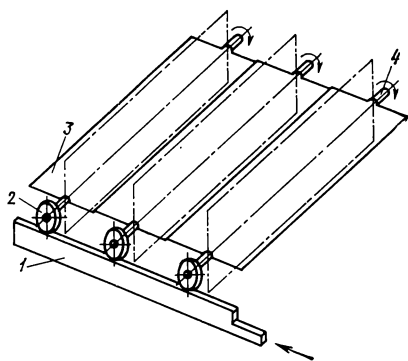


Рис. 10.9. Схема затвора жалюзи:
1—рейка; 2—зубчатое колесо; 3—створка; 4—ось

Для определения эффективной выдержки $t_{эф}$ имеем:

$$t_{отк} = \frac{\varphi}{\omega_{обт}}; \quad t_{в} = \frac{\alpha_{св} + \varphi}{\omega_{обт}}; \quad \eta_{обт} = 1 - \frac{\varphi}{\alpha_{св} + \varphi} = \frac{\alpha_{св}}{\alpha_{св} + \varphi}; \quad (10.5)$$

$$t_{эф} = \eta_{обт} t_{в} = \frac{\alpha_{св}}{\alpha_{св} + \varphi} \frac{\alpha_{св} + \varphi}{\omega_{обт}} = \frac{\alpha_{св}}{\omega_{обт}}, \quad (10.6)$$

где $\omega_{обт}$ — угловая скорость вращения obtюратора. Заменив $\omega_{обт}$ на $2\pi W_c$, получаем

$$t_{эф} = \frac{\alpha_{св}}{2\pi W_c} \quad (10.6')$$

Затворы жалюзи применяются преимущественно в аэрофотоаппаратах. Содержат несколько взаимно перекрывающихся створок 3, которые выполняют роль световых заслонок (рис. 10.9). В процессе отработки выдержки створки одновременно поворачиваются вокруг своих осей 4 на угол π рад (показано пунктиром), что обеспечивается перемещением рейки 1, с которой сцеплены зубчатые колеса 2. Створки могут поворачиваться или непрерывно (без остановки), или прерывисто: сначала поворот на $\pi/2$ рад ($t_{отк}$), затем остановка ($t_{п.о}$), и наконец, еще поворот на $\pi/2$ рад ($t_{зак}$).

Как показывает практика, ОКПД затвора жалюзи не превышает 0,50. Кроме того, различные точки в пределах поля кадра экспонируются с различными выдержками и неодновременно.

Створки располагаются в ходе световых лучей, что приводит к их рассеянию и частичному затенению. Таким образом, затворы жалюзи имеют существенные недостатки и невысокие показатели по сравнению с затворами других типов. Основное достоинство затворов жалюзи — их относительно простая конструкция и обеспечение открывания и закрывания больших световых отверстий, которые характерны для длиннофокусных объективов ($f' > 100$ мм).

10.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫДЕРЖКИ

Большинство затворов, как правило, обеспечивают автоматическую обработку нескольких различных по своей величине выдержек, устанавливаемых заранее на шкале выдержек. Для этого они снабжаются специальными устройствами, называемыми механизмами выдержек.

Изменение продолжительности выдержки в фотозатворах осуществляется различными способами. Так, например, величину выдержки можно изменять за счет изменения скорости движения световых заслонок. Для увеличения продолжительности выдержки часто применяются различного типа тормозные механизмы, служащие, главным образом, для изменения времени полного открытия $t_{п.о.}$ В последнее время в качестве регулятора выдержек стали использовать электронные устройства.

Для изменения продолжительности выдержек в центральных затворах широко применяются тормозные механизмы анкерного типа (рис. 10.10).

Рис. 10.10. Схема тормозного механизма анкерного типа:

1—приводное кольцо; 2—ось; 3—пружина; 4—штифт; 5—зубчатый сектор; 6—зубчатая передача; 7—анкерное колесо; 8—анкер; 9—кулачок

Приводное кольцо 1 после своего поворота на угол, соответствующий $t_{отк.}$ встречает на своем пути выступ зубчатого сектора 5 и останавливается. Так как кольцо 1 находится под воздействием спусковой пружины, то оно будет давить на выступ зубчатого сектора с некоторым усилием Q , стремясь повернуть его по часовой стрелке. Для освобождения кольца 1 зубчатый сектор должен повернуться на угол γ и занять положение, показанное пунктиром. Продолжитель-

ность этого разворота, а значит и длительность выдержки, зависит как от скорости разворота самого сектора, так и от величины угла γ . Сектор 5 зубчатой передачей 6 связан с анкерным колесом 7.

Скорость разворота сектора можно регулировать путем включения или отключения анкера 8, для чего служит эксцентрик 9, а также подключением к приводному кольцу 1 дополнительной пружины. Величину угла γ изменяют разворотом кольца установки выдержек, в фигурный паз которого входит штифт 4. Воздействуя на этот штифт, можно устанавливать сектор в различных положениях, разворачивая его вокруг оси 2. При отводе сектора в крайнее правое положение происходит отключение тормозного механизма и время $t_{\text{д.о}}$ становится равным нулю, а отрабатываемая выдержка — минимальной. Пружина 3 поджимает сектор 5 к кольцу 1. Тормозные механизмы анкерного типа применяются также в автопусках, которые служат для автоматического спуска затвора через некоторый промежуток времени после нажатия на спусковую кнопку.

В шторных затворах изменение продолжительности выдержек осуществляется за счет изменения промежутка времени между моментами начала движения обеих шторок, которое можно осуществлять также с помощью механических тормозных механизмов.

Для регулирования автоматически отрабатываемых выдержек вместо чисто механических устройств стали применяться электромеханические устройства, включающие как механические, так и электрические (электронные) узлы. В фотозатворах с электромеханическими устройствами перемещение их световых заслонок во время открывания светового отверстия осуществляется с помощью пружин, срабатывающих после нажатия на пусковую кнопку. Продолжительность выдержки задается с помощью электросхемы, вырабатывающей управляющий сигнал (команду) на закрывание затвора.

Принцип действия управляющего органа большинства таких затворов основан на изменении продолжительности зарядки конденсатора C (рис. 10.11). При нажатии на спусковую кнопку одновременно с открыванием светового отверстия замыкается контакт K и конденсатор C начнет заряжаться от батареи B напряжением U_0 . Величину зарядного электротока можно изменять переменным резистором R , а от величины тока будет зависеть время зарядки конденсатора до достижения определенной величины напряжения U_c на его обкладках, при котором срабатывает электронное реле ЭР, подающее команду на закрывание затвора.

Таким образом, изменяя величину электросопротивления R переменного резистора, можно регулировать промежуток времени между моментами открывания и закрывания затвора, т. е. величину выдержки. Это обеспечивается за счет кинематической

связи между узлом установки выдержек и движком переменного резистора R .

Если переменный резистор R заменить фоторезистором, сопротивление которого изменяется по определенному закону в зависимости от освещенности его рабочей площадки, то такой затвор будет обрабатывать выдержки автоматически. Принципиальная схема такого фотозатвора показана на рис. 10. 12. При нажатии на кнопку спуска затвора замыкается контакт K и че-

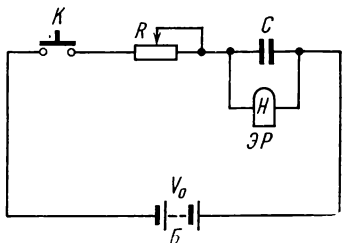


Рис. 10. 11. Схема управления затвором с помощью электро-механического устройства

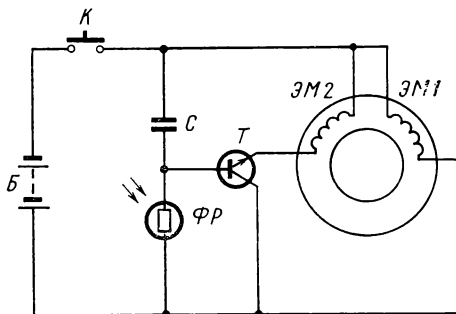


Рис. 10. 12. Схема затвора с автоматической обработкой выдержек

рез электромагнит $\mathcal{E}M1$ начнет протекать электроток, что приведет к открыванию затвора. Одновременно начнет заряжаться конденсатор C , причем величина зарядного тока будет определяться электросопротивлением фоторезистора ΦP , воспринимающего световые лучи, идущие от предметов съемки.

В момент зарядки конденсатора до величины напряжения, при котором открывается полупроводниковый триод T , через электромагнит $\mathcal{E}M2$ начнет протекать электроток и затвор закроется. Чем больше освещенность рабочей площади фоторезистора $E_{\Phi P}$, тем меньше его электросопротивление и тем больше величина зарядного тока, и наоборот. Так как величина освещенности $E_{\Phi P}$ зависит от яркости предметов съемки, то, следовательно, и выдержка, обрабатываемая автоматически таким затвором, будет тоже зависеть от величины этой яркости.

Глава 11

ЛЕНТОПРОТЯЖНЫЕ МЕАНИЗМЫ КИНОАППАРАТОВ

11.1. СХЕМА ЛЕНТОПРОТЯЖНОГО МЕХАНИЗМА

Как при киносъемке, так и при кинопроекции киноплёнка (кинофильм) перемещается через фильмовый канал киноаппа-

рата обычно прерывисто (скачкообразно) с некоторой постоянной частотой смены кадров. Перемещение киноплёнки в киноаппарате обеспечивается с помощью специального механизма, который принято называть лентопротяжным, хотя его правильное бы именовать плёнопротяжным механизмом. В функции такого механизма входит также непрерывное разматывание киноплёнки с рулона, находящегося в подающей кассете (бобине), с последующим непрерывным наматыванием ее на рулон, находящийся в принимающей кассете (бобине).

На рис. 11.1 показана типовая схема лентопротяжного механизма киноаппарата. Киноплёнка равномерно разматывается с рулона 1 посредством тянущего зубчатого барабана 2 и подается в фильмовый канал 3, содержащий прямоугольный вырез 4, называемый кадровым окном. Мимо кадрового окна киноплёнка перемещается прерывисто с помощью скачкового механизма 5, который периодически продергивает киноплёнку на шаг кадров H_k .

Шагом кадров называется расстояние между центрами (или другими одноименными точками) двух последовательных кадров, получаемых на киноплёнке. Затем киноплёнка поступает на задерживающий барабан, служащий для равномерной ее подачи к рулону 7, на который она и наматывается. За тянущим барабаном 2 и перед задерживающим барабаном 6 киноплёнка должна образовывать петли «а» и «б» с целью обеспечения возможности ее скачкообразного перемещения через фильмовый канал 3.

Для предотвращения самопроизвольного разматывания плёнки с рулона 1 необходимо обеспечить торможение сердечника рулона, для чего служит тормозное устройство (обычно фрикционного типа), обозначенное через Φ_T . Вследствие такого

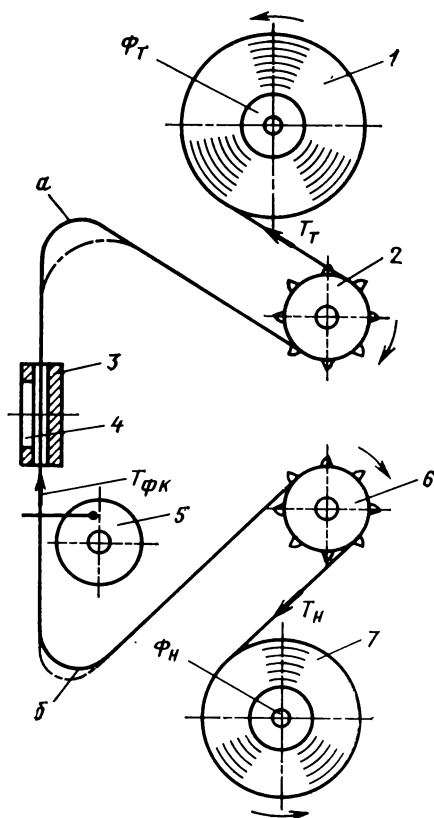


Рис. 11.1. Типовая схема лентопротяжного механизма:

1—подающий рулон; 2—тянущий зубчатый барабан; 3—фильмовый канал; 4—кадровое окно; 5—скачковый механизм; 6—задерживающий зубчатый барабан; 7—принимающий рулон

торможения между тянущим зубчатым барабаном и разматываемым рулоном киноплёнка испытывает натяжение T_t . Вторичному натяжению киноплёнка подвергается на участке между фильмовым каналом и скачковым механизмом. На рис. оно обозначено $T_{фк}$. Это натяжение возникает, во-первых, вследствие инерционности протергиваемого куска плёнки, во-вторых, из-за прижима киноплёнки к направляющим ползкам фильмового канала.

Для обеспечения наматывания киноплёнки на рулон 7 сердечник этого рулона должен вращаться принудительно от приводного механизма киноаппарата. Так как диаметр наматываемого рулона с каждым оборотом сердечника постепенно увеличивается, то его угловая скорость должна постепенно уменьшаться. Только при обеспечении такого соответствия между диаметром рулона и угловой скоростью сердечника наматывание киноплёнки будет осуществляться с постоянной скоростью, равной скорости ее разматывания. Поэтому между сердечником наматываемого рулона 7 и приводом киноаппарата кинематическая связь должна быть нежесткой, чтобы опесечивалась возможность некоторого пробуксовывания сердечника по мере намотки рулона. Это пробуксовывание создается за счет силы натяжения киноплёнки T_n между задерживающим зубчатым барабаном 6 и наматываемым рулоном 7.

В табл. 11.1 приведены усредненные значения усилия натяжения киноплёнки, которым она подвергается в процессе перемещения через лентопротяжный тракт кинопроектора.

Таблица 11.1

Зона натяжения	Ширина киноплёнки в мм		
	16	35	70
	Усилие натяжения в Н		
Между разматываемым рулоном и тянущим барабаном (не менее)	0,5	1,5	2,5
Между фильмовым каналом и скачковым механизмом	1	4	9
Между задерживающим барабаном и наматываемым рулоном (не менее)	1,5	2	3,5

Примечания: 1. В киносъёмочных аппаратах усилия натяжения могут быть несколько увеличены, т. к. киноплёнка протягивается через их лентопротяжный тракт не более 2 раз;

2. Натяжение T_n принимается больше T_t для обеспечения более плотной намотки рулона.

11.2. ЗУБЧАТЫЕ БАРАБАНЫ

Зубчатые барабаны служат для непрерывного перемещения киноплёнки с определенной линейной скоростью $V_{пл}$, зависящей от частоты киносъемки W (кинопроекции) и шага кадров H_K и равной: $V_{пл} = WH_K$ [мм/с]. Конструкция и точность изготовления зубчатых барабанов могут быть различными, однако во всех случаях они должны соответствовать основным требованиям,

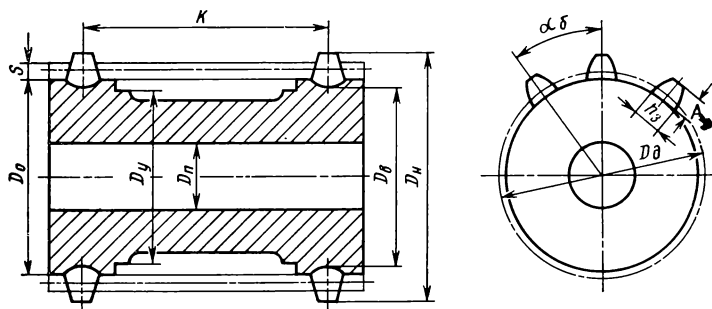


Рис. 11.2. Конструктивные размеры зубчатого барабана

предъявленным к зубчатым барабанам. На рис. 11.2 показаны конструктивные размеры зубчатого барабана и их обозначения.

D_0 — диаметр опорной поверхности, на которой располагается киноплёнка (показана пунктиром) толщиной s ;

D_d — диаметр делительной окружности зубьев барабана, совпадающей со средней линией киноплёнки;

D_b — диаметр внутренней окружности зубьев барабана;

D_y — диаметр уступов;

D_n — наружный диаметр зубьев барабана;

$D_{п}$ — посадочный диаметр;

A — высота зуба;

h_3 — толщина зуба у основания;

α_6 — угловой шаг зубьев барабана;

K — расстояние между зубчатыми венцами.

Для определения основных размеров в мм имеем следующие выражения: $D_d = \frac{t_6 z}{\pi}$, где t_6 — шаг зубьев, а z — число зубьев;

$$D_0 = D_d - s; \quad D_n = (D_d + 2A - s);$$

$$A = (1,25 \div 1,3);$$

$$D_b = D_0 - (0,15 \div 0,20);$$

$$D_y = D_0 - 0,3;$$

$$\alpha_6 = \frac{2\pi}{z}; \quad (11.1)$$

$K = m_2 + b_{п}$, где m_2 и $b_{п}$ — размеры, показанные на рис. 8.2 и приведенные в табл. 8.1.

Шаг зубьев t_{δ} зависит от режима работы зубчатого барабана, определяемого направлениями усилия натяжения T и скорости пленки $V_{пл}$. Если натяжение T и скорость пленки $V_{пл}$ направлены в различные стороны, то имеет место режим тянущего барабана; если T и $V_{пл}$ направлены в одну сторону, то имеет место режим задерживающего барабана. Каждому режиму работы зубчатого барабана соответствует определенное расположение киноплемки на опорной поверхности барабана, как это показано на рис. 11.3: a — для тянущего барабана; b — для задерживающего барабана. В обоих случаях непосредственный контакт с кромкой

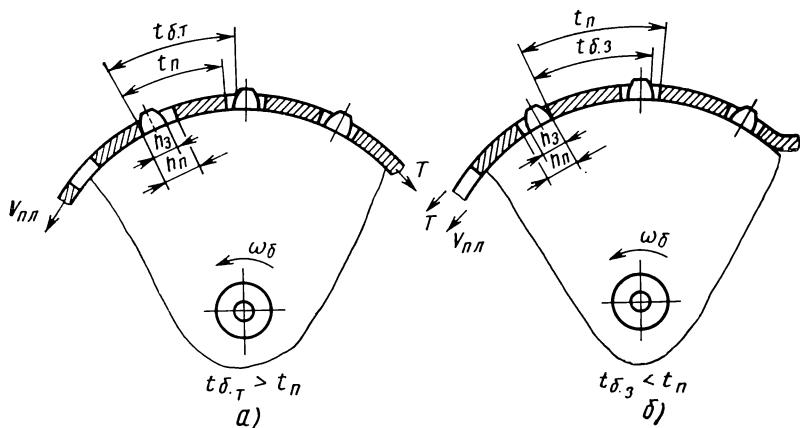


Рис. 11.3. Расположение киноплемки на зубчатом барабане:

a —тянущем; b —задерживающем

перфорации имеет только один зуб, который принято называть рабочим. При вращении барабана роль рабочего зуба выполняют последовательно все зубья барабана. Существенное различие между характером действия рабочих зубьев в обоих режимах заключается в том, что зубья барабанов контактируют с кромкой перфорации разными своими поверхностями. Это обстоятельство приводит к тому, что соотношение между шагом зубьев барабанов t_{δ} и шагом перфораций киноплемки t_n должно быть различным, в зависимости от режима работы барабана. Так, например, зубчатый барабан, работающий в тянущем режиме, должен иметь шаг своих зубьев $t_{\delta\tau}$ больше шага перфораций t_n . Соответственно, у зубчатого барабана, работающего в задерживающем режиме, шаг его зубьев $t_{\delta z}$ должен быть меньше шага перфораций t_n . Для обеспечения этого шаг зубьев тянущего барабана $t_{\delta\tau}$ принимается равным шагу перфораций t_n , который имеет свежая (неусохшая) киноплемка, а шаг зубьев задерживающего барабана $t_{\delta z}$ — шагу перфораций t_n у усохшей киноплемки. Уменьшение шага перфораций t_n у свежей киноплемки, т. е.

при минимальной ее усадке, не превышает (0,3—0,4) %, а у усохшей киноленты, т. е. после максимальной ее усадки, может достигать (1,2—1,5) %.

С целью уменьшения размеров лентопротяжного механизма в киносъемочных аппаратах иногда вместо тянущего и задерживающего зубчатых барабанов применяется один, так называемый комбинированный барабан (рис. 11.4). С одной стороны такой барабан работает как тянущий, а с другой стороны — как задерживающий. Рабочими зубьями комбинированного барабана являются зубья «а» и «б», а шаг его зубьев $t_{б.к} = t_{п}$ при средней усадке киноленты ($\sim 0,6\%$).

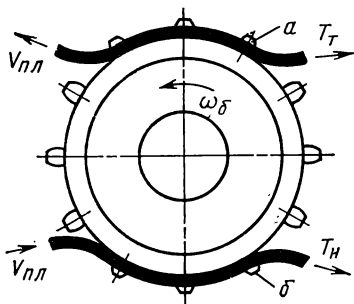


Рис. 11.4. Расположение киноленты на комбинированном зубчатом барабане

Число зубьев барабана z должно быть кратным числу перфораций, приходящихся на один кадр. Рекомендуется z выбирать равным: для 70-мм киноленты — 20, 30 или 40; для 35-мм киноленты 16, 24 или 32; для 16-мм киноленты — 8, 12 или 16.

11.3. СКАЧКОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Скачковые механизмы предназначены для периодического прерывистого перемещения киноленты в фильмовом канале киноаппарата. Для оценки скачковых механизмов служат следующие их технические показатели:

1. Точность перемещения киноленты на шаг кадров H_k , которая, наряду с другими факторами, определяет устойчивость киноизображения на экране при кинопроекции. Величина допускаемого смещения кадров от их идеального положения (величина неустойчивости кадров) у различных киноаппаратов не должна превышать (0,020—0,025) мм.

2. Световой коэффициент (его называют также коэффициентом рациональности) равный отношению времени t_n , в течение которого кинолента находится в неподвижном положении, к периоду смены кадров T_k , равному сумме $(t_n + t_{п})$, где $t_{п}$ — время перемещения киноленты на величину шага H_k скачковым механизмом. Чем меньше $t_{п}$, тем больше t_n и тем эффективнее используется световой поток, проходящий через кадровое окно киноаппарата. Особенно важно повышать световой коэффициент скачковых механизмов у кинопроекторов.

3. Усилие воздействия рабочего элемента скачкового механизма на киноленту (обычно — на межперфорационную перемычку) во время ее продергивания. Оно не должно превышать определенной величины, которая назначается исходя из прочно-

сти перемычки. Особенно важно уменьшить усилие продергивания в кинопроекторах, так как кинофильм должен выдерживать свыше 250 протягиваний через лентопротяжный тракт.

4. Срок службы скачкового механизма или его долговечность, зависящая главным образом от усилий, действующих в сочленениях отдельных деталей механизма в процессе его работы. Эти усилия определяют износ деталей скачкового механизма и уровень шума, возникающего при его работе.

5. Кинематические характеристики скачкового механизма, представляемые в виде графиков изменения пути, скорости и

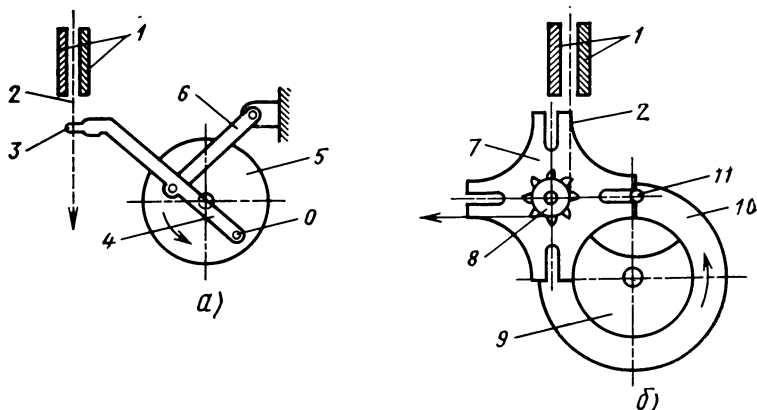


Рис. 11. 5. Схемы скачковых механизмов:

а—рейферного; *б*—мальтийского:
1—фильмовый канал; 2—киноплёнка; 3—зуб рейфера; 4—рейферный рычаг;
5—шайба; 6—балансир; 7—мальтийский крест; 8—зубчатый барабан; 9—кулачок; 10—шайба (эксцентрик); 11—палец

ускорения прерывисто перемещаемого куска киноплёнки или ведущего звена скачкового механизма в функции времени. От этих показателей зависит характер воздействия рабочего элемента скачкового механизма на киноплёнку.

В киноаппаратах применяются несколько типов скачковых механизмов, принципиальные схемы двух из которых приведены на рис. 11. 5.

Рейферный механизм (рис. 11. 5, *а*) перемещение киноплёнки 2 в фильмовом канале 1 осуществляет с помощью зубьев 3 (одного или нескольких), расположенных на конце качающегося рейферного рычага 4, соединённого шарниром *О* с вращающейся шайбой 5. Так как шайба 5 выполняет роль кривошипа, то такие рейферные механизмы называются кривошипными. Для обеспечения желаемого закона движения зубьев рейфера служит качающийся балансир 6. Вместо него можно использовать различные по своей конфигурации направляющие и другие приспособления.

В некоторых грейферных механизмах в качестве приводного звена применяется вращающийся кулачок Вольфа, который охватывает рамку, несущая грейфер. Такие грейферные механизмы поэтому называются рамочно-кулачковым (см. рис. 11.6).

Мальтийский механизм (рис. 11.5, б) обеспечивает прерывистое продвижение киноленты 2 с помощью зубчатого барабана 8, сидящего на одной оси с мальтийским крестом 7. В шлицы креста периодически входит палец 11, находящийся на вращающейся шайбе (эксцентрик) 10. Фиксация креста после его разворота осуществляется кулачком 9.

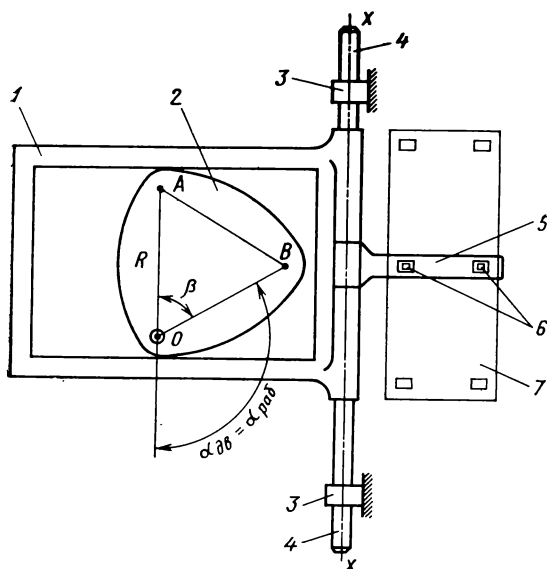


Рис. 11.6. Схема рамочно-кулачкового грейферного механизма:

1—рамка; 2—кулачок; 3—направляющие; 4—полуоси; 5—грейфер; 6—зубья грейфера; 7—кинолента

Из скачковых механизмов, показанных на рис. 11.5, наивысшую точность перемещения киноленты обеспечивают грейферные механизмы, которые поэтому преимущественно применяются в киносъёмочных аппаратах. В кинопроекторных аппаратах находят широкое применение мальтийские механизмы вследствие их долговечности и достаточно высокого светового коэффициента, что очень важно при кинопроекции, так как позволяет повышать яркость киноизображения на экране.

Познакомимся с принципом действия рамочно-кулачкового грейферного механизма и на примере этого скачкового механизма рассмотрим методику определения численной величины светового коэффициента (рис. 11.6). При равномерном вращении кулачка 2 вокруг оси O рамка 1 будет совершать возвратно-поступательное движение вверх и вниз, при этом полуоси 4 будут двигаться в направляющих 3. Вместе с рамкой 1 одновременно перемещается грейфер 5 с зубьями 6. Для периодического ввода зубьев грейфера в перфорации киноленты 7 и последующего

их вывода из перфораций грейфер должен поворачиваться вокруг оси xx , для чего применяется вспомогательное устройство (на рисунке не показано).

Если кулачок 2 построен на базе равностороннего треугольника АОВ, сторона которого R , то величина хода H_r грейфера в направлении перемещения киноплёнки тоже равна R . При совершении грейфером 5 рабочего хода на величину H_r кулачок повернется на некоторый угол, называемый углом движения приводного звена, или рабочим его углом $\alpha_{\text{раб}}$. Этот угол соответствует промежутку времени $t_{\text{п}}$, а полный оборот кулачка — сумме $(t_{\text{н}} + t_{\text{п}})$. Таким образом, для определения величины светового

коэффициента отношение $\frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{п}}}$ можно заменить отношением $\frac{2\pi - \alpha_{\text{раб}}}{2\pi}$. После почленного деления получаем $1 - \frac{\alpha_{\text{раб}}}{2\pi}$.

Так как угол АОВ $= \beta = \frac{1}{3}\pi$, то $\alpha_{\text{раб}} = \pi - \beta = \frac{2}{3}\pi$. Поэтому световой коэффициент такого [рамочно-кулачкового грейферного механизма равен $\frac{2}{3} = 0,67$.

У мальтийского механизма с крестом, имеющим четыре лопасти, угол поворота шайбы 17 (рис. 11.5, б) за время продвижения киноплёнки, т. е. угол $\alpha_{\text{раб}}$, равен $\pi/2$. Поэтому световой коэффициент такого механизма равен $\frac{3}{4} = 0,75$.

Для увеличения светового коэффициента в рамочно-кулачковых грейферных механизмах применяются кулачки, построенные на базе равнобедренного треугольника (угол $\beta > \pi/3$). В мальтийских механизмах для этих целей между приводом киноаппарата и шайбой с пальцем устанавливаются кулисные механизмы, обеспечивающие ускоренный поворот шайбы при перемещении киноплёнки и замедленный — во время, когда киноплёнка неподвижна.

11.4. ПРОЧИЕ УЗЛЫ ЛЕНТОПРОТЯЖНОГО МЕХАНИЗМА КИНОАППАРАТА

Фильмовый канал предназначен для обеспечения правильной раскладки киноплёнки около кадрового окна перед съёмкой кинокадра или перед его проецированием на экран. Так как кадровое окно сделано в одной из деталей фильмового канала, то последний должен устанавливаться в определённом положении относительно киносъёмочного или кинопроекционного объектива. Фильмовый канал должен, во-первых, обеспечивать выравнивание киноплёнки при ее остановке около кадрового окна. Во-вторых, взаимное расположение киноплёнки и кадрового окна должно быть по возможности неизменным (стабильным).

Выравнивание киноплёнки большей частью обеспечивается ее прижимом к неподвижным ползкам 4 основания 3 фильмового канала (рис. 11.7) с помощью пружинящих ползков 2, которыми снабжена крышка (дверца) 1. Стабилизация киноплёнки в поперечном направлении может осуществляться или с помощью боковых бортиков 6 или с помощью других приспособлений (например, поперечно-направляющим роликом). Стабилизация кадрового окна 5 в продольном направлении зависит в основном от точности работы скачкового механизма. Роль фильмового канала сводится к тому, чтобы удерживать киноплёнку в том положении, в котором она оказывается после перемещения скачковым механизмом. Фиксация киноплёнки после прекращения действия скачкового механизма осуществляется или ее прижимом, или с помощью специальных приспособлений (например, контргрейфером).

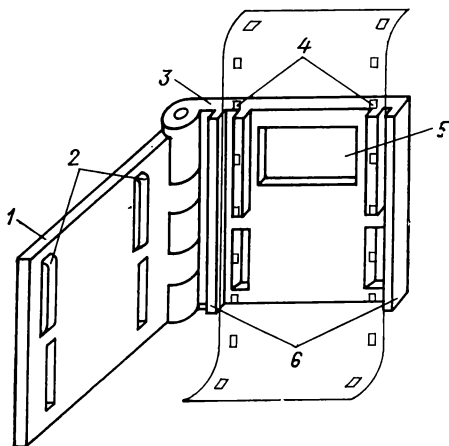


Рис. 11.7. Фильмовый канал киноаппарата:

1—крышка (дверца); 2—пружинящие ползки; 3—основание; 4—неподвижные ползки; 5—кадровое окно; 6—бортики

Размеры кадрового окна принимаются такими, чтобы размеры изображений, получаемых на киноплёнке при съёмке, или проецируемых на экран при проекции соответствовали размерам, нормируемым государственными стандартами. Принято кадровое окно в фильмовом канале кинопроектора делать по своим размерам несколько меньшим, чем кадровое окно фильмового канала киносъёмочного аппарата. В табл. 11.2 приведены номинальные размеры изображений (кадров) при различных форматах фото- и киноплёнки. Размеры даны в мм в виде произведения: высота $\times$ ширина.

Кассеты являются составными частями киноаппаратов и служат для размещения в них рулонов с киноплёнкой. Кассеты применяются главным образом в киносъёмочных аппаратах, причем они бывают наружными и внутренними. Корпус кассеты делается светонепроницаемым, а в местах входа и выхода киноплёнки (в так называемых устьях кассеты) устанавливаются приспособления для предотвращения проникновения света внутрь кассеты. Эти приспособления называются световыми клапанами.

Кассету, в которой находится разматываемый рулон, принято называть подающей, а кассету с наматываемым рулоном — принимающей. По своей конструкции кассеты бывают одинар-

Таблица 11.2

Аппарат	Ширина пленки			
	8-мм	16-мм	35-мм	70-мм и другие
Фотоаппараты	—	10×14; 14×21	18×24; 24×36	45×60; 60×60; 60×90; 90×120
Киносъемочный	3,5×4,9; 4,12×5,69*	7,45×10,05	16,0×21,95; 18,6×21,95**	23,0×52,5
Кинопроекционный	3,25×4,4; 4,01×5,41*	7,26×9,7	15,3×21,3; 18,1×21,2**	19,8×45,6

* Размеры для формата «супер».

** Размеры для широкоэкранного кинематографа.

ными, сдвоенными и полуторными. Одинарные кассеты вмещают в себя один рулон киноплёнки (рис. 11.8, а). Сдвоенные кассеты содержат две одинарные, смонтированные на одном основании (рис. 11, б). Полуторная кассета имеет одну внутреннюю

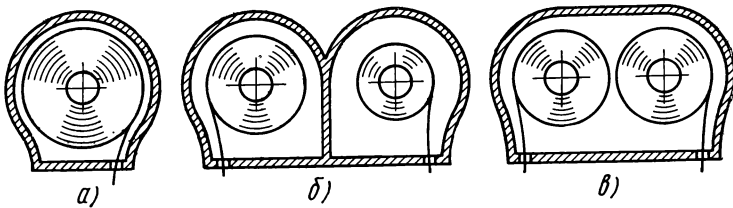


Рис. 11.8. Разновидности кассет:
а—одинарная; б—сдвоенная; в—полуторная

полость, в которой размещаются два рулона — разматываемый и наматываемый (рис. 11.8, в). Некоторые полуторные кассеты содержат в себе направляющие ролики, зубчатые барабаны, фильмовый канал и другие узлы ленто-протяжного механизма. Такие кассеты позволяют очень быстро перезаряжать киносъемочный аппарат, отчего их называют быстросменными кассетами. Они применяются преимущественно в ручных и любительских киноаппаратах.

Рулон киноплёнки в подающую кассету заряжается, будучи намотанным на сердечник (бобышку). Основные размеры сердечников выбираются в соответствии с ГОСТом 3917—64 и 11669—65. Для размещения рулона киноплёнки часто используются сердечники, к боковым торцам которых прикреплены диски. Такие устройства, называемые бобинами, применяются преимущественно в кинопроекционных аппаратах. Бобины используются также и для зарядки киносъемочных аппаратов.

На рис. 11.9 приведен внешний вид бобины. Диски бобин должны иметь вырезы (окна) для наблюдения за разматываемым или наматываемым рулоном. Кроме того, около сердечника в диске должны быть отверстия, в которые входят пальцы рук при закреплении зарядного конца киноплёнки на сердечнике. Основные размеры бобин и технические требования к ним содержатся в ГОСТе 9615—61 (бобины для киносъёмочных аппаратов), ГОСТе 7381—61 и 15881—70 (бобины для кинопроекторов).

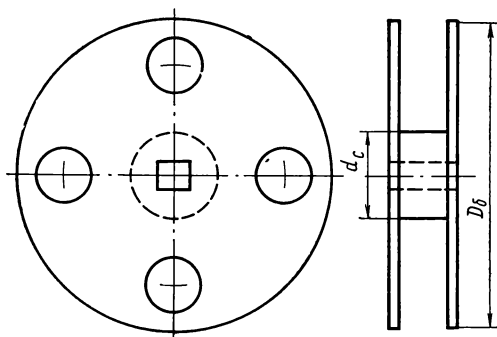


Рис. 11.9. Внешний вид бобины

Каждая бобина имеет условное обозначение. Например, бобина для киноплёнки шириной 35 мм, вмещающая 300 м, обозначается: «Бобина 35—300 ГОСТ 15881—70».

Внутренний диаметр одинарной кассеты D_k или наружный диаметр дисков бобины D_b должен быть несколько больше диаметра рулона D_p , величина которого определяется по формуле:

$$D_p = \sqrt{\frac{4Lsv}{\pi} + d_c^2}, \quad (11.2)$$

где L — длина намотанной киноплёнки (ёмкость рулона);

s — толщина киноплёнки;

v — коэффициент, учитывающий неплотное прилегание витков друг к другу $v = (1,05 \div 1,10)$;

d_c — диаметр сердечника.

Наматывающие устройства (наматыватели) обеспечивают намотку киноплёнки на сердечник принимающей кассеты (бобины). Как уже отмечалось ранее, в процессе разматывания и наматывания киноплёнка испытывает некоторое натяжение, возникающее в результате действия узла торможения сердечника падающей кассеты или узла пробуксовывания сердечника принимающей кассеты. Как торможение, так и пробуксовывание обеспечиваются преимущественно с помощью фрикционных

устройств, причем последние могут быть как с постоянным моментом сил трения M , так и с переменным.

Если момент M в процессе перемотки киноплёнки не изменяется, то по мере изменения диаметра рулона будет изменяться величина натяжения T , которая определяется по формуле: $T = 2 \frac{M}{D_p}$. Различие в величине T будет тем больше, чем больше

соотношение между наибольшим диаметром рулона $D_{p \max}$ и диаметром сердечника d_c . Для уменьшения перепада натяжений рекомендуется увеличивать диаметр сердечника.

В фрикционных устройствах с переменным моментом M последний должен изменяться по мере изменения диаметра рулона таким образом, чтобы величина натяжения оставалась примерно постоянной. Такие фрикционные устройства имеют более сложную конструкцию и применяются главным образом в кинопроекторах. Это объясняется тем, что через лентопротяжный механизм кинопроектора киноплёнка протягивается многократно и поэтому необходимо применять меры для ее защиты от преждевременного разрушения в процессе эксплуатации фильма.

Для улучшения условий эксплуатации кинофильмов в кинопроекторах стали применяться такие разматывающие и наматывающие устройства, которые обеспечивают возможность демонстрации кинофильма без его перемотки.

Такие устройства поэтому называются бесперемоточными.

Глава 12

ФОТОЭКСПОНОМЕТРЫ И ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

12.1. ОСНОВНАЯ ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Качество изображения, получаемого на фотослое в результате его экспонирования и последующей химико-фотографической обработки, главным образом зависит от величины экспозиции H , сообщаемой фотослою во время съёмки. Для того чтобы обеспечить качественное тоновоспроизведение в фотоизображении, необходимо фотослою сообщать такие экспозиции, величина которых находилась бы в пределах его фотографической широты L или его полезного интервала экспозиций L_g (см. разд. 8.4).

Поскольку экспозиция H равна произведению Et , то ее величина зависит как от освещенности оптического изображения E , так и от выдержки t , с которой экспонируется данный участок фотослоя. В свою очередь, величина освещенности изображения E зависит как от яркости B изображаемого участка предмета,

так и от светосилы съёмочного объектива. Эта зависимость выражается следующей приближенной формулой:

$$E \approx \frac{1}{4} \pi \tau B \left(\frac{D_{\text{вх}}}{f'} \right)^2 = \frac{1}{4} \pi \tau B \left(\frac{1}{n_r} \right)^2, \quad (12.1)$$

где τ — коэффициент светопропускания объектива;
 $D_{\text{вх}}/f'$ — относительное отверстие объектива;
 n_r — знаменатель относительного отверстия или значение диафрагмы.

Таким образом, величина экспозиции H определяется из выражения:

$$H = \frac{1}{4} \pi \tau B \frac{t_{\text{эф}}}{(n_r)^2} = \frac{1}{4} \pi B \frac{t_{\text{эф}}}{(n_{\text{эф}})^2}, \quad (12.2)$$

где $n_{\text{эф}} = \frac{n_r}{\sqrt{\tau}}$ — знаменатель эффективного относительного отверстия.

Пусть участкам снимаемого предмета, имеющим некоторую яркость $B_{\text{ср}}$, соответствует в фотоизображении некоторая оптическая плотность $D_{\text{ср}}$, равная D_s . Так как светочувствительность $S = \frac{10}{H_{D_s}}$, то для обеспечения равенства $D_{\text{ср}} = D_s$ необходимо, чтобы $H_{\text{ср}} = H_{D_s}$, т. е.

$$\frac{1}{4} \pi B_{\text{ср}} \frac{t_{\text{эф}}}{(n_{\text{эф}})^2} = \frac{10}{S}.$$

После преобразований получаем следующее выражение, называемое основной экспонометрической формулой:

$$\frac{B_{\text{ср}} S}{K} = \frac{n_{\text{эф}}^2}{t_{\text{эф}}}, \quad (12.3)$$

где K — экспонометрическая постоянная.

Значения выдержек $t_{\text{эф}}$ и диафрагм $n_{\text{эф}}$ можно выразить следующими зависимостями: $t_{\text{эф}} = \frac{1}{2^m}$, а $n_{\text{эф}} = \sqrt{2^p}$. Следовательно, отношение $n_{\text{эф}}^2/t_{\text{эф}}$ можно представить в виде $2^m \cdot 2^p = 2^L$, где $L = (m + p)$. Поэтому формулу (12.3) можно записать:

$$\frac{B_{\text{ср}} S}{K} = 2^L = \frac{n_{\text{эф}}^2}{t_{\text{эф}}} \quad (12.4)$$

Условное число L , называемое экспозиционным числом, однозначно выражает всевозможные сочетания между внешними факторами съёмки $B_{\text{ср}}$ и S и внутренними экспозиционными параметрами $n_{\text{эф}}$ и $t_{\text{эф}}$. Таким образом, для определения нужных значений $n_{\text{эф}}$ и $t_{\text{эф}}$ достаточно найти величину экспозиционного числа L , соответствующего яркости B снимаемого предмета и

светочувствительности S используемого при съеме фотоматериала.

Принцип действия большинства разнообразных приспособлений и устройств основан на прямом или косвенном способах предварительного определения экспозиционного числа L , используемого затем для нахождения правильных значений экспозиционных параметров: диафрагмы $n_{\text{эф}}$ и выдержки $t_{\text{эф}}$. К ним относятся некоторые типы фотоэкспонетров, а также устройства, встраиваемые в съемочные аппараты и являющиеся их составной частью (так называемые экспонетрические устройства).

При расчете экспонетрических устройств киносъемочных аппаратов основная экспонетрическая формула может быть записана в другом виде:

$$\frac{B_{\text{ср}} S}{K'} = n_{\text{эф}}^2 W_{\text{с}}, \quad (12.5)$$

где $K' = K \frac{2\pi}{\alpha_{\text{св}}}$;

$W_{\text{с}}$ — частота киносъемки;

$\alpha_{\text{св}}$ — угол светового выреза (угол раскрытия) обтюратора.

Если известна освещенность E предметов съемки, то их яркость B можно определить по формуле $\pi B = \rho E$, где ρ — коэффициент отражения предметов съемки.

Подставив величину B в формулу (12.5), получим

$$\frac{E_{\text{ср}} S}{C} = \frac{n_{\text{эф}}^2}{t_{\text{эф}}}, \quad (12.6)$$

где $C = K \frac{\pi}{\rho}$

12.2. ФОТОЭКСПОНОМЕТРЫ

Фотоэкспонетрами или просто экспонетрами называют приспособления, которые предназначены для определения значений выдержки и диафрагмы при съемке. Большинство из них выполняется в виде отдельного от съемочного аппарата приспособления, однако встречаются и встроенные в фотоаппарат экспонетры. По принципу, положенному в основу их действия, экспонетры подразделяют на табличные, оптические, визуальные и фотоэлектрические.

Табличные экспонетры имеют несколько таблиц, содержащих данные об условиях съемки: времени года и суток, месте (сюжете) съемки, состоянии погоды и применяемом при съемке светофильтре. Эти данные, а также шкалы светочувствительности S , диафрагм n и выдержек t расположены определенным образом на подвижных и неподвижных частях экспонетра *. После

* Такие системы таблиц и шкал принято называть калькуляторами.

необходимого взаимного совмещения таблиц и шкал в соответствии с условиями съемки шкалы диафрагм и выдержек располагаются друг относительно друга в определенном положении, позволяющем определить несколько пар значений n и t и выбрать из них желаемое их сочетание.

С целью быстрого и, как правило, очень приближенного определения значений n и t некоторые фотоаппараты снабжаются простейшим (упрощенным) табличным экспонометром. На рис. 12.1 приведен калькулятор, которым снабжается фотоаппарат «Вега-2». Порядок определения диафрагмы n и выдержки t следующий. Сначала устанавливают против центрального индекса нужное деление на шкале светочувствительности S , а затем индекс на наружном кольце совмещают со штрихом, соответствующим условию освещения (дождь, пасмурно, солнце за облаками и т. д.). После этого по шкалам n и t находят желаемое сочетание значений диафрагмы и выдержки.

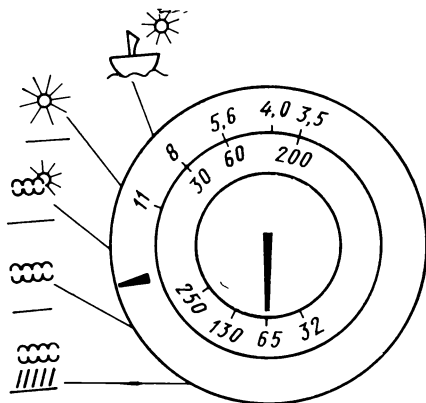


Рис. 12.1. Калькулятор фотоаппарата «Вега-2»

Фотоэлектрические экспонометры содержат фотодатчик, который вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный яркости $B_{\text{ср}}$ снимаемого предмета. В качестве фотодатчика исполь-

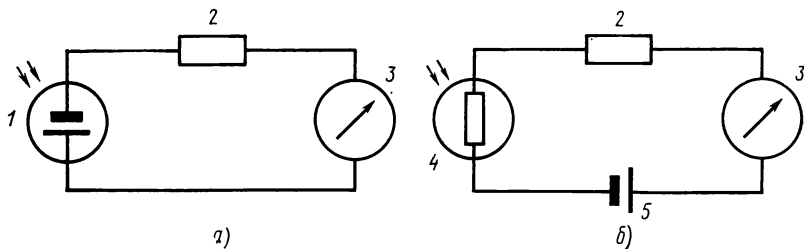


Рис. 12.2. Принципиальные схемы фотоэлектрических экспонометров:

a —с фотозлементом; $б$ —с фоторезистором;
1—фотозлемент; 2—резистор; 3—гальванометр; 4—фоторезистор; 5—источник питания

зуются как селеновые фотозлементы, так и фоторезисторы (фотосопротивления) на основе CdS. Индикатором сигнала (обычно электротока) является магнитоэлектрический гальванометр. Принципиальные схемы фотоэлектрических систем экспонометров приведены на рис. 12.2.

Фотоприемник (фотоэлемент 1 на рис. 12.2, а или фоторезистор 4 на рис. 12.2, б) соединен с гальванометром 3 через резистор 2, который предохраняет гальванометр от больших по своей величине электротоков, а также служит для согласования чувствительности фотоприемника с чувствительностью гальванометра. Схема с фотоэлементом не требует применения источника питания 5, однако она имеет меньшую чувствительность, чем схема с фоторезистором.

Для того чтобы фотоприемник воспринимал только те световые лучи, которые отражаются от предметов съемки, перед ним устанавливают светоограничительное устройство. Простейшим

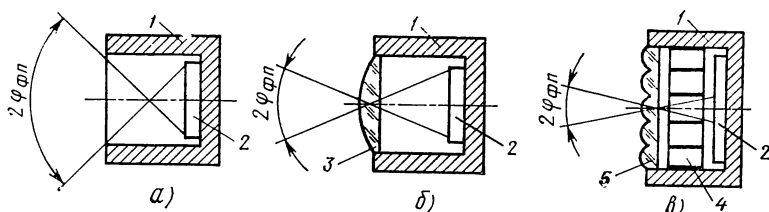


Рис. 12.3. Светоограничительные устройства:

а—простая ниша; б—ниша с линзой; в—растр с сотовой решеткой;
1—ниша; 2—фотоприемник; 3—линза; 4—сотовая решетка; 5—растр

светоограничительным устройством может быть ниша 1 (углубление), в которой располагается фотоприемник 2 (рис. 12.3, а). Угол восприятия $2\varphi_{\text{фп}}$ зависит от глубины ниши и размеров светоприемной площадки фотоприемника. Для повышения равномерности освещенности во входное отверстие ниши можно помещать линзу 3 (рис. 12.3, б).

Более совершенными являются светоограничительные устройства, состоящие из линзовой растровой системы 5 и сотовой (туннельной) решетки 4 (рис. 12.3, в). Такие светоограничительные устройства имеют меньшие габариты благодаря уменьшению их толщины.

При направлении фотодатчика, снабженного светоограничительным устройством, в сторону предметов съемки освещенность $E_{\text{фп}}$ светоприемной площади фотоприемника будет пропорциональна средней яркости $B_{\text{ср}}$ снимаемых предметов. В свою очередь, от величины $E_{\text{фп}}$ будет зависеть величина тока, протекающего через гальванометр, а следовательно, и угол отклонения его стрелки $\alpha_{\text{г}}^{\circ}$. Таким образом, по углу $\alpha_{\text{г}}^{\circ}$ можно судить о величине яркости $B_{\text{ср}}$. График зависимости $\alpha_{\text{г}}^{\circ} = f(B_{\text{ср}})$ называется **градуировочной характеристикой** фотоэлектрической системы экспонетра. Ее принято строить в координатах $\alpha_{\text{г}}^{\circ}$ и $\log_2 B_{\text{ср}}$.

Познакомимся с порядком определения значений диафрагмы n и выдержки t на примере фотоэлектрического экспонетра, которым снабжены фотоаппараты «Киев-4», «Киев-5»

(рис. 12.4). Экспонометр имеет три круговых шкалы: светочувствительности S , диафрагм n и выдержек t (на рис. 12.4 шкалы показаны в развернутом виде).

Порядок определения значений n и t следующий. Вращением кольца со шкалой n устанавливают индекс 5 против нужного значения светочувствительности на шкале S . Затем, разворачивая кольцо со шкалой t , смещают движок по резистору 4 до тех пор, пока стрелка гальванометра не совместится с ромбиком на шкале, расположенной против стрелки. В результате шкалы n и

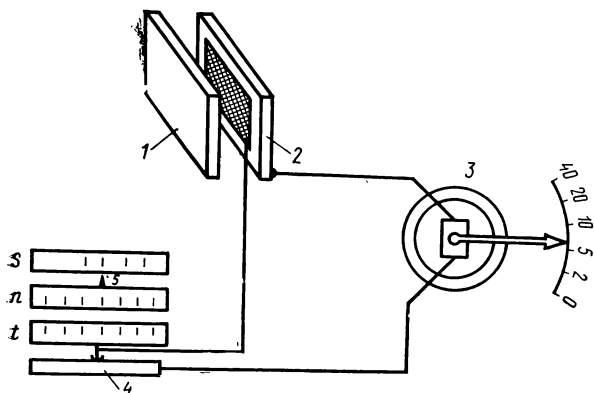


Рис. 12.4. Схема фотоэлектрического экспонометра:

1—светоограничительное устройство; 2—фотоэлемент; 3—гальванометр; 4—переменный резистор; 5—индекс

t займут определенное положение друг относительно друга, причем каждому значению n будет соответствовать нужное значение t .

Если стрелку гальванометра невозможно совместить с ромбиком (когда яркость предметов съемки очень мала), то ее совмещают с любым делением шкалы. Число, стоящее около этого деления, показывает кратность увеличения выдержки, найденной по шкале t .

Обычные (невстроенные) фотоэлектрические экспонометры позволяют определять значения n и t как на основе измерения яркости $B_{\text{ср}}$ предметов съемки, так и на основе измерения их освещенности $E_{\text{ср}}$. Во втором случае экспонометр располагают около предмета съемки и направляют его входное окно в сторону съемочного аппарата. Некоторые из этих экспонометров (например, «Ленинград-2») наряду со шкалами n и t имеют также шкалу экспозиционных чисел L . По своему принципу действия они несколько отличаются от экспонометра фотоаппарата «Киев».

12.3. ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

При использовании экспонометров после определения нужных значений диафрагмы n и выдержки t необходимо затратить некоторое время на установку найденных значений n и t на шкале диафрагм съемочного объектива и на шкале выдержек фотоаппарата. Это несколько увеличивает время, затрачиваемое для подготовки аппарата к съемке, и усложняет пользование им. С целью автоматизации процесса подготовки аппаратов к съемке в них стали встраивать фотоэлектрические системы, кинематически связанные с механизмами диафрагмы и фотоаппарата (точнее, с их установочными органами). Такую составную часть съемочного аппарата принято называть экспонометрическим устройством.

Экспонометрические устройства делят на полуавтоматические и автоматические. Полуавтоматическими называют такие экспонометрические устройства, которые требуют выполнения некоторых установочных операций вручную, причем после предварительной установки диафрагмы n (выдержки t) выдержка t (диафрагма n) устанавливается автоматически. В автоматических экспонометрических устройствах значения диафрагмы n и выдержки t устанавливаются автоматически, причем это может осуществлять по одной так называемой «жесткой» программе, или по нескольким программам. В последнем случае программа может или выбираться самим оператором, или находиться автоматически.

Согласно формул (12.3) и (12.4) значения диафрагмы n и выдержки t находятся исходя из конкретных величин яркости $B_{\text{ср}}$ предмета съемки и светочувствительности S фотоматериала. Измерение величины яркости $B_{\text{ср}}$ осуществляется с помощью фотоэлектрических систем, снабженных фотоэлементом или фоторезистором. Величина же светочувствительности S , которая безусловно известна оператору, должна учитываться (вводиться) каким-либо способом с помощью различных приспособлений.

По способу учета величины светочувствительности S экспонометрические устройства можно подразделить на две группы. В первую группу входят такие экспонометрические устройства, в которых учет S осуществляется непосредственно в самой фотоэлектрической системе. В результате угол отклонения стрелки гальванометра $\alpha_{\text{г}}$ будет зависеть как от величины яркости $B_{\text{ср}}$, так и от величины светочувствительности S , т. е. будет пропорционален величине экспозиционного числа L .

К таким способам учета величины S относятся:

1. Изменение величины светового потока, падающего на светоприемную площадку фотоприемника, или посредством светофильтров, имеющих различную оптическую плотность, или перекрыванием светоприемной площадки.

2. Изменение электросопротивления в цепи связи фотоприемника с гальванометром с помощью переменного резистора.

3. Разворот корпуса гальванометра вместе со стрелкой вокруг оси, совпадающей с осью вращения его подвижной части.

В экспонетрических устройствах второй группы учет величины S осуществляется в механизмах кинематической связи между стрелкой гальванометра и органами установки диафрагмы n и выдержки t . Для этого могут использоваться различного

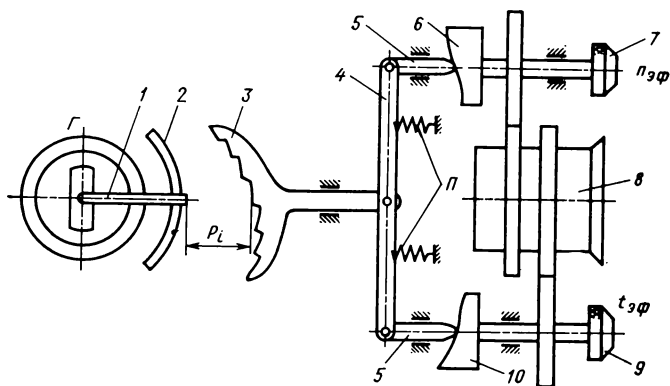


Рис. 12. 5. Схема установки n и t фиксацией стрелки гальванометра:

1—стрелка гальванометра; 2—упор; 3—ступенчатый фиксатор; 4—планка; 5—толкатель; 6, 10—кулачки; 7, 9—барабанчики; 8—обьектив

типа суммирующие механизмы или кинематические связи с переменным передаточным отношением, а также и другие приспособления.

Непосредственная установка диафрагмы n и выдержки t в съемочных аппаратах, снабженных экспонетрическим устройством, может осуществляться несколькими способами. Широко распространен способ установки n и t , основанный на зажиме (фиксации) стрелки 1 гальванометра Γ с помощью ступенчатого фиксатора 3 (рис. 12. 5). При вращении барабанчиков 7 и 9 в процессе установки диафрагмы и выдержки через торцовые кулачки 6 и 10 будут смещаться толкатели 5 , что приведет к смещению планки 4 с фиксатором 3 до зажима стрелки 1 между упором 2 и одной из ступеней фиксатора 3 . При различных положениях стрелки 1 , что соответствует различным сочетаниям яркости $B_{ср}$ и светочувствительности S , расстояние p_i между стрелкой и фиксирующей ступенью будет различным. Следовательно, развороты установочных барабанчиков будут зависеть от $B_{ср}$ и S . Пружины Π обеспечивают силовое замыкание между толкателями 5 и кулачками 6 и 10 . Рассмотренная схема позво-

ляет осуществлять предварительную установку одного из экспозиционных параметров.

Другим широко распространенным способом установки n и t является способ, основанный на совмещении двух стрелок: гальванометра 1 и калькулятора 2 (рис. 12.6). При установке диафрагмы и выдержки разворотом поводков 7 и 8 через тяги 6 будет смещаться планка 5 совместно с рейкой 4. С рейкой связано зубчатое колесо 3, на оси которого сидит стрелка 2. Рассмотренная схема тоже позволяет предварительно устанавливать один из экспозиционных параметров.

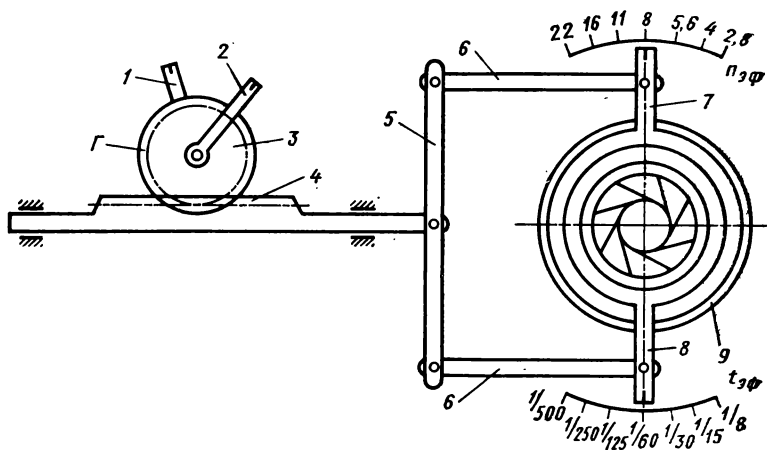


Рис. 12.6. Схема установки n и t посредством совмещения двух стрелок:

1—стрелка гальванометра; 2—стрелка калькулятора; 3—зубчатое колесо; 4—рейка; 5—планка; 6—тяги; 7, 8—поводки; 9—объектив

В схемах на рис. 12.5 и 12.6 стрелка гальванометра отклоняется на угол $\alpha_r^\circ = f(B_{\text{ср}}; S)$, что имеет место в экспонометрических устройствах первой группы. На рис. 12.7 приведена схема установки n и t в фотоаппарате, снабженном экспонометрическим устройством, относящимся ко второй группе. Принцип действия схемы такой же, как и на рис. 12.5, только торцевой кулачок 6 сделан составным. Толкатель 5 (верхний) будет перемещаться как при вращении барабанчика 7, так и при развороте его части b_1 относительно части b_2 при вводе величины светочувствительности S .

Примером автоматического экспонометрического устройства, обеспечивающего установку экспозиционных параметров n и t по жесткой программе, т. е. без возможности свободного выбора одного из них, является экспонометрическое устройство фотоаппарата «Зоркий-10» (рис. 12.8). Положение стрелки 2 гальванометра зависит от $B_{\text{ср}}$ и S . При нажатии на спусковую клавишу

фотоаппарата (на рисунке не показана) сначала освобождается двухплечий рычаг, на одном конце которого имеется ступенчатый фиксатор 3, а на другом — вилка, в которую входят штиф-

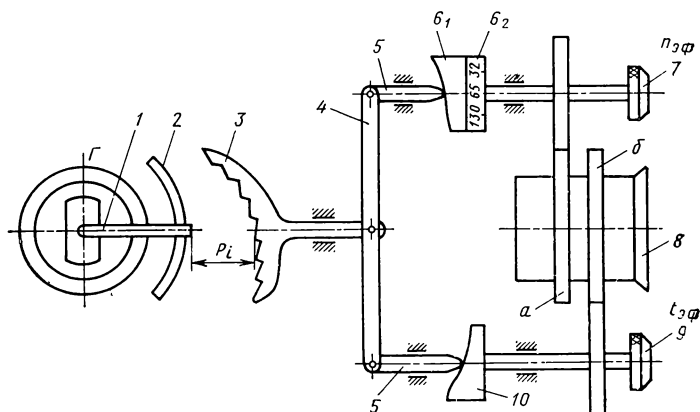


Рис. 12. 7. Учет светочувствительности S вне фотоэлектрической системы:

1—стрелка гальванометра; 2—упор; 3—ступенчатый фиксатор; 4—планка; 5—толкатели; 6, 10—кулачки; 7, 9—барабанчики; 8—объектив

ты 6. Последние находятся на установочных кольцах 4, которыми снабжен объектив 5. Под действием пружины Π рычаг будет поворачиваться до тех пор, пока ступень фиксатора 3 не прижмет стрелку 2 к упору 1. При повороте рычага вокруг оси O будут одновременно поворачиваться установочные кольца 4, что

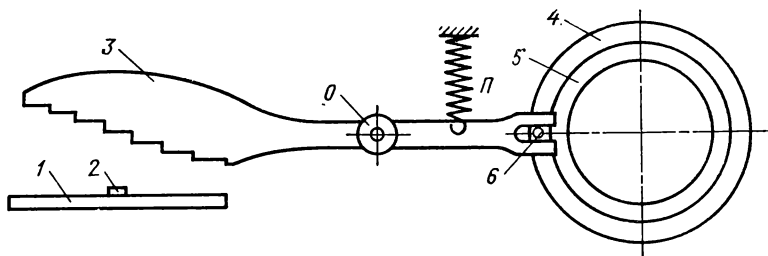


Рис. 12. 8. Схема узла установки n и t в фотоаппарате «Зоркий-10»:

1—упор; 2—стрелка гальванометра; 3—ступенчатый фиксатор; 4—установочные кольца; 5—объектив; 6—штифт

приведет к плавному и одновременному изменению диафрагмы и выдержки от: $n=2,8$ и $t=1/30$ до $n=11$ и $t=1/250$.

В киноаппаратах автоматическая установка диафрагмы может осуществляться непосредственно при развороте подвижной части гальванометра 5 (рис. 12. 9), кинематически связанной с

одним или двумя лепестками 1 и 7, которые могут разворачиваться вокруг осей 8, изменяя площадь светового отверстия 9 объектива. Лепестки 1 и 7 имеют вырезы, в которые входят штифты 2, находящиеся на планке 6, закрепленной на подвижной части гальванометра. Стрелка 3 показывает по шкале диафрагм, видимой в поле зрения 4 визирного устройства, значение n , которое установлено автоматическим экспонометрическим устройством.

Для изменения светового отверстия объектива 1 можно применять элек-

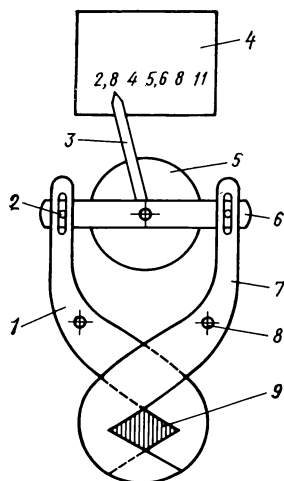


Рис. 12.9. Система автоматической установки диафрагмы объектива с помощью гальванометра:

1, 7—лепестки; 2—штифт; 3—стрелка гальванометра; 4—поле зрения; 5—гальванометр; 6—планка; 8—ось лепестков; 9—световое отверстие

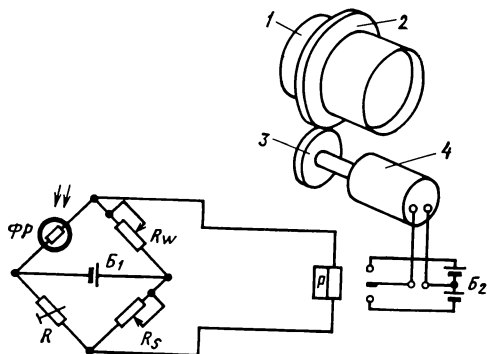


Рис. 12.10. Система установки диафрагмы объектива с помощью электродвигателя:

1—объектив; 2—установочное кольцо; 3—зубчатое колесо; 4—электродвигатель

тродвигатель 4, как показано на рис. 12.10. Фотоэлектрическая система содержит фоторезистор ФР, резисторы: R_W — ввода частоты киносъемки W_c ;

R_S — ввода величины светочувствительности S киноплёнки и R — подстроечный резистор. Все элементы собраны по мостовой схеме, в диагонали которой включены источник питания B_1 и поларизованное реле P .

В зависимости от направления протекающего через реле P тока переключатель Π будет замыкать верхнюю или нижнюю цепи питания электродвигателя 4, подключенного к батарее B_2 . Через зубчатое колесо 3 будет разворачиваться кольцо 2, что приведет к изменению светового отверстия диафрагмы съемочного объектива 1.

В связи с применением в фотоэлектрических системах экспонометрических устройств фоторезисторов, обладающих повышенной чувствительностью, появилась возможность располагать их в ходе световых лучей за съемочным объективом. Такое расположение фотоприемника по так называемой системе *TTL* имеет

безусловное преимущество перед другими способами его расположения, так как отпадает необходимость в применении светограничителей, автоматически учитывается коэффициент пропускания съемочного объектива и светофильтра, используемого при съемке.

Глава 13

ФОТОАППАРАТЫ

13.1. ТИПЫ СОВРЕМЕННЫХ ФОТОАППАРАТОВ

Все выпускаемые оптико-механической промышленностью фотоаппараты принято разделять на отдельные типы в зависимости от их назначения, конструктивных особенностей и других признаков.

В зависимости от их назначения фотоаппараты классифицируют на любительские, профессиональные и специальные. Любительские фотоаппараты предназначены для фотосъемки с любительскими целями. Обычно они выпускаются большими партиями и весьма разнообразными по своей конструкции, начиная от простейших, предназначенных для неопытных фотолюбителей, и кончая достаточно сложными фотоаппаратами, рассчитанными на опытных потребителей.

Профессиональные фотоаппараты предназначены для фотографов-профессионалов, фотокорреспондентов, работников фотостудий и т. п. Эти фотоаппараты сложной конструкции оснащены различными фотоприспособлениями и имеют большие форматы получаемых снимков.

Специальные фотоаппараты предназначены для различных фототехнических работ, таких как: изготовление шкал, трафаретов, шаблонов и других деталей фотоспособом. В группу специальных фотоаппаратов следует также отнести и фотоаппараты, предназначенные для наземной и воздушной фотосъемки земной поверхности, осуществляемой с различными целями: картографирование местности, изучение растительного покрова и др.

Любительские и профессиональные фотоаппараты принято подразделять на несколько подгрупп в зависимости от размеров (формата) получаемых фотоснимков, т. е. фактически от размеров их кадрового окна (табл. 13. 1).

По конструктивным признакам, в частности, по способу фокусировки объектива и оптической схеме визирного устройства (видоискателя), фотоаппараты бывают дальномерные и зеркальные (однообъективные и двухобъективные). Характерными конструктивными особенностями дальномерных фотоаппаратов является наличие монокулярного дальномера и телескопического

Таблица 13.1

Название подгруппы фотоаппаратов	Миниатюрные	Полуформатные	Малоформатные	Среднеформатные	Крупноформатные
Размеры фотоснимка (кадрового окна) в мм × мм	10×14 14×21	18×24	24×36	45×60; 60×60 60×90	90×120; 130×180; 180×240

параллаксного видоискателя. К ним относятся такие фотоаппараты, как «Зоркий», «ФЭД», «Сокол» и др.

В однообъективных зеркальных фотоаппаратах между объективом и кадровым окном установлено зеркало, которое во время визирования направляет световые лучи в схему видоискателя, а на период съемки — отводится в сторону. К таким фотоаппаратам относится «Зенит», «Салют» и др.

В двухобъективных зеркальных фотоаппаратах около основного объектива устанавливается вспомогательный объектив, который используется для фокусировки и визирования. Поэтому в таких фотоаппаратах нет необходимости в использовании поворотного зеркала, прыгающей диафрагмы и других приспособлений. Такие фотоаппараты обеспечивают возможность постоянного наблюдения за предметами съемки, что невозможно обеспечить в однообъективных зеркальных фотоаппаратах. Классическим примером двухобъективного зеркального фотоаппарата является «Любитель».

По способу установки экспозиционных параметров фотоаппараты бывают автоматизированные и неавтоматизированные. По уровню автоматизации процесса установки диафрагмы n и выдержки t фотоаппараты можно подразделить на четвертьавтоматические (имеющие встроенные экспонометры), полуавтоматические и автоматические.

Большинство фотоаппаратов рассчитано на применение как основного (штатного) объектива, так и комплекта сменных объективов, имеющих различные фокусные расстояния и другие характеристики.

13.2. ФОТОАППАРАТЫ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ СЪЕМКИ

К специальным видам съемки принято относить стереосъемку, панорамную съемку, макро- и микросъемку и подводную съемку.

Стереосъемка — это такой вид фотосъемки, когда получают не один, а два фотоснимка, составляющих между собой так называемую стереопару. При рассматривании таких парных снимков с помощью стереоскопа наблюдатель будет воспринимать объемное изображение заснятого пространства. Стереосъемка может осуществляться или однообъективным фотоаппаратом со стереонасадкой (рис. 13.1), или двухобъективным фотоаппаратом. Стереонасадка к фотоаппарату «Зоркий» (рис. 13.1, а) состоит

из двух одинаковых, симметрично расположенных призм 1, закрепленных в оправе, присоединяемой к основному объективу 2. Стереонасадка к фотоаппарату «Киев» (рис. 13. 1, б) имеет две призмы 1 и два объектива 2. Она устанавливается в гнездо на корпусе фотоаппарата вместо основного объектива. В том и другом случаях на фотопленке получают два стереокадра 3 при базе съемки $BC=65$ мм.

В двухобъективных фотоаппаратах съемочные объективы закреплены на корпусе аппарата так, что их оптические оси па-

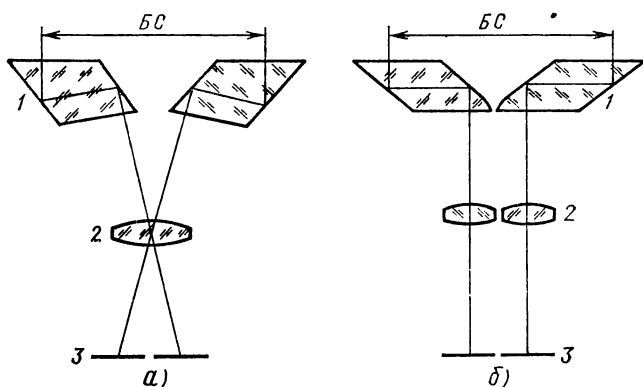


Рис. 13. 1. Схемы стереонасадок:

а—однообъективная; б—двухобъективная;
1—призмы; 2—объективы; 3—стереокадры

раллельны и смещены по горизонту на расстояние, равное базе съемки. Отечественной промышленностью выпускается стереоскопический фотоаппарат «Спутник».

Панорамная съемка обеспечивает получение фотоизображений при больших углах обзора по горизонту (100° и более), которые принято называть панорамами. Такая фотосъемка обычно обеспечивается разворотом съемочного объектива на некоторый угол по горизонту. Экспонирование фотослоя осуществляется через щель, перемещаемую около фотоматериала одновременно с разворотом объектива. Объектив закрепляется внутри полого барабана, имеющего вертикальную ось вращения. Перед входным отверстием объектива в корпусе барабана сделан прямоугольный вырез, ширина которого меньше высоты (по форме экспонирующей щели). Выдержка, с которой экспонируется фотослой, определяется шириною экспонирующей щели и скоростью разворота объектива в процессе панорамирования. В СССР для осуществления панорамной фотосъемки выпускается фотоаппарат «Горизонт».

Макрофотосъемкой называется съемка мелких предметов с линейными увеличениями, значительно превосходящими увеличе-

ние при обычной съемке (от 1 10 до 5 1). Для осуществления макросъемки фотоаппараты должны дополняться специальными приспособлениями. Кроме того, макросъемка имеет некоторые специфические особенности и выполняется по особой методике.

Съемка с большими увеличениями требует прежде всего значительных перемещений объектива в сторону снимаемого предмета. Между фокусирующим перемещением объектива, имеющим фокусное расстояние f' , и линейным увеличением β имеет место следующая зависимость: $x' = \beta f'$, где x' — расстояние между задним фокусом объектива и плоскостью изображения, т. е. фокусирующее перемещение объектива. Следовательно, при съемке с увеличением 1 1 (в натуральную величину) объектив необходимо перемещать в сторону предмета на величину фокусного расстояния. Так как оправы обычных объективов не обеспечивают возможности осуществления таких перемещений, то между объективом и корпусом фотоаппарата следует устанавливать или промежуточные (удлинительные) кольца, или растяжной (раздвижной) мех. Удлинительные кольца рекомендуется использовать только с зеркальными фотоаппаратами. Согласно ОСТ 3—65—70 отечественной промышленностью выпускаются удлинительные кольца с присоединительной резьбой М42×1 и размерами по длине: 7, 14 и 28 мм.

В связи с существенным увеличением расстояния от объектива до плоскости изображения значительно понижается освещенность изображения (в $(1 + \beta)^2$ раз) по сравнению с освещенностью, имеющей место при обычной съемке. Такое понижение освещенности изображения следует компенсировать или увеличением выдержки, или увеличением освещенности предмета съемки.

Так как при макросъемке расстояние от объектива до снимаемого предмета необходимо уменьшать, то это приводит одновременно к существенному уменьшению глубины резко изображаемого пространства, что следует из формулы (9.6). С целью увеличения глубины резко изображаемого пространства приходится увеличивать значение диафрагмы n_r , что приводит к еще большему уменьшению освещенности изображения.

Наиболее пригодными для производства макросъемки являются объективы, имеющие небольшие фокусные расстояния (не более 15 мм). С целью уменьшения фокусного расстояния съемочных объективов фотоаппаратов к ним присоединяют положительные (собирающие) линзы, называемые насадочными. Наиболее удобно помещать предмет съемки в переднем фокусе насадочной линзы, а основной объектив устанавливать по шкале расстояний на «бесконечность». Желательно для каждого объектива иметь специально рассчитанные насадочные линзы, чтобы они не ухудшали качество изображения за счет увеличения аберрационных погрешностей.

Для проведения макросъемки в лабораторных условиях выпускаются специальные установки (например, прибор ФМН22). Из фотоаппаратов наиболее пригодными для осуществления макросъемки являются зеркальные фотоаппараты «Зенит», «Салют» и др.

Микрофотосъемкой принято называть съемку мелких предметов с использованием микроскопа. Линейное увеличение при этом всегда больше 1. Находят практическое применение следующие способы микросъемки.

1. Микросъемка с помощью только объектива микроскопа без окуляра. В этом случае съемочный объектив фотоаппарата тоже

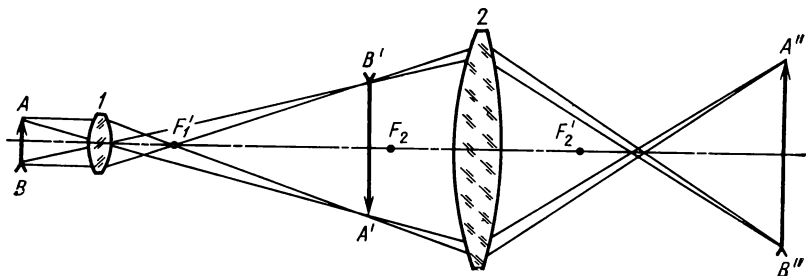


Рис. 13. 2. Схема микросъемки при применении фотоокуляра:

1—объектив микроскопа; 2—фотоокуляр

не используется. Этот способ микросъемки схож с ранее рассмотренной макросъемкой. При таком способе микросъемки следует применять специальные микрообъективы, такие как планохроматы или планapoхроматы, которые дают достаточно плоские изображения.

2. Микросъемка через микроскоп с помощью фотоаппарата, который устанавливается за микроскопом так, чтобы выходной зрачок окуляра микроскопа совпал с входным зрачком съемочного объектива фотоаппарата. В этом случае все световые лучи, выходящие из окуляра, попадут в съемочный объектив. При таком способе микросъемки съемочный объектив устанавливается на «бесконечность».

3. Микросъемка только с использованием микроскопа без съемочного объектива фотоаппарата или вообще без самого фотоаппарата. При этом способе микросъемки применяются специальные окуляры, обеспечивающие получение действительных изображений микропредметов на фотоматериале, помещенном в особой фотонасадке (для этого можно использовать и корпус фотоаппарата). К таким специальным окулярам относятся окуляры — выравниватели, называемые негативными линзами или гомалами, и фотографические окуляры. При применении фотоокуляров изображение $A''B''$ на фотоматериале образуется по схеме, приведенной на рис. 13. 2. Объектив 1 микроскопа обра-

зует изображение $A'B'$ предмета AB перед передним фокусом F_2 окуляра 2. Окуляр проецирует изображение $A''B''$ с некоторым линейным увеличением на фотоматериал.

Для производства микрофотосъемок выпускаются специальные установки и насадки. К ним относятся микрофотоустановка ФМН-3, микрокиноустановка МКУ-2 и микрофотонасадки МФН-7 (кадр 65×90 мм²) МФН-2 (кадр 90×120 мм²), МФН-12 (кадр 24×36 мм²), МФН-5 (стереоскопическая), МФНЭ-1 (с экспонометром) и др.

Подводная фотосъемка (фотосъемка под водой) производится обычными фотоаппаратами, заключенными в водонепроницаемые боксы. Боксы снаружи имеют рычаги и рукоятки, с помощью которых выполняются все необходимые операции: перемотка фотопленки, фокусировка, взвод и спуск затвора и т. п. При помещении фотоаппарата или киноаппарата в бокс необходимо обеспечить, чтобы между поверхностью передней линзы объектива и водой был обязательно воздушный промежуток. Т. к. показатель преломления воды меньше показателя преломления стекла, то при съемке под водой необходимо применять широкоугольные объективы (типа «Руссар») или вместо плоского стекла в иллюминатор (входное окно) бокса вставлять систему корректирующих линз.

К специальным видам фотосъемки можно отнести также съемку с использованием фотокомплектов, позволяющих получать сразу же позитивные изображения. Фотокомплект содержит негативную светочувствительную пленку и позитивную бумажную несветочувствительную ленту. После экспонирования негативной пленки она приводится в контакт с приемным слоем позитивной ленты. Между ними равномерно распределяется слой специального обрабатывающего состава, находящегося в пастообразном состоянии.

Пленка и лента находятся в контакте друг с другом около 1 мин. В течение этого времени происходит проявление скрытого изображения на негативе и перенос неиспользованного $AgHal$ к приемному слою позитивной ленты. В этом слое происходит восстановление атомов Ag , из которых образуется позитивное изображение. Перенос остатков $AgHal$ осуществляется в результате их диффузии, отчего такая обработка фотокомплекта получила название диффузионного способа химико-фотографической обработки, а фотопроцесс — одноступенного процесса.

К фотоаппаратам, рассчитанным на применение фотокомплектов, относятся «Момент» и «Фотон».

13.3. АЭРОФОТОАППАРАТЫ

Аэрофотоаппараты (АФА) относятся к специальным фотоаппаратам, предназначенным для фотосъемки земной поверхности с самолетов и других летательных или воздухоплавательных

аппаратов. Воздушное фотографирование или аэрофотосъемка (далее — аэросъемка) осуществляется с различными целями. В зависимости от этого принято различать следующие виды аэросъемки: А) топографическая — служащая для создания топографических карт (для целей картографирования); б) для изучения местности; в) метеорологическая; г) геологическая; д) лесная и др.

Конечным результатом всякой аэросъемки являются аэрофотоснимки (далее — аэроснимки), которые тщательно изучаются с целью их дешифрирования. Наряду с непосредственным рассмотрением аэроснимков их исследуют с помощью различных приборов: фотограмметрических (для измерения размеров и расстояний), фотометрических (для измерения оптической плотности фотопочернений) и др.

В зависимости от положения оптической оси аэрофотообъектива относительно вертикали различают **плановую** и **перспективную аэросъемку**. Так при плановой аэросъемке с картографическими целями угол отклонения оптической оси аэрофотообъектива от вертикали не должен превышать 3° .

Рассмотрим некоторые особенности осуществления аэросъемки, которые должны учитываться при разработке конструкции как всего АФА, так и его основных узлов.

1. Вследствие перемещения АФА совместно с его носителем относительно снимаемых предметов изображения этих предметов в процессе аэросъемки смещаются с некоторой скоростью относительно фотослоя. Скорость изображения равна путевой скорости носителя W , умноженной на масштаб фотографирования, равный отношению f'/H , где f' — фокусное расстояние аэрофотообъектива, а H — высота фотографирования. Поэтому при аэросъемке для получения резких аэроснимков необходимо или оснащать АФА затворами с очень короткими выдержками, или осуществлять компенсацию сдвига изображения во время отработки выдержки затвором.

2. Для достижения высокой точности в процессе всевозможных линейных измерений, осуществляемых на аэроснимках, необходимо очень тщательно выравнивать аэропленку в зоне ее экспонирования. Отступления аэропленки от заданной плоскости (общее или местные) приводят к геометрическому искажению фотоизображения и понижению его резкости.

3. На точность получаемых в процессе линейных измерений результатов большое влияние оказывают геометрические искажения в оптическом изображении, которое образует аэрофотообъектив. Эти искажения являются следствием прежде всего остаточных аберраций оптической системы аэрофотообъектива, таких как: дисторсия, кривизна поля и др. Поэтому у аэрофотообъективов дисторсия должна быть минимальной, или она должна учитываться при линейных измерениях.

4. С целью устранения геометрических искажений в фотоизображении рекомендуется в АФА применять центральные затворы (см. разд. 7. 4).

5. Для правильного взаимного расположения аэроснимков при их монтаже в один общий фотоплан необходимо при аэро съемке обеспечивать некоторое перекрытие между соседними аэроснимками. Если перекрытие превышает 0,6 части обоих аэроснимков, то такие аэроснимки образуют стереопару. Для обеспе-

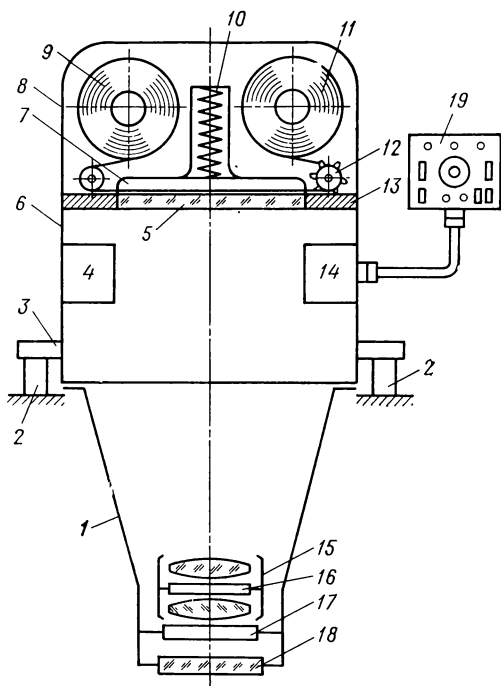


Рис. 13. 3. Принципиальная схема аэрофотоаппарата:

1—объективная часть (конус); 2—амортизаторы; 3—аэрофотоустановка; 4—электродвигатель; 5—выравнивающее стекло; 6—камерная часть; 7—прижимной стол; 8—кассета; 9, 11—подающая и принимающая катушки; 10—пружина; 12—мерный вал; 13—прикладная рамка; 14—распределительный механизм; 15—аэрофотообъектив; 16—центральный затвор; 17—оптический компенсатор; 18—светофильтр; 19—командный прибор

чения взаимного перекрытия аэроснимков АФА должен снабжаться специальным устройством, называемым механизмом интервалов (интервалометром), который включает АФА через определенные промежутки времени.

АФА является сложным оптико-механическим прибором, состоящим из следующих основных частей (рис. 13. 3): объективной части (конуса) 1, камерной части 6, кассеты 8, командного прибора 19 и аэрофотоустановки 3. В камерной части 6 монтируется электродвигатель 4, который через распределительный механизм 14 обеспечивает согласованную работу всех механизмов АФА. В верхней части камеры находится прикладная рамка 13 с выравнивающим стеклом 5, к которому прижимается аэропленка перед экспонированием. К камерной части 6 присое-

диняется съемная кассета 8, в которой находятся подающая 9 и принимающая 11 катушки с аэропленкой. Аэропленка прижимается к выравнивающему стеклу 5 столом 7 под действием пружины 10. Перемотка аэропленки на шаг кадра производится с помощью мерного зубчатого валика 12.

АФА устанавливается в специальном приспособлении 3, которое называется аэрофотоустановкой. Последняя опирается на несущую опору носителя с использованием амортизаторов 2, защищающих АФА от вибраций, которые испытывает носитель (самолет и т. п.).

Аэрофотоустановка служит также для ориентации АФА в пространстве. Она может быть неподвижной или иметь привод для автоматического качания АФА в процессе аэросъемки. Стабилизация положения АФА может обеспечиваться автоматически с использованием гиростабилизаторов или других устройств.

Для контроля за работой АФА и дистанционного управления им служит командный прибор 19, соединенный с камерной частью электрокабелем. Командный прибор обычно содержит сигнальные лампочки, счетчик кадров, механизм интервалов (интервалометр), переключатели и другие приспособления. В камерной части могут размещаться всевозможные приборы, показания которых регистрируются на аэропленке по краям снимка (часы, уровень, высометр и др.). Прикладная рамка 13 находится в фокальной плоскости объектива 15. Она может иметь координатные метки, фиксируемые на аэропленке и определяющие положение системы координат на снимке. Электропитание АФА осуществляется от источника постоянного тока напряжением 27 В от бортовой сети носителя.

Рассмотрим принцип действия некоторых механизмов АФА.

Перемотка аэропленки в АФА может осуществляться двумя способами: с использованием в качестве ведущего звена принимающей катушки или мерного валика. В первом случае вращение от электродвигателя подается только на принимающую катушку, а мерный валик вращается протягиваемой аэропленкой. На валу мерного валика посажен кулачок, выключающий электродвигатель после перемотки аэропленки на шаг кадра.

Наибольшее применение находит второй способ (рис. 13.4), при котором вращение подается как к принимающей катушке 4, так и к мерному валику 9 через зубчатые колеса 6 и 8 от приводного зубчатого колеса 7. По мере увеличения диаметра рулона 5 принимающая катушка должна пробуксовывать относительно зубчатого колеса 6. Для этого между осью катушки 4 и колесом 6 имеется фрикционное устройство. Натяжение аэропленки в зоне между рулоном 3 на подающей катушке 2, направляющим валиком 1 и мерным валиком 9 обеспечивается фрикционным устройством подающей катушки.

Выравнивание аэропленки может осуществляться несколькими способами, в том числе и посредством ее натяжения (одно-

стороннего и двухстороннего). Однако в практике аэрофотоаппаратостроения выравнивание аэропленки осуществляется преимущественно посредством ее прижима к плоскому стеклу и пневматически.

Пневматическое выравнивание может осуществляться или созданием вакуума между столом и аэропленкой, или наддувом воздуха во внутреннюю полость камерной части. Наибольшее применение имеет выравнивание с использованием вакуума. Отступления поверхности аэропленки от идеальной плоскости не должны превышать (0,01—0,02) мм.

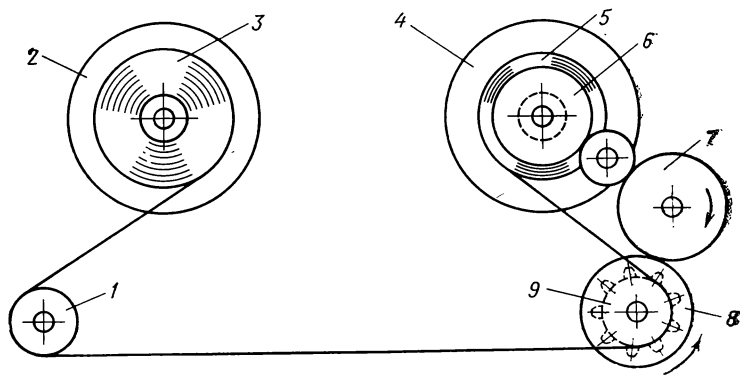


Рис. 13.4. Схема лентопротяжного механизма с мерным валиком:

1—направляющий валик; 2—подающая катушка; 3—рулон аэропленки; 4—принимающая катушка; 5—рулон аэропленки; 6, 7, 8—зубчатые колеса; 9—мерный валик

Компенсация сдвига изображения в АФА, возникающего вследствие перемещения носителя, необходима: во-первых, для повышения резкости получаемого на аэропленке фотоизображения; во-вторых, для обеспечения возможности аэросъемки с продолжительными выдержками. Находят применение два способа компенсации сдвига изображения: механическая и оптическая компенсация.

При механической компенсации чаще всего используется перемещение аэропленки в сторону смещения оптического изображения. Такой способ компенсации применяется в АФА-МК и в щелевых АФА.

При оптической компенсации осуществляется смещение оптического изображения в сторону, противоположную его сдвигу вследствие перемещения носителя. Наиболее просто эта задача решается вращением в разные стороны двух оптических клиньев 1 и 2 (рис. 13.5), располагаемых перед аэрофотообъективом 3. Если оптические клинья сделаны из одного сорта стекла и имеют одинаковые углы при их вершинах, то при синхронном их

вращении в противоположных направлениях оптические лучи, прошедшие сквозь клинья, будут отклоняться от оптической оси в обе стороны, но в одной плоскости (например, в плоскости чертежа). При сдвиге изображения в этой же плоскости можно с помощью клиньев обеспечить компенсацию этого сдвига в течение некоторого промежутка времени с одновременной подачей команды на срабатывание аэрофотоаппарата.

Оптическую компенсацию можно осуществлять также качающимся зеркалом, при помощи оптического клина с переменным углом при вершине и другими способами.

В зависимости от назначения и конструктивных особенностей АФА подразделяются на следующие типы:

Топографические АФА, предназначенные для выполнения топографической аэросъемки с целью создания карт стереофотограмметрическими методами. Отличаются повышенной точностью и высокой надежностью в эксплуатации, благодаря чему с их помощью обеспечивается получение аэроснимков самого высокого качества. К топографическим АФА относятся отечественные аэрофотоаппараты АФА-ТЭ (топографические, электрические), АФА-ТЭС и АФА-41. В АФА-ТЭ каждая часть аэрофотоаппарата имеет собственный электропривод, а взаимная синхронизация всех его механизмов обеспечивается электрической схемой. АФА-ТЭС являются более совершенными аэрофотоаппаратами, чем АФА-ТЭ. Так АФА-ТЭС-10 оснащен объективом с выравнивающим стеклом в фокальной плоскости, автоматическим экспонетрическим устройством, более совершенным затвором и кассетой. АФА-41, кроме топографической аэросъемки, используется для аэросъемки с больших высот (до 20 км) с измерительными целями.

Кадровые АФА с компенсацией сдвига изображения предназначены для выполнения аэросъемки с больших высот. Они подразделяются на АФА с механической компенсацией и АФА с оптической компенсацией.

К аэрофотоаппаратам первой группы относится АФА-МК, используемый для аэросъемки при пониженной освещенности земной поверхности. Компенсация сдвига изображения осуществляется перемещением аэропленки, скорость которой устанавливается дискретно и имеет двадцать различных значений. В эту же группу входят ночные аэрофотоаппараты НАФА-МК.

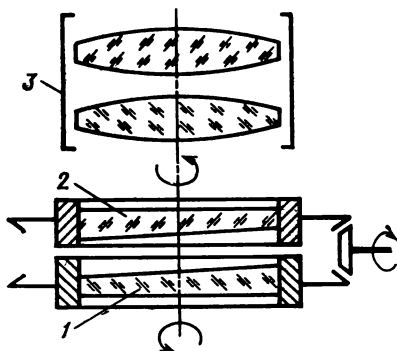


Рис. 13.5. Компенсатор сдвига изображения с двумя вращающимися оптическими клиньями:

1, 2—оптические клинья; 3—аэрофотообъектив

К аэрофотоаппаратам второй группы относятся АФА-42 и АФА-40, в которых компенсация сдвига изображения обеспечивается с помощью двух вращающихся оптических клиньев (см. рис. 13.5). АФА-40 оснащен длиннофокусным аэрофотообъективом «Телемар-12» (8,0/1800) и предназначен для аэросъемки с больших высот. В самолете АФА-40 располагается горизонтально, поэтому перед оптическим компенсатором установлено зеркало, которое может отклоняться от среднего положения в обе стороны на $\pm\beta$, что используется при осуществлении двух- и трехмаршрутной аэросъемки (при двухмаршрутной съемке $\beta = \pm 5^\circ 45'$; при трехмаршрутной съемке $\beta = 0$ и $\pm 11^\circ$).

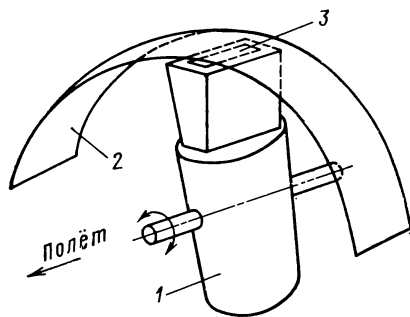


Рис. 13.6. Панорамный аэрофотоаппарат:

1—аэрофотообъектив; 2—аэроплёнка; 3—щель

Кадровые АФА без компенсации сдвига изображения относятся к группе специальных аэрофотоаппаратов. Отличаются небольшими размерами кадров (менее 18×18 см²) и небольшими фокусными расстояниями аэрофотообъективов. К ним относятся АФА-39 и АФА-БА.

Панорамные АФА служат для аэросъемки панорам местности в виде полос, расположенных перпендикулярно направлению по-

лета. Панорамирование может осуществляться или качанием объектива вокруг оси, расположенной в плоскости полета самолета, или с помощью поворотного зеркала, расположенного перед неподвижным объективом. При панорамировании качающимся объективом 1 съемка осуществляется через щель 3, которая перемещается синхронно с объективом около аэроплёнки 2, расположенной по дуге окружности (плоскость пленки образует цилиндрическую поверхность), как это показано на рис. 13.6. При панорамировании вращающимся зеркалом объектив и щель неподвижны, а аэроплёнка перемещается за щелью синхронно с оптическим изображением.

Щелевые АФА обеспечивают аэросъемку полосы местности вдоль маршрута самолета. Свое название получили потому, что экспонирование аэроплёнки осуществляется через щель, расположенную перпендикулярно к направлению перемещения аэроплёнки. Принципиальная схема щелевого АФА показана на рис. 13.7. Аэроплёнка, разматываясь с подающего рулона 5, огибает направляющий валик 6 и с некоторой скоростью $V_{пл}$ непрерывно перемещается за щелью 2 с помощью зубчатого тянущего валика 3. Аэрофотообъектив 1 образует изображение местности на фотослое аэроплёнки в пределах ширины щели $b_{щ}$. Это изображение вследствие полета самолета перемещается со

скоростью $V_{из} = W \frac{f'}{H}$, где W — путевая скорость самолета, а H — высота аэросъемки. Проекспонированная аэропленка наматывается на принимающий рулон 4.

Если скорость $V_{пл}$ равна $V_{из}$, то при экспонировании фотослава сдвига изображения не происходит и ширину щели $b_{щ}$ можно увеличивать с целью увеличения выдержки t . В этом за-

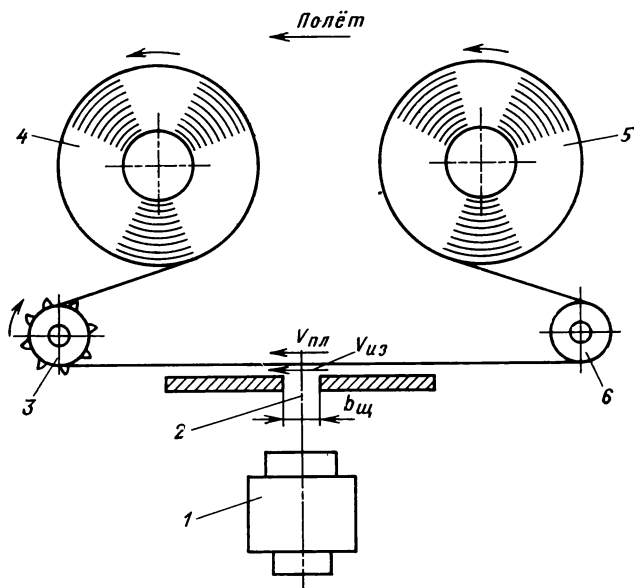


Рис. 13. 7. Схема щелевого аэрофотоаппарата:

1—аэрофотообъектив; 2—щель; 3—зубчатый тянущий валик; 4—принимающий рулон; 6—направляющий валик; 5—подающий рулон

ключается основное достоинство щелевой аэросъемки, т. е. ее можно осуществлять при пониженной освещенности местности и даже в сумерки.

Для выравнивания аэропленки применяется выравнивающий валик (на рисунке не показан), располагаемый над аэропленкой в том месте, где находится щель.

Щелевые АФА обычно снабжаются двумя объективами, что позволяет осуществлять несколько видов аэросъемки: при разных фокусных расстояниях объективов — двухмасштабную съемку; при одинаковых фокусных расстояниях — двухмаршрутную и стереоскопическую съемки. Находящийся в эксплуатации щелевой аэрофотоаппарат АЩАФА-5 рассчитан на три вида аэросъемки: двухмаршрутную, стереоскопическую и аксонометрическую (используется один объектив и две щели). Для синхрони-

зации скорости пленки $V_{пл}$ со скоростью изображения в АЩАФА-5 применены полуавтоматическая и автоматическая системы.

Глава 14

КИНОАППАРАТЫ

14.1. КИНОСЪЕМОЧНЫЕ АППАРАТЫ

Киносъемочные аппараты обеспечивают фоторегистрацию изображений через равные промежутки времени, т. е. относятся к циклически действующим устройствам.

Число кадров, регистрируемых киносъемочным аппаратом в одну секунду, называется частотой киносъемки W_c . Нормальная (стандартная) частота при киносъемке на 70- и 35-мм кинопленку равна 24 кадр/с, при киносъемке на 16- и 8-мм кинопленку — 16 кадр/с.

В кинотехнике используется несколько типов кинопленки, отличающихся друг от друга как по ширине, так и по другим размерам (см. табл. 8. 1). Поэтому размеры кинокадров тоже отличаются друг от друга. В зависимости от соотношения между шириной киноизображения и его высотой различают широкоформатный, широкоэкранный и обычный кинофильмы.

Широкоформатным принято называть кинофильм, снятый на кинопленку шириной 70 мм. Широкоэкранный кинофильм снимается на 35-мм кинопленку с анаморфированием изображения, для чего к объективу присоединяется специальная оптическая насадка, обеспечивающая анаморфирование («сжатие») изображения по ширине кадра. При проецировании такого кинофильма производится дезанаморфирование («растяжение») изображения, что обеспечивается также с помощью специальной оптической насадки, присоединяемой к кинопроеекционному объективу. Таким образом, при проецировании как широкоформатного, так и широкоэкранного кинофильмов ширина получаемого на экране киноизображения будет более, чем в два раза, превышать его высоту. При демонстрации обычных кинофильмов отношение ширины киноизображения к его высоте не превышает 1,37 : 1.

В табл. 14. 1 приведены значения основных размеров, определяющих форму и расположение изображений, получаемых при киносъемке, и показанных на рис. 14. 1.

По своему назначению киносъемочные аппараты делятся на любительские, профессиональные и специальные. Любительские киноаппараты осуществляют киносъемку на узкую кинопленку, отчего их называют узкоплёночными киноаппаратами. Они рассчитаны на применение кинопленки шириною 8- и 16-мм, при-

Таблица 14.1

Кинофильм	Размеры в мм			
	m		$b_{из}$	$h_{из}$
70-мм широкоформатный	8,8 max	(61,3)	52,5 min	23,0
35-мм широкоэкранный	7,8 max	29,75 min	21,95 min	18,6
35-мм обычный	7,8 max	29,75 min	21,95 min	16,0
16-мм обычный	2,95 max	13,0	(10,05)	7,45
8-мм обычный	2,85 max	7,75	(4,9)	3,55
8-мм типа «С»	1,47 max	7,16 min	(5,69)	4,12

Примечание. Размеры, указанные в скобках, не нормированы ГОСТом.

чем на 16-мм киноленту могут сниматься кинокадры в один и два ряда. В последнем случае кинолента обозначается 2×8-мм; на нее снимаются кинокадры, имеющие размеры, соответствующие 8-мм кинофильмам (см. табл. 14.1) и располагаемые в два ряда. После съемки и химико-фотографической обработки пленка разрезается пополам и из обеих частей получают 8-мм кинофильм. В качестве привода в любительских киноаппаратах применяют как пружинные двигатели, так и электродвигатели постоянного тока. Регулирование числа оборотов приводного вала лентопротяжного механизма обеспечивается или центробежными тормозными регуляторами, или электроконтактными регуляторами.

Профессиональные киносъемочные аппараты предназначены для киносъемки телевизионных, хроникальных и художественных кинофильмов. Они рассчитаны на применение киноленты шириною 16, 35 и 70-мм. Если киноаппарат предназначен для киносъемки с одновременной записью звукового сопровождения, то он называется **синхронным киноаппаратом**. Особенности профессиональных киноаппаратов следующие: повышенная точность перемещения киноленты, высокое качество изображения, беспараллаксные визирные устройства, повышенная емкость зарядки и др. В качестве привода в профессиональных киноаппаратах приме-

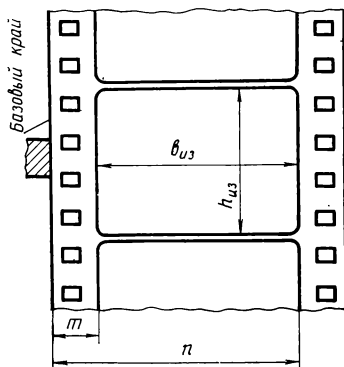


Рис. 14.1. Размеры и расположение изображений при киносъемке

няют электродвигатели. Из-за своей большой массы при киносъемке они устанавливаются на штативы или специальные подъемные устройства.

Специальные киносъемочные аппараты предназначены для осуществления таких видов киносъемки, как: комбинированная обычная и по методу «блуждающей» маски, мультипликационная и ускоренная. Киноаппараты для комбинированной киносъемки отличаются высокой точностью перемещения киноплёнки на шаг кадра (неустойчивость кадра не более 0,01 мм), поэтому их называют также прецизионными. Некоторые из специальных киноаппаратов рассчитаны на перемотку одновременно двух киноплёнок. Киноаппараты с повышенной частотой киносъемки (до 100 и более кадр/с) применяются как при комбинированной съемке, так и для спортивной, макетной и научной съемок. В киноаппаратах для комбинированной съемки по методу «блуждающей» маски обеспечивается одновременное экспонирование двух киноплёнок: негативной и масочной. Для этого за объективом устанавливается светоразделяющая призмная система, направляющая видимые лучи — к негативной киноплёнке, а инфракрасные лучи — к масочной киноплёнке.

К специальным киносъемочным аппаратам относятся также киноаппараты, предназначенные для осуществления съемок при научно-технических исследованиях. Такие киноаппараты обеспечивают съемку с очень большими частотами: от нескольких сотен до нескольких миллионов кадров в секунду. По своим принципам действия и конструкции они существенно отличаются от обычных киноаппаратов и будут рассмотрены ниже.

14.2. КИНОАППАРАТЫ ДЛЯ СКОРОСТНОЙ И ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМОК

Скоростная и высокоскоростная киносъемки осуществляются с частотами свыше 100 кадр/с. В аппаратах, предназначенных для таких киносъемок, фотоматериал (киноплёнка, фотопластинка и др.) или перемещается непрерывно с определенной скоростью, или находится в неподвижном положении.

При киносъемке на непрерывно движущуюся киноплёнку для полного или частичного устранения смещения изображения относительно фотослоя за время его экспонирования применяются специальные устройства, называемые компенсаторами. С помощью компенсатора оптическое изображение снимаемого предмета перемещается совместно с киноплёнкой, благодаря чему фотоизображения на кадрах получаются резкими (несмазанными). В качестве компенсаторов широко применяются вращающиеся стеклянные призмы и зеркальные многогранники (зеркальные барабаны). На рис. 14. 2 приведены принципиальные схемы обоих типов оптических компенсаторов.

При вращении призмы 2 (рис. 14.2, а), оптическое изображение, даваемое объективом 1, будет смещаться с некоторой скоростью $V_{из}$ совместно с кинолентой 3, движущейся со скоростью $V_{пл}$. То же самое будет происходить и при вращении зеркального барабана 4 (рис. 14.2, б). В некоторых киноаппаратах применяют зеркальные барабаны с внутренними отражающими гранями.

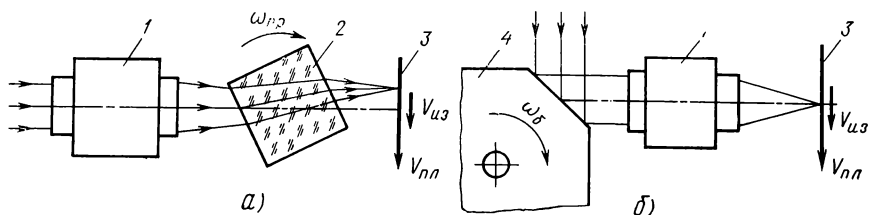


Рис. 14.2. Оптические компенсаторы скоростных киноаппаратов:

а—призмный; б—зеркальный;

1—объектив; 2—вращающаяся призма; 3—кинолентка; 4—вращающийся зеркальный барабан (многогранник)

Частота киносъемки, достигаемая в аппаратах с непрерывным перемещением кинолентки, определяется по формуле: $W_c = 1000 \frac{V_{пл}}{H}$, где $V_{пл}$ — скорость кинолентки в м/с; H_k — шаг кадров в мм. Наибольшая величина скорости $V_{пл}$ не превышает 300 м/с.

Отечественной оптико-механической промышленностью изготавливается аппарат СКС-1М с четырехгранным призмным оптическим компенсатором, осуществляющий киносъемку на 16-мм кинолентку с частотами от 150 до 4000 кадр/с. При использовании восьмигранной призмы частоты съемки увеличиваются в два раза с одновременным уменьшением высоты изображений (кадра) тоже в два раза.

В аппаратах, осуществляющих съемку на неподвижный фотоматериал, применяют развертывающие устройства, обеспечивающие смещение оптических лучей относительно фотослоя. Для получения на фотослое отдельных изображений в процессе непрерывной развертки световых лучей (для обеспечения покадровой киносъемки) применяются так называемые коммутирующие системы. Наибольшее применение находят оптические коммутирующие системы. Принципиальная схема аппарата с оптической коммутацией отдельных изображений показана на рис. 14.3. Основной съемочный объектив 1 совместно с коллективом 2 образует изображение $A'B'$ предмета съемки AB в плоскости, проходящей через ось вращения развертывающего зеркала 3. При вращении зеркала даваемое им изображение $A''B''$ будет поворачиваться вместе с зеркалом, занимая всегда перпендикулярное положение относительно отражаемого зеркалом главного осе-

вого луча. Это промежуточное изображение $A''B''$ переносится одним из объективов блока 4 на неподвижный фотоматериал 5 (на рис. изображение $A'''B'''$).

Коллектив 2 изображает выходной зрачок C_1 съемочного объектива 1 в месте расположения входных зрачков C_2 промежуточных объективов. При вращении зеркала 3 изображение зрачка C_1 будет смещаться по зрачкам C_2 , обеспечивая получение на фотоматериале отдельных изображений в моменты совпадения изображения зрачка C_1 с одним из зрачков C_2 . (Изображе-

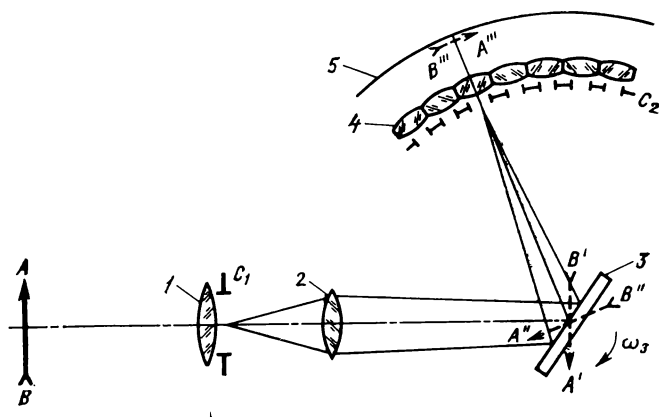


Рис. 14. 3. Схема киноаппарата с оптической коммутацией изображений:

1—основной объектив; 2—коллектив; 3—развортывающее зеркало;
4—блок дополнительных объективов; 5—кинолента

ние зрачка C_1 действует, как своеобразный оптический распределитель света, т. е. является своего рода оптическим коммутатором). Число кадров, получаемых на фотоматериале, равно числу промежуточных объективов в блоке 4.

В некоторых аппаратах с оптической коммутацией изображений в плоскости выходного зрачка C_1 устанавливают диафрагму с несколькими вырезами, а блок 4 имеет несколько рядов промежуточных объективов. Такая система оптической коммутации применяется в высокоскоростном аппарате СФР, схема которого приведена на рис. 14. 4. Съемочный объектив 1 и коллектив 4 дают изображение предмета съемки в плоскости развортывающего зеркала 5. Затем это изображение переносится с помощью одного из промежуточных объективов блока 6 на фотопленку 7, расположенную между кассетами 8. В плоскости выходного зрачка объектива 1 помещена диафрагма 2 с двумя или четырьмя вырезами. Эта диафрагма коллективом 4 изображается перед блоком 6, содержащим два или четыре ряда промежуточных объективов. При смещении изображения диафрагмы 2 по входным зрачкам промежуточных объективов на пленке последовательно

получаются изображения снимаемого предмета, расположенные тоже в два или четыре ряда. Затвор 3 служит для открывания доступа световым лучам к фотослою на время съемки.

Основные данные аппарата СФР таковы: при использовании двухрядного блока 6, содержащего 60 промежуточных объективов, частота киносъемки достигает 625 тыс. кадр/с; при примене-

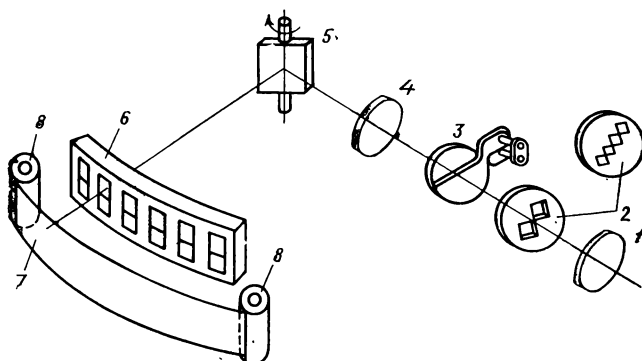


Рис. 14.4. Схема киноаппарата СФР:

1—основной объектив; 2—диафрагма; 3—затвор; 4—коллектив;
5—развертывающее зеркало; 6—блок дополнительных объективов;
7—фотопленка; 8—кассеты

нии четырехрядного блока, содержащего 240 промежуточных объективов, частота киносъемки повышается до 2,5 млн. кадр/с. В некоторых высокоскоростных аппаратах оптическое изображение расчленяется на большее число отдельных частей или элементов. К таким аппаратам относятся, например, растровые съемочные аппараты, в которых разложение изображения на составляющие элементы осуществляется с помощью растров. Растровые аппараты позволяют производить киносъемку с частотой в 100 и более млн. кадр/с.

14.3. КИНОПРОЕКЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

Кинопроекционные аппараты (далее — кинопроекторы) предназначены для проецирования кинофильмов на настенные экраны. Отличительной особенностью кинопроектора является наличие осветительной системы, служащей для просвечивания проецируемого изображения (кинокадра). Кинопроекторы, обеспечивающие демонстрацию кинофильмов со звуковым сопровождением, имеют также устройства для воспроизведения звука с фонограммы, записанной на самом фильме или на отдельной магнитной ленте.

Кадровые окна в фильмовых каналах кинопроекторов по своим размерам делаются намного меньше, чем кадровые окна киносъемочных аппаратов при одной и той же ширине кинопленки.

Это необходимо для того, чтобы проецируемое на экран изображение не имело бы по своим краям нежелательных обрамлений. В табл. 14. 2 приведены значения размеров, определяющих форму и расположение проецируемых изображений (обозначения размеров показаны на рис. 14. 1).

Т а б л и ц а 14. 2

Кинофильм	Размеры в мм			
	m		$b_{из}$	$h_{из}$
70-мм широкоформатный	12,20	57,8	(49,6)	19,80
35-мм широкоэкранный	8,10	29,40	21,3	18,20
35-мм обычный	8,20	29,30	(21,1)	15,3
16-мм обычный	3,10	12,80	(9,70)	7,26
8-мм обычный	3,05	7,45	(4,4)	3,25
8-мм типа «С»	1,65	7,06	(5,41)	4,01

Примечание. Размеры, указанные в скобках, не нормированы ГОСТом.

По своему назначению кинопроекторы подразделяются на любительские, передвижные и стационарные. В кинотеатрах и кинозалах дворцов культуры и клубов устанавливаются стационарные кинопроекторы. Они рассчитаны на демонстрацию 35 и 70-мм кинофильмов. Передвижные кинопроекторы предназначены для установки в кинозалах, в которых отсутствуют стационарные кинопроекторы, а также в любых зрительных залах. Они приспособлены для быстрой их установки в кинобудке или непосредственно в зрительном зале и рассчитаны на демонстрацию 35 и 16-мм кинофильмов.

Осветительные системы кинопроекторов включают источник света и конденсор, служащий для направления световых лучей, излучаемых источником света, в сторону кадрового окна кинопроектора. Конденсоры, применяемые в кинопроекторах, могут содержать как линзовые, так и зеркальные компоненты (см. рис. 14. 5). Плоский угол $2U_K$, соответствующий телесному углу, в пределах которого конденсор как бы «захватывает» световые лучи, называется **углом охвата** конденсора. Чем больше угол $2U_K$, тем больше световых лучей направляется конденсором в сторону кадрового окна, тем выше коэффициент использования светового потока источника света 1 . Линзовые конденсоры 2 имеют углы охвата не более 100° ; у зеркальных конденсоров 3 (в основном эллиптической формы) $2U_K$ доходит до 180° . Иногда с линзовым конденсором используется сферический отражатель.

Такие схемы осветителей широко применяются в передвижных и любительских кинопроекторах. Сферический отражатель дает изображение тела накала источника света в плоскости самого тела накала, что приводит к увеличению яркости источника света со стороны конденсора.

В качестве источника света в современных кинопроекторах применяют лампы накаливания (обычные и галогенные) и газоразрядные ксеноновые лампы. Тело накала в лампах накаливания имеет прямоугольную форму, что снижает световые потери

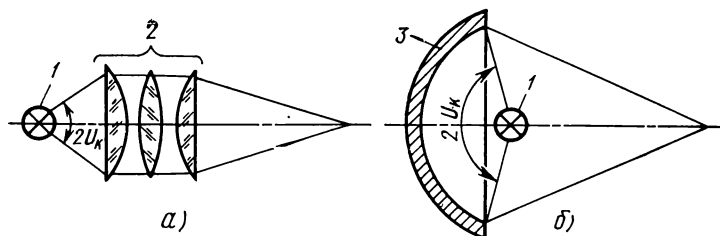


Рис. 14. 5. Схемы осветителей кинопроекторов:

а—с линзовым конденсором; б—с зеркальным конденсором;
1—источник света; 2—линзовый конденсор; 3—зеркальный конденсор

в кадровом окне. Они рассчитаны на напряжение питания не более 40 В. Габаритная (усредненная) яркость их тела накала не превышает 25 кд/м². В некоторых лампах накаливания, предназначенных для любительских кинопроекторов, внутри их колбы устанавливают зеркальный конденсор. Такие лампы называются поэтому зеркальными. Лампы накаливания применяют только в любительских и некоторых передвижных кинопроекторах.

Ксеноновые лампы имеют колбу с помещенными внутри ее двумя электродами, между которыми создается электрический разряд, протекающий в межэлектродном промежутке. Внутри колбы наполнена инертным газом — ксеноном. Источником светового излучения в ксеноновой лампе является нагретый и возбужденный электрическим разрядом газ ксенон. Небольшая доля от общего светового излучения ксеноновой лампы приходится на накалинные электроды (не более 10%). Колба делается из кварца, который является термостойким материалом, обладающим хорошей прозрачностью.

Ксеноновые лампы бывают двух типов: ДКсШ и ДКсР. Лампы ДКсШ делают неразборными и они не имеют водяного охлаждения. Лампы ДКсР — разборные, а их электроды охлаждаются водой, пропускаемой внутри токопроводящих трубок. Мощность ксеноновых ламп ДКсШ достигает 3 кВт, а ДКсР — доходит до 10 кВт. Яркость в середине разряда у различных по своей мощности ксеноновых ламп находится в пределах от 200 до 1000 и более кд/м². Общий световой поток у ксеноновых ламп

достигает 100 и более клм. Ксеноновые лампы применяют преимущественно в стационарных кинопроекторах, в которых они вытеснили электродуговые источники света.

Для поджига ксеноновых ламп необходимо высоковольтное напряжение от 15 до 25 кВ, что обеспечивается специальным электроустройством.

В кинопроекторах, как и в киносъемочных аппаратах, для периодического перекрывания световых лучей, идущих к кадро-

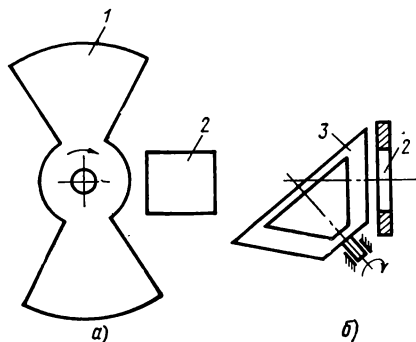


Рис. 14.6. Двухлопастные obtюраторы кинопроекторов:

а—дисковый; б—конический;
1—дисковый obtюратор; 2—проекционное окно; 3—конический obtюратор

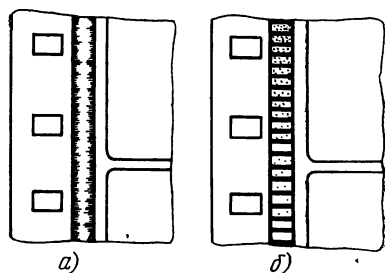


Рис. 14.7. Фотографические фоновграммы:

а—переменной ширины; б—переменной плотности

вому окну, на время продергивания кинофильма применяют obtюраторы. Наряду с обычными дисковыми obtюраторами в стационарных кинопроекторах широко используют конические obtюраторы.

Для того чтобы зрители не замечали изменений освещенности экрана (мельканий экрана) при периодическом перекрывании obtюратором световых лучей, необходимо обеспечивать смену освещенности экрана с частотой выше 40 Гц. Поэтому obtюраторы кинопроекторов или имеют две лопасти, или вращаются в два раза быстрее, если они имеют одну лопасть. У двухлопастных obtюраторов одна лопасть называется рабочей, а другая — холостой. На рис. 14.6 показаны дисковый 1 и конический 3 obtюраторы и их расположение относительно проекционного окна 2.

Основным показателем кинопроектора является величина светового потока, выходящего из объектива при отсутствии кинофильма в фильмовом канале и работающем obtюраторе. Этот поток F , называемый **полезным световым потоком**, определяет в лм по формуле:

$$F_{\text{пол}} = 0,25\pi\tau_{\text{общ}}B_{\text{ист}}(b_{\text{к.о}} \times h_{\text{к.о}}) \frac{1}{n_{\text{г}}^2}, \quad (14.1)$$

где $\tau_{\text{общ}}$ — общий коэффициент светопропускания всех элементов, расположенных по ходу световых лучей;

$B_{\text{ист}}$ — габаритная яркость источника света;

$(b_{\text{к.о}} \times h_{\text{к.о}})$ — площадь кадрового окна, м × м;

$n_{\text{г}}$ — знаменатель относительного отверстия проекционного объектива.

Чем больше величина $F_{\text{пол}}$, тем больше могут быть размеры экрана при заданной его яркости. В свою очередь яркость B экрана зависит от его освещенности E :

$$B_{\text{экp}} = \frac{r_{\text{p}} E_{\text{экp}}}{\pi},$$

где r_{p} — расчетный коэффициент яркости экрана*.

Согласно нормам Норм-Кино 50—58 яркость в центре экрана при отсутствии на нем киноизображения должна быть равна 35^{+15}_{-10} кд/м².

Запись звукового сопровождения на кинофильме осуществляется на узких полосках, расположенных около перфорационных отверстий по одной или обеим сторонам кинокадров. Участок кинофильма, на котором записано звуковое сопровождение, называется фонограммой.

Различают фотографическую и магнитную фонограммы. Фотографическая фонограмма образуется на фотослое световым пучком, размеры или интенсивность которого изменяются в соответствии со звуковыми колебаниями. На рис. 14.7 показаны разновидности фотографической фонограммы. Из-за некоторых преимуществ магнитной записи звука (немедленное прослушивание фонограммы, возможность «стирания» записи и др.) в последнее время в кинематографии широкое распространение находят магнитные фонограммы. Для обеспечения возможности магнитной записи звука на киноплёнку наносятся полоски ферромагнитного порошка (по типу магнитофонной ленты).

Необходимо отметить, что первоначальная запись звукового сопровождения осуществляется на отдельную от кинофильма плёнку и только при печати фильмокопий звук перезаписывается на киноплёнку.

* Если экран рассеивает отражаемый им свет равномерно во все стороны, то вместо r можно подставлять коэффициент отражения поверхности экрана ρ .

Оптические приборы наземной, авиационной и космической техники

Оптические приборы наземной и авиационной техники можно разделить на следующие основные классы: наблюдательные и угломерные приборы, дальномерные устройства, прицелы наземного вооружения и устройства для прицеливания баллистических ракет, прицелы воздушной стрельбы, прицелы бомбометания, устройства астронавигации летательных аппаратов и др.

Глава 15

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

15.1. ПРИМЕНЕНИЕ, ОСОБЕННОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Краткие сведения о применении геодезических приборов

Геодезические приборы предназначены для измерений относительного положения точек на земной поверхности. Для этого геодезическими приборами измеряют длины линий, горизонтальные и вертикальные углы и разности высот точек. При помощи геодезических приборов решается также обратная задача — нахождение положения точек на поверхности земли по их заданным координатам.

Горизонтальные и вертикальные углы измеряют при помощи теодолита соответственно по его горизонтальному и вертикальному лимбам.

Разность высот двух точек (нивелирование) измеряют с помощью нивелира определением разности отсчетов по вертикальным рейкам, установленным в двух измеряемых точках.

Расстояния между точками на местности измеряют с помощью оптических дальномеров, причем в настоящее время широко используются высокоточные фазовые оптиколокационные дальномеры (светодальномеры).

Особенности геодезических приборов

Расстояния между точками, непосредственно измеряемые геодезическими приборами, колеблются в пределах от нескольких метров до десятков километров. Точность измерения расстояний между точками характеризуется относительной ошибкой ($\Delta L/L$) в пределах от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-2}$.

Точность измерения углов с помощью геодезических приборов находится в пределах $0,5''$ до $2'$.

Существенная особенность работы геодезических приборов состоит в том, что они, как правило, предназначены для использования в полевых (экспедиционных) условиях.

Классификация геодезических приборов

Обычно геодезические приборы классифицируют по назначению и точности.

По назначению можно выделить следующие основные группы приборов:

1. Приборы для линейных измерений — дальномеры.
2. Приборы для измерения углов: теодолит, вертикальный круг, буссоль, гироскопический компас.
3. Приборы для определения высот и превышений: нивелир, профилограф, барометр.
4. Приборы графической съемки местности и фотографические приборы: мензула с кинрегелем, фототеодолит, фотограмметрические приборы.
5. Оптические проектиры: оптический отвес, оптический проектир направления, световой указатель.
6. Приборы для камеральных работ: планиметр, пантограф, светокопировальный аппарат.

Приведенная классификация является условной, так как отдельные приборы служат для нескольких видов измерений.

Приборы одного назначения образуют ряд в зависимости от точности. Точность измерения изменяется постепенно. Приборы по точности делятся на три группы: высокоточные, точные и технические.

Обоснование параметров геодезического прибора

Геодезические приборы должны обеспечивать возможность соответствующих измерений с требуемой точностью. Поэтому при их проектировании расчеты на точность являются основными.

Требуемая точность результатов измерений задается средней квадратичной погрешностью конечного результата или предельной ошибкой. Погрешности могут выражаться в угловой или линейной мере в зависимости от вида и характера измерений. При этом должно учитываться, что частью погрешности конеч-

ного результата будет ошибка от влияния внешних условий (прозрачности атмосферы, ее рефракции, колебаний основания прибора и т. д.).

Физиологические возможности глаза должны быть известны разработчику приборов (см. разд. 1.1 и 2.5), так как на них основывается расчет увеличения зрительных труб и микроскопов, выбор схемы отсчетных приспособлений.

Технологические возможности обуславливают предельные погрешности в изготовлении ответственных деталей и узлов приборов и определяют достижимую точность этих приборов. Уровень развития техники в настоящее время позволяет получить погрешность нанесения штрихов на лимбах $\pm 1''$, наименьшую толщину штрихов сеток 1—2 мкм, колебание цены деления уровня в $1''$ в пределах $\pm 10\%$ на разных частях ампулы, ошибку шага микровинтов в 1 мкм для минимального шага в 0,25 мм, зазор в цилиндрических осях — $0,5 \div 0,8$ мкм и т. д.

15. 2. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Зрительные трубы

Зрительные трубы используют для визирования на предметы. Они представляют собой телескопические системы типа трубы Кеплера. При помощи зрительной трубы наблюдатель должен различить предмет и иметь возможность определить положение индекса сетки трубы относительно предмета, а также обнаружить подробности предмета. Ошибки измерений, зависящие от зрительной трубы, в основном определяются точностью визирования (см. разд. 2.5).

Зрительные трубы имеют большое увеличение $\Gamma = 10 \times \text{—} 60 \times$, малый угол поля зрения $2W = 1^\circ \text{—} 3^\circ$, малый размер выходного зрачка $D_{\text{зр. вых.}} = 0,7 \text{—} 1,5$ мм. Относительные отверстия объективов находятся в пределах 1:6 до 1:10. В передней фокальной плоскости окуляра устанавливается сетка для визирования на предметы.

Предметы могут располагаться на разных расстояниях от прибора, начиная приблизительно от 5 м до бесконечности, поэтому в конструкции зрительной трубы должны предусматриваться фокусирующие устройства.

На рис. 15.1 приведена оптическая схема телескопической системы с внешней фокусировкой. Фокусировка осуществляется перемещением окуляра 3 с сеткой 2 относительно объектива 1, который неподвижен. Следует заметить, что при визировании на конечное расстояние труба не является телескопической системой.

Если при фокусировке перекрестие сетки вследствие погрешностей изготовления переместится в плоскости, перпендикулярной оптической оси, на величину Δl , то произойдет наклон визир-

ной оси на угол α_v (погрешность визирования), величина которого будет определяться как

$$\alpha_v'' = \frac{\Delta l}{f'_{об}} \varrho'', \quad (15.1)$$

где $f'_{об}$ — фокусное расстояние объектива;
 $\varrho'' = 206265''$

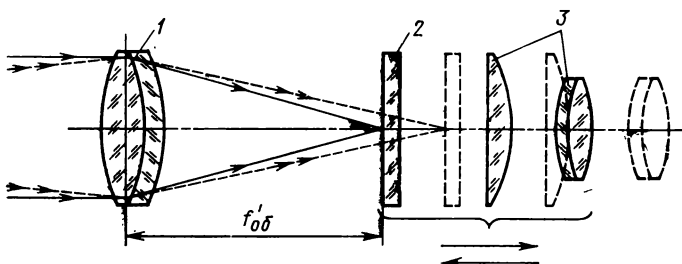


Рис. 15.1. Схема зрительной трубы с внешней фокусировкой:
 1—объектив; 2—сетка; 3—окуляр

Допустимая величина Δl должна быть не более нескольких мкм.

На рис. 15.2 приведена оптическая схема зрительной трубы с внутренней фокусировкой. Объектив 1 такой трубы состоит из двух компонентов, находящихся на определенном расстоянии

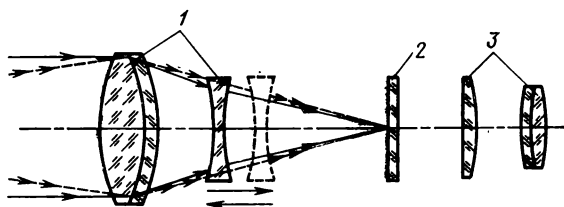


Рис. 15.2. Схема зрительной трубы с внутренней фокусировкой:
 1—объектив; 2—сетка; 3—окуляр

друг от друга и представляющих собой телеобъектив, эквивалентное фокусное расстояние которого равно

$$f'_{об} = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - l_1}, \quad (15.2)$$

где f'_1 и f'_2 — фокусные расстояния компонентов телеобъектива;
 l_1 — расстояние между ними.

Фокусировка на близкий и дальний предметы осуществляется перемещением второй линзы объектива. Обычно она бывает

отрицательной. Для контроля геометрии изделий в машиностроении фокусировка на ближний и дальний предметы осуществляется перемещением положительной фокусирующей линзы. Это дает возможность сократить ближнее визирное расстояние.

Для расчета перемещения фокусирующей линзы следует пользоваться формулой, приводимой в курсах прикладной оптики:

$$l_0 = \frac{1}{2} [(A'_1 + L) - \sqrt{(A'_1 - L)(A'_1 - L + 4f'_2)}], \quad (15.3)$$

где L — длина трубы (обычно она задается), а A'_1 рассчиты-

$$\text{вается по формуле } A'_1 = \frac{f'_1 A_1}{f'_1 + A_1};$$

A_1 — расстояние от предмета до передней главной плоскости объектива.

Для уменьшения габаритов труб в настоящее время широко применяют зеркально-линзовые объективы.

В геодезических приборах применяются окуляры типа Кельнера, симметричный и ортоскопический. Они имеют диоптрийную наводку в пределах ± 5 дптр. В поле зрения геодезического прибора имеется сетка. Сетка может иметь вид перекрестия или биссектора с тремя полными или неполными горизонтальными нитями. Расчет расстояния l_c между нитями сетки делается по формуле

$$l_c = \frac{f'_{06}}{k}, \quad (15.4)$$

где k — коэффициент дальномера, равный 100, 200, 300 и т. д.

Расстояние до предмета вычисляется по формуле

$$L = kC_p + C, \quad (15.5)$$

где C_p — число делений рейки между нитями дальномера;

$$C = f'_{06} + a;$$

a — расстояние от передней главной плоскости объектива до вертикальной оси вращения прибора.

Для различных приборов значение C находится в пределах от 250 до 700 мм. Способы определения этой величины приводятся в курсах геодезии.

В трубах с внутренней фокусировкой связь параметров оптической системы с коэффициентами k и C и переменный характер этих величин затрудняют пользование нитяным дальномером. Однако соответствующим выбором элементов конструкции трубы удалось получить значение $C=0$. Эти трубы носят название аналлактических.

Отсчетные системы

Отсчетные системы (лупы и микроскопы) служат для рассматривания шкал и лимбов и уточнения измерений (см. разд. 2. 5).

Все необходимые для расчета формулы приведены в гл. 1 настоящего учебника, там же даны подробные описания отсчетных приспособлений.

Осевые системы

Механические оси должны определять и взаимно сохранять перпендикулярность или параллельность отдельных узлов и деталей прибора, а также устанавливать размеры и пределы изменения их расположения.

По расположению оси делятся на вертикальные и горизонтальные, по форме — на конические и цилиндрические.

При конструировании узлов осей необходимо обеспечить:

- а) точность совмещения осей (центрированность) и их взаимную перпендикулярность или параллельность;
- б) правильность вращения в пределах точности прибора в условиях меняющейся температуры;
- в) постоянство размеров и форм деталей.

Вертикальные конические оси позволяют регулировать зазор в процессе работы, их можно ремонтировать, они могут быть изготовлены с высокой точностью.

Материалы оси и ее втулки должны иметь близкие коэффициенты линейного расширения и малые коэффициенты трения (сталь — бронза, бронза — латунь).

Детали осевых систем изготавливаются по 1 классу точности и имеют жесткие допуски на погрешность формы.

Цилиндрические вертикальные оси с трением скольжения менее точны вследствие неизбежного зазора, не позволяют регулировать зазор, чувствительны к изменению температуры. В вертикальной цилиндрической осевой системе иногда вместо поверхностей скольжения вводятся подшипники качения. Точность центрировки при применении шарикоподшипников в осевых системах может достигать 3—5 мкм для серийных и 1 мкм для специальных подшипников.

Расчеты осевых систем на «прочность» и «жесткость» производятся по методам, изложенным в курсе «Детали машин и приборов».

Горизонтальные оси в угломерных приборах несут на себе трубу или трубу и вертикальный круг с алидадой. Цапфы оси укладываются в специальные гнезда подставок — лагеры. Цапфы прижимаются к лагерам пластиной с пружинным упором. Для

регулировки горизонтального положения оси одна из подставок должна иметь приспособление для изменения ее высоты.

Горизонтальную ось и цапфы делают из латуни, бронзы, стали. Форма цапф цилиндрическая.

Лимбы

Геодезические приборы должны иметь в конструкции рабочую меру (основную шкалу) для сравнения измеряемой величины с единицей измерения. Рабочими мерами для измерения углов являются лимбы. Они представляют собой металлические или стеклянные круги, разделенные на некоторое число равных делений.

Конструктивными элементами лимба являются его диаметр,

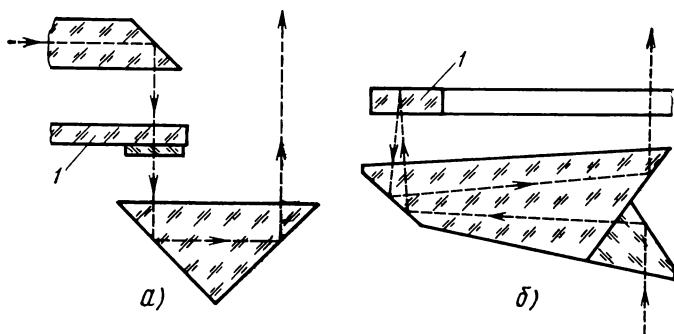


Рис. 15.3. Подсветка стеклянных лимбов:

а—в проходящем свете; б—в отраженном свете;
1—лимб

цена деления, интервал деления, толщина штрихов, форма поверхности несущей деления, материал детали. Если штрихи имеют толщину 0,1 мм и более, материалом для лимба служит латунь (ЛС59-1) или бронза (БрОФ 6,5—0,4, БрОЦС6-3). Для более тонких штрихов применяется нейзильбер (МНЦ 15—20) или серебряный сплав (Ag 87,5% и Cu 12,5%). Серебряный сплав или нейзильбер в виде полоски припаивается или завальцовывается в латунное основание, затем подвергается окончательной обработке «пемзовке» и нанесению штрихов на делительных машинах с погрешностью 1"—3"

Стеклянные лимбы изготавливают из стекла (БК10), деления наносят травлением, затем лимбы закрываются покровным стеклом.

Диаметры металлических лимбов для теодолитов колеблются в пределах от 50 до 140 мм, стеклянных — от 50 до 90 мм при толщине 3—5 мм. Во многих современных конструкциях лимб входит в оптическую систему и представляет собой плоскопараллельную пластинку 1, на которой штрихи могут освещаться

щаться в проходящем (рис. 15.3, а) и отраженном свете (рис. 15.3, б).

Лимбы геодезических приборов имеют цену делений $1/2^\circ$, $1/3^\circ$, $1/6^\circ$, $1/12^\circ$ и $1/15^\circ$. Интервал деления (линейное расстояние между двумя соседними штрихами) при заданной цене и диаметре D лимба определяется по формуле

$$a = \frac{\pi D}{N}, \quad (15.6)$$

где N — число делений на лимбе.

Толщина штрихов на лимбе зависит от способа наблюдения. При рассматривании невооруженным глазом толщина штриха принимается $0,1 \div 0,2$ мм с интервалом $1,5 \div 2$ мм, при использовании верньера толщина штриха — $0,02 \div 0,1$ мм с интервалом $0,3 \div 1$ мм, при использовании микроскопов и оптических микрометров толщина штриха от $0,002$ до $0,02$ мм, с интервалом $0,3 \div 0,7$ мм.

Верньер (нониус) представляет собой шкалу 1, расположенную на дуге и соприкасающуюся с лимбом (рис. 15.4). Дуга шкалы верньера 2 содержит n делений и равна $n-1$ минимальных делений лимба. Обозначим цену деления лимба через $C_{\text{л}}$, а цену деления верньера через $C_{\text{в}}$, тогда получим $C_{\text{л}}(n-1) = C_{\text{в}}n$. Разность между ценой деления лимба и ценой деления верньера называется точностью и определяется по формуле

$$\Delta C = C_{\text{л}} - C_{\text{в}} = \frac{C_{\text{л}}}{n}. \quad (15.7)$$

В геодезических приборах с помощью верньера отсчитывают углы с точностью $10''$, $20''$, $30''$ и $1'$.

Уровни

Уровни в геодезических приборах служат для ориентирования прибора и отдельных его частей относительно вертикали в данной точке и для измерения малых углов наклона от вертикали. Уровень состоит из ампулы с жидкостью и оправы. По форме ампулы уровни разделяются на цилиндрические (рис. 15.5, а) и сферические или круглые (рис. 15.5, б). Внутренняя поверхность цилиндрического уровня отшлифована по дуге окружности вдоль образующей цилиндра, внутренняя поверхность ампулы круглого уровня отшлифована по шаровой поверхности. Уровни обычно имеют на наружной поверхности ампулы штрихи, по которым отсчитываются малые углы наклона.

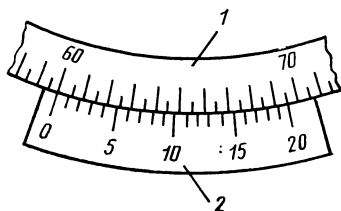


Рис. 15.4. Верньер:

1—шкала; 2—шкала верньера

Ценой деления уровня C_y называется угол, на который нужно наклонить ампулу, чтобы пузырек уровня передвинулся на одно деление. Интервал между делениями a_y принимается для цилиндрических уровней равным 2 мм, для круглых — 4 мм.

Порогом чувствительности уровня называется угол, на который нужно наклонить ампулу, чтобы пузырек сместился на $0,1 C_y$. Чувствительность уровня возрастает с увеличением диаметра ампулы.

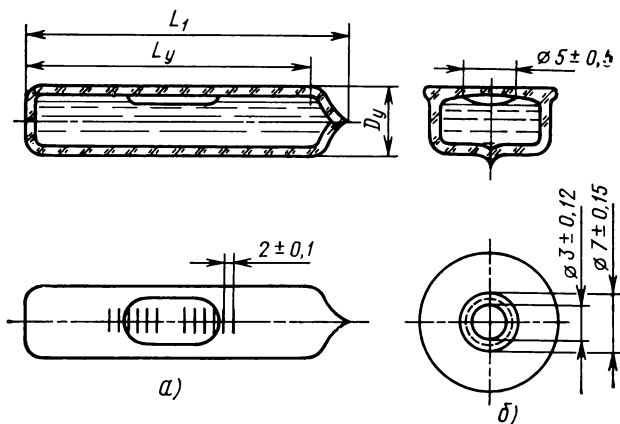


Рис. 15. 5. Типы уровней:
а—цилиндрический; б—круговой

Диаметры ампул колеблются в пределах от 7,5 до 18 мм, длины ампул от 23 до 155 мм, отношение диаметра к длине от $1/6$ до $1/9$.

Ампулы делятся по точности на ампулы малой точности с ценой деления выше $1'$, средней точности — от $5''$ до $1'$ и высокой точности от $1''$ до $5''$. Минимальная цена деления для круглых уровней — $10''$.

Для изготовления ампул применяют два сорта стекла: термометрическое и жароустойчивое (пирекс). В качестве наполнителя используют метиловый, этиловый спирт, серный эфир и др.

Установочные приспособления

Геодетические приборы и инструменты в рабочем положении устанавливают и закрепляют на штативе или консоли. Основными частями штатива являются головка, три ножки, и становой винт, с помощью которого прибор укрепляется на головке штатива.

Перед тем как приступить к измерениям, геодезический прибор устанавливают над соответствующей точкой местности в

определенное положение. Центр лимба теодолита должен находиться в вершине измеряемого угла, а вертикальная ось прибора должна занимать вертикальное положение. Алидада и труба закрепляются и медленным наведением приводятся в нужную точку. Все приспособления, которые служат для этой цели, носят название установочных. К ним относятся подъемные, зажимные и микрометрические наводящие устройства.

15. 3. УГЛОМЕРНЫЕ ПРИБОРЫ И НИВЕЛИРЫ

Угломерные приборы

Угломерные приборы предназначаются для проведения теодолитных и тахеометрических съемок на местности, т. е. измерения горизонтальных и вертикальных углов.

На рис. 15. 6 изображена схема угломерного прибора. Вертикальная ось OO' является основной, вокруг которой вращается горизонтальный лимб $б$ с делениями и его алидада (линейка с верньером). Сама ось OO' устанавливается вертикально при помощи подъемного устройства 5 из трех винтов. Вертикальность оси и горизонтальность круга проверяется по уровню. На горизонтально расположенной алидаде укреплен подставка 4 U -образной формы. На подставке располагается горизонтальная ось трубы 3 (AA'), сама зрительная труба 2 (BB') и вертикальный лимб 1 . Угломерный инструмент центрируется по отвесу и выставляется в вершине измеряемого угла. Зрительная труба наводится на точки визирования, а по лимбам при помощи индексов снимаются отсчеты. Разность отсчетов по горизонтальному лимбу даст значение горизонтального угла между двумя направлениями на точки визирования.

Теодолиты и теодолиты-тахеометры предназначены для измерения углов, первые — горизонтальных с большой точностью, вторые — горизонтальных и вертикальных углов с одинаковой точностью.

По конструкции угломерные приборы можно разделить на «классические» и «оптические». Классические формы обладают простотой регулировки, доступностью ремонта и т. д. «Оптические» приборы имеют стеклянные лимбы и отсчеты по лимбам введены или в поле зрения отсчетного микроскопа или зрительной трубы. В настоящее время имеют преимущественное развитие теодолиты оптического типа со средней квадратичной ошибкой измерений в пределах от $0,5''$ до $30''$.

Угломерные инструменты (теодолиты) классифицируются по точности.

Рассмотрим в качестве примера теодолит Т2. Он относится к группе точных приборов. Повышенная точность измерения углов обеспечивается одновременным рассматриванием через микроскоп противоположных сторон лимба (что исключает ошибку

эксцентриситета лимба) и использованием оптического микрометра. Теодолит снабжен коробчатой ориентир-буссолью и оптической визирной системой для предварительного наведения прибора.

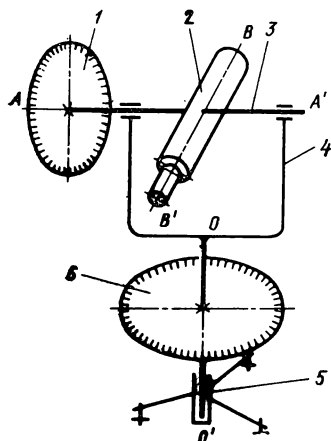


Рис. 15.6. Схема угломерного прибора:

1—вертикальный лимб; 2—зрительная труба; 3—горизонтальная ось зрительной трубы; 4—подставка; 5—подъемное устройство; 6—горизонтальный лимб

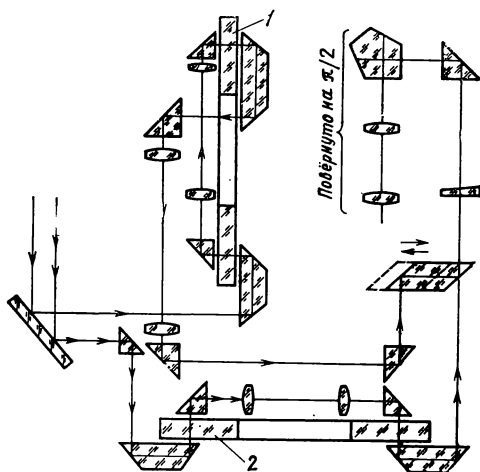


Рис. 15.7. Оптическая схема теодолита Т2.

1—вертикальный лимб; 2—горизонтальный лимб

На рис. 15.7 приведена оптическая система теодолита Т2 для снятия отсчетов с вертикального 1 и горизонтального 2 лимбов. Оптические характеристики теодолита $T2 \times \Gamma = 25,6 \times 2W = 1^\circ 30'$, $D_{зр. вх} = 35$ мм, $f'_{об} = 250$ мм, цена деления окулярного микрометра горизонтального и вертикального — $1''$, цена деления лимба горизонтального и вертикального — $20'$, масса 5 кг.

Нивелиры

Нивелиры предназначены для определения превышения одной точки над другой при помощи горизонтальной линии визирования. Основными узлами нивелира являются зрительная труба, уровень, треножник с подъемными винтами, осевое устройство.

Нивелиры классифицируются по точности на высокоточные (прецизионные), точные и технические. Точность нивелиров устанавливает ГОСТ. Например, высокоточные нивелиры имеют среднюю квадратичную ошибку измерения не более $\pm 0,5$ мм на 1 км, цену деления уровня не более $8-10''$ на 2 мм в поле зрения трубы и т. д.

У приборов технической точности средняя квадратичная ошибка составляет 15—30 мм на 1 км, уровень 30-секундной точности и т. д.

В качестве примера рассмотрим нивелир средней точности (рис. 15.8). Зрительная труба 1 имеет устройство для внутренней фокусировки 2. Сбоку трубы укреплена коробка, в которой помещается цилиндрический уровень и система призм (рис. 15.9), передающая изображение уровня в поле зрения трубы.

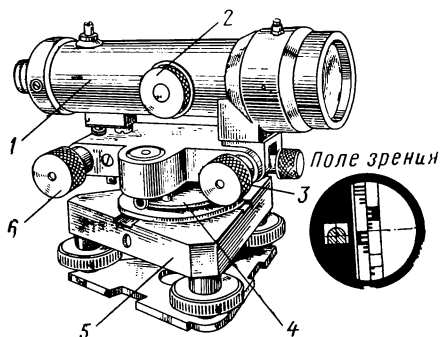


Рис. 15.8. Нивелир НЗ:

1—зрительная труба; 2—устройство внутренней фокусировки трубы; 3—микрометрический винт; 4—вертикальная ось; 5—треножник; 6—элевационный винт

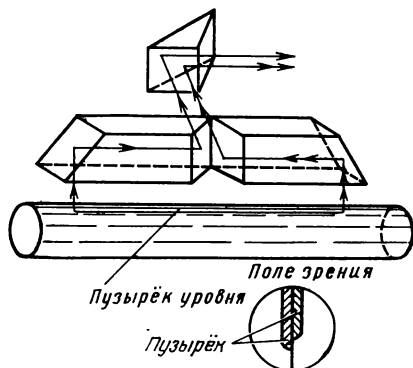


Рис. 15.9. Схема совмещения пузырька уровня в поле зрения нивелира

Нивелир снабжен элевационным винтом 6 (см. рис. 15.8), позволяющим быстро устанавливать прибор в горизонтальное положение (совмещать концы пузырька уровня). Цилиндрическая ось прибора 4 укреплена в треножнике 5 вместе с тремя подъемными винтами. Для наибольших перемещений трубы в горизонтальной плоскости служит микрометрический винт 3. Угловое увеличение $\Gamma = 31\times$, цена деления цилиндрического уровня $17'' \div 23''$

В последнее время начали выпускаться нивелиры с самоуставляющейся линией визирования. В них визирная линия, определяемая задней узловой точкой объектива и отметкой на сетке нитей, автоматически устанавливается горизонтально с помощью компенсаторов.

15.4. ОПТИКОЛОКАЦИОННЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

В основе измерения расстояния с помощью оптиколокационных дальномеров лежит зависимость (15.4). Оптиколокационные дальномеры можно разделить на два основных класса: фазовые дальномеры, в которых используется непрерывная модуляция излучения при определении дистанции, и импульсные дальномеры, в которых используется импульсная модуляция.

К достоинствам данных дальномеров можно отнести значи-

тельную дальность действия и высокую точность, менее зависящую от расстояния, чем для внешне- и внутрибазных оптических дальномеров. Погрешность в измерении дистанции у фазовых дальномеров составляет 5—20 мм, у импульсных дальномеров — 1—10 м.

Фазовые оптиколокационные дальномеры

В фазовых дальномерах оптическое излучение модулируется по синусоидальному закону. Формула (15.4) при использовании в фазовых дальномерах может быть преобразована к более удобному виду. Расстояние между объектом и дальномером можно выразить через целое количество длин волн и часть целой волны модулированного оптического излучения. В этом случае дистанция L равна

$$L = \frac{1}{2} \left(N\lambda_m + \frac{\varphi}{2\pi}\lambda_m \right), \quad (15.8)$$

где N — целое число волн, укладывающееся в двойной дальности до цели;

λ_m — длина волны модулированного оптического излучения (не путать с собственной длиной волны оптического излучения)

$$\lambda_m = \frac{C}{nf_m},$$

C — скорость света (электромагнитных волн) в вакууме;

n — показатель преломления среды, где распространяется оптическое излучение;

f_m — частота модуляции излучения;

φ — часть периода модуляции.

Выражая в (15.8) величину λ_m через скорость света и частоту модуляции, получим

$$L = \frac{C}{2nf_m} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right). \quad (15.9)$$

Рассматривая зависимость (15.9), видим, что измерение дальности сводится к определению φ и счету N , при известных C , n и f_m . Определим ошибку при измерении дальности в зависимости от погрешности в измерении разности фаз $\Delta\varphi$. Дифференцируя (15.9) по L и φ , переходя к конечным приращениям, получим

$$\Delta L = \frac{C\Delta\varphi}{2nf_m2\pi}. \quad (15.10)$$

При современных методах измерения величины $\Delta\varphi^\circ$ может быть измерена с ошибкой в 1° (и даже в $0,1^\circ$), отсюда при $\Delta\varphi^\circ = 1^\circ$ получаем

$$\Delta L = \frac{C}{nf_m 720}. \quad (15.11)$$

При $C=3 \cdot 10^8$ м/с, $n=1$, $\Delta\varphi^\circ=1^\circ$, $f_m=30$ МГц (соответствует, например, одной из частот дальнотера КДГ-3), получим $\Delta L \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$ м. Зависимость (15.10) показывает, что с увеличением f_m ошибка в измерении дальности будет уменьшаться.

Блок-схема фазового оптиколокаторного дальномера

Блок-схема современного фазового дальномера приведена на рис. 15. 10. Высокочастотное синусоидальное напряжение с частотой f_m от генератора масштабных частот 1 поступает на полу-

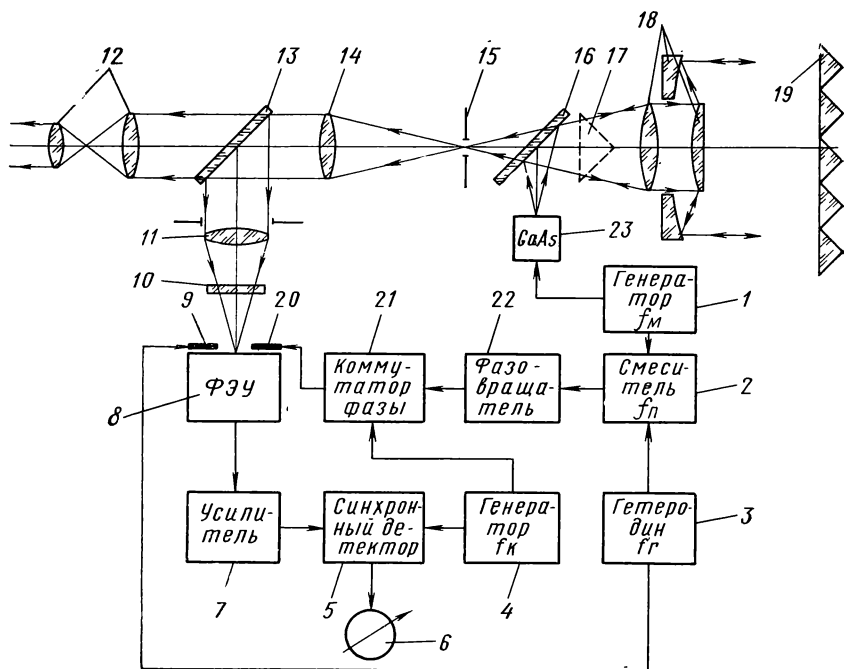


Рис. 15. 10. Блок-схема фазового дальномера:

1—генератор масштабных частот; 2—смеситель; 3—гетеродин; 4—генератор; 5—синхронный детектор; 6—нуль-индикатор; 7—усилитель; 8—ФЭУ; 9, 20—внешние электроды ФЭУ; 10—интерференционный фильтр; 11—объектив; 12—телескопическая система; 13, 14, 16—оптические элементы; 15—диафрагма; 17—трипль-призма; 18—основной объектив; 19—угловоковый отражатель; 21—коммутатор фазы; 22—фазовращатель; 23—полупроводниковый излучатель

проводниковый излучатель 23, допускающий модуляцию оптического излучения по питанию. В качестве излучателя может также использоваться оптический квантовый генератор (ОКГ), излучение которого модулируется по синусоидальному закону.

В настоящее время как источники излучения широко приме-

няются полупроводниковые излучатели, например, из арсенида галлия.

Излучение от полупроводникового излучателя отражается от светоделительной пластинки 16 и объективом 18 направляется на уголкового отражатель 19, установленный в конце измеряемой дистанции.

Угловой отражатель представляет собой набор четырехгранных призм, на все грани которых, кроме входной, нанесены зеркальные отражающие покрытия. Все три зеркальные грани составляют друг с другом прямые углы (рис. 15.11). Основным свойством таких призм является то, что падающий на входную

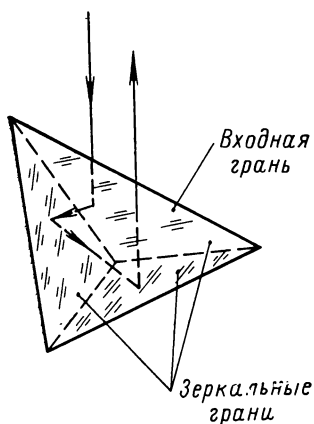


Рис. 15.11. Призма углового отражателя

грань пучок лучей после отражений от зеркальных граней выходит из призмы в обратном направлении. Отраженное излучение собирается тем же объективом и попадает после прохождения оптических элементов 16, 14, 13, 11, 10 на катод фотоумножителя 8, выполняющего функции фотоприемника и фазового детектора. Для уменьшения влияния фоновых засветок перед катодом ФЭУ устанавливается интерференционный фильтр 10. Спектральная полоса пропускания фильтра выбирается в зависимости от ширины линии излучения полупроводникового излучателя или ОКГ.

Для визуального наведения прибора на отражатель служит телескопическая система 12.

На излучатель 23 подается модулирующее напряжение с частотой f_m от генератора 1. Оптический сигнал с частотой модуляции f_m , приходящий с дистанции на ФЭУ и преобразованный им, смешивается в околкатодном пространстве фотоумножителя с сигналом частоты f_r , подаваемым на внешний электрод 9 ФЭУ от гетеродина (вспомогательного генератора) 3. В результате смешения f_m и f_r (гетеродинирования) образуется переменная составляющая фототока с промежуточной (разностной) частотой $f_n = f_m - f_r$, фаза которой зависит от величины измеренного расстояния. Эта составляющая смешивается в том же околкатодном пространстве ФЭУ с опорным сигналом частоты f_n . Для получения опорного сигнала имеется смеситель 2, на который подаются сигналы с частотами f_m и f_r от генератора масштабных частот 1 и гетеродина 3. На выходе смесителя выделяется сигнал с промежуточной частотой f_n и подается на второй внешний электрод 20 ФЭУ через фазовращатель 22 и коммутатор фазы 21. Цепь 1, 2, 22, 21 является опорным каналом дальномера. Комму-

татор фазы осуществляет периодическую переброску фазы сигнала в опорном канале скачком на π с низкой частотой f_k , задаваемой генератором прямоугольного напряжения 4, который управляет работой коммутатора фазы.

В результате смещения полученной при гетеродинировании составляющей частоты f_{Σ} , фаза которой зависит от измеряемого расстояния, с опорным сигналом той же частоты происходит фазовое детектирование на частоте f_{Σ} . Поскольку опорный сигнал коммутируется по фазе, то на выходе ФЭУ появляется составляющая фототока с частотой коммутации f_k . Амплитуда этой составляющей зависит от разности фаз опорного сигнала и сигнала, пришедшего с дистанции. Эта составляющая усиливается усилителем 7 и поступает на синхронный детектор 5, на второй вход которого подается сигнал той же частоты f_k от генератора 4. С выхода синхронного детектора снимается постоянное напряжение, величина которого зависит от разности фаз между опорным и пришедшим с дистанции сигналами. Это напряжение регистрируется нуль-индикатором 6. Измерительным элементом дальномера является фазовращатель.

Для определения нуля шкалы фазовращателя (начального отсчета) вводится линия оптического замыкания (трипель-призма 17), при помощи которой излучение можно направить на ФЭУ, минуя дистанцию.

Достоинством данной схемы является то, что измерение разности фаз между опорным и сигналом с дистанции осуществляется не на частоте модуляции f_m , составляющей десятки и сотни МГц, а на промежуточной частоте f_{Σ} , составляющей десятки и сотни КГц. Создание высокоточных фазовращателей на высоких частотах связано с большими трудностями, поэтому в фазовых дальномерах обычно фаза измеряется у напряжения сравнительно низкой промежуточной частотой.

Для однозначного измерения дистанции в дальномерах используется несколько масштабных частот f_{m1} , f_{m2} , f_{m3} и так далее. Расстояние измеряется на нескольких частотах и по ним определяется число N .

Частота колебаний генератора масштабных частот в настоящее время может выдерживаться со стабильностью $\frac{\Delta f_m}{f_m} = (1-2)10^{-6}$. Минимальная частота модуляции рассчитывается из условия

$$f_{\min} \geq \frac{C \Delta \varphi}{4\pi n \Delta L}. \quad (15.12)$$

К настоящему времени разработано большое количество моделей достаточно совершенных отечественных фазовых дальномеров.

Импульсные оптиколокационные дальномеры

Дальность до цели определяется по зависимости (15.4). Определим погрешность измерения дальности. Дифференцируя (15.4) по L и t и переходя к конечным приращениям, получим

$$\Delta L = \frac{C \Delta t}{2n}. \quad (15.13)$$

Формула (15.13) предполагает, что скорость света C и показатель преломления n на трассе измерения постоянны. При современных способах возможно обеспечить погрешность в измерении промежутка времени $\Delta t \approx 1$ нс (10^{-9} с). Исходя из этого, ошибка в измерении дальности при $C = 3 \cdot 10^8$ м/с, $n = 1$ будет

$$\Delta L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Блок-схема импульсного оптиколокационного дальномера

Количество разработанных к настоящему времени импульсных оптиколокационных дальномеров достаточно велико.

Однако все они в принципе строятся по одной и той же функциональной схеме, отличаясь в основном электронными схемами измерения времени и характеристиками ОКГ и оптических систем.

Блок-схема импульсного оптиколокационного дальномера представлена на рис. 15.12. Источником оптического излучения служит твердотельный ОКГ, работающий в режиме модуляции добротности, осуществляемом вращающейся призмой 1 или каким-либо другим методом.

Такой режим работы ОКГ позволяет генерировать одиночные оптические импульсы с временем нарастания импульса в пределах 10 нс, шириной несколько десятков нс и с мощностью в импульсе до нескольких десятков мВт.

Излучение ОКГ формируется передающей телескопической системой 3 в пучок лучей с очень малой расходимостью и направляется на цель. Отраженное от цели излучение улавливается приемной телескопической оптической системой 5. В выходном зрачке оптической системы располагается фотокатод ФЭУ 10, перед которым устанавливается узкополосный интерференционный фильтр 11, который служит для срезания излучения от фона. Фильтр пропускает излучение в пределах $\Delta \lambda \approx (1 \div 5)$ нм. В фокальной плоскости объектива приемной оптической системы расположена полевая диафрагма 13, которая ограничивает поле зрения приемной части дальномера и, тем самым также уменьшает влияние фоновых помех. Часть излучения ОКГ (опорный импульс) при помощи призм 4 передается непосредственно в

приемную оптику, минуя дистанцию. После фотоэлектрического преобразования ФЭУ опорный импульс усиливается усилителем 9 и из него формируется импульс в несколько нс. Под действием импульса происходит переброска триггера 8, который генерирует стартовый импульс, запускающий счетное устройство 7, представляющее собой кварцевый генератор импульсов и счетчик

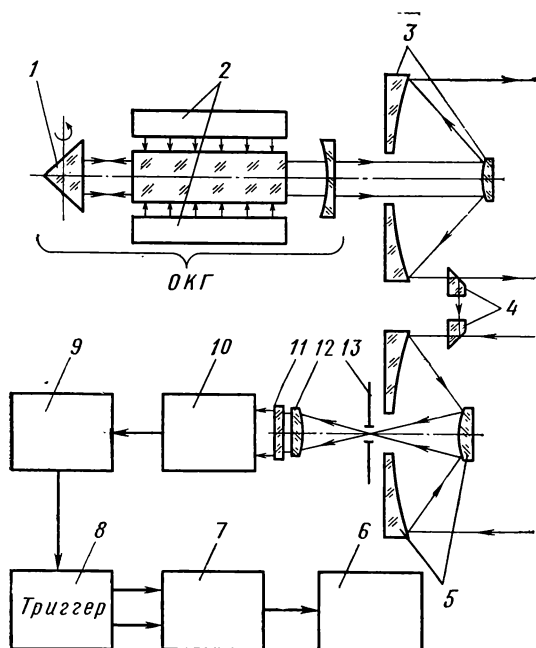


Рис. 15. 12. Блок-схема импульсного дальномера:

1—призма; 2—лампа накачки; 3—передающая оптическая система; 4—призма; 5, 12—приемная оптическая система; 6—индикатор дальности; 7—счетное устройство; 8—триггер; 9—усилитель; 10—ФЭУ; 11—фильтр; 13—диафрагма

импульсов. Отраженный от цели сигнал образует импульс на выходе ФЭУ, сдвинутый по времени относительно опорного. Он также после усиления и формирования подается на триггер 8. Под действием этого импульса триггер перебрасывается в исходное состояние и генерирует стоп-импульс, останавливающий счетное устройство 7. Счетное устройство измеряет время задержки отраженного импульса относительно опорного и выдает в цифровой индикатор 6 значение дальности до цели. Величина дистанции вычисляется по формуле

$$L = \frac{\Delta\tau NC}{n}, \quad (15. 14)$$

где $\Delta\tau$ — ширина импульса генератора счетного устройства;
 N — количество импульсов.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ И УГЛОМЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При визуальном осмотре местности, выявлении целей и наблюдении за ними, определении координат целей и ориентиров используют наблюдательные и угломерные оптические приборы.

Деление этой группы приборов на наблюдательные и угломерные является условным, так как с помощью обоих типов приборов можно наблюдать и измерять угловые величины.

При наблюдении и измерении угловых координат целей необходимо задать в пространстве положение линии, соединяющей глаз наблюдателя с целью (**линии визирования**). Для этого все приборы рассматриваемой группы снабжены телескопическими визирами. Для измерения вертикальных и горизонтальных углов данные приборы имеют специальные угломерные устройства.

Измерение вертикальных углов проводится относительно горизонтальной плоскости. Горизонтальные углы могут отсчитываться от географического или истинного меридиана (направления Север — Юг) по часовой стрелке и, в этом случае носят название **азимута**; от магнитного меридиана (направление магнитной стрелки Север — Юг) по часовой стрелке и носят название **магнитного азимута**, от некоторого направления, принимаемого за основное. Пределы измерения азимутов от 0 до 2π .

Единицей измерения углов в угломерных и прицельных устройствах (за исключением прицельных устройств, используемых для прицеливания баллистических ракет) является тысячная дистанция. В этой системе угловых измерений окружность делится не на 360° , а на 6000 частей. Угол, опирающийся на дугу, равную $1/6000$ части окружности, принят за единицу измерения углов и носит название **тысячной дистанции**. Длина дуги окружности с радиусом R , соответствующая тысячной дистанции, равна $l = \frac{2\pi}{6000} R = \frac{6,28}{6000} R = \frac{1,047}{1000} R \cong \frac{R}{1000}$. В градусной мере одна тысячная (0—01) соответствует $3,6'$. При записи и подаче команд число тысячных разбивают на две группы цифр: в первой указывают сотни тысячных, во второй — десятки и единицы тысячных. Запись углов в тысячных выглядит так: 10—27, 59—14, что соответствует 1027 тысячным и 5914 тысячным дистанции. Произносится запись: десять — двадцать семь, пятьдесят девять — четырнадцать.

В соответствии с указанным обозначением углов в отдельных угломерных приборах имеется две отсчетных шкалы: на одной наносится 60 делений, соответствующие сотням тысячных (две первые цифры угла), на второй — 100 делений, соответствующие десяткам и единицам тысячных (две последние цифры угла).

С помощью данной системы измерения углов можно опреде-

лять расстояние до цели. Если через прибор осуществляется наблюдение за целью, размер которой известен и равен B , то для определения расстояния до цели необходимо знать угловую величину цели в тысячных дистанции. Для этого наводят перекрестие сетки прибора на края цели и берут разность отсчетов по шкалам или определяют угловые размеры цели по угломерной сетке прибора. Угломерная сетка имеет обычно деления через 0—05 или 0—10 (рис. 16.1). Если угловой размер цели равен n тысячным дистанции, то расстояние до цели определяется

$$L = \frac{B}{n} 1000. \quad (16.1)$$

Истинные линейные размеры целей должны быть известны. К группе наблюдательных и угломерных приборов относятся бинокли, стереотрубы, буссоли, перископы, панорамные визиры.

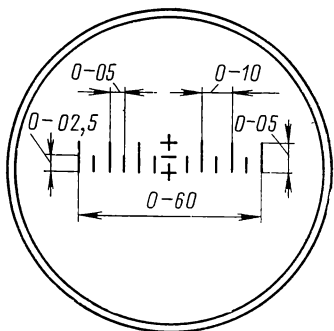


Рис. 16.1. Угломерная сетка

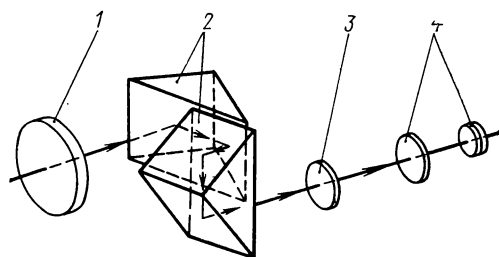


Рис. 16.2. Оптическая схема бинокля:

1—объектив; 2—призменная оборачивающая система; 3—сетка; 4—окуляр

Бинокли

Бинокль — бинокулярный наблюдательный оптический прибор, предназначенный для наблюдения за различными объектами, для измерения углов и корректирования стрельбы.

Бинокулярные приборы обладают **пластичностью**, т. е. способностью повышать радиус стереоскопического (объемного) зрения. Невооруженными глазами человек видит местность стереоскопически на расстоянии до 1340 м. Эта величина получается, если среднюю базу глаз (65 мм) разделить на угол, равный пороговой чувствительности глаза к стереоэффекту ($10''$). Если величину базы увеличить, то можно наблюдать местность стереоскопически на больших расстояниях.

Пластичностью называется отношение расстояния между центрами входных зрачков прибора к расстоянию между центрами выходных зрачков, умноженное на угловое увеличение Γ .

Оптическая система бинокля состоит из двух одинаковых телескопических трубок, отличающихся лишь тем, что в правой трубке в фокальной плоскости объектива и окуляра расположена

угломерная сетка. Оптическая схема правой трубки приведена на рис. 16. 2. Она состоит из объектива 1, системы из двух прямоугольных призм Порро 2, сетки 3 и окуляра Кельнера или Эрфле 4. Призмная система служит для оборачивания изображения и уменьшения габаритов прибора.

С помощью угломерной сетки (рис. 16. 1) можно измерять углы. Сетка имеет в горизонтальной плоскости 12 делений через 0—05 и 3 деления через 0—01 в вертикальной плоскости. Интервал деления на сетке в линейной мере можно определить, пользуясь формулой прикладной оптики

$$\alpha_c = f'_{сб} \operatorname{tg} \alpha, \quad (16. 2)$$

где α — цена деления в тысячных.

Конструктивно обе трубки (монокуляры) соединены шарниром, позволяющим изменять расстояние между осями окуляров в пределах от 56 до 72 мм. Каждый монокуляр имеет диоптринную наводку ± 5 дптр.

Артиллерийская стереотруба

Артиллерийская стереотруба (АСТ) является наблюдательным и угломерным

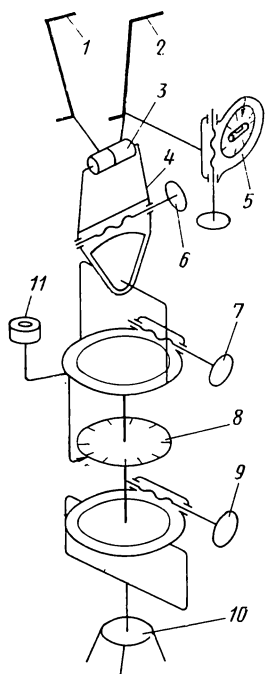


Рис. 16. 3. Кинематическая схема АСТ:

1, 2—телескопические трубы; 3—шарнир; 4—держатель; 5—механизм бокового уровня; 6—механизм вертикального качания; 7, 9—червячные механизмы лимба; 8—лимб; 10—тренога; 11—шаровый уровень

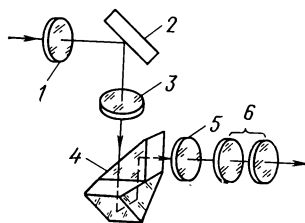


Рис. 16. 4. Оптическая схема АСТ:

1—защитное стекло; 2—зеркало; 3—объектив; 4—призмы оборачивающей системы; 5—сетка; 6—окуляр

прибором и применяется как для выполнения основных углоизмерительных работ, так и для наблюдения и разведки поля боя.

АСТ (рис. 16. 3) имеет две телескопические трубы 1 и 2, соединенные шарниром 3, держатель 4 с механизмом вертикального качания 6, лимб 8 для измерения горизонтальных углов и механизм бокового уровня 5. Горизонтальные углы измеряются в пределах 60—00, вертикальные в пределах ± 3 —00.

Горизонтальные углы измеряются с помощью лимба. Механизм лимба состоит из двух червячных механизмов 7 и 9, червячные шестерни которых нарезаны на одной детали. Нижний червяк 9 служит лишь для точной наводки стереотрубы без изменения установки лимба. Верхний червяк 7, обкатываясь вокруг заторможенного червячного колеса, перемещает индекс относительно лимба 8 и производит отсчет. Точность измерения по индексу 1—00, по барабану 7—0—01. Вертикальные углы измеряются механизмом бокового уровня 5.

Для измерения вертикальных углов АСТ горизонтируется по шаровому уровню 11. Маховиком вертикальной наводки 6 стереотруба наводится на цель, маховичком механизма бокового уровня 5 пузырек устанавливается на середину и с червячного колеса механизма бокового уровня снимается отсчет с точностью до 1—00, а с барабана червяка отсчет с точностью до 0—01. Устанавливается АСТ на треноге 10.

Оптическая система (рис. 16.4) каждой из труб состоит из защитного стекла 1, зеркала 2, объектива 3, двух призм 4, сетки 5 (устанавливается в правом монокуляре), окуляра 6. На одну из труб может надеваться афокальная насадка.

Артиллерийская панорама

Артиллерийская панорама является угломерным прибором для прицелов наземной ствольной и реактивной артиллерии и предназначена для наводки и отметки орудия. Она позволяет измерять горизонтальные углы в пределах 60—00 с точностью 0—01 и вертикальные углы в пределах ± 3 —00 с точностью 0—01. Оптико-кинематическая схема панорамы приведена на рис. 16.5. Оптическая система состоит из защитного стекла 1, призмы-отражателя 2, призмы Дове 8, объектива 9, призмы с крышей 10, сетки с перекрестием 11 и окуляра 12.

При измерении горизонтальных углов головная призма 2 поворачивается вокруг вертикальной оси с помощью рукоятки угломера 6, червячного колеса 5 и стакана 4. Для компенсации возникающего в этом случае наклона изображения служит призма Дове 8. Для компенсации наклона изображения призма Дове поворачивается вместе с головной призмой, но угол ее поворота должен быть в два раза меньше угла поворота головной призмы. Это осуществляется с помощью дифференциала 7, 13, 14, 15, 16.

Качание призмы 2 с помощью червяка 3 обеспечивает визирующее и измерение углов в вертикальной плоскости.

Перископическая артиллерийская буссоль

Перископическая артиллерийская буссоль (ПАБ) предназначена для измерения магнитных азимутов, горизонтальных и вертикальных углов на местности и расстояний при помощи специальной рейки. Ошибка определения магнитного азимута лежит в пределах от 0—02 до 0—05.

Буссоль (рис. 16.6) состоит из следующих основных узлов: вертикальной оси с шаровой пятой 8, корпуса буссоли 6, ориентир-буссоли 10, шарового уровня 3, горизонтального угломерного узла 4, 5, 11, монокуляра 1, на который может надеваться перископическая насадка, механизма вертикальных углов 2.

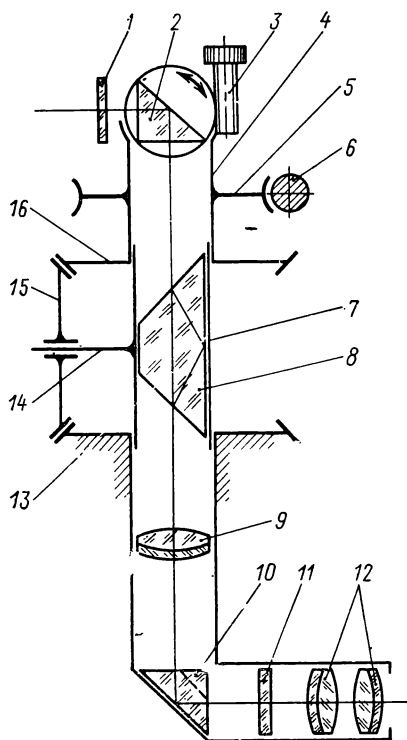


Рис. 16.5. Оптико-кинематическая схема панорамы:

1—защитное стекло; 2—головная призма; 3—червяк; 4—стакан; 5—червячное колесо; 6—рукоятка угломера; 7—водило дифференциала; 8—призма Дове; 9—объектив; 10—призма; 11—сетка; 12—окуляр; 13, 14, 15, 16—дифференциал

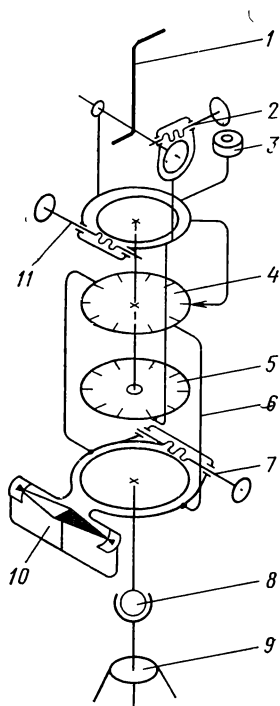


Рис. 16.6. Кинематическая схема ПАБ:

1—монокуляр; 2—механизм измерения вертикальных углов; 3—шаровой уровень; 4—буссольная шкала; 5—угломерная шкала; 6—корпус буссоли; 7—наводящий винт; 8—шаровая пята; 9—тренога; 10—ориентир-буссоль; 11—механизм измерения горизонтальных углов

При ориентировании прибора по ориентир-буссоли корпус 6 с помощью наводящего винта 7 разворачивается вокруг вертикальной оси. При наведении в горизонтальной плоскости визира буссоли на цель с помощью маховичка 11 верхняя часть корпуса разворачивается относительно буссольной шкалы 4 и угломерной шкалы 5. Угломерная шкала с черными делениями может быть развернута относительно корпуса буссоли, буссольная шка-

ла с красными штрихами неподвижна. Пределы измерения горизонтальных углов от 0 до 60—00 с точностью 0—01.

Измерение горизонтальных углов от магнитного меридиана производится по буссольному кольцу, а от какого-либо другого направления — по угломерному кольцу, если последнее будет выставлено в нужном направлении линией 30—00—0.

В вертикальной плоскости монокуляр буссоли поворачивается на углы $\pm 3—00$. (точность измерения 0—01) рукояткой 2 механизма измерения вертикальных углов. Оптическая система ПАБ аналогична схеме рис. 16. 2.

Глава 17

ОПТИЧЕСКИЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

17.1. НАЗНАЧЕНИЕ ДАЛЬНОМЕРОВ И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

При решении различных технических задач очень часто необходимо знать расстояние до отдельных объектов на местности. Измерение расстояний осуществляется с помощью приборов, называемых оптическими дальномерами.

Измерение расстояния с помощью оптических дальномеров осуществляется либо определением стороны измерительного треугольника по другим его элементам, один из которых остается постоянным, либо определением времени прохождения оптического излучения (света) от излучателя до объекта и обратно.

Рассмотрим треугольник $АЦВ$ (рис. 17. 1). Если известна сторона $АВ=Б$, противолежащий угол ϵ и один из прилежащих углов γ , то сторона $АЦ=L$ определяется по теореме синусов:

$$\frac{L}{\sin \gamma} = \frac{Б}{\sin \epsilon},$$

$$\text{откуда} \quad L = \frac{Б \sin \gamma}{\sin \epsilon}, \quad (17. 1)$$

где L — дистанция (дальность до цели);
 ϵ — параллактический угол;
 $Б$ — база.

Если треугольник $АЦВ$ прямоугольный, то $\sin \gamma = 1$ и тогда

$$L = \frac{Б}{\sin \epsilon}.$$

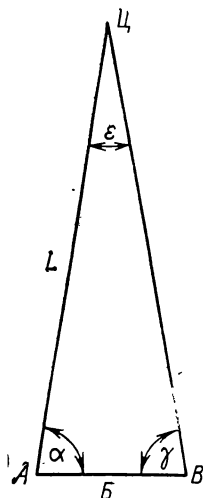


Рис. 17. 1. Измерительный треугольник

При малых углах ε можно положить $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$, тогда

$$L = \frac{B}{\varepsilon}. \quad (17.2)$$

Таким образом, для определения дистанции L по формуле (17.2) необходимо знать базу B и измерить параллактический угол ε . В качестве базы может служить известный размер предмета (его длина или высота), либо расстояние между входными окнами дальномера или расстояние между пунктами наблюдения цели.

Дальномеры, использующие в качестве базы расстояние между входными окнами, называются **оптическими внутрибазными дальномерами**. Дальность определяется зависимостью (17.2).

Дальномеры, использующие в качестве базы размер предмета (цели), называются **оптическими дальномерами с базой на цели** (оптические внешнебазовые дальномеры). Определение дистанции с помощью внешнебазового дальномера сводится к определению величины изображения цели в фокальной плоскости объектива визирного устройства при известной величине базы (размера цели). Дальность до цели определяется как

$$L = \frac{B f'_{об}}{l'} \cos q, \quad (17.3)$$

где B — размер цели (база);

$f'_{об}$ — фокусное расстояние объектива оптического визирного устройства;

l' — размер изображения цели в фокальной плоскости объектива;

q — угол между базой цели и ее проекцией на плоскость, перпендикулярную оптической оси.

Дальномеры, использующие в качестве базы расстояние между пунктами наблюдения, называются **дальномерами с базой на местности**. Дистанция до цели определяется формулой (17.1).

Дальномеры, в которых измерение расстояний осуществляется определением времени прохождения оптического излучения до цели и обратно, называются оптиколокационными или светодальномерами.

Дистанция до цели в этом случае определяется по формуле

$$L = \frac{C}{2n} t, \quad (17.4)$$

где C — скорость распространения оптического излучения (скорость света) в вакууме ($C = 3 \cdot 10^8$ м/с);

n — показатель преломления среды, в которой распространяется оптическое излучение;

t — время прохождения излучением удвоенного расстояния L .

17.2. ОПТИЧЕСКИЕ ВНУТРИБАЗНЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ

Теоретическая точность измерения

Оптический внутрибазный дальномер осуществляет измерение дистанции определением параллактического угла цели ε с некоторой погрешностью $\Delta\varepsilon$. При этом измеренная дальность будет иметь погрешность ΔL . Если прологарифмировать, а затем продифференцировать формулу (17.2) и заменить дифференциалы конечными приращениями, то получим

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta B}{B} - \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}. \quad (17.5)$$

При изготовлении дальномера величина $\Delta B/B$ может быть настолько мала, что ею пренебрегают. Тогда абсолютное значение погрешности измерений дистанции до цели зависит лишь от ошибки измерения параллактического угла и равно

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}. \quad (17.6)$$

Подставляя формулу (17.2) в (17.6), для величины ΔL получим

$$\Delta L = \frac{L^2 \Delta\varepsilon}{B}. \quad (17.7)$$

Точность измерения параллактического угла $\Delta\varepsilon$ ограничивается разрешающей способностью глаза наблюдателя. Применительно к дальномерам под **разрешающей способностью глаза** понимают минимальное измерение параллактического угла ε , вызываемого изменением дистанции, которое может быть обнаружено глазом.

Если разрешающую способность невооруженного глаза обозначить ψ , то при увеличении дальномера Γ минимальное изменение параллактического угла, обнаруживаемое дальномером, будет

$$\Delta\varepsilon = \frac{\psi}{\Gamma}.$$

Величина $\Delta\varepsilon$ называется **угловой теоретической погрешностью** дальномера.

Разрешающая способность глаза зависит от способа измерения, если измерение состоит в приведении частей изображения разделенных линией раздела на одну прямую линию, то $\psi \approx 10''$. При стереоскопическом способе совмещения изображений в одну кажущуюся плоскость величина ψ также равна $10''$. Подстав-

для значения $\Delta \varepsilon$ в формулу (17.7) для погрешности в измерении дистанции ΔL и учитывая, что $\psi = 10''$, получим

$$\Delta L = \frac{L^2 10''}{GB206265''}. \quad (17.8)$$

Величина ΔL в формуле (17.8) называется **линейной теоретической погрешностью** дальномера.

Основные принципы устройства и работы дальномеров

Оптические внутрибазные дальномеры бывают двух типов: монокулярные и стереоскопические.

Принципиальная схема монокулярного дальномера приведена на рис. 17.2. На концах базы дальномера Б, в точках А и В, расположены концевые отражатели 1 и 6, которые направляют

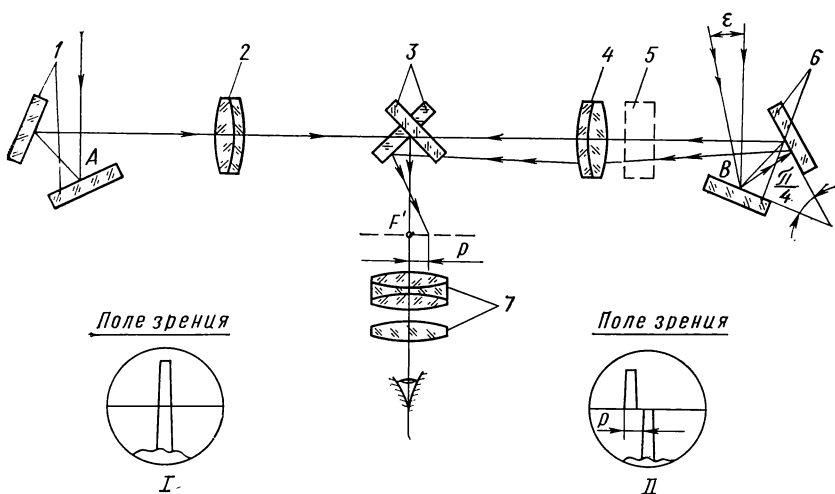


Рис. 17.2. Схема монокулярного дальномера:

1, 6—концевые отражатели; 2, 4—объективы; 3—зеркало; 5—компенсатор; 7—окуляр

лучи, идущие от цели, в объективы 2 и 4. В качестве концевых отражателей часто используются пентапризмы или угловые зеркала, состоящие из двух плоских зеркал, образующих двухгранный угол в $\pi/4$.

В середине базы дальномера находится центральная призма, которая объединяет лучи обеих ветвей дальномера в одно поле зрения и осуществляет оборачивание изображения. На рис. 17.2 для простоты показаны два зеркала 3, расположенные одно над другим. Объективы 2 и 4 имеют равные по величине и знаку фокусные расстояния и расположены так, что их главные фокусы совпадают друг с другом и точкой F' , а также с передним фокусом окуляра 7.

При наблюдении за целью, расположенной в бесконечности, пучки лучей, поступающие в левый и правый объективы, параллельны друг другу, т. е. параллактический угол ε равен нулю, и части изображения цели в верхней и нижней половине поля зрения совпадают (рис. 17.2, I). Если цель находится на некотором конечном расстоянии L , то части изображения в верхней и нижней половинах поля зрения сместятся друг относительно друга на величину линейного параллакса p (рис. 17.2, II). При малых углах ε величина линейного параллакса равна $p = f'_{об}\varepsilon$, откуда с учетом (17.2) получим

$$p = \frac{B f'_{об}}{L}. \quad (17.9)$$

Таким образом, измерение дальности сводится к измерению линейного параллакса, что можно сделать совмещением верхней и нижней частей изображения цели с помощью оптического компенсатора 5 (см. рис. 17.2).

Измерение дальности в стереоскопических дальномерах базируется на явлениях **стереоэффекта**, который возникает в результате наблюдения предметов двумя глазами.

Принципиальная схема стереоскопического дальномера показана на рис. 17.3. Стереодальномер представляет собой бинокулярный прибор, состоящий из двух телескопических систем, входные окна которых находятся на расстоянии B . Концевые отражатели 1 и 7 направляют лучи от цели в объективы 2 и 5. Пройдя центральные призмы 3 и 4 и ромбические призмы 8 и 13, пучки лучей дают два изображения в фокальных плоскостях окуляров 10 и 11. В этих плоскостях находятся пластинки с марками 9 и 12. Марки обычно имеют вид ромбов и располагаются на оптических осях телескопических систем, поэтому пучки лучей от марок выходят из окуляров параллельно друг другу и наблюдателю кажется, что он видит одну марку, расположенную в бесконечности. Если цель находится в бесконечности, то наблюдатель видит ее совмещенной по глубине с измерительной маркой, т. е. $p=0$.

При наблюдении цели, расположенной на конечном расстоянии, линейный параллакс изображения цели $p=c_1-c_2$ не равен нулю, а цель и марка кажутся расположенными на различной глубине. Измерение дальности ведется совмещением по глубине изображений цели и центральной марки с помощью оптического компенсатора 6.

Некоторые дальномеры с базой до 1 м имеют в поле зрения забор «неподвижных марок» (рис. 17.4), положение которых в поле зрения рассчитано так, что они видны под разными параллактическими углами, соответствующими определенным значениям дальности. При измерении дальности до цели в поле зрения

определяют ту марку, которая кажется наблюдателю расположенной на одной глубине с целью. Число над этой маркой показывает значение дальности.

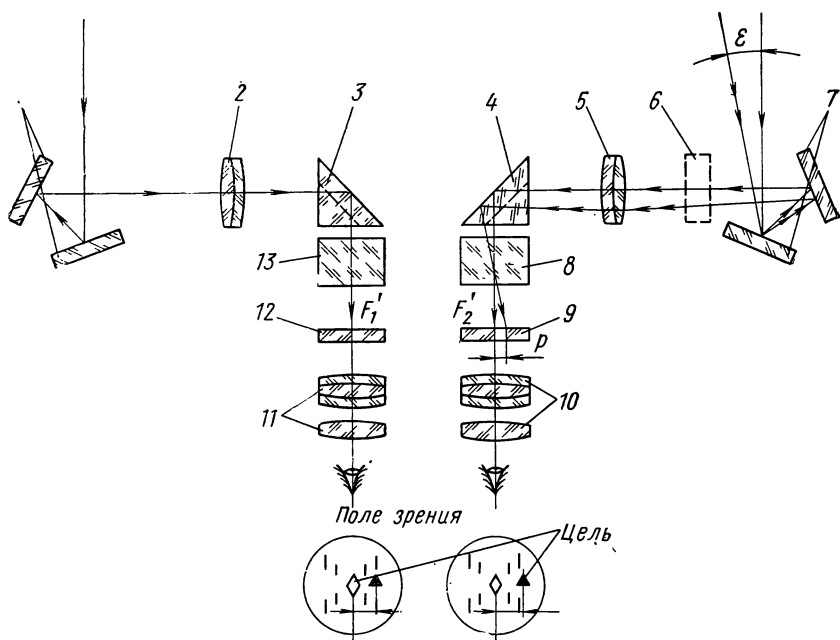


Рис. 17.3. Схема стереоскопического дальномера:

1, 7—концевые отражатели; 2, 5—объективы; 3, 4—центральные призмы; 6—компенсатор; 8, 13—ромбические призмы; 9, 12—пластинка с марками; 10, 11—окуляры

Расстройства дальномеров по дальности и высоте

Точность измерения дальности зависит от точности измерения параллактического угла. Лучи, идущие от цели в левую и правую ветви дальномера и образующие параллактический угол, испытывают в дальномере ряд сложных отражений и преломлений, вследствие чего величина параллактического угла может меняться. Кроме того, в процессе эксплуатации из-за ударов, тряски, неравномерного солнечного нагрева и так далее возможны небольшие перекосы и перемещения оптических деталей, что приводит к изменению параллактического угла и к погрешностям измерения дальности.

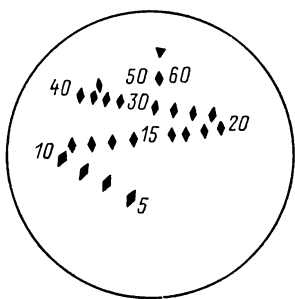


Рис. 17.4. Стереоскопические марки

В дальномерах различают два вида погрешностей: **расстройство по высоте** и **расстройство по дальности**.

Расстройство монокулярного дальномера по высоте заключается в том, что одна из половин изображения объекта смещается относительно другой в вертикальной плоскости.

Расстройство стереоскопического дальномера по высоте состоит в том, что изображения цели в правом и левом окулярах находятся на неодинаковой высоте по отношению к измерительным маркам. Расстройство монокулярного дальномера по дальности выражается в том, что результат измерения дальности отличается от действительного расстояния до цели, т. е. при установке дистанции до цели по шкале дальности половинки изображения цели не совмещаются друг с другом (рис. 18.2, II). Расстройство стереоскопического дальномера по дальности состоит в том, что при установке на шкале известной дальности до цели измерительная марка и цель не совпадают по глубине.

Для уменьшения влияния внешних воздействий на точность измерения дальности разработаны схемы малорасстраивающихся стереоскопических дальномеров. Чтобы сделать дальномер малорасстраивающимся по дальности, необходимо вынести устройство, дающее изображение марок за пределы основной оптической системы дальномера таким образом, чтобы объединение лучей, идущих от цели и марок, происходило вблизи входных окон дальномера. При такой схеме оптические детали оказывают одинаковое влияние как на лучи от цели, так и на лучи от марок и расстройств по дальности не происходит.

Принципиальная схема малорасстраивающегося дальномера с биаксиальным коллиматором приведена на рис. 17.5.

Биаксиальный коллиматор состоит из двух объективов 2 и 8 с равными фокусными расстояниями ($f'_{к1} = f'_{к2}$). В центре каждого из объективов нанесены измерительные марки m_1 и m_2 , причем марка m_1 находится в фокальной плоскости объектива 8, а марка m_2 — в фокальной плоскости объектива 2. Поле марок подсвечивается источником света 5 через конденсоры 4 и 6 и прямоугольные призмы 3 и 7. Так как измерительные марки расположены в фокальных плоскостях объективов биаксиального коллиматора, то лучи от марок будут выходить из объективов 2 и 8 параллельными пучками. Отражаясь от концевых отражателей 1 и 10, 11 и 20, лучи от марок будут поступать в основные объективы 12 и 19 и далее, пройдя прямоугольные призмы 13 и 18 и ромбические призмы 14 и 17, дадут изображения марок в фокальных плоскостях объективов 12 и 19. Лучи от цели поступают в концевые отражатели 1 и 10 далее в концевые отражатели 11 и 20, которые направляют их в основные объективы 12 и 19. Лучи от цели фокусируются объективами и дают изображения цели в фокальных плоскостях. Таким образом, в фокальных плоскостях объективов 12 и 19 образуются изображения марок и цели. Если цель находится в ∞ , то пучки лучей в левый и правый концевые отражатели приходят параллельно друг дру-

гу и линейный параллакс $p = c_1 - c_2$ (см. рис. 17.3) равен нулю. В этом случае марка и цель кажутся наблюдателю, рассматривающему картину через окуляры 15 и 16, расположенными на

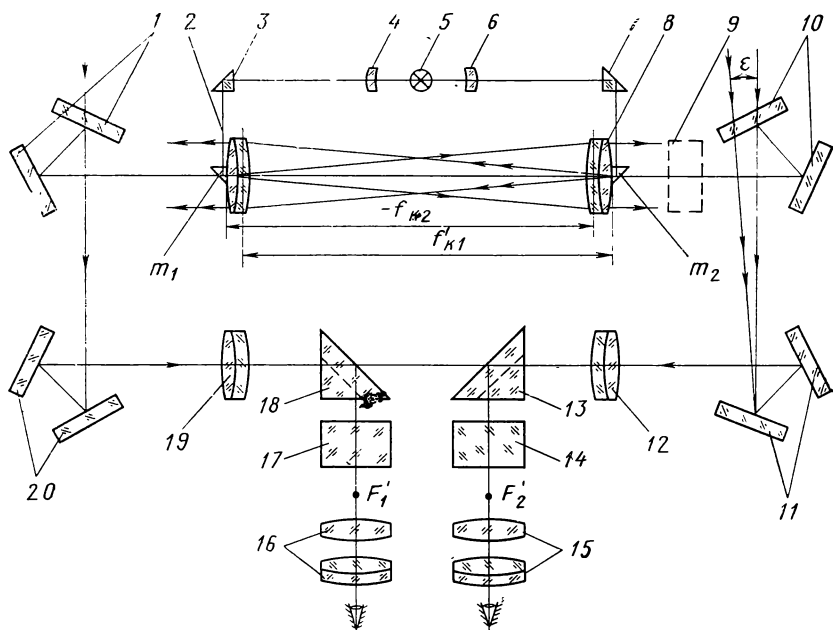


Рис. 17.5. Схема малорасстраивающегося стереоскопического дальномера:

1, 10, 11, 20—концевые отражатели; 2, 8—объективы биаксимального коллиматора; 3, 4, 6, 7—призмы; 5—источник излучения; 9—компенсатор; 12, 19—основные объективы; 13, 18—прямоугольные призмы; 14, 17—ромбические призмы; 15, 16—окуляры

одной глубине. Если цель находится на расстоянии L , то возникает параллактический угол цели ϵ , что приводит к появлению линейного параллакса $p = c_1 - c_2 \neq 0$ и наблюдатель будет видеть цель и марку, расположенные на разной глубине.

17.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ВНУТРИБАЗНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ

Как указывалось выше, для измерения дистанции достаточно измерить параллактический угол ϵ или линейный параллакс p , связанные между собой равенством $p = f'_{\text{об}} \epsilon$. Для измерения линейных параллаксов используют оптические микрометры, часто называемые оптическими компенсаторами. Компенсатор вызывает весьма малые перемещения изображения, измеряемые единицами и долями микрометра, при относительно больших перемещениях или поворотах измерительного механизма. Кроме того, в измерительные устройства могут входить дистанционная шкала

и привод, передающий движение на компенсатор и дистанционную шкалу.

В оптических внутрибазных дальномерах в качестве измерительных компенсаторов могут использоваться: одноклиновые, двухклиновые и линзовые компенсаторы.

Вращающийся двухклиновый компенсатор

Двухклиновый компенсатор состоит из двух одинаковых оптических клиньев, поворачивающихся от некоторого среднего положения на равные углы, но в противоположные стороны. Он устанавливается перед объективом в параллельном пучке лучей. Рассмотрим три частных случая взаимного расположения клинь-

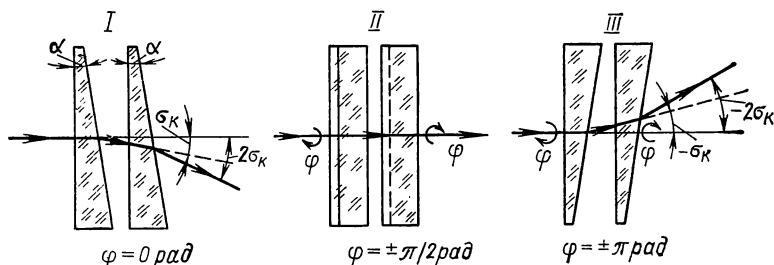


Рис. 17.6. Вращающийся двухклиновой компенсатор

ев (рис. 17.6). В позиции I угол ϵ отклонения лучей компенсатором равен сумме углов отклонения клиньев, т. е. $\epsilon = 2\sigma_k$, где σ_k — угол отклонения лучей отдельным клином. В позиции II $\epsilon = 0$, клинья повернуты в противоположные стороны на угол $\varphi = \pi/2$. В этом случае компенсатор эквивалентен плоскопараллельной пластинке. В позиции III, когда клинья повернуты относительно позиции I на π в противоположные стороны, угол $\epsilon = -2\sigma_k$. Определим закон перемещения изображения в фокальной плоскости объектива в зависимости от угла разворота клиньев I (рис. 17.7). Пусть изображение бесконечно удаленной точки при отсутствии клиньев совпадает с точкой F' , причем ось z лежит в плоскости измерительного треугольника. За начальное положение клиньев, установленных перед объективом 2, примем позицию II (рис. 17.6). В этом случае изображение точечного источника, лежащего на оптической оси, будет в точке F' . При повороте первого клина на угол φ , а второго на угол $-\varphi$, изображение точки займет положение A. Так как углы клиньев одинаковы, то координата точки A определяется как

$$z = 2r \cos \varphi = 2\sigma_k f'_{o6} \cos \varphi, \quad (17.10)$$

$$y = 0.$$

Отсюда величина угла отклонения лучей, даваемая компенсатором, равна

$$\varepsilon = 2\sigma_k \cos \varphi. \quad (17.11)$$

Из зависимости (17.11) видно, что диапазон компенсации параллактических углов составляет $\pm 2\sigma_k$. Так как параллактический угол всегда одного знака, то для того чтобы использовать весь рабочий диапазон угла отклонения компенсатора, необходимо начало отсчета параллактических углов сместить в сторону отрицательных значений углов ε . Обычно диапазон углов поворота клиньев ограничивается величинами φ_0 и φ_∞ , которые соответствуют предельным значениям дистанции.

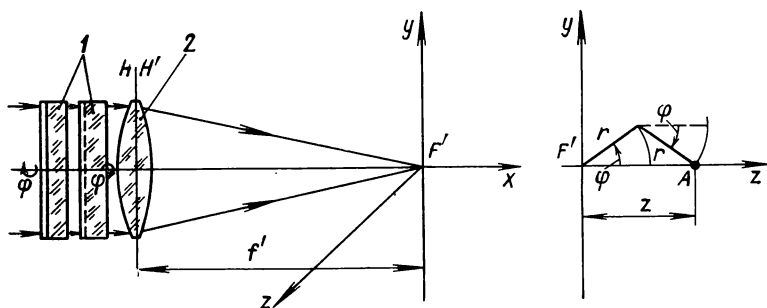


Рис. 17.7. Перемещение изображения от поворота двухклинового компенсатора

1—клиновой компенсатор; 2—объектив

Вследствие смещения начала отсчета параллактических углов при $L=\infty$ и $\varepsilon=0$ клинья не образуют плоскопараллельной пластинки и изображение цели не находится в точке F' . Для того чтобы привести изображение в эту точку, передвигают центральный призмный мостик, изменяют углы концевых отражателей и т. д. Это равносильно введению фиктивного клина с углом отклонения σ_0 . В результате при $L=\infty$ и $\varepsilon=0$ получим

$$\varepsilon_\infty = \frac{B}{L_\infty} = 2\sigma_k \cos \varphi_\infty + \sigma_0 = 0. \quad (17.12)$$

Величина φ_∞ определяется конструктивными особенностями дальномера и соответствует L_∞ .

Если φ_∞ выбрано, то

$$\sigma_0 = -2\sigma_k \cos \varphi_\infty. \quad (17.13)$$

Для начальной дистанции L_0 имеем

$$\varepsilon_0 = \frac{B}{L_0} = 2\sigma_k \cos \varphi_0 + \sigma_0, \quad (17.14)$$

где σ_0 имеет то же значение, что и в формуле (17.12).

Величины базы и начальной дистанции L_0 задаются тактико-техническими требованиями на дальномер, величина φ_0 выбирается из конструктивных соображений, но должна быть меньше π .

Исключая из равенств (17.12) и (17.14) величину σ_0 , находим угол отклонения лучей, даваемый отдельным клином

$$\sigma_k = \frac{B}{2L_0(\cos \varphi_0 - \cos \varphi_\infty)}. \quad (17.15)$$

Отсюда преломляющий угол клина определяют как

$$\alpha = \frac{B}{2L_0^2(n-1)(\cos \varphi_0 - \cos \varphi_\infty)}. \quad (17.16)$$

где n — показатель преломления материала клина.

Для промежуточной дистанции получим

$$\varepsilon = \frac{B}{L} = 2\sigma_k \cos \varphi + \sigma_0. \quad (17.17)$$

Подставляя в уравнение (17.17) зависимости (17.13) и (17.15), для $\cos \varphi$, получим

$$\cos \varphi = \cos \varphi_\infty + \frac{L_0}{L} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_\infty). \quad (17.18)$$

Выражение (17.18) служит для расчета шкалы дальномера. Величину $\varphi_0 - \varphi_\infty$ выбирают обычно в пределах $\frac{2}{3}\pi$, так как при углах, близких к 0 и π , компенсация параллактических углов осуществляется очень медленно.

Линзовый компенсатор

Линзовый компенсатор представляет собой афокальную систему и состоит из двух длиннофокусных линз 1 и 2, имеющих равные по абсолютной величине, но противоположные по знаку фокусные расстояния $f'_{11} = -f'_{22}$ (рис. 17.8). Компенсатор устанавливается перед объективом 3 и работает в параллельном пучке лучей.

Если оптические оси линз совпадают, то пучок лучей, параллельных оптической оси, проходя через компенсатор, своего направления не меняет (рис. 17.8, а). При поперечном смещении одной из линз на расстояние l , пучок лучей отклоняется от нулевого положения на угол ε (рис. 17.8, б). Так как $f'_L \gg l$ и углы ε малы, то $l = f'_L \varepsilon$ (см. рис. 17.8, б).

При достаточно большом фокусном расстоянии f'_L (f'_L составляет несколько метров) для точных измерений угла ε величина перемещений линзы l может быть сравнительно большой.

Чтобы при компенсации параллактических углов использовать весь диапазон перемещения линзы, необходимо, как при

использовании двухклинового компенсатора ввести начальное отклонение лучей σ_0 .

Так как шкала дистанций дальномера ограничена пределами $L_0 < L < L_\infty$, то предельным значениям дистанции соответствуют два положения линзы 1 l_0 и l_∞ .

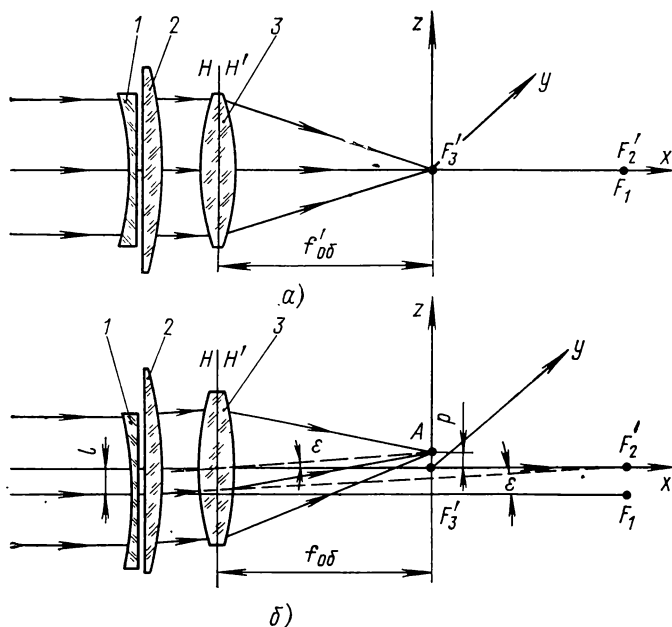


Рис. 17.8. Линзовый компенсатор:

a —при параллактическом угле $\varepsilon=0$; b —при параллактическом угле $\varepsilon \neq 0$;
1—отрицательная линза; 2—положительная линза; 3—объектив

При $L_\infty = \infty$ и $\varepsilon = 0$ имеем

$$\varepsilon_\infty = \frac{B}{L_\infty} = \frac{l_\infty}{f'_\lambda} + \sigma_0. \quad (17.19)$$

Величина l_∞ выбирается из конструктивных соображений. Если l_∞ выбрано, то

$$\sigma_0 = -\frac{l_\infty}{f'_\lambda}. \quad (17.20)$$

Для наименьшей дистанции L_0 получим

$$\varepsilon_0 = \frac{B}{L_0} = \frac{l_0}{f'_\lambda} + \sigma_0. \quad (17.21)$$

Для промежуточной дистанции имеем

$$\epsilon = \frac{B}{L} = \frac{l}{f'_n} + \sigma_0. \quad (17.22)$$

Исключая из уравнений (17.19) и (17.21) величину σ_0 , получим величину фокусного расстояния линзы компенсатора

$$f'_n = f'_{n2} = -f'_{n1} = \frac{l_0 - l_\infty}{B} L_0. \quad (17.23)$$

Подставляя в уравнение (17.22) зависимости (17.23) и (17.20), и проведя несложные преобразования, получим

$$l = l_\infty + \frac{L_0}{L} (l_0 - l_\infty). \quad (17.24)$$

Выражение (17.24) служит для расчета дистанционной шкалы дальномера.

Краткое описание стереоскопического малорасстраивающегося дальномера

Примером малорасстраивающейся схемы дальномера является схема малобазного дальномера с неподвижными измеритель-

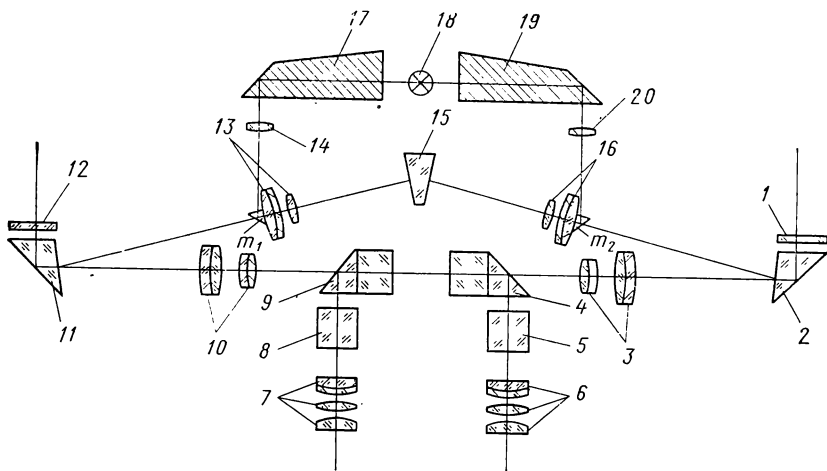


Рис. 17. 9. Оптическая схема:

1, 12—защитные клинья; 2, 11—концевые призмы; 3, 10—основные объективы; 4, 9—призмные мостики; 5, 8—ромбические призмы; 6, 7—окуляры; 13, 16—объективы биаксиального коллиматора; 14, 17, 18, 19, 20—система подсветки марок; 15—зеркало

ными марками. Оптическая схема приведена на рис. 17.9 и состоит из биаксиального коллиматора, на объективах которого нанесены неподвижные измерительные марки (см. рис. 17.4), бинокулярной зрительной трубы, дающей в фокальной плоскости окуляров изображение марок и цели, и осветительной системы.

Лучи от цели через защитные клинья *1* и *12* попадают на концевые призмы *2* и *11*. Эти призмы отклоняют лучи в телескоп под углом $\pi/2$. Одновременно от граней концевых призм, расположенных поперек продольной оси дальномера, отражаются лучи, идущие от измерительных марок m_1 и m_2 и падающие на указанные грани под некоторым углом из биаксиального коллиматора. После этого лучи, идущие от цели и от измерительных марок, совместно проходят через объективы телескопа *3* и *10*, центральные призмы *4* и *9*, ромбические призмы *5* и *8*, и выходят из окуляров *6* и *7*. Наблюдатель в поле зрения видит одновременно изображение цели и измерительных марок. Замечая марку шкалы, с которой цель представляется лежащей в одной плоскости, наблюдатель определяет дистанцию.

В биаксиальном коллиматоре лучи от измерительных марок, освещаемые дневным светом или с помощью осветителя *18*, *17*, *14*, *19*, *20*, падают на призмы, наклеенные на линзы объективов *13* и *16*. Эти призмы направляют лучи на среднее зеркало *15*, удаленное от главных плоскостей объективов *13* и *16*, на половину фокусного расстояния. Обе половины зеркала отражают лучи от марок обратно и они выходят из объективов параллельными пучками и падают на отражающие поверхности призм *2* и *11*. Для того чтобы лучи, идущие от марок, падали на призмы под заданными углами и отражались от них по направлению, параллельному лучам, идущим от цели, среднее зеркало биаксиального коллиматора имеет форму клина, угол которого равен углу между визирными осями биаксиального коллиматора. В дальномере расстройство по дальности могут вносить лишь призмы *2* и *11* вследствие изменения угла между преломляющими и отражающими гранями. Чтобы уменьшить это расстройство, их изготавливают из специально отожденного оптического стекла.

ПРИЦЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАЗЕМНЫХ УСТАНОВОК

18.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ПРИЦЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ СРЕЛЬБЫ

При стрельбе из нарезного или реактивного оружия снаряд движется по пространственной криволинейной траектории, форма которой определяется условиями стрельбы, действием сил тяжести и сопротивления воздуха. Поэтому для поражения цели ствол оружия необходимо ориентировать в пространстве определенным образом. Это требование выполняется в процессе наводки орудия, заключающемся в придании стволу такого положения, при котором средняя траектория снаряда проходит через цель. Положение ствола относительно цели однозначно определяется двумя углами наводки, отсчитываемыми от горизонтальной и вертикальной плоскостей. Устройства, с помощью которых обеспечивается измерение и построение указанных углов, называются **прицелами**, а сам процесс их построения — **прицеливанием** (наводкой) оружия.

По назначению прицелы можно разделить на стрелковые, минометные, наземной ствольной и реактивной артиллерии, танковые, устройства для прицеливания баллистических ракет и т. д.

Следует отметить, что прицелы ствольной и реактивной артиллерии используют одни и те же принципы построения, поэтому они объединены в одну группу.

Величины углов наводки определяют с помощью геометрического построения, называемого **прицельной схемой**, в которой учитываются параметры стрельбы, дальность до цели, скорость перемещения цели и оружия, баллистика оружия, влияние среды и другие факторы. Принято рассматривать две прицельные схемы: оружие и цель неподвижны; оружие и цель подвижны.

Прицельная схема стрельбы из неподвижного оружия по неподвижной цели

С точкой стояния орудия O (рис. 18.1) совмещено начало системы координат $Oxyz$. Плоскость горизонта орудия Oxz совмещена с плоскостью истинного горизонта, плоскость стрельбы Oxy вертикальна. Цель C по отношению к горизонту орудия расположена под углом места цели ε (угол ε измеряют от горизонта орудия к линии цели OC). Так как на снаряд действует сила тяжести, которая вызывает понижение траектории его полета, то ствол орудия при выстреле необходимо отклонить вверх от линии OC' на угол прицеливания α .

В результате взаимодействия вращающегося снаряда с набегающим потоком воздуха возникают динамические силы, вызы-

вающие искривление траектории полета снаряда в боковом направлении (деривация снаряда). Поэтому ствол орудия отклоняют от плоскости цели $ОЦЦ''$ на горизонтальный угол прицеливания γ (угол деривации). В плоскости угломера артиллерийской панорамы $ОЦЦ'$ углу γ соответствует боковой угол γ' . Так как угол γ мал, то часто принимают, что $\gamma \approx \gamma'$.

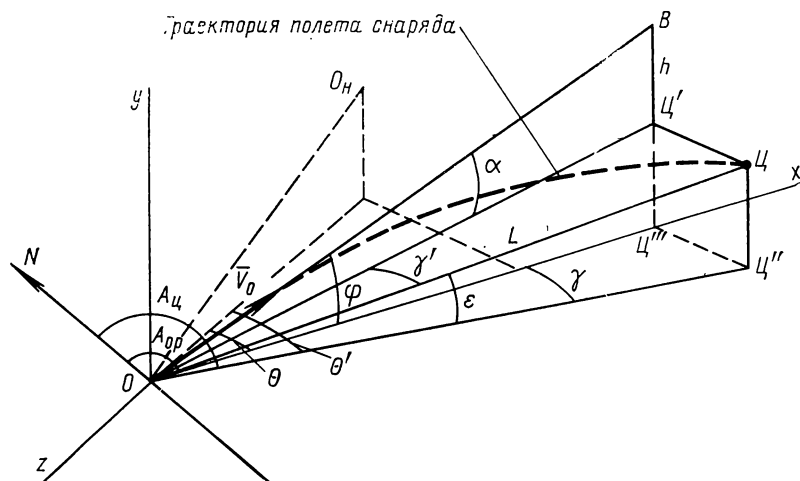


Рис. 18.1. Схема стрельбы из неподвижного орудия по неподвижной цели

С учетом гравитационного понижения траектории снаряда и деривации вертикальный и горизонтальный углы оси канала ствола орудия оказываются соответственно равными:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varepsilon + \alpha; \\ A_{ор} &= A_{ц} - \gamma, \end{aligned} \quad (18.1)$$

где φ — угол возвышения орудия; $A_{ц}$ — азимут цели; $A_{ор}$ — азимут орудия.

Установка орудия по углу возвышения называется **вертикальной наводкой**, а установка в горизонтальной плоскости — **горизонтальной** или **боковой наводкой**. При стрельбе из неуправляемого реактивного орудия, у которого отсутствует вращение снаряда, схема стрельбы аналогична рис. 18.1, но угол деривации γ равен нулю.

Прицельная схема стрельбы из подвижного орудия по движущейся цели

С точкой установки орудия O на подвижном основании (рис. 18.2) совмещено начало координат $O_{хуз}$. Как и в предыдущей схеме плоскость Oxz совмещена с плоскостью истинного горизонта, плоскость стрельбы Oxy вертикальна.

Основание вместе с орудием и системой координат $Oxyz$ перемещается в пространстве с постоянной скоростью $\vec{V}_1$. В этих условиях направление полета снаряда при выстреле определяется вектором $\vec{V}_{01}$ (вектор абсолютной начальной скорости снаряда), который равен геометрической сумме векторов $\vec{V}_1$ и $\vec{V}_0$ ($\vec{V}_{01} = \vec{V}_1 + \vec{V}_0$), где $\vec{V}_0$ — вектор начальной скорости полета сна-

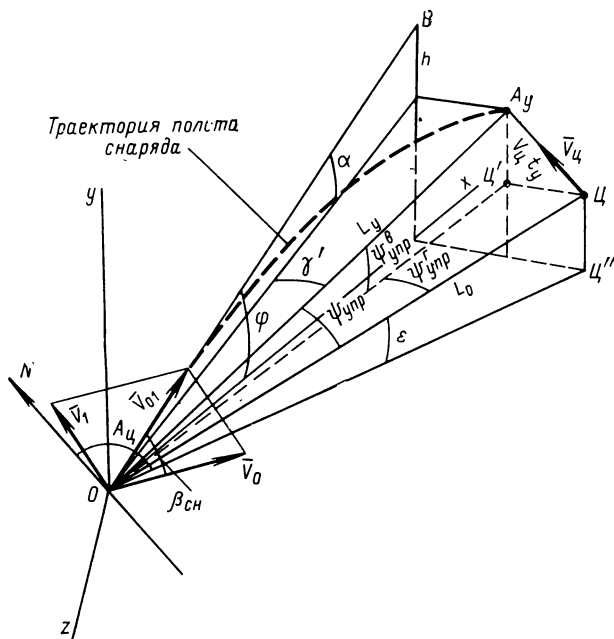


Рис. 18.2. Схема стрельба из подвижного орудия по движущейся цели

ряда. Буквой C обозначено положение цели в момент выстрела. Цель движется с постоянной скоростью $\vec{V}_c$. За время полета снаряда цель сместится из точки C в точку A_y и встреча снаряда с целью произойдет в точке A_y , которая называется упрежденной точкой. Расстояния OC и OA_y называются соответственно **начальной** (L_0) и **упрежденной** (L_y) дальностями. Время полета снаряда от точки O до A_y называется временем полета на упрежденную дальность (t_y). Плоскость OCA_y называется плоскостью упредительного треугольника. Для обеспечения встречи снаряда с целью между линией цели (направлением на цель) и направлением вектора $\vec{V}_{01}$ должен быть некоторый угол $\psi_{упр}$, называемый углом упреждения. Отклонение оси канала ствола орудия должно происходить в сторону движения цели.

С учетом гравитационного понижения снаряда, угла скольжения снаряда $\beta_{\text{сн}}$ и деривации вертикальный и горизонтальный углы оси канала ствола соответственно равны

$$\varphi = \varepsilon + \alpha + \psi_{\text{упр}}^{\text{в}} + \beta_{\text{сн}}^{\text{в}},$$

$$A_{\text{ор}} = A_{\text{ц}} - \gamma - \psi_{\text{упр}}^{\text{г}} + \beta_{\text{сн}}^{\text{г}}, \quad (18.2)$$

где $\psi_{\text{упр}}^{\text{в}}$, $\psi_{\text{упр}}^{\text{г}}$ — вертикальная и горизонтальная составляющие угла упреждения;

$\beta_{\text{сн}}^{\text{в}}$, $\beta_{\text{сн}}^{\text{г}}$ — вертикальная и горизонтальная составляющие угла скольжения снаряда (угол скольжения —

угол между осью канала ствола орудия и направления вектора начальной абсолютной скорости снаряда $\bar{V}_{01}$). При стрельбе на небольшие дальности из артиллерийских систем (до 2—3 км) обычно угол деривации γ мал и им пренебрегают.

Определим зависимость угла упреждения от параметров стрельбы в случае, если угол $\beta_{\text{сн}}$ равен нулю (стрельба вдоль вектора скорости движущегося с орудием основания) и угол γ мал, так что им можно пренебречь. Кроме этого, будем считать, что угол прицеливания

Рис. 18. 3. Упредительный треугольник

мало влияет на характер зависимостей для угла упреждения.

Рассмотрим отдельно упредительный треугольник $OЦA_y$ (рис. 18. 3). Для рассматриваемого случая векторы $\bar{V}_1$ и $\bar{V}_0$ совпадают по направлению. Абсолютная начальная скорость снаряда $\bar{V}_{01}$ равна алгебраической сумме скоростей V_1 и V_0 . По теореме синусов находим

$$\sin \psi_{\text{упр}} = \frac{V_{\text{ц}} t_y}{L_y} \sin q, \quad (18.3)$$

где q — курсовой угол цели (синус курсового угла называется ракурсом цели).

Выразим значение синуса курсового угла через относительную угловую скорость цели, которая определяется разностью поперечных скоростей $V_{\text{ц.п}}$ и $V_{1\text{п}}$, поделенной на начальную дальность

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{цп}} - V_{1\text{п}}}{L_0} = \frac{1}{L_0} (V_{\text{ц}} \sin q - V_1 \sin \psi_{\text{упр}}), \quad (18.4)$$

откуда

$$\sin q = \frac{1}{V_{\text{ц}}} (\omega_{\text{ц}} L_0 + V_1 \sin \psi_{\text{упр}}).$$

Подставляя это выражение в формулу (18.3), получим

$$\sin \psi_{\text{упр}} = \frac{\omega_{\text{ц}} L_0}{\frac{L_y}{t_y} - V_1}. \quad (18.5)$$

Отношение L_y/t_y есть не что иное, как средняя скорость полета снаряда на упрежденную дальность L_y . Однако к моменту выстрела положение упрежденной точки определить нельзя, а следовательно, величины L_y и t_y неизвестны. Поэтому обычно считают, что средняя скорость полета снаряда на упрежденную дальность равна средней скорости полета снаряда на начальную дальность. Это дает возможность заменить в формуле (18.5) отношение L_y/t_y отношением L_0/t_0 , где t_0 — время полета снаряда на дальность L_0 . Отношение $\frac{L_0}{L_0/t_0 - V_1} = t_{\text{ф}}$, имеющее размерность времени, обычно называют **условным** (фиктивным) **временем полета** снаряда, и обозначают $t_{\text{ф}}$. С учетом $t_{\text{ф}}$ получим

$$\sin \psi_{\text{упр}} = \omega_{\text{ц}} t_{\text{ф}}. \quad (18.6)$$

При малых углах упреждения $\sin \psi_{\text{упр}} \approx \psi_{\text{упр}}$ можно получить следующую формулу:

$$\psi_{\text{упр}} = \omega_{\text{ц}} t_{\text{ф}}. \quad (18.7)$$

Величина $\omega_{\text{ц}}$ зависит от дальности до цели L_0 , курсового угла q , а также от величины и направления скорости $V_{\text{ц}}$. Измерение угловой скорости цели осуществляется с помощью непрерывного слежения визирной линией прицела за целью.

Значение фиктивного полетного времени снаряда зависит от величины L_0 и t_0 . В свою очередь, t_0 зависит от L_0 , начальной скорости снаряда V_0 и факторов, определяющих торможение снаряда.

Для вертикальной и горизонтальной наводки орудия угол упреждения вырабатывается в вертикальной $\psi_{\text{упр}}^{\text{в}}$ и горизонтальной $\psi_{\text{упр}}^{\text{г}}$ плоскостях.

При стрельбе из неподвижного орудия по движущейся цели ($V_1=0$) формулы (18.6) и (18.7) не меняются. Изменяются лишь величины $\omega_{\text{ц}}$ и $t_{\text{ф}}$. Они соответственно равны

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц.п}}}{L_0} = \frac{1}{L_0} V_{\text{ц}} \sin q \quad (18.8)$$

и

$$t_{\text{ф}} = \frac{L_0}{\frac{L_0}{t_0}} = t_0. \quad (18.9)$$

Угол прицеливания α для двух рассмотренных прицельных схем вычисляется также, как в случае стрельбы из неподвижного орудия по неподвижной цели, лишь величина дальности L должна быть равна L_0 и непрерывно вводиться в счетно-решающее устройство прицела.

18.2. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЦЕЛЫ СТВОЛЬНОГО И РЕАКТИВНОГО ОРУЖИЯ

Винтовочный оптический прицел

Оптический прицел служит для точного прицеливания по индивидуальным целям, угловые размеры которых невелики, а расстояния до них лежат в пределах 13 м (для винтовки). Прицел работает со снайперской винтовкой и охотничьим

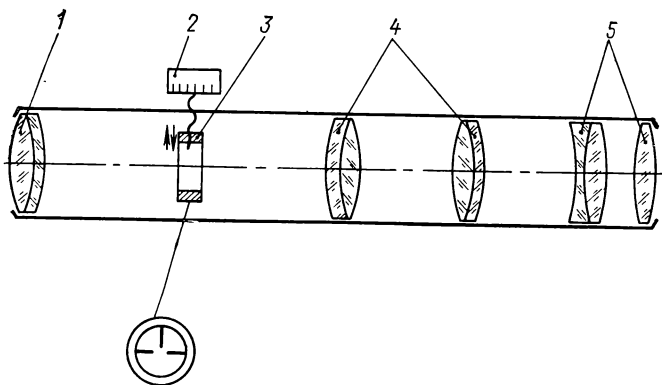


Рис. 18.4. Схема винтовочного прицела:

1—объектив; 2—барабан угла прицеливания; 3—сетка; 4—оборачивающая система; 5—окуляр

ружьем, на которых крепится жестко с помощью кронштейнов и винтов таким образом, чтобы оптическая ось была параллельна оси канала ствола. Прицел в соответствии с прицельной схемой рис. 18.1 позволяет при известной дальности до цели L построить угол прицеливания α и боковую угловую поправку γ . Угол места цели ϵ вводится подъемом оси канала ствола при визировании на цель.

Оптический прицел представляет собой телескопическую трубку с линзовой оборачивающей системой.

Принципиальная схема прицела приведена на рис. 18.4. Он состоит из объектива 1, механизма сетки 3, состоящего из барабанов углов прицеливания 2 и боковых поправок, оборачивающей системы 4 и окуляра 5. Окуляр не имеет диоптрийной наводки и установлен жестко (-1 дптр). Для предохранения

глаза стрелка от удара при отдаче винтовки зрачок выхода удален от последней поверхности окуляра на 72 мм.

Сетка прибора состоит из кольца и припаянных к нему никелевых проволочек диаметром 0,2 мм. Сетка может перемещаться вверх и вниз, вправо и влево. Механизм сетки состоит из двух винтовых пар, винты которых совершают только вращательное движение, а гайки только поступательное. Движение одной гайки не мешает движению другой, так как гайки имеют форму ползунков, перемещающимся по своим Т-образным пазам.

Артиллерийские прицелы

Артиллерийские оптические прицелы предназначены для горизонтальной и вертикальной наводки ствола орудия.

По способу сопряжения со стволом прицелы делятся на две группы: **прицелы зависимые** от орудия и прицелы **не зависимые** от орудия. Прицелы, зависимые от орудия, характеризуются тем, что при наклоне ствола на угол возвышения ϕ происходит наклон прицела и линии прицеливания (визирования) в вертикальной плоскости. Если при установке по шкалам прицела углов α и ϵ линия прицеливания изменяет свое положение в пространстве, то он относится к прицелам с зависимой линией прицеливания. Все зависимые от орудия прицелы имеют и зависимую линию прицеливания. При прицеливании с помощью зависимого от орудия прицела наводчик осуществляет как ввод прицельных данных в прицел, так и наводку самого орудия с помощью механизмов наведения.

Прицелы, не зависящие от орудия, характеризуются тем, что они не меняют своего положения в пространстве при вертикальной наводке орудия. Не зависимые от орудия прицелы могут иметь независимую или полунезависимую линии прицеливания.

Линия прицеливания является **независимой**, если при установке на шкалах прицела углов α и ϵ она остается неподвижной в пространстве. Линия прицеливания называется **полузависимой**, если она не меняет своего положения в пространстве при установке по шкалам прицела угла α и изменяет свое положение при установке угла ϵ .

Не зависимые от орудия прицелы устанавливаются на тяжелых орудиях, где функции прицеливания и наведения выполняются несколькими номерами расчета. Не зависимые от орудия прицелы обладают меньшей точностью, чем зависимые прицелы.

Стрельба из минометных, артиллерийских ствольных и реактивных установок может осуществляться или прямой наводкой (цель непосредственно наблюдается через визирное устройство прицела), или не прямой наводкой (если цель не видна). Стрельба прямой наводкой по неподвижной и движущейся целям осу-

ществляется в соответствии с прицельными схемами рис. 18. 1 и 18. 2.

Если стрельба ведется с закрытых позиций по неподвижным целям, то используется непрямая наводка (рис. 18. 1). При выполнении не прямой наводки намечают ориентир O_n (точку наводки), хорошо видимый из точки стояния орудия O . По карте или на местности определяют горизонтальный угол θ' между плоскостью цели и плоскостью наводки. Зная дистанцию до цели L , определяют угол γ и вычисляют горизонтальный угол наводки $\theta = \theta' - \gamma$.

Угол возвышения орудия определяют расчетным путем по измеренному по карте (или на местности) углу ϵ и вычисленному углу α как $\varphi = \epsilon + \alpha$. Необходимо подчеркнуть, что точка наводки O_n используется лишь для горизонтальной наводки орудия. Непрямая горизонтальная наводка осуществляется следующим образом. На шкале прицела (артиллерийской панорамы) устанавливают угол θ и механизмом наведения разворачивают орудие по горизонту так, чтобы точка наводки O_n оказалась на вертикальном штрихе перекрестия прицельной сетки визира, при этом строится угол θ .

Точность прицельной стрельбы зависит не только от правильности определения углов установки орудия, но и от собственных ошибок прицела (методических и инструментальных) и точности его установки на орудии. Наиболее существенными погрешностями прицеливания, связанными с установкой прицела на орудии, являются погрешности от наклона плоскости угломера панорамы по отношению к горизонтальной плоскости и наклона оси цапф орудия.

При рассмотрении рис. 18. 1 отмечалось, что прицелы вместо угла γ строят угол γ' в плоскости угломера панорамы $OЦЦ'$. Если угол $\epsilon \neq 0$, то $\gamma \neq \gamma'$. Из $\Delta OЦЦ'$ (см. рис. 18.1) имеем $\sin \gamma' = \frac{ЦЦ'}{OЦ}$. Выражая $ЦЦ' = Ц''Ц'''$ через $OЦ''$ и $\sin \gamma$, получим, что

$$\sin \gamma' = \cos \epsilon \sin \gamma. \quad (18. 10)$$

Определим ошибку в построении угла γ , равную $\Delta\gamma = \gamma - \gamma'$. Из (18. 10) находим, что

$$\sin \gamma - \sin \gamma' = \sin \gamma (1 - \cos \epsilon). \quad (18. 11)$$

С другой стороны $\sin \gamma - \sin \gamma' = 2 \sin \frac{\Delta\gamma}{2} \cos \frac{2\gamma - \Delta\gamma}{2}$.

Величина $\Delta\gamma \ll \gamma$, поэтому $2 \sin \frac{\Delta\gamma}{2} \approx \Delta\gamma$ и $\cos \frac{2\gamma - \Delta\gamma}{2} \approx \cos \gamma$.

С учетом последнего

$$\sin \gamma - \sin \gamma' = \sin \gamma (1 - \cos \epsilon) = \Delta\gamma \cos \gamma. \quad (18. 12)$$

Отсюда получаем формулу для определения $\Delta\gamma$:

$$\Delta\gamma = (1 - \cos \epsilon) \operatorname{tg} \gamma. \quad (18. 13)$$

орудия. С их помощью происходит совмещение плоскости прицеливания с вертикальной плоскостью.

Рассмотрим кинематические схемы зависимого и не зависящего от орудия прицелов.

На рис. 18.6 приведена кинематическая схема зависимого от орудия прицела с зависимой линией прицеливания. Прицел со-

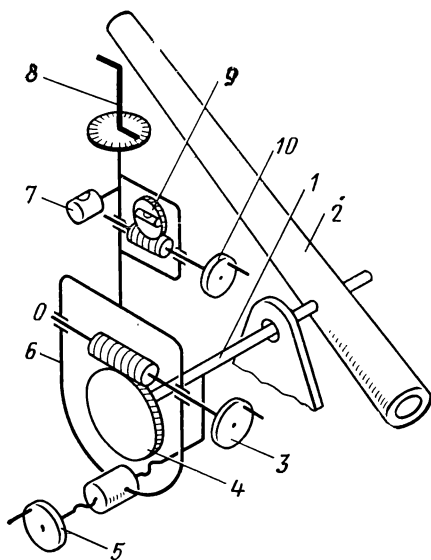


Рис. 18.6. Кинематическая схема зависимого от орудия прицела:

1—ось; 2—ствол; 3—рукоятка углов прицеливания; 4—червячное колесо; 5—механизм качения прицела; 6—корпус прицела; 7—поперечный уровень; 8—панорама; 9—продольный уровень; 10—рукоятка углов места цели

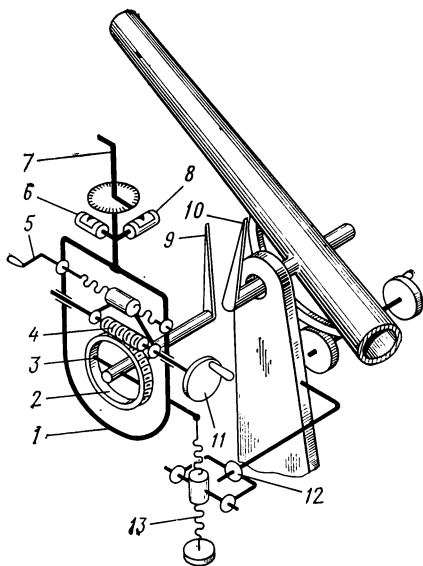


Рис. 18.7. Кинематическая схема не зависящего от орудия прицела:

1—корпус прицела; 2—червячное колесо; 3—ось; 4—червяк; 5—рукоятка установки углов ϵ ; 6—продольный уровень; 7—панорама; 8—поперечный уровень; 9—прицельная стрелка; 10—орудийная стрелка; 11—рукоятка установки углов α ; 12—рукоятка качения прицела; 13—механизм горизонтирования прицела

стоит из панорамы, предназначенной для наблюдения и установки горизонтальных углов, механизма углов прицеливания, механизма углов места цели и механизма поперечного уровня, служащего для компенсации наклона оси цапф орудия.

Прицел установлен на оси 1, связанной с люлькой ствола орудия 2. При установке углов прицеливания α с помощью рукоятки 3 червяк обкатывается по червячному сектору и наклоняет корпус прицела 6 с панорамой 8 и продольным уровнем 9. Установка углов места цели ϵ осуществляется разворотом продольного уровня 9 рукояткой 10. Компенсация наклона оси цапф орудия осуществляется качанием всего прицела вокруг оси 00

с помощью рукоятки 5 и контролируется поперечным уровнем 7.

Вертикальная наводка орудия осуществляется поворотом ствола в вертикальной плоскости до тех пор, пока пузырек продольного уровня 9 не займет нулевого положения, в этом случае $\varphi = \alpha + \epsilon$. Горизонтальная наводка при стрельбе с закрытых позиций рассмотрена ранее.

На рис. 18.7 представлена кинематическая схема не зависящего от орудия прицела с независимой линией прицеливания. Прицел состоит из визира (панорамы), продольного и поперечного уровней, механизмов построения углов α и ϵ и механизма качания прицела.

При установке угла прицеливания α рукояткой 11 червяк 4 поворачивает червячное колесо 2 с прицельной стрелкой 9. При установке угла места цели ϵ с помощью рукоятки 5 червяк 4 перемещается в осевом направлении (как рейка), поворачивая дополнительно колесо 2 со стрелкой 9. Суммарный угол поворота прицельной стрелки 9 будет равен $\alpha + \epsilon$. Поднимая ствол орудия, наводчик совмещает орудийную стрелку 10 с прицельной 9, угол возвышения ствола при этом станет равным $\varphi = \alpha + \epsilon$. Качанием корпуса прицела 1 вокруг оси 3, с помощью рукоятки 12, компенсируют наклон оси цапф, контролируя его по уровню 8. Уровень 6 используется для определения горизонта орудия, путем разворота прицела рукояткой 13.

Горизонтальная наводка орудия осуществляется с помощью панорамы 7.

Минометные прицелы и прицелы для реактивной артиллерии по схеме построения аналогичны прицелам для ствольной артиллерии. Некоторое отличие заключается в том, что при горизонтальной наводке в них не учитывается боковая поправка на дивергенцию γ .

Танковый шарнирный прицел

Танковый шарнирный прицел ТШ предназначен для прицеливания при стрельбе прямой наводкой из пушки танка и спаренного с ней пулемета. Орудие закреплено в башне танка, в так называемой «маске», которая может наклоняться на определенные углы в вертикальной плоскости. В горизонтальной плоскости орудие поворачивается вместе с башней танка.

Прицел ТШ (рис. 18.8) состоит из трех основных частей: подвижной части I, в которой расположен объектив и прицельная сетка, жестко скрепленная с пушкой; неподвижной окулярной части III, прикрепленной через тягу к крышке башни, и связывающего обе эти части шарнирного механизма II.

Оптическая схема прицела ТШ приведена на рис. 18.8. Особенностью данной схемы является наличие оптического шарнира. Он состоит из четырех зеркал 5, 6, 7, 8. При наклоне зеркала 5, находящегося в головной части прицела, вокруг оси OO проис-

ходит наклон изображения. Зеркала 6 и 7, жестко соединенные между собой, при наклоне головной части поворачиваются соответственно вокруг осей OO и O_1O_1 на угол, равный половине угла поворота зеркала 5, тем самым компенсируется наклон изображения. Зеркало 8 при наклоне головной части остается неподвижным.

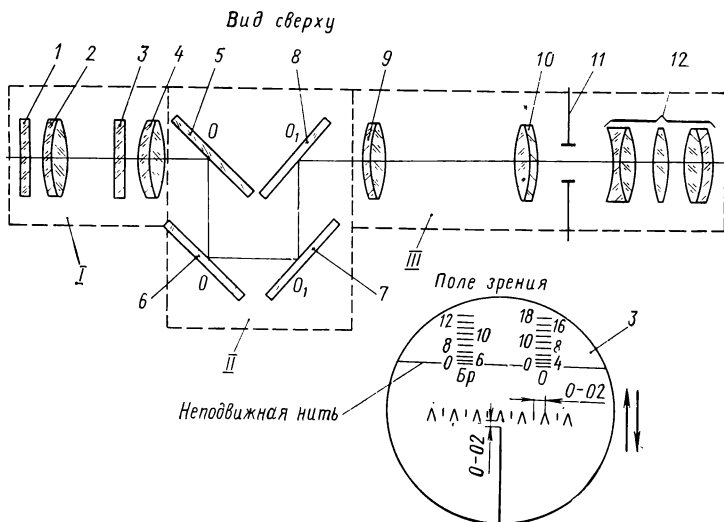


Рис. 18.8. Оптическая схема прицела ТШ:

1—защитное стекло; 2—объектив; 3—сетка; 4—коллектив; 5, 6, 7, 8—зеркала оптического шарнира; 9, 10—линзы оборачивающей системы; 11—диафрагма; 12—окуляр

Углы прицеливания устанавливают по прицельным шкалам и прицельным маркам, нанесенным на сетке 3 (см. рис. 18.8) и видимым в поле зрения прицела. Шкала прицельных знаков позволяет вводить боковые поправки вправо и влево до 0—32. Неподвижным индексом для установки углов прицеливания служит неподвижная горизонтальная нить.

Установка углов прицеливания (см. рис. 18.8) производится рукояткой, которая соединена валиком карданной передачи с конической шестерней, находящейся в головной части прицела. Коническая пара передает вращательное движение гайке, последняя вызывает поступательное перемещение винта, палец которого водит вверх и вниз каретку сетки.

18.3. ПЕРИСКОПЫ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

Типы и назначения

Перископы подводной лодки выполняют функции нескольких оптических приборов, а именно: наблюдательных приборов; при-

целов для торпедной стрельбы; навигационных приборов; дальномеров.

На подводных лодках различного назначения применяется несколько типов перископов: командирский перископ, или перископ атаки; зенитный перископ и др. Перископ атаки используется для наблюдения за горизонтом в погруженном состоянии лодки, для определения расстояния до цели, скорости цели и угла упреждения.

Зенитный перископ служит для наблюдения как надводных, так и воздушных целей. Он используется так же, как навигационный прибор для определения местонахождения лодки по небесным светилам.

Устройство перископов

Перископ подводной лодки представляет собой оптический прибор, выполненный в виде трубы большой длины. Расстояние между осями окулярной и головной частей называется **перископичностью**.

Из лодки выступает лишь некоторая часть перископа, а над водой выступает лишь тонкая головная часть длиной 300—400 мм. Диаметр шейки головной части перископа атаки составляет 31 мм, у зенитного — 60—80 мм. Шейка головки необходима для уменьшения буруна, возникающего у перископа при движении подводной лодки.

Оптическая схема перископа атаки приведена на рис. 18. 9. Сменное увеличение $1,5\times$ и $6\times$. Смена увеличения осуществляется перемещением линзы 4.

Оптическая схема зенитного перископа показана на рис. 18. 10 и отличается от командирского тем, что в качестве головной призмы используется призма-куб 2, защитным стеклом служит сферический колпак 1. Для компенсации оптической силы сферического защитного стекла между призмой 2 и колпаком 1 помещена положительная линза 10, которая при повороте призмы 2 перемещается по дуге, центр которой совпадает с осью вращения головной призмы, на угол в два раза больший, чем угол поворота призмы-куба.

Перископы имеют два окуляра, один для наблюдения, второй для определения дистанции до цели и курсового угла цели. Схема дальномерного окуляра приведена на рис. 18. 11. В окуляре имеются две подвижные полулинзы 1 и 2. Если оптические силы этих полулинз равны и оси их совпадают, то действие пары линз будет равно действию плоскопараллельной пластинки. Если передвинуть обе полулинзы в направлении стрелки, то лучи пойдут вверх у одной пары и вниз у другой, т. е. изображение раздвигается в вертикальной плоскости. При измерении дистанции до цели перископ используется как дальномер с базой на цели. Если фокусное расстояние оптики перископа без оку-

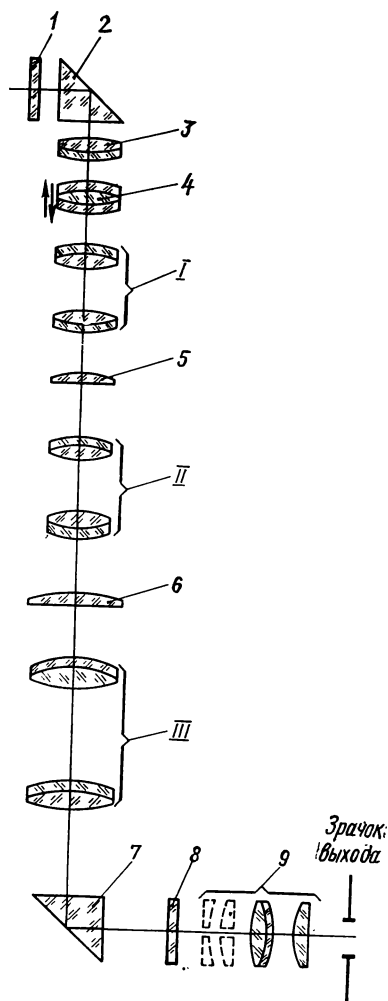


Рис. 18.9. Оптическая схема перископа атаки:

1—защитное стекло; 2—головная призма; 3—объектив; 4—линза; 5, 6—коллективы; 7—окулярная призма; 8—сетка; 9—окуляр; I, II, III—оборачивающие системы

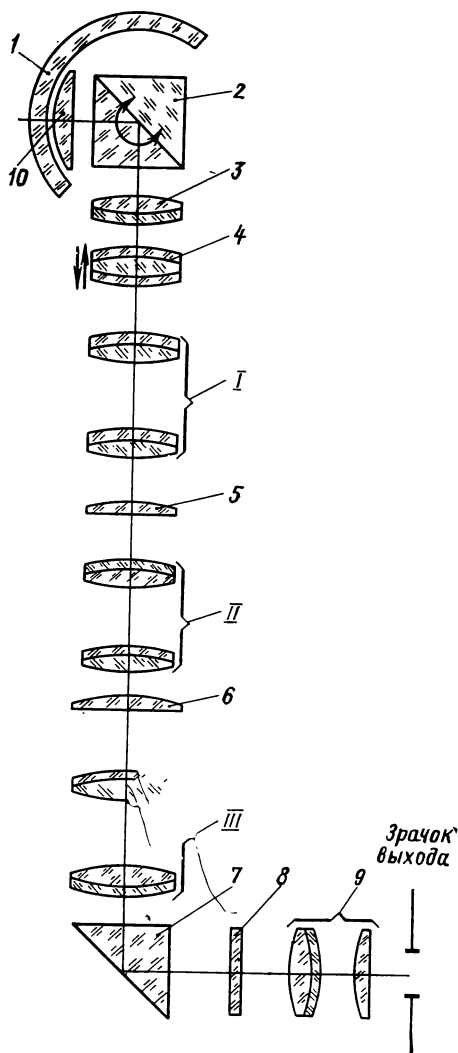


Рис. 18.10. Оптическая схема зенитного перископа:

1—защитное стекло; 2—призма-куб; 3—объектив; 4—линза; 5, 6—коллективы; 7—окулярная призма; 8—сетка; 9—окуляр; 10—линза; I, II, III—оборачивающие системы

ляра равно $f'_{\text{экв}}$, а цель имеет высоту H , то из подобия треугольников OAB и $OA'B'$ (рис. 18.12, а) можно написать

$$L = \frac{H f'_{\text{экв}}}{h}, \quad (18.16)$$

где h — величина изображения цели в вертикальной плоскости;
 L — дистанция до цели.

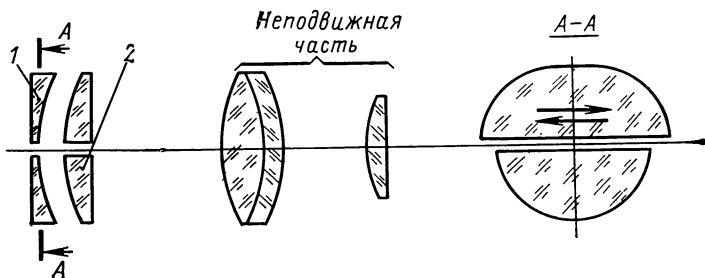


Рис. 18.11. Схема дальнометрического окуляра:

1, 2—подвижные линзы

Зная величину H и измерив h , можно определить L . Измерение величины изображения осуществляется перемещением подвижных линз окуляра. Перемещение осуществляется до тех пор, пока нижний край одной половины изображения не совместится с верхним краем другой. При этом половинки изображения расходятся на величину h .

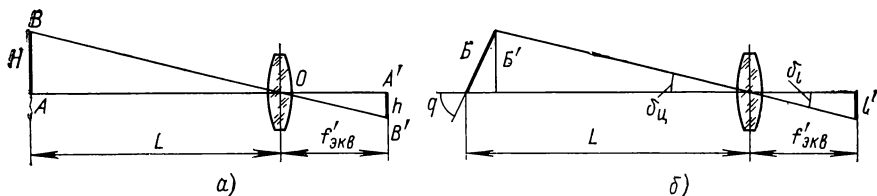


Рис. 18.12.

К определению дистанции:
а—измерение дистанции; б—курсового угла

Механизм дальнометрического приспособления устроен так, что после разведения половинок изображения на подвижной шкале можно прочесть дистанцию L , если введена известная величина H . Определение курсового угла q корабля противника основано на измерении размера ракурсного изображения корабля (проекции) по горизонтальному направлению. Этот размер зависит

от длины корабля Б, дистанции L и курсового угла q . Из рис. 18. 12, б при условии, что $B \ll L$ имеем

$$\delta_{\text{ц}} = \frac{B \sin q}{L} = \frac{l'}{f'_{\text{эКВ}}}, \quad (18. 17)$$

где l' — величина изображения корабля в горизонтальной плоскости.

Из формулы (18. 17) получаем

$$\sin q = \frac{L l'}{B f'_{\text{эКВ}}}. \quad (18. 18)$$

Курсовой угол измеряется сразу после измерения дистанции L , при этом величина l' , измеряется поворотом окуляра на $\pi/2$ и «раздвиганием» изображения цели по длине. Величина $f'_{\text{эКВ}}$ при измерении L и q вводится как постоянная.

При стрельбе торпедами перископ используется как прицел для построения угла упреждения. Из упредительного треугольника (см. рис. 18.3) видно, что торпеда должна быть направлена в упрежденную точку A_y . Для этого необходимо определить угол $\psi_{\text{упр}}$. Из рис. 18. 3, используя теорему синусов, можем написать, что

$$\sin \psi_{\text{упр}} = \frac{V_{\text{ц}}}{V_0} \sin q, \quad (18. 19)$$

где $V_{\text{ц}}$ — скорость цели; V_0 — скорость торпеды; q — курсовой угол цели.

При торпедной стрельбе скорость торпеды V_0 — величина известная, а курсовой угол определяется, как указано выше.

Для измерения скорости цели в фокальной плоскости окуляра перископа атаки имеется вертикальная нить, дающая направление, стабилизированное от гироскопа. Таким образом, при изменении подводной лодкой своего курса, направление визирной линии, даваемое нитью, остается неизменным в пространстве. Если известна длина цели Б, то с помощью секундомера определяют время t , необходимое для того, чтобы цель прошла путь, равный ее длине относительно неподвижной нити в пространстве. Тогда величина скорости цели будет

$$V_{\text{ц}} = \frac{B}{t}. \quad (18. 20)$$

Выражение (18. 20) оказывается справедливым при любом курсовом угле q .

Если лодка имеет скорость V_1 , то скорость цели определяется выражением

$$V_{\text{ц}} = \frac{B}{t} + \frac{V_1 \sin q_1}{\sin q}, \quad (18. 21)$$

где q_1 — курсовой угол своей лодки.

18.4. ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АЗИМУТАЛЬНОГО ПРИЦЕЛИВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

Траектория полета баллистической ракеты

Траектория полета ракеты в вертикальной плоскости приведена на рис. 18. 13. С момента начала движения и до момента падения она делится на два участка: участок активного полета, т. е. полета с работающим двигателем (OB) и участок свободного полета (BC'), когда двигатель не работает.

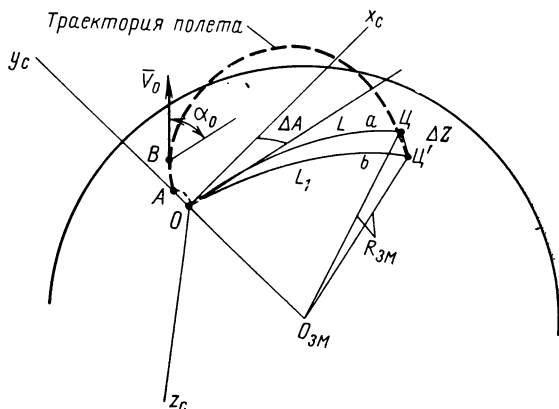


Рис. 18. 13. Траектория полета ракеты

Ракета стартует вертикально и в течение нескольких десятков секунд движется прямо вверх, быстро проходя наиболее плотные слои атмосферы. Эту часть активного участка (OA) называют стартовым. Далее ракета выводится на баллистическую траекторию на второй части активного участка (AB). Необходимое изменение угла наклона траектории по тангажу на участке AB осуществляется с помощью программного управления.

На стартовом участке траектории угол наклона продольной оси ракеты к горизонту равен $\alpha = \pi/2$, на участке AB угол α является функцией времени, т. е. $\alpha = \alpha(t)$ и в конце активного участка $\alpha(t)$ выдерживается постоянным и равным α_0 с тем, чтобы обеспечить максимальную точность управления.

Системы координат, используемые при прицеливании

Для того чтобы траектория полета ракеты проходила через объект, перед пуском корпус ракеты и датчики системы управления точно ориентируются относительно вертикали и по азимуту. Совокупность операций при подготовке к пуску, обеспечи-

вающих пространственное ориентирование корпуса ракеты и датчиков системы управления, называется прицеливанием ракеты.

Ориентирование корпуса ракеты и датчиков системы управления осуществляется относительно стартовой системы координат $Ox_c y_c z_c$ (см. рис. 18.13). Ее начало совпадает с центром мас-

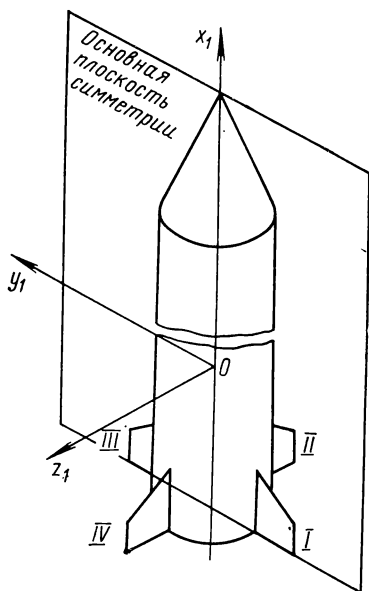


Рис. 18.14. Связанная система координат

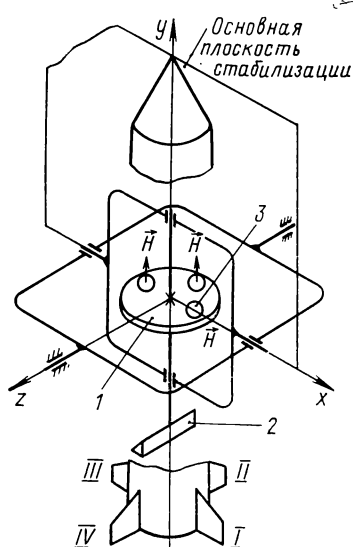


Рис. 18.15. Инерциальная система координат:

1—ГСП; 2—контрольный элемент (призма); 3—гироскоп

сы ракеты, установленной на пусковом столе. Ось Oy_c направлена вертикально вверх, ось Ox_c указывает направление стрельбы. Плоскость $y_c Ox_c$ называется плоскостью стрельбы и проходит через цель.

С корпусом ракеты жестко связывается система координат $Ox_1 y_1 z_1$ (рис. 18.14). Ее называют связанной системой координат. Начало помещается в центре массы ракеты, ось Ox_1 совпадает с продольной осью ракеты, ось Oy_1 лежит в плоскости рулевых двигателей I—III. Плоскость, проходящую через продольную ось ракеты и рулевые двигатели I—III, называют основной плоскостью симметрии.

Направление осей чувствительных датчиков автономной системы управления определяет инерциальную систему координат $Oxyz$ (рис. 18.15). Датчики автономной системы управления расположены на гиросtabilизированной платформе 1, сохраня-

ющей на протяжении всего управляемого полета ракеты неизменное положение относительно неподвижной системы координат. Для стабилизации платформы используются три гироскопа 3: тангажа, курса (рыскания) и крена. Оси подвеса платформы определяют оси координат. Ось Oy совпадает с осью подвеса внутренней рамы. Плоскость yOx называется основной плоскостью стабилизации ракеты и совпадает с плоскостью внутренней рамки ГСП. Контрольный элемент 2 (призма или зеркало) расположено на оси подвеса внутренней рамы ГСП.

Сущность прицеливания

К моменту пуска ракеты оси связанной и инерциальной системы координат ориентируются относительно стартовой системы координат. Это ориентирование осуществляется в процессе прицеливания ракеты. Окончательное положение осей всех трех систем координат перед пуском должно быть таким, чтобы основные плоскости стабилизации и симметрии совпадали с плоскостью стрельбы, а оси Ox_1 и Oy были вертикальны. Приведение осей систем координат в указанное положение осуществляется путем вертикализации ракеты, горизонтирования и юстировки гиropлатформы, азимутального прицеливания.

Вертикализацией ракеты называют совокупность операций по приданию ее продольной оси вертикального положения на пусковом столе. Эта операция производится непосредственно после установки ракеты на пусковой стол.

Горизонтирование гиropлатформы состоит в совмещении оси инерциальной системы координат с вертикальной осью стартовой системы координат.

Юстировка гиropлатформы — это совмещение основной плоскости стабилизации с основной плоскостью симметрии с помощью системы азимутального приведения ГСП.

Азимутальное прицеливание состоит в совмещении основной плоскости стабилизации ракеты с плоскостью стрельбы, в раздельном совмещении с плоскостью стрельбы сначала основной плоскости симметрии, а затем основной плоскости стабилизации ракеты. Грубое совмещение основной плоскости симметрии с плоскостью стрельбы осуществляется поворотом ракеты, точное же азимутальное прицеливание производится разворотом ГСП по азимуту относительно корпуса ракеты.

Чтобы зафиксировать непосредственно на стартовой позиции направление стрельбы, перед прицеливанием ракеты выполняются две подготовительные операции: геодезическая подготовка пуска и подготовка исходных данных для стрельбы.

При геодезической подготовке пуска определяются координаты точки стояния пускового стола и ориентированные направления на стартовой позиции. Координаты точки стояния пускового стола вместе с координатами цели используются при подго-

товке исходных данных для стрельбы, а ориентированные геодезические направления используются непосредственно для азимутального прицеливания

Влияние ошибок азимутального прицеливания на отклонение точек падения ракет

При наличии ошибки азимутального прицеливания ΔA плоскость стрельбы отклоняется от расчетной на угол, равный угловой ошибке прицеливания, в результате чего точка падения ракеты отклоняется от цели в боковом направлении на величину Δz (см. рис. 18.13). Определим связь между величинами ΔA и Δz . На рис. 18.13 изображены проекции расчетной a и реальной b траекторий движения ракеты по поверхности Земли. На основании теоремы косинусов для сферического треугольника $OЦЦ'$ можем записать, что

$$\cos \frac{\Delta z}{R_{3.м}} = \cos \frac{L}{R_{3.м}} \cos \frac{L_1}{R_{3.м}} + \sin \frac{L}{R_{3.м}} \sin \frac{L_1}{R_{3.м}} \cos \Delta A, \quad (18.22)$$

где L и L_1 — сферические дальности полета ракеты;

Δz — сферическое отклонение точки падения ракеты от цели.

Полагая, что $L \approx L_1$ для (18.22), получим

$$\cos \frac{\Delta z}{R_{3.м}} = \cos^2 \frac{L}{R_{3.м}} + \sin^2 \frac{L}{R_{3.м}} \cos \Delta A. \quad (18.23)$$

Выражая $\cos^2 \frac{L}{R_{3.м}}$ через $1 - \sin^2 \frac{L}{R_{3.м}}$ и учитывая, что

$$1 - \cos \Delta A = 2 \sin^2 \frac{\Delta A}{2} \quad \text{и} \quad 1 - \cos \frac{\Delta z}{R_{3.м}} = 2 \sin^2 \frac{\Delta z}{2R_{3.м}},$$

после несложных преобразований для ΔA получим

$$\Delta A = 2 \arcsin \left(\frac{\sin \frac{\Delta z}{2R_{3.м}}}{\sin \frac{L}{R_{3.м}}} \right). \quad (18.24)$$

Зависимость (18.24) показывает, что Δz будет максимальным, если отношение $\frac{L}{R_{3.м}} = \frac{\pi}{2}$ или $\frac{3\pi}{2}$, т. е. при сферических дальностях полета $L = 10000$ км и 30000 км. Если $\frac{L}{R_{3.м}} = \pi$ или 2π ($L = 20000$ км или 40000 км), то при любой величине ΔA боковое отклонение Δz равно нулю. Расчеты показывают, что при $L = 10000$ км и $\Delta A = 60''$ величина $\Delta z = 1,85$ км.

Системы азимутального прицеливания ракет

Пуск ракет может осуществляться из шахт, подвижных и неподвижных наземных установок и из подводных лодок.

Систему прицеливания ракеты из шахтных пусковых установок рассмотрим на базе ракеты «Минитмен».

Размещение основных блоков системы прицеливания, управления и контроля приведено на рис. 18.16. В основном стволе шахты помещается пусковой стол 1, на который устанавливается ракета 2. В боковых бункерах устанавливаются автоколлимационный угломер 4, который может перемещаться по кольцевому рельсу 5,

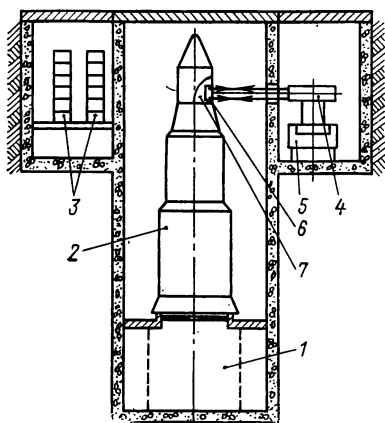


Рис. 18.16. Ракета в шахте:

1—пусковой стол; 2—ракета; 3—система управления и контроля; 4—автоколлимационный угломер; 5—кольцевой рельс; 6—зеркало; 7—герметический отсек

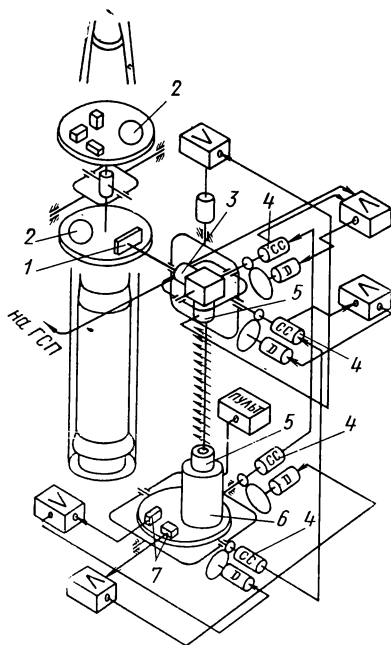


Рис. 18.17. Система прицеливания с подвижной установкой:

1—зеркало; 2—гироскоп; 3—угломер; 4—сельсинная передача; 5—поляризационная передача; 6—гироскопический компас; 7—датчик горизонта

и система управления и контроля ракеты 3. На самой ракете находится герметический отсек системы наведения 7. В нем расположены гиросtabilизатор, электронные блоки и бортовая ЦВМ. Контрольным элементом гиросtabilизатора является установленное на нем зеркало 6.

Измерительным элементом системы прицеливания является автоколлимационный угломер. Положение угломера на кольцевом рельсе зависит от азимута стрельбы. Прицеливание ракеты производится в два этапа: вначале грубый разворот ракеты с помощью поворотного устройства пускового стола, а затем точ-

ное прицеливание разворотом бортовой гиросtabilизированной платформы по азимуту, т. е. совмещение основной плоскости стабилизации с плоскостью стрельбы или с плоскостью основного геодезического направления, относительно которой задается плоскость стрельбы.

Азимут оптической оси угломера определяется путем передачи направлений от геодезической сети или из астрономических наблюдений. Визирование теодолитом при геодезической привязке угломера производится через люк в крышке шахты.

Система прицеливания ракеты «Минитмен» при пуске с железнодорожной платформы показана на рис. 18. 17.

Гироскопический компас 6, с помощью которого определяется направление истинного меридиана, размещается под специальным защитным колпаком, установленным на стабилизированной платформе у пускового стола. Под этим колпаком находится и оператор, работающий с гирокомпасом при определении направления меридиана перед прицеливанием.

Для передачи направления пуска с гирокомпаса на угломер 5, установленный у приборного отсека ракеты на контейнере, служит поляризационная следящая передача 5.

Угломер вместе с приемником синхронной передачи установлен на стабилизированной платформе, закрепленной в кардановом подвесе. Платформа может вращаться в карданном подвесе по азимуту в пределах $1/36 \pi$ рад ($\pm 5^\circ$) и по углу места в пределах $1/60 \pi$ ($\pm 3^\circ$).

Для нормальной работы всей системы прицеливания осуществляется горизонтирование платформы, на которой установлен гирокомпас, и горизонтирование платформы угломера. Датчиками системы горизонтирования и стабилизации платформы гирокомпаса являются два акселерометра 7, оси которых установлены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Сигналы рассогласования подаются на приводы горизонтирования по соответствующим осям платформы.

Для предварительного горизонтирования платформы угломера служит сельсинная синхронная передача 4 (см. рис. 18.17). Точное горизонтирование осуществляется с помощью автоколлимационного поляризационного угломера (см. рис. 18.21).

Зеркало устанавливается на ГСП, имеющей внутренний карданный подвес, и обеспечивающей разворот по азимуту в пределах $\pm 70^\circ$.

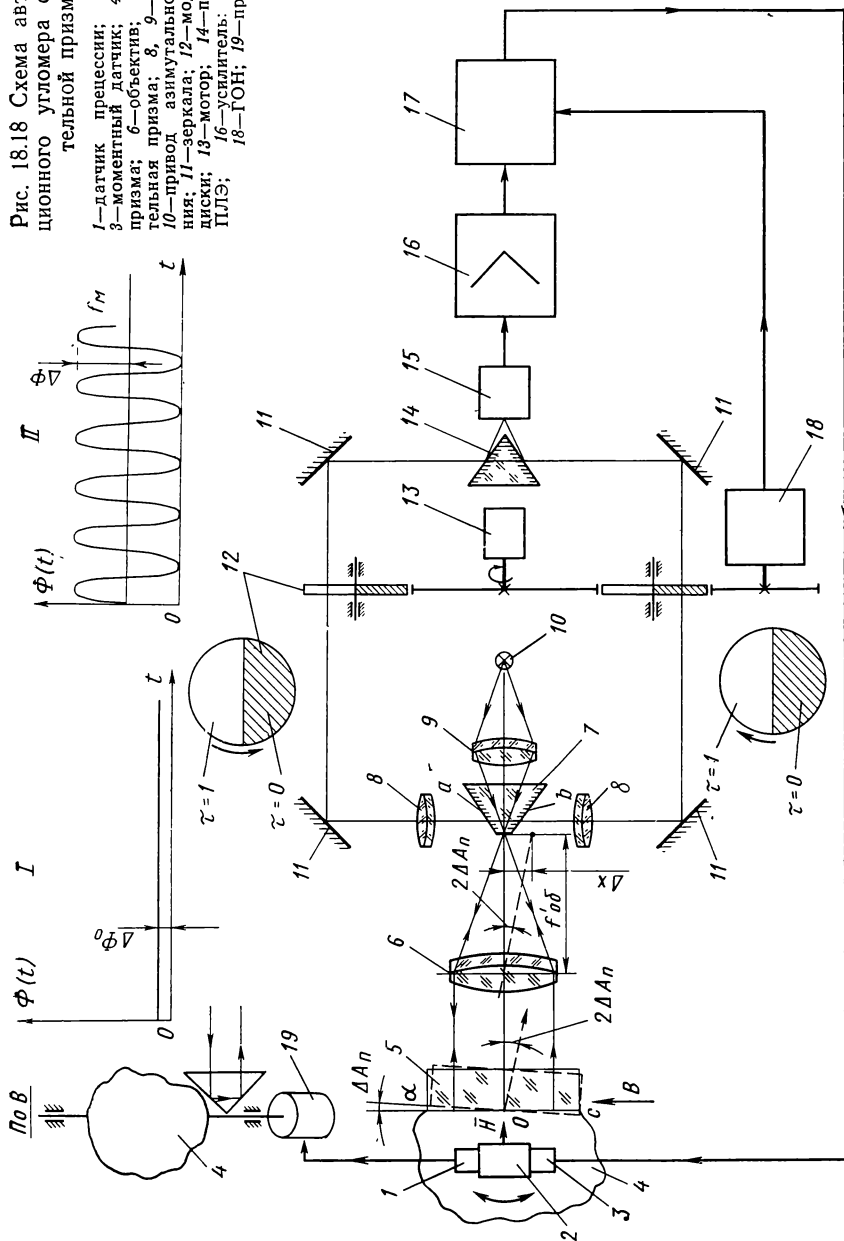
Рассмотрим принципиальные схемы автоколлимационных угломеров и поляризационной следящей передачи.

Принципиальная схема автоколлимационного угломера с разделительной призмой показана на рис. 18. 18 (вид сверху).

При включении источника излучения 10 его изображение с помощью конденсора 9 проектируется на срезанную грань призмы-ножа 7, равномерно освещая ее. Боковые грани a и b призмы 7 имеют зеркальные покрытия и служат для отражения пото-

Рис. 18.18 Схема автоколлимационного угломера с разделительной призмой:

1—датчик прелесции; 2—гирокскоп; 3—моментный датчик; 4—ГСП; 5—призма; 6—объектив; 7—разделительная призма; 8, 9—конденсоры; 10—привод азимутального наведения; 11—зеркала; 12—модулирующие диски; 13—мотор; 14—призма; 15—ПЛЭ; 16—усилитель; 17—ФЧД; 18—ГОН; 19—привод



ков излучения в правый и левый каналы. Срезанная грань расположена в фокальной плоскости объектива 6, поэтому лучи, проходящие через срезанную грань, выходят из объектива параллельным пучком и попадают на контрольную призму (зеркало) 5, расположенную на ГСП 4. Если ГСП занимает такое положение, что нормаль к грани cd призмы 5 параллельна оптической оси автоколлиматора, то лучи, войдя в призму параллельно оптической оси, выйдут обратно по тому же направлению и дадут изображение срезанной грани в фокальной плоскости объектива без смещения с оптической оси. В этом случае потоки излучения в верхнем и нижнем каналах будут одинаковы (по величине близки к нулю), с одинаковыми амплитудами, но в противофазе будут модулироваться модулирующими дисками 12 с частотой f_m и на приемнике энергии излучения 15 дадут некоторый постоянный сигнал (рис. 18.8, I), который не будет усиливаться избирательным усилителем 16, настроенным на частоту модуляции f_m . В этом случае сигнал, снимаемый с фазочувствительного детектора 17, будет равен нулю и ГСП — неподвижна.

Если нормаль к грани cd призмы 5 имеет угол ΔA_n с оптической осью автоколлиматора, то пучок лучей, вошедший в призму 5 параллельно оптической оси, выйдет из нее отклоненным в плоскости чертежа на угол $2\Delta A_n$. В этом случае изображение срезанной грани в фокальной плоскости сместится относительно оптической оси в плоскости чертежа на величину $\Delta x = f'_{06} 2\Delta A_n$.

Потоки излучения в правом и левом каналах будут неодинаковыми. В левом канале величина потока $\Delta\Phi$ будет пропорциональна смещению Δx (в линейной зоне), в правом канале поток будет равен нулю. Поток в левом канале будет модулироваться с частотой f_m (рис. 18.18, II) и на выходе ПЛЭ получим переменный электрический сигнал, напряжение которого будет пропорционально амплитуде модулированного потока $\Delta\Phi$.

Напряжение в ПЛЭ будет усиливаться избирательным усилителем 16 и поступать на фазочувствительный детектор (ФЧД) 17. Одновременно на ФЧД поступает сигнал с генератора опорных напряжений (ГОН) 18. В ФЧД происходит сравнение фазы сигнала, снимаемого с усилителя 16, с фазой сигнала с ГОН и таким путем определяется направление угла ΔA_n . Сигнал с ФЧД поступает на моментный датчик (МД) 3 гироскопа 2, который под действием поступающего сигнала начинает прецессировать вокруг вертикальной оси. С датчика прецессии (ДП) 1 снимается сигнал, пропорциональный скорости прецессии гироскопа и поступает на привод азимутального наведения (ПАН) 19, который разворачивает ГСП до совмещения нормали к грани cd призмы 5 с оптической осью автоколлиматора. Объективы 8, зеркала 11 и призма 14 служат для направления потоков излучения на ПЛЭ. Двигатель 13 служит для приведения во вращение модулирующих дисков 12.

Далее рассмотрим принципиальную схему следящей поляризационной синхронной передачи, и схему поляризационного угламера.

На рис. 18.19 изображена схема поляризационной синхронной передачи, в которой модуляция светового потока производится с помощью поляризационного устройства, меняющего свои характеристики под действием приложенного к нему переменного напряжения.

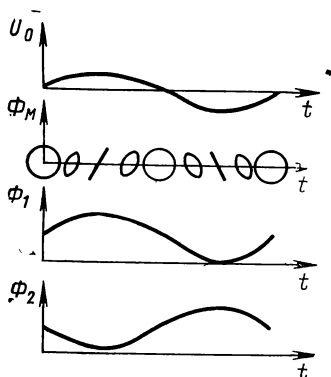
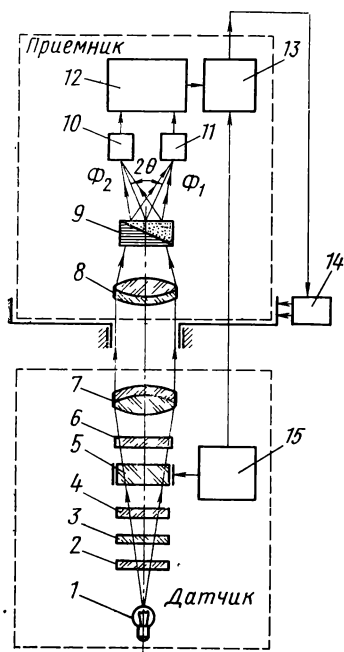


Рис. 18.20. Поляризация светового потока

← Рис. 18.19. Схема поляризационной передачи:

1—источник света; 2—фильтр; 3—поляроид; 4—двоякопреломляющая пластинка; 5—модулятор; 6—двоякопреломляющий кристалл; 7—объектив; 8—объектив; 9—анализатор; 10, 11—ФАЭ; 12—усилитель; 13—ФЧД; 14—привод; 15—ГОН

Источник света 1 расположен в датчике поляризационной передачи, который в свою очередь устанавливается на поворотной части гирокомаса. После того, как определены направление меридиана и азимут пуска, датчик вручную ориентируется оператором.

Световой поток от источника излучения 1 проходит через фильтр 2, а затем с помощью поляроида 3 и двоякопреломляющей пластинки 4 преобразуется в свет с круговой поляризацией. Поляризованный по кругу свет входит в модулятор 5, к которому приложено переменное напряжение, частотой f_m , вырабатываемое генератором 15. Модулятор представляет собой кристалл из фосфорнокислого калия KN_2PO_4 , расположенный между двумя электродами. Под действием переменного напряжения поляризующие свойства кристалла меняются, благодаря чему выходной световой поток Φ_m подвергается сложной поляризации

(рис. 18.20). За один период приложенного напряжения световой поток поляризуется по кругу по эллипсу с различной ориентацией полуосей и линейно в двух плоскостях.

На выходе модулятора установлен двоякопреломляющий кристалл 6, после которого свет оказывается поляризованным в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Составляющие светового потока Φ_1 и Φ_2 , поляризованные в различных плоскостях, модулированы в противофазе. Эти две составляющие светового потока в виде параллельного пучка лучей выходят из объектива датчика 7.

В приемнике синхронной передачи световой поток проходит через объектив 8 и попадает на анализатор 9, в качестве которого используется призма Волластона. Она отклоняет обыкновенные и необыкновенные лучи в разные стороны на один и тот же угол

$$\theta = (n_0 - n_e) \operatorname{tg} \alpha,$$

где n_0 — показатель преломления для обыкновенного луча;

n_e — показатель преломления для необыкновенного луча;

α — преломляющий угол призмы.

На выходе призмы Волластона амплитуды световых потоков для обыкновенных и необыкновенных лучей определяются зависимостями

$$\Phi_1 = \Phi_0 \cos^2(\pi/4 + \Delta A_1),$$

$$\Phi_2 = \Phi_0 \cos^2(\pi/4 - \Delta A_1),$$

где Φ_0 — величина светового потока в выходном зрачке объектива 8;

ΔA_1 — отклонение осей призмы от угла 45° с каждой из плоскостей поляризации.

Потоки Φ_1 и Φ_2 после призмы Волластона попадают соответственно на приемники энергии излучения 10 и 11. Если оси призмы 9 составляют угол $\beta = \pi/4$ с плоскостями поляризации светового потока датчиком, световые потоки Φ_1 и Φ_2 , падающие на ПЛЭ, будут равными по амплитуде, но противоположными по фазе и сигнал рассогласования, усиленный усилителем 12, на выходе ФЧД 13 будет равен нулю. Если появится угол рассогласования ΔA_1 , то нарушается равенство амплитуд световых потоков, падающих на приемники энергии излучения и сигнал рассогласования на выходе ФЧД будет отличным от нуля. Этот сигнал поступает на привод поворота приемного устройства 14, который отработает угол рассогласования ΔA_1 и развернет платформу с приемным устройством так, чтобы угол рассогласования ΔA_1 сделать равным нулю. Направление угла ΔA_1 определяется в ФЧД путем сравнения фазы опорного напряжения генератора 15 и фазы сигнала, снимаемого с избирательного усилителя 12.

Схема поляризационного автоколлимационного угломера показана на рис. 18. 21. Он может вырабатывать два сигнала рассогласования. Один из них пропорционален углу отклонения оптической оси от нормали к контрольному зеркалу ГСП по азимуту, а другой — по тангажу. Азимутальный сигнал рассогласования подается на привод ГСП, обеспечивающий ее разворот по азимуту. Сигнал рассогласования по тангажу подается на вер-

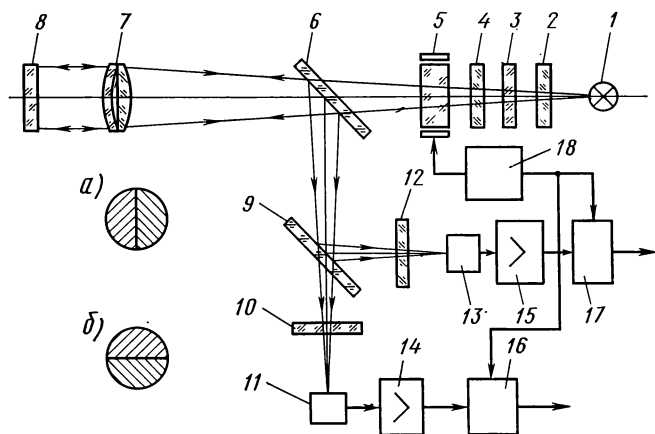


Рис. 18. 21. Схема поляризационного угломера:

1—источник света; 2—фильтр; 3—поляризатор; 4—двоякопреломляющая пластинка; 5—модулятор; 6, 9—полупрозрачные зеркала; 7—объектив; 8—контрастное зеркало; 10, 12—анализаторы; 11, 13—ПЛЭ; 14, 15—усилители; 16, 17—ФЧД

тикальный привод карданова подвеса угломера (см. рис. 18. 17). Этот привод служит для согласования оптической оси угломера с нормалью к контрольному зеркалу ГСП по тангажу.

Принцип действия поляризационного угломера аналогичен принципу действия поляризационной синхронной передачи. Световой поток от источника излучения 1 (рис. 18. 21) проходит через фильтр 2, поляризатор 3, двоякопреломляющую пластину 4, на выходе которой он имеет круговую поляризацию. После модулятора 5 имеются две составляющие светового потока, поляризованные сложным образом (см. рис. 18. 20). Каждая из этих составляющих сдвинута относительно другой на 180° по фазе.

После прохождения полупрозрачного зеркала 6 свет выходит из объектива 7 в виде пучка лучей, параллельных оптической оси. Пучок падает на контрольное зеркало 8 ГСП и, отразившись от него, снова поступает в объектив 7 и далее отражается от полупрозрачного зеркала 6. Часть потока через полупрозрачное зеркало 9 и анализатор 10 попадает на ПЛЭ 11, далее на избирательный усилитель 14 и ФЧД, вторая часть потока, отразившись от зеркала 9 и пройдя анализатор 12, попадает на ПЛЭ

13, далее на усилитель 15 и ФЧД. Генератор синусоидальных колебаний 18 дает сигналы на 5, 16 и 17.

В качестве анализаторов используются пластинки из двух поляроидов, склеенных по диаметру (рис. 18. 21, *а* и *б*). Плоскости поляризации света каждой из половин анализатора перпендикулярны, поэтому фазы составляющих светового потока, проходящих через эти половины анализатора, отличаются на 180° . Анализаторы ориентированы в каждом из каналов различным образом: в азимутальном канале граница раздела половин анализатора вертикальна, а в канале тангажа — горизонтальна. Принцип выделения сигнала рассогласования в каждом из каналов одинаков. Рассмотрим азимутальный канал. Если оптическая ось угломера перпендикулярна контрольному зеркалу в азимутальной плоскости, на ПЛЭ 11 падают два световых потока, равных по амплитуде и противоположных по фазе. Поэтому на выходе ФЧД сигнал равен нулю. В том случае когда оптическая ось неперпендикулярна к плоскости контрольного зеркала, через анализатор 10 на ПЛЭ 11 падают неравные по амплитуде световые потоки противоположных фаз. Управляющий сигнал на выходе ФЧД 16 будет отличаться от нуля, а его поляриность соответствует знаку угла $\Delta\alpha_{\text{ц}}$.

Глава 19

АВИАЦИОННЫЕ СТРЕЛКОВЫЕ ПРИЦЕЛЫ

19.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ

О СТРЕЛКОВОМ ВООРУЖЕНИИ САМОЛЕТОВ

Стрелковое вооружение самолетов состоит из ракетных, пулеметных и пушечных установок. Направляющие для пуска ракет класса «воздух — воздух», как правило, закрепляются неподвижно и параллельно оси самолета (рис. 19. 1).

Пулеметно-пушечное вооружение состоит из установок неподвижного или подвижного типа. Неподвижное оружие ставится обычно на истребителях. Ось канала ствола оружия располагается параллельно продольной оси самолета и направлена вперед. Прицеливание при стрельбе из неподвижных артиллерийских или ракетных установок осуществляется разворотом корпуса самолета с помощью соответствующих органов управления.

Самолеты бомбардировочной авиации, военно-транспортные самолеты и вертолеты для защиты от нападения истребителей снабжаются подвижными установками. Тип установки, их конструкция и размещение зависят от типа самолета или вертолета. На рис. 19. 2 показана схема вооружения бомбардировщика, принимавшего участие во второй мировой войне. Он имеет пять подвижных установок. На рис. 19. 3 показана типовая механизированная турель. Ствол оружия может поворачиваться отно-

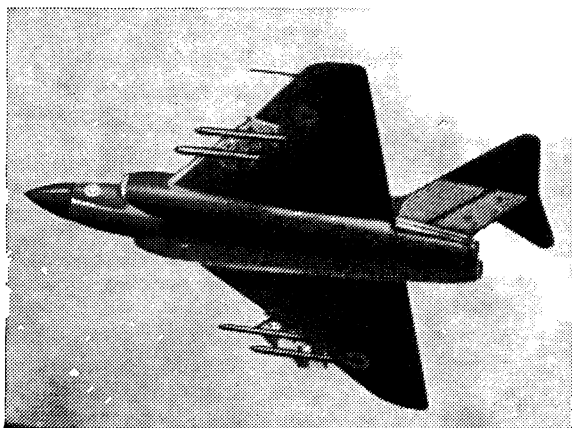


Рис. 19.1. Подвеска управляемых ракет под крыльями самолета

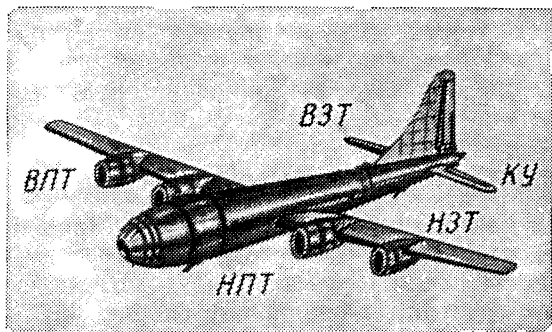


Рис. 19.2. Размещение подвижных стрелковых установок на самолете:

Турельные установки: ВПТ и ВЗТ — верхние (передняя и задняя); НПТ и НЗТ — нижние (передняя и задняя); КУ — кормовая установка

сительно двух взаимно перпендикулярных осей. Поворот вокруг одной из осей (в плоскости, параллельной плоскости крыльев самолета) неограничен, а второй поворот (вверх — вниз) имеет ограничения. При наведении ствола на части собственного само-

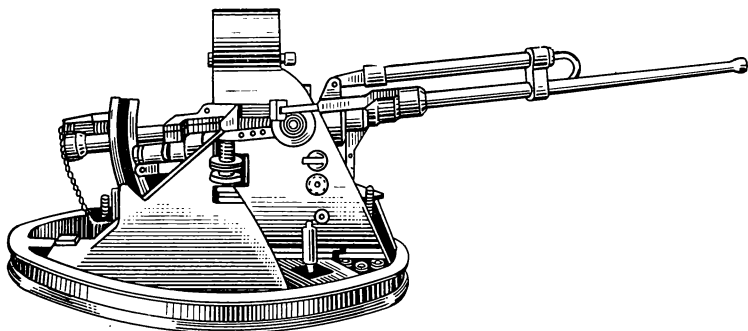


Рис. 19.3. Типовая механизированная турельная установка

лета оружие автоматически прекращает стрельбу. Кормовая установка имеет ограниченный сектор обстрела в задней полусфере. Она обычно самая мощная, так как именно из задней полусферы наиболее эффективна атака истребителя.

Для лучшей обороны самолета иногда бывает необходимо располагать установки в таких местах, где невозможно поместить стрелка для непосредственного управления орудием. В этих случаях стрелок вместе с прицельным устройством (прицельной станцией) размещается в месте наилучшего обзора пространства сектора обстрела, а управление орудием осуществляется дистанционно (установки с дистанционным управлением).

19.2. ПРИЦЕЛИВАНИЕ ПРИ ВОЗДУШНОЙ СТРЕЛЬБЕ

Прицеливание при воздушной стрельбе неуправляемыми снарядами принципиально ничем не отличается от прицеливания при наземной стрельбе по открытым целям. Однако из-за быстротечности и чрезвычайно сложной обстановки к авиационным стрелковым прицелам предъявляются повышенные требования в отношении автоматизации и точности выработки угловых поправок.

На рис. 19.4 приведена схема прицеливания при стрельбе из неподвижных стрелковых установок. Оптический визир прицела 8, представляющий собой коллиматорную систему, формирует изображение сетки прицела. Полупрозрачная плоскопараллельная пластина-отражатель 7 отклоняет лучи, выходящие из объектива коллиматора, направляя их в глаз стрелка 9. Таким образом, стрелок видит удаленное в бесконечность светящееся изо-

бражение сетки прицела, состоящее из прицельной марки 3 и точечного кольца 2. Поскольку отражатель 7 полупрозрачный, то стрелок видит также пространство предметов, расположенное впереди.

Воображаемая линия, соединяющая глаз стрелка с изображением прицельной марки, называется **линией визирования прицела**. В начальном положении, когда прицел не вырабатывает угловых

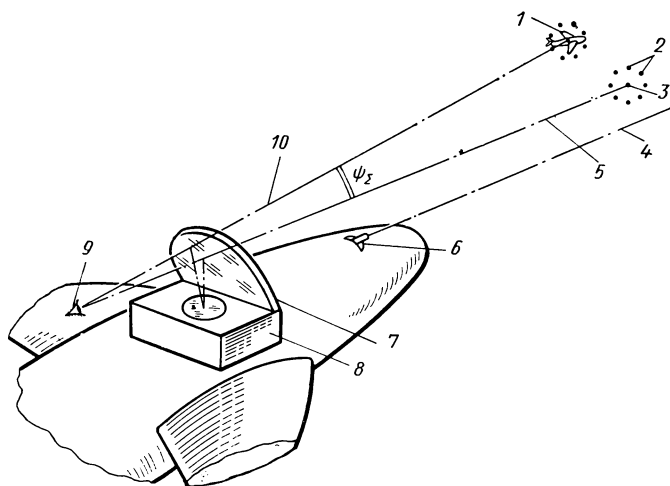


Рис. 19. 4. Схема прицеливания при воздушной стрельбе из неподвижных установок неуправляемыми снарядами:

1—цель; 2—точечное кольцо; 3—прицельная марка; 4—ось канала ствола орудия; 5—нулевая визирная линия прицела; 6—ствол орудия; 7—отражатель прицела; 8—визир прицела; 9—глаз стрелка; 10—смещенная визирная линия прицела; ψ_z —суммарная угловая поправка

поправок, эта линия совпадает с оптической осью коллиматора и называется **нулевой визирной линией** 5. Прицел устанавливается на самолете так, что нулевая визирная линия параллельна оси 4 канала ствола орудия 6. (Строго говоря, между линиями 4 и 5 может быть некоторый угол, необходимость которого определяется при пристрелке орудия. Однако этот угол очень мал и мы будем считать, что нулевая визирная линия параллельна оси канала ствола орудия.)

При выработке прицелом угловых поправок изображение сетки прицела смещается, что вызывает поворот визирной линии. Между нулевой 5 и смещенной 10 визирными линиями прицела появляется некоторый угол. Если прицел работает правильно, а стрелок совмещает изображение прицельной марки с целью 1, то этот угол равен суммарной угловой поправке ψ_z . Нетрудно видеть, что в этих условиях можно вести стрельбу, ибо ось канала

ствола орудия отклонена от направления на цель на угол ψ , который необходим для обеспечения попадания.

Угол ψ вырабатывается автоматически, на базе автоматически измеренных и введенных в прицел исходных данных для стрельбы. Единственной задачей стрелка является наложение изображения прицельной марки на цель, что производится разворотом всего самолета. Однако в том случае, если автоматический

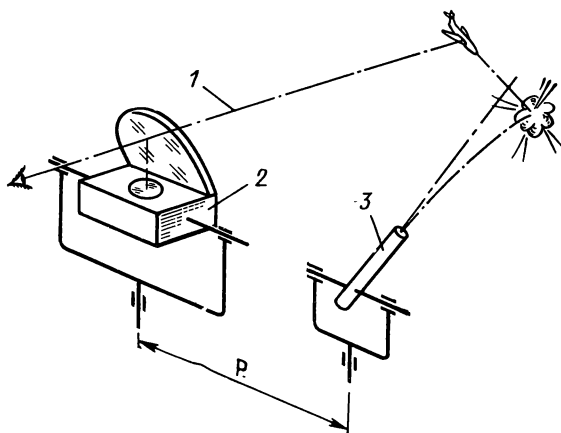


Рис. 19.5. Схема прицеливания при воздушной стрельбе из подвижных установок с дистанционным управлением:

1—визирная линия прицела; 2—визир прицела; 3—ствол орудия; P—расстояние между орудием и прицелом

канал измерения дальности с помощью радиодальномера по каким-либо причинам не работает, стрелку приходится выполнять еще одну операцию — «обрамлять» контуры цели изображением точечного кольца 2. Диаметр этого кольца, называемого **дальномерным кольцом**, может изменяться с помощью соответствующей рукоятки прицела.

Прицеливание при стрельбе из подвижных пулеметно-пушечных установок производится аналогично. Разница состоит лишь в том, что наложение прицельной марки на цель (т. е. собственно прицеливание) производится уже не разворотом всего самолета, а поворотом орудия вместе с установленным на нем прицелом.

Несколько иначе может решаться задача при стрельбе из неподвижных стрелковых установок дистанционного управления. В этом случае орудие 3 и визир прицела 2 закрепляются в двухступенных карданных подвесах (рис. 19.5). Линия визирования 1 прицела жестко фиксирована относительно его корпуса и может поворачиваться лишь вместе с прицелом. В течение нескольких секунд стрелок ведет прицельное слежение за целью, управляя разворотом визира. При этом с прицельного поста в вычислитель системы управления орудием поступают данные об

угловых координатах и угловой скорости цели. Одновременно туда подаются также все остальные параметры, определяющие условия стрельбы. Вычислитель определяет положение ствола орудия, необходимое для попадания в цель. Орудие автоматически устанавливается в это положение с помощью специальных приводов.

Прицел с неподвижной относительно корпуса линией визирования значительно более прост по устройству, хотя он также может иметь внешнебазный дальномер. Такие прицелы применяются не только при стрельбе из установок с дистанционным управлением, а часто используются, например, при решении задачи запуска управляемых снарядов класса «воздух — воздух» с оптическими головками самонаведения.

Естественно, что оптические прицелы могут использоваться лишь в условиях видимости цели. Ночью, а также при прицеливании на больших дальностях используются инфракрасные или радиолокационные прицелы.

19.3. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПРИЦЕЛОВ ВОЗДУШНОЙ СТРЕЛЬБЫ

В современных прицелах применяются оптические системы коллиматорного типа. Схема простейшего коллиматорного прицела приведена на рис. 19. 6.

Сетка прицела 3, установленная в фокальной плоскости объектива 2, подсвечивается малогабаритной лампочкой 4. Сетка представляет собой стеклянную пластинку, одна из сторон которой, обращенная к объективу, имеет непрозрачное покрытие с вытравленными на нем перекрестием и несколькими кольцами (рис. 19. 7). Вторая сторона пластинки матирована, что обеспечивает равномерное освещение сетки. Пройдя сетку, лучи света поступают в объектив 2 и, отразившись от полупрозрачного отражателя 1, попадают в глаз наблюдателя параллельным пучком. Наблюдатель видит светящееся изображение перекрестия и колец, удаленное в бесконечность.

Сетка прицела может быть сделана также из фольги с прорезанными перекрестием и кольцами. Для равномерности освещения металлической сетки между ней и лампочкой ставят матовое стекло.

При выполнении габаритного расчета оптической системы прицела обычно требуется определить диаметры колец сетки, исходя из заданного углового размера каждого кольца. Расчетная формула имеет вид:

$$D_k = 2f'_{06} \operatorname{tg} \frac{\delta_k}{2},$$

где D_k — диаметр кольца;
 δ_k — угловой размер кольца.

Особенности работы наблюдателя на борту самолета требуют, чтобы его голова находилась на достаточном расстоянии от прицела (порядка 200—400 мм). При этом наблюдатель должен видеть всю сетку прицела.

Из рис. 19.8 видно, что если поместить центр зрачка глаза в точку A , то стрелок увидит кольцо сетки, диаметр которого ра-

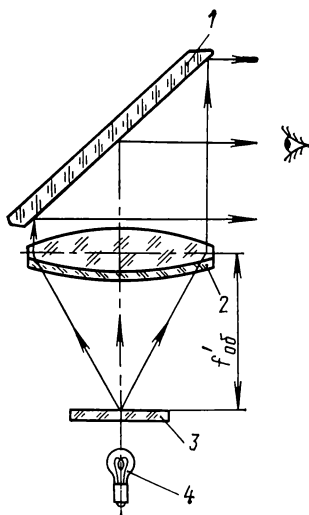


Рис. 19.6. Оптическая схема коллиматорного прицела:

1—полупрозрачный отражатель;
2—объектив; 3—сетка; 4—лампа подсветки

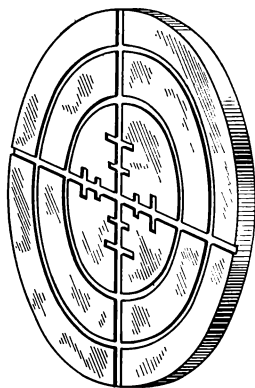


Рис. 19.7. Сетка прицела с кольцами и перекрестием

вен D_k . Причем в формировании изображения кольца на сетчатке глаза будут участвовать лишь те лучи, которые находятся в заштрихованной области. При смещении зрачка глаза вверх на величину $D_{зр.гл}/2$ наблюдатель не увидит край кольца, так как все лучи, исходящие из точки b , не попадут в глаз. При смещении глаза вниз на ту же величину стрелок не увидит другой край кольца.

Чем правее точки A находится глаз, тем меньше лучей от каждой точки кольца попадает в глаз и тем меньше видимая яркость кольца. При малейшем поперечном смещении глаза один из краев кольца исчезает из поля зрения. Наконец, при расположении центра зрачка глаза в точке A_1 наблюдатель вообще не увидит кольца, имеющего диаметр D_k .

Техническим заданием на разработку визира задается величина углового размера наибольшего из колец сетки $\delta_k^{\max}$, определяемая расчетным путем из условий применения прицела. При

заданном значении $\delta_k^{\max}$ максимально возможное удаление глаза стрелка от прицела зависит от светового диаметра объектива. Чем больше диаметр объектива, тем большее удаление глаза можно допустить. Однако увеличение диаметра не должно вести за собой увеличение фокусного расстояния объектива, так как это неблагоприятно скажется на габаритах прицела. Поэтому в тех случаях, когда требуется обеспечить большое удаление

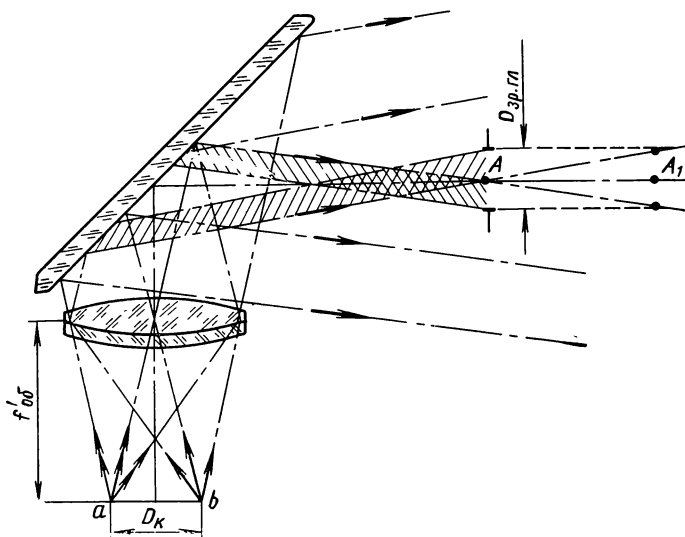


Рис. 19. 8. К расчету допустимого удаления глаза оператора от отражателя прицела

глаза стрелка от прицела, объектив должен быть достаточно светосильным.

Простейшие коллиматорные прицелы широко использовались при воздушной стрельбе вплоть до второй мировой войны. Изображение перекрестия сетки использовалось как прицельная марка при стрельбе прямой наводкой, а кольца служили для приближенного учета поправки на упреждение. В настоящее время их применение ограничивается задачами, решаемыми прицелами с неподвижной относительно прицела линией визирования (см. разд. 19. 2).

На рис. 19. 9 изображена оптическая схема полуавтоматического прицела.

Зазор между тонкими металлическими сетками 3 и 4 дальномерного механизма минимальный. Фокальная плоскость объектива δ находится между сетками. Сетки устроены таким образом, что, наблюдая в отражатель прицела, видно в бесконеч-

ности светящееся точечное кольцо с точкой в центре, причём диаметр кольца может меняться.

Зеркало 2 закреплено на роторе гироскопа построителя угловых поправок (см. разд. 19.5) и имеет возможность поворачиваться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей на углы φ_v и φ_r . Например, при повороте зеркала на угол φ_v визирная линия прицела поворачивается на угол ψ_v в плоскости

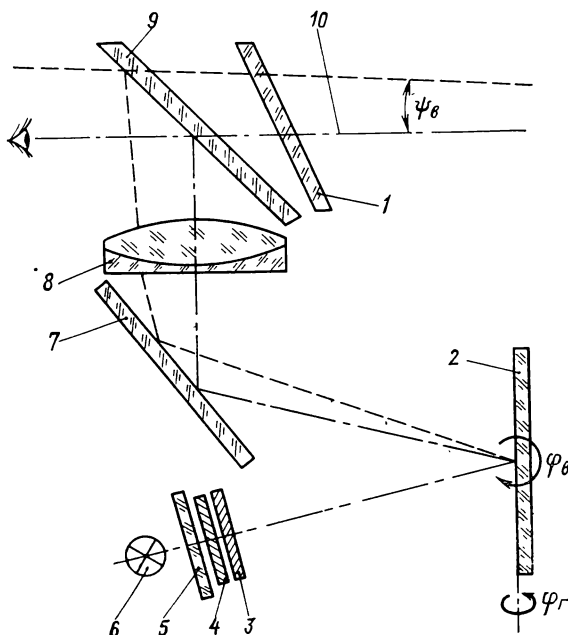


Рис. 19.9. Оптическая схема полуавтоматического прицела:

1—светофильтр; 2—поворотное зеркало; 3, 4—сетки дальнометрического механизма; 5—матовое стекло; 6—лампа подсветки; 7—неподвижное зеркало; 8—объектив; 9—полупрозрачный отражатель; 10—нулевая визирная линия прицела; ψ_v —угол поворота визирной линии при повороте зеркала 2 на угол φ_v

чертежа. Отношение $\varphi_v/\psi_v = \mu$ называется **передаточным коэффициентом** оптической системы прицела. Для нахождения связи между передаточным коэффициентом и параметрами оптической системы воспользуемся рис. 19.10.

В целях упрощения зеркало 7 и полупрозрачный отражатель 9 исключены расчетной схемы, так как они лишь изменяют ход лучей, не влияя на существо построения (см. рис. 19.9).

При отклонении зеркала на угол φ_v изображение точки A сместится по дуге радиуса R в точку A_2 .

Угол A_1BA_2 равен $2\varphi_v$. Соединив точку A_2 с главной точкой объектива, получим новое положение визирной линии прицела, повернутое относительно нулевого положения на угол ψ_v . Из треугольника OA_2C найдем

$$\operatorname{tg} \psi_v = \frac{A_2C}{OC} = \frac{R \sin 2\varphi_v}{OA_1 - CA_1} = \frac{R \sin 2\varphi_v}{OA_1 - R(1 - \cos 2\varphi_v)}.$$

Откуда найдем

$$\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{в}}}{\operatorname{tg} \psi_{\text{в}}} = \frac{f'_{\text{об}} - R(1 - \cos 2\varphi_{\text{в}})}{2R \cos^2 \varphi_{\text{в}}}.$$

При малых углах, полагая $\operatorname{tg} \varphi_{\text{в}} \approx \varphi_{\text{в}}$, $\operatorname{tg} \psi_{\text{в}} \approx \psi_{\text{в}}$, $\cos 2\varphi_{\text{в}} \approx \cos^2 \varphi_{\text{в}} \approx 1,0$ получим

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\varphi_{\text{в}}}{\psi_{\text{в}}} = \frac{f'_{\text{об}}}{2R} = \text{const}, \\ \psi_{\text{в}} &= \frac{\varphi_{\text{в}}}{\mu} = \frac{2R\varphi_{\text{в}}}{f'_{\text{об}}}. \end{aligned} \quad (19.3)$$

Таким образом, при малых углах $\varphi_{\text{в}}$ и $\psi_{\text{в}}$ передаточный коэффициент можно считать постоянным и зависящим только от параметров оптической системы.

Прицел устанавливается на самолете таким образом, чтобы нулевая визирная линия прицела (линия 10 на рис. 19.9, соединяющая глаз с изображением центральной точки сетки при угле поворота зеркала, равном нулю), была параллельна оси канала ствола орудия. Зеркало 2, закрепленное на роторе гироскопа построителя угловых поправок, автоматически поворачивается на угол, который обеспечивает поворот визирной линии от ее нулевого положения на угол, равный суммарной угловой поправке.

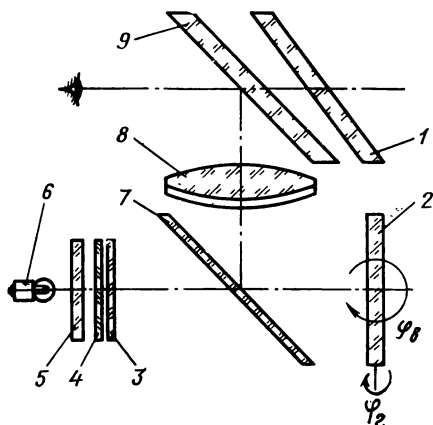


Рис. 19.11. Измененный вариант оптической схемы полуавтоматического прицела:

1—светофильтр; 2—поворотное зеркало; 3, 4—сетки; 5—матовое стекло; 6—лампа подсветки; 7—полупрозрачное зеркало; 8—объектив; 9—полупрозрачный отражатель

Отметим, что для поворота визирной линии может быть использован также поворот зеркала 7 или отражателя 9.

Если при повороте зеркала 2 на угол $\varphi_{\text{т}}$ линия визирования поворачивалась бы в плоскости, перпендикулярной чертежу и проходящей через нулевую линию визирования, то появилась бы возможность строить суммарную угловую поправку (положение которой в пространстве может быть произвольным) в виде двух ортогональных составляющих.

К сожалению в рассматриваемой схеме прицела поворот зеркала 2 на угол $\varphi_{\text{т}}$ вызывает смещение визирной линии по криволинейной поверхности. Это приводит к ошибке, называемой **вертикальной оптической ошибкой**. Для ее устранения необходимо

усложнять счетно-решающую схему прицела, что уже само по себе приводит к дополнительным погрешностям.

Однако если несколько видоизменить оптическую схему прицела, то вертикальная оптическая погрешность исчезает. Такая схема изображена на рис. 19.11. Лучи света, пройдя матовое стекло 5 сетки 4, 3 и полупрозрачное зеркало 7 попадают на подвижное зеркало 2. Отразившись в обратном ходе от полупрозрачного зеркала 7, лучи попадают в объектив 8. Таким образом, зеркало 7 работает дважды: в прямом ходе лучей — на пропускание и в обратном — на отражение. Полезная световая энергия уменьшается в 4—5 раз по сравнению со схемой рис. 19.9, поэтому осветитель здесь должен быть более мощным. Кроме того, следует иметь в виду, что плоскопараллельная пластина 7 в расходящемся пучке лучей вносит астигматизм. Для его уменьшения подложку зеркала 7 делают достаточно тонкой.

19. 4. ДАЛЬНОМЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ПРИЦЕЛОВ ВОЗДУШНОЙ СТРЕЛБЫ

Дальность до цели является одним из важнейших параметров, подлежащих определению при решении задачи прицеливания. Поэтому быстрое и достаточно точное определение дальности до цели во многом определяет эффективность воздушной стрельбы.

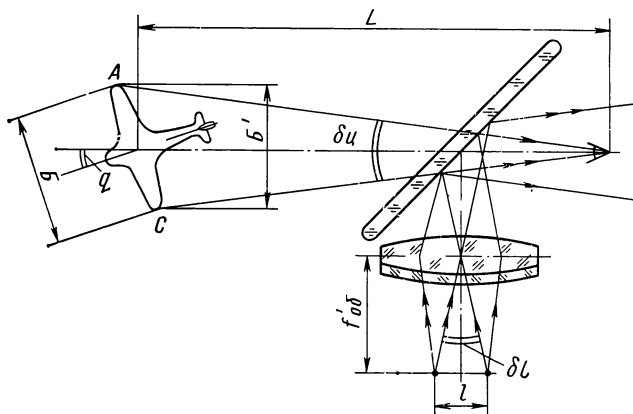


Рис. 19.12. Схема работы внешнебазного дальномера прицелов воздушной стрельбы

В основном режиме работы полуавтоматического прицела дальность до цели вводится в вычислитель прицела от самолетного радиодальномера в виде электрического напряжения, пропорционального этой дальности. При отказе радиодальномера включается в работу оптический дальномер.

Оптические дальномерные устройства прицелов воздушной стрельбы относятся к типу внешнебазных дальномеров. Схема, поясняющая принцип действия внешнебазного дальномера применительно к коллиматорному визиру прицела воздушной стрельбы (ПВС), изображена на рис. 19. 12. Приравнивая угловой размер δ_l отрезка в сети визира видимому угловому размеру цели δ_c , получим формулу, аналогичную зависимости (17. 3)

$$L = \frac{B'}{l} f'_{\infty} = \frac{B}{l} f'_{\infty} \cos q. \quad (19. 4)$$

В правую часть выражения (19. 4) входят четыре величины. Значение фокусного расстояния объектива прицела известно. Для того чтобы найти дальность до цели, необходимо определить базу цели B , курсовой угол цели q и величину отрезка l сетки прицела.

Величина B определяется по типу цели. Обнаружив цель и определив по характерным особенностям силуэта ее тип, оператор вручную вводит в прицел величину базы цели B еще до начала прицеливания.

Наиболее трудно поддается измерению курсовой угол цели. Ранние образцы прицелов воздушной стрельбы для определения курсового угла были снабжены специальными устройствами — курсомерами. Однако эти устройства имели чрезвычайно низкую точность.

Задача точного измерения курсового угла цели не решена и до настоящего времени. Дальномер прицела рассчитывается на среднее значение курсового угла $q_{\text{ср}}$, что ведет к погрешностям в определении дальности. При расчете дальномера среднее значение курсового угла подбирают так, чтобы эти погрешности были минимальны во всем диапазоне возможных курсовых углов. Поскольку наиболее эффективны атаки сзади, то $\cos q_{\text{ср}} \approx 0,95$. Найти относительную погрешность в определении дальности, вызванную усреднением курсового угла цели, можно по формуле

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L'}{L} = \frac{\cos q - \cos q_{\text{ср}}}{\cos q},$$

где L — дальность, рассчитанная по формуле (19. 4);

L' — дальность, рассчитанная по формуле (19. 4), при $q = q_{\text{ср}}$.

Пример. Найти максимальную относительную ошибку в диапазоне курсовых углов от 0 до 25° при $\cos q_{\text{ср}} = 0,95$:

$$\text{при } q = 0^\circ \quad \frac{\Delta L}{L} = \frac{1 - 0,95}{1} = 0,05 \text{ (5\%)}.$$

$$\text{при } q = 25^\circ \quad \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,906 - 0,95}{0,906} = -0,0486 \text{ (4,86 \%)}$$

Максимальная относительная ошибка равна 5%.

Третий искомый параметр — величина отрезка l сетки визи-ра — может быть, в общем случае, измерен несколькими путями. Так, например, в приборах наземного вооружения оператор просто определяет величину отрезка по угломерным делениям сетки визи-ра и в соответствии с отсчитанной величиной вычисляет дальность до цели. В нашем случае такой замедленный способ определения дальности до цели, конечно, неприемлем.

Как уже упоминалось в разд 19.3, сеточный механизм дальномера прицела воздушной стрельбы устроен так, что в поле зрения наблюдатель видит светящееся кольцо переменного диаметра и точку в центре кольца. Наблюдая в визи-р прицела за приближающейся или удаляющейся целью, наблюдатель изменяет диаметр кольца таким образом, что изображение кольца непрерывно обрамляет цель (рис. 19.13). В этом случае угловой размер диаметра кольца сетки будет равен видимому угловому размеру цели, а диаметр кольца будет равен отрезку l .

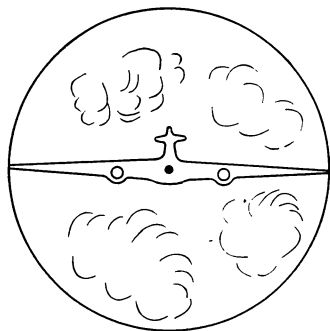


Рис. 19.13. Обрамление цели дальномерным кольцом

Для того чтобы измерить дальность с помощью внешнебазного оптического дальномера прицела, необходимо:

1. До начала атаки определить тип цели и установить в прицеле ее базу — Б.
2. В процессе атаки непрерывно обрамлять цель изображением кольца сетки прицела.

При соблюдении этих условий счетно-решающая система прицела непрерывно вырабатывает значение дальности цели.

Все ошибки оператора в определении базы цели, в неточности установки базы по шкале прицела, а также ошибки в обрамлении цели кольцом непосредственно сказываются на точности определения дальности.

Двухсеточное дальномерное устройство

Схема двухсеточного дальномерного устройства приведена на рис. 19.14.

Сетки 1 и 2 представляют собой непрозрачные диски с центральным отверстием и прорезями. На сетке 1 нанесены радиальные прорезы, а на сетке 2 — криволинейные (рис. 19.15), выполненные по закону

$$r = r_0 e^{a\varphi}, \quad (19.5)$$

где r_0 и a — постоянные величины.

Сетка 1 связана с рукояткой установки базы — Б, а сетка 2 — с рукояткой дальности и движком (щеткой) потенциометра 3.

При такой конструкции сеток в поле зрения прицела видно светящееся точечное кольцо и центральная точка. Поскольку каждая точка (точнее ромбик) образована пересечением радиальной и криволинейной прорези, то число точек кольца равно числу прорезей на сетках. Относительный поворот сеток вызывает изменение диаметра точечного кольца.

Работа с таким дальномерным устройством сводится

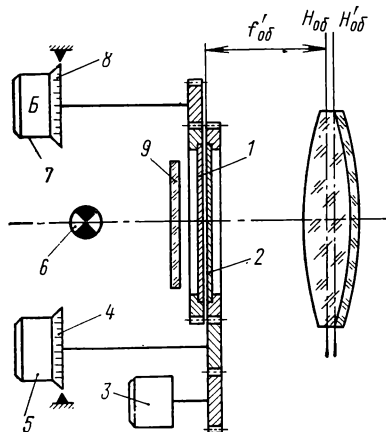


Рис. 19.14. Двухсеточное дальномерное устройство:

1, 2—сетки; 3, 4, 5—потенциометр, шкала и рукоятка дальности; 6—лампа подсветки; 7, 8—рукоятка и шкала баз; 9—матовое стекло

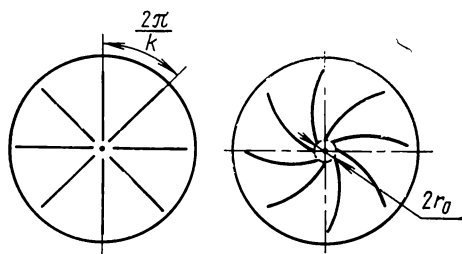


Рис. 19.15. Сетки дальномерного устройства

к следующему. Определив тип цели, оператор рукояткой 7 по шкале 8 устанавливает базу цели, а вращением рукоятки 5 изменяет диаметр точечного кольца, непрерывно обрамляя им цель.

Приведенные ниже расчеты показывают, что при соблюдении этих требований угол поворота сетки 2, а следовательно, и угол поворота движка потенциометра 3, функционально связан с дальностью до цели. Если потенциометр нелинейный, то с него можно получить электрический сигнал, пропорциональный дальности.

Расчет двухсеточного дальномера сводится, в основном, к трем пунктам:

- а) к определению значений r_0 и α ;
- б) к определению связи между углом поворота φ_1 сетки 1 и значением базы Б;
- в) к установлению связи между углом поворота φ_2 сетки 2 и значением дальности до цели — L .

Для расчета задаются минимальное и максимальные значения базы цели $B_{\min}$ и $B_{\max}$; минимальное и максимальные значения

дальности до цели $L_{\min}$ и $L_{\max}$, фокусное расстояние объектива $f'_{об}$ и средний курсовой угол цели q_{cp} ; число прорезей на сетках — k .

Для нахождения r_0 и a необходимо найти минимальное и максимальное значение диаметра точечного кольца ($D_{\min}$ и $D_{\max}$). В соответствии с формулой (19.4) (учитывая, что отрезок l равен диаметру кольца) имеем

$$D_{\min} = \frac{B_{\min}}{L_{\max}} f'_{об} \cos q_{cp}, \quad (19.6)$$

$$D_{\max} = \frac{B_{\max}}{L_{\min}} f'_{об} \cos q_{cp}. \quad (19.7)$$

В соответствии с формулой (19.5) минимальный диаметр кольца получим при $\varphi=0$:

$$D_{\min} = 2r_{\min} = 2r_0. \quad (19.8)$$

Из выражений (19.6) и (19.8) имеем

$$r_0 = \frac{1}{2} \frac{B_{\min}}{L_{\max}} f'_{об} \cos q_{cp}. \quad (19.9)$$

Максимальный диаметр дальномерного кольца будет иметь место при максимальном угле взаимного разворота сеток, который ограничивается числом прорезей

$$\varphi_{\max} = \frac{2\pi}{k},$$

поэтому

$$D_{\max} = 2r_{\max} = 2r_0 e^{a \frac{2\pi}{k}} \quad (19.10)$$

Из выражений (19.7) и (19.8) найдем:

$$a = \frac{k}{2\pi} \ln \frac{B_{\max} L_{\max}}{B_{\min} L_{\min}}.$$

Таким образом, величины r_0 и a найдены, т. е. уравнение криволинейных прорезей сетки 2 определено.

Для нахождения зависимостей вида $\varphi_1 = f(B)$ и $\varphi_2 = f(L)$ прологарифмируем выражение (19.4) с учетом того, что $l = D$ и $q = q_{cp}$:

$$\ln D = \ln B - \ln L + \ln (f'_{об} \cos q_{cp}). \quad (19.11)$$

Формулу (19.5) можно записать как

$$D = 2r_0 e^{a\varphi}.$$

Логарифмируя это выражение, получим

$$\ln D = \ln 2r_0 + a\varphi.$$

Полный угол сдвига сеток φ есть не что иное как сумма углов $\varphi_1 + \varphi_2$, а поэтому

$$\ln D = \ln 2r_0 + a\varphi_1 + a\varphi_2. \quad (19.12)$$

Приравнявая друг другу выражения (19.11) и (19.12), получим

$$\ln B - \ln L + \ln (f'_{об} \cos q_{ср}) = \ln 2r_0 + a\varphi_1 + a\varphi_2.$$

При $B = B_{min}$ $\varphi_1 = 0$, а поэтому

$$\varphi_2 = \frac{1}{a} \ln \frac{B_{min} f'_{об} \cos q_{ср}}{2r_0 L} = \frac{1}{a} \ln \frac{L_{max}}{L}. \quad (19.13)$$

При $L = L_{max}$ $\varphi_2 = 0$. Следовательно,

$$\varphi_1 = \frac{1}{a} \ln \frac{B f'_{об} \cos q_{ср}}{2r_0 L_{max}} = \frac{1}{a} \ln \frac{B}{B_{min}}. \quad (19.14)$$

Выражения (19.13) и (19.14) устанавливают связь между углами поворота сеток и значениями B и L . Имея эти зависимости и выбрав передаточные отношения кинематических цепей от сеток к рукояткам 5 и 7, можно рассчитать шкалы баз и дальностей.

Основной недостаток двухсеточного дальномерного устройства заключается в том, что точность обрамления цели невысока, ввиду малого количества точек в кольце (обычно их 8). Увеличить число точек в двухсеточном дальномерном устройстве можно лишь за счет увеличения числа прорезей сеток. Однако, при этом уменьшается значение Φ_{max} . Если сохранить передаточное число кинематической цепи от сеток к рукояткам и реостату прежним, то ухудшается точность измерения дальности вследствие уменьшения масштабов ввода величин B и L . Увеличение передаточного отношения приводит к росту габаритов механизма и появлению дополнительных погрешностей в кинематической цепи.

Для построения дальномерного кольца с большим числом точек применяется трехсеточный механизм. При создании изображения сплошного кольца лучше всего достигается обрамление цели.

На рис. 19.16 приведена схема устройства, дающая возможность получить изображение сплошного кольца. В фокальной плоскости объектива 1 прицела установлена

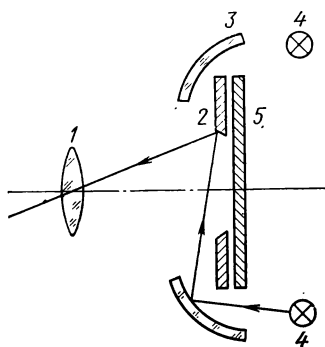


Рис. 19.16. Схема построения сплошного дальномерного кольца:

1—объектив прицела; 2—диафрагма; 3—торический рефлектор; 4—лампы; 5—шторка

ирисовая диафрагма 2 с полированной внутренней фаской. Фаска подсвечивается с помощью торического рефлектора 3 несколькими лампочками 4. Нерабочие поверхности диафрагмы 2 и шторки 5 покрыты матовой черной краской.

19.5. ГИРОМАГНИТНЫЕ ПОСТРОИТЕЛИ УГЛОВЫХ ПОПРАВОК

Гиромагнитные построители угловых поправок применяются в прицелах воздушной стрельбы для отклонения визирной линии прицела от ее нулевого положения на величину суммарной угловой поправки. Конструкция гиромагнитного построителя показана на рис. 19. 17.

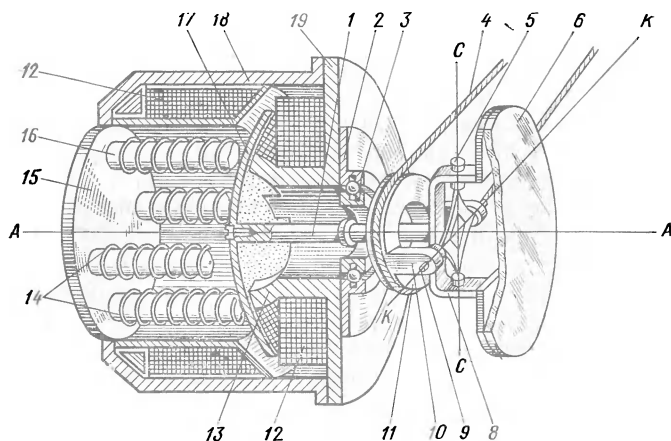


Рис. 19. 17. Гиромагнитный построитель угловых поправок:

1—ось гироскопа; 2, 3—наружное и внутреннее кольца подшипника; 4—гибкий тросик; 5, 9—опорные подшипники крестовины; 6—зеркало; 7—крестовина; 8—лапки оси гироскопа; 10—щечки шкива; 11—шкив; 12—основная обмотка; 13—выступы; 14—дополнительные обмотки; 15—диск; 16—сердечник; 17—чашка; 18—корпус; 19—крышка

Корпус 18 построителя имеет форму стакана и изготовлен из материала, имеющего хорошую магнитную проводимость. В дно стакана вставляется дюралюминиевый диск 15 с четырьмя пермаллоевыми сердечниками 16. Крышка 19 корпуса имеет четыре выступа 13, каждый из которых располагается напротив своего сердечника. Между стенкой корпуса и сердечниками 16 помещена обмотка 12. Вторая часть обмотки 12 размещается на выступах 13. Обе части обмотки соединены между собой последовательно и образуют основную обмотку гироскопического построителя, которая служит для построения поправки на упреждение.

На каждом из четырех сердечников 16 размещены обмотки 14. Они соединены между собой попарно последовательно. Пара последовательно соединенных обмоток 14 на верхнем и нижнем

сердечниках образуют вертикальную дополнительную обмотку построителя, а пара соединенных таким же образом обмоток на боковых сердечниках — горизонтальную дополнительную обмотку. Обе дополнительные обмотки служат для построения угла прицеливания.

Между сердечниками 16 и выступами 13 есть зазор ($\sim 1,5$ мм), в котором помещается дюралюминиевая сферическая чашка 17, закрепленная на одном конце оси 1 ротора трехступенного гироскопа. Другой конец оси ротора гироскопа заканчивается лапками 8, к которым крепится зеркало 6. В лапки 8 ввернуты два подшипника 5. В конические углубления подшипников входят своими концами крестовина. Боковые концы крестовины таким же образом входят в подшипники 9, закрепленные в щечках 10 шкива 11. Шкив крепится к внутреннему кольцу 3 шарикового подшипника. Наружное кольцо 2 этого подшипника закреплено на крышке корпуса построителя поправок. Через тросик 4 ось ротора гироскопа приводится во вращение вокруг оси AA от электродвигателя. Помимо этого ось ротора вместе с крестовиной может поворачиваться в подшипниках 9 вокруг оси KK и относительно крестовины вокруг оси CC в подшипниках 5. Такая система закрепления ротора гироскопа называется трехступенным кардановым подвесом. Точка пересечения осей AA , KK и CC , вокруг которой поворачивается гироскоп, является центром подвеса. Гироскоп статически и динамически сбалансирован относительно центра карданного подвеса. Центр шаровой поверхности чашки 17 находится также в точке пересечения осей. Зеркало 6 является частью оптической системы визира прицела (см. поз. 2, рис. 19.9 и 19.11). Поворот зеркала 6 вызывает поворот визирной линии прицела. Задачей гироскопического построителя поправок является построение такого угла поворота зеркала 6, чтобы поворот визирной линии был равен суммарной угловой поправке. Рассмотрим принцип работы построителя при выработке основных составляющих суммарной поправки.

Построение угла упреждения

Для построения угла упреждения по основной обмотке 12 пропускается ток I_0 . В пространстве вокруг обмотки возникает электромагнитное поле. Оно имеет форму четырех замкнутых потоков магнитных силовых линий. Каждый из потоков проходит сердечник, пересекает воздушный зазор между ним и выступом крышки и замыкается через крышку и корпус.

Вращаясь, чашка пересекает магнитные силовые линии и в месте пересечения в ней возникают короткозамкнутые токи Фуко, создающие собственные магнитные поля. Взаимодействие полей токов Фуко с основным полем порождает четыре силы P_1 — P_4 , тормозящие вращение ротора гироскопа (рис. 19.18).

Из теории электромагнитной индукции известно, что величина каждой силы определяется зависимостью

$$P_i = k_1 \Phi_0^2 V_i,$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности;

Φ_0 — величина магнитного потока;

V_i — линейная скорость прохождения чашки через поток у центра i -го сердечника.

Поскольку $\Phi_0 = k_2 I_0 W_0$ и

$$V_i = a_i \Omega,$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности;

Ω — угловая скорость вращения ротора гироскопа;

W_0 — число витков основной обмотки;

a_i — расстояние от оси ротора до центра i -го сердечника,

то

$$P_i = k_1 k_2^2 \Omega a_i (I_0 W_0)^2.$$

В нулевом положении ротора гироскопа расстояния от оси ротора до центра каждого из сердечников равны между собой (см. рис. 19.18), т. е. $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$. Поэтому все четыре силы также равны между собой ($P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P$) и на чашку действует лишь тормозной момент $M_T = 4Pa$, преодолеваемый электродвигателем.

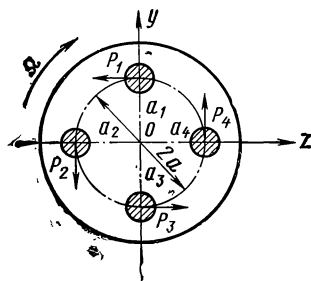


Рис. 19.18. Начальное взаимное расположение сердечников и чашки ротора гироскопа

При развороте прицела с угловой скоростью $\omega_{\text{п}}$ ось ротора гироскопа стремится сохранить свое положение в пространстве, а сердечники электромагнитной системы вместе с прицелом повернутся (рис. 19.19). Появляется смещение сердечников относительно чашки ротора, которое характеризуется величиной

$$m = r \varphi_0$$

где r — радиус сферической чашки;

φ — угол поворота ротора гироскопа относительно корпуса прицела.

Силы, действующие на чашку, изменятся. Найдем величину каждой силы:

$$P_1 = P_3 = k_1 k_2^2 \Omega (I_0 W_0)^2 a_1 = k_1 k_2^2 \Omega (I_0 W_0)^2 \frac{m}{\sin \beta},$$

$$P_2 = k_1 k_2^2 \Omega (I_0 W_0)^2 (a + m),$$

$$P_4 = k_1 k_2^2 \Omega (I_0 W_0)^2 (a - m).$$

Разложим силы P_1 и P_3 на составляющие R_1, Q_1, R_3, Q_3 и найдем сумму проекций всех сил на оси Oy и Oz :

$$\begin{aligned}\sum P_z &= Q_1 - Q_3 = P_1 \cos \beta - P_3 \cos \beta = 0, \\ \sum P_y &= R_1 + P_2 + R_3 - P_4 = P_1 \sin \beta + P_2 + P_3 \sin \beta - \\ &\quad - P_4 = 4k_1 k_2^2 r \Omega (I_0 W_0)^2 \varphi.\end{aligned}$$

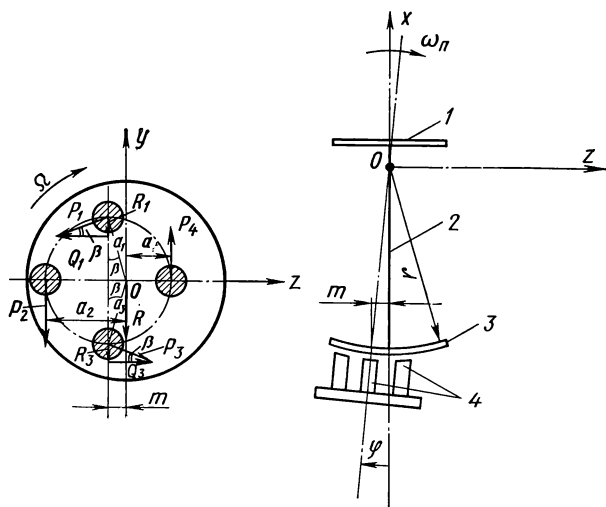


Рис. 19. Взаимное положение сердечников и чашки при развороте прицела:

1—зеркало; 2—ось гироскопа; 3—чашка; 4—сердечники

Таким образом, при развороте магнитной системы относительно оси ротора гироскопа на угол φ на чашку будет действовать результирующая сила

$$R' = \sum P_y = 4k_1 k_2^2 r \Omega (I_0 W_0)^2 \varphi.$$

Сила R' направлена вниз вдоль оси Oy . Точка приложения силы R' лежит на оси Oz левее центра чашки. Действие этой силы на ротор гироскопа можно представить как тормозной момент, равный произведению величины силы R' на расстояние от точки ее приложения до центра чашки, и силу R , приложенную к центру чашки, создает момент относительно центра подвеса ротора гироскопа, равный

$$M = rR = 4k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2 \varphi. \quad (19.15)$$

Под действием этого момента ротор гироскопа начнет прецессировать со скоростью $\omega_{пр}$. Направление прецессии ротора гироскопа определяется из рис. 19. 20.

Поскольку угловая скорость прецессии должна быть направлена так, чтобы совместить вектор $\vec{H}$ с вектором $\vec{M}$ по кратчайшему пути, то из рис. 19.20 видно, что направления ω_{π} и $\omega_{\text{пр}}$ совпадают.

Из теории гироскопа известно, что

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{M}{H} \sin(\vec{M}\vec{H}),$$

а поскольку в данном случае угол между векторами $\vec{M}$ и $\vec{H}$ равен 90° , то

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{M}{H}.$$

Учитывая формулу (19.15), получим

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{4}{H} k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2 \varphi. \quad (19.16)$$

Формула (19.16) показывает, что угловая скорость прецессии пропорциональна углу поворота ротора гироскопа. В начальный момент времени (при $\varphi=0$) $\omega_{\text{пр}}$ также равна нулю. Поворот прицела вызовет появление угла φ и прецессию гироскопа в том же направлении. Совершенно очевидно, что увеличение угла φ происходит до тех пор, пока угловая скорость прецессии не станет равной угловой скорости поворота прицела. Режим, при котором $\omega_{\text{пр}} = \omega_{\pi}$, назовем установившимся режимом работы прицела. В этом режиме при заданных конструктивных параметрах гироманнитного построителя и данном токе I_0 каждому значению ω_{π} соответствует свое значение угла φ .

В неустановившемся режиме, т. е. до наступления момента равенства $\omega_{\text{пр}} = \omega_{\pi}$, угловая скорость прецессии меньше угловой скорости разворота прицела на величину скорости изменения угла φ , т. е.

$$\omega_{\text{пр}} = \omega_{\pi} - \dot{\varphi}. \quad (19.17)$$

Подставляя значение $\omega_{\text{пр}}$ в (19.16), найдем

$$\varphi = \frac{H}{4 k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2} (\omega_{\pi} - \dot{\varphi}). \quad (19.18)$$

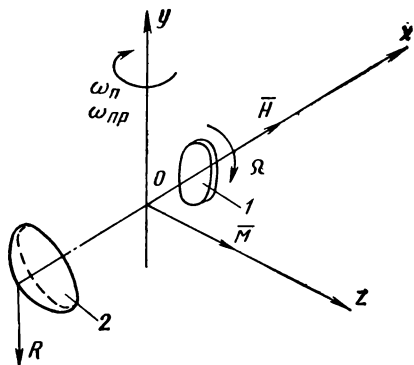


Рис. 19.20. Схема для определения направления скорости прецессии:

1—зеркало; 2—чашка; O—центр подвеса ротора гироскопа; $\vec{H}$ —вектор кинетического момента гироскопа; $\vec{M}$ —вектор момента, действующего на гироскоп

При повороте ротора гироскопа на угол φ вместе с ним поворачивается и закрепленное на нем зеркало. Это приводит к повороту визирной линии прицела на угол ψ . Причем (см. разд. 19.3)

$$\psi = \frac{\varphi}{\mu}, \quad (19.19)$$

где μ — передаточный коэффициент оптической системы.

Дифференцирование при $\mu = \text{const}$ дает

$$\dot{\psi} = \mu \dot{\varphi}. \quad (19.20)$$

Подставляя (19.19) и (19.20) в (19.18), получим

$$\psi = \frac{H}{4\mu k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2} (\omega_{\Pi} - \mu \dot{\psi}). \quad (19.21)$$

Выражение (19.21) представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее работу прицела при наличии тока I_0 в основных обмотках построителя поправок. Это уравнение можно представить в несколько ином виде, если учесть, что между угловой скоростью разворота прицела ω_{Π} и угловой скоростью поворота визирной линии $\omega_{в.л}$ имеет место связь, аналогичная (19.17)

$$\omega_{\Pi} = \omega_{в.л} - \dot{\psi},$$

где $\dot{\psi}$ — скорость изменения угловой поправки.

Тогда

$$\psi = \frac{H}{4\mu k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2} [\omega_{в.л} - (\mu - 1) \dot{\psi}]. \quad (19.22)$$

Поскольку с помощью основных обмоток должен вырабатываться угол упреждения, то сопоставим (19.22) с формулой (18.7), которая дает величину теоретически необходимого угла упреждения. Сравнение показывает, что для обеспечения правильной работы прицела нужно выполнить два условия

$$\omega_{в.л} = \omega_{\Pi}, \quad (19.23)$$

$$\frac{H}{4\mu k_1 k_2^2 r^2 \Omega (I_0 W_0)^2} = t_{\Phi}. \quad (19.24)$$

При выполнении этих условий получим

$$\psi = [\omega_{\Pi} - (\mu - 1) \dot{\psi}] t_{\Phi}. \quad (19.25)$$

Выражение (19.25) отличается от (18.6) членом $(\mu - 1) \dot{\psi}$. Это показывает, что прицел строит угол упреждения с ошибкой, величина которой зависит от значения передаточного коэффициента μ . При $\mu = 1$ ошибка исчезает. При $\mu \neq 1$ ошибка отсутст-

вует лишь в установившемся режиме работы прицела, когда $\dot{\varphi} = \dot{\psi} = 0$.

Выполнение условия (19.23) обеспечивается за счет того, что оператор в процессе прицеливания непрерывно совмещают с целью изображение прицельной марки, т. е. следит визирной линией прицела за целью (см. разд. 19.2). Для выполнения условия (19.24) необходимо подать в основную обмотку ток I_0 , функ-

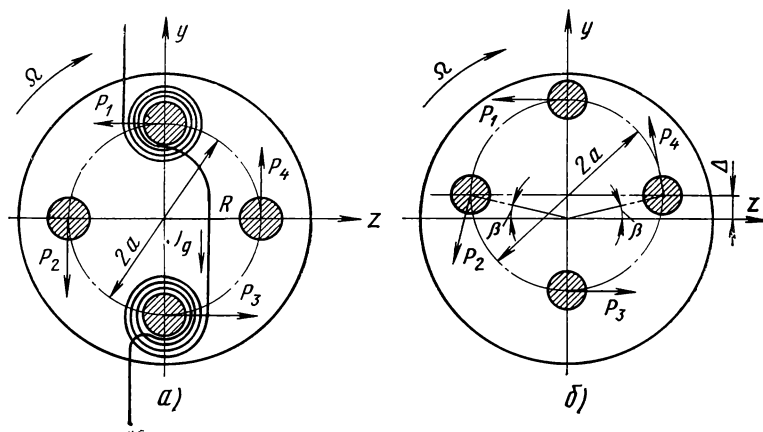


Рис. 19.21. К расчету тока в дополнительной обмотке построителя

ционально связанный с фиктивным полетным временем снаряда $t_{\text{ф}}$. Величину тока можно найти из (19.24)

$$I_0 = \frac{1}{2k_2 r W_0} \sqrt{\frac{H}{\mu k_1 \Omega}} \frac{1}{\sqrt{t_{\text{ф}}}} = \frac{k_3}{\sqrt{t_{\text{ф}}}}, \quad (19.26)$$

где $k_3 = \frac{1}{2k_2 r W_0} \sqrt{\frac{H}{\mu k_1 \Omega}} = \text{const}$ и зависит от конструктивных и кинематических параметров прицела.

С помощью основной обмотки гироманнитного построителя строится угловая поправка лишь при наличии угловой скорости разворота прицела, а поэтому она может использоваться только для построения угла упреждения. Однако для решения задачи воздушной стрельбы прицел должен вырабатывать ряд поправок вне зависимости от того, разворачивается прицел при слежении за целью или нет. К таким поправкам относится, например, угол прицеливания.

Для построения угла прицеливания на каждом из четырех сердечников магнитной системы построителя помещены дополнительные обмотки 14 (см. рис. 19.17). Обмотки верхнего и нижнего сердечников соединены последовательно и намотаны так, что при пропускании в них тока $I_{\text{д}}$ магнитный поток, создаваемый ими в верхнем сердечнике, ослабляет поток, создаваемый

мый основной обмоткой, а в нижнем сердечнике — усиливает его. Поэтому сила, действующая на чашку у верхнего сердечника, станет меньше, а у нижнего сердечника — больше (рис. 19.21, а). Появится равнодействующая сила, вызывающая прецессию гироскопа. Направление прецессии всегда таково, что при смещении чашки относительно сердечников на Δ (см. рис. 19.21, б) равнодействующая исчезает. Задача расчета тока I_d такова, что поворот оси ротора гироскопа приводит к построению угла прицеливания.

19.6. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРИЦЕЛА ДЛЯ НЕПОДВИЖНОГО ОРУДИЯ

Для уяснения взаимодействия всех узлов прицела рассмотрим одну из возможных функциональных схем прицела для неподвижного орудия, изображенную на рис. 19.22. Напомним, что

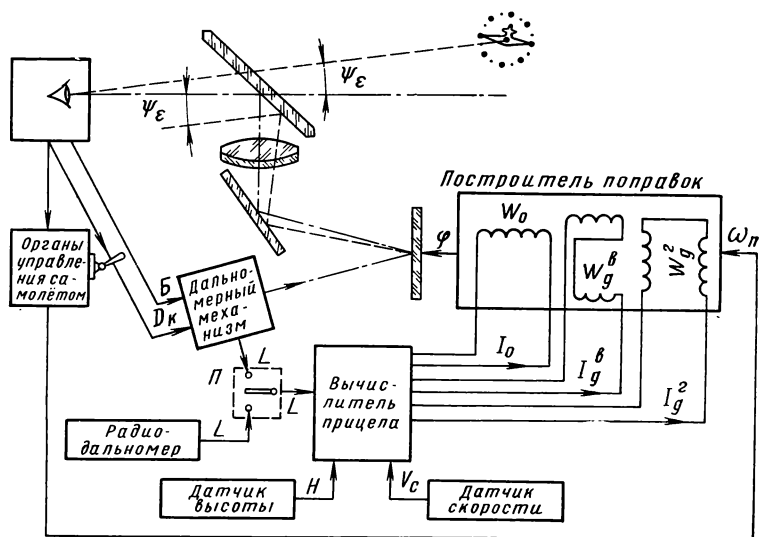


Рис. 19.22. Функциональная схема ПВС для неподвижного орудия

неподвижное стрелково-пушечное вооружение применяется на истребителях, где летчик одновременно является и стрелком, а прицеливание осуществляется разворотом всего самолета.

При обнаружении цели летчик должен определить ее тип и установить в дальномерном механизме базу цели — Б. Затем производит сближение с целью на дальность огня и, воздействуя на органы управления самолетом, совмещает центральную точку сетки прицела с целью. Одновременно производится обрамление цели дальномерным кольцом. Для того чтобы не усложнять пилотирование, рукоятка изменения диаметра дальномерного коль-

ца устанавливается на одном из органов управления самолетом. При введенных B и D_k дальномерный механизм вырабатывает дальность цели L , которая при соответствующем положении переключателя Π поступает в вычислитель прицела.

Второе положение переключателя обеспечивает автоматический (основной) режим ввода дальности в прицел от радиодальномера.

Датчики высоты и скорости полета самолета непрерывно измеряют и вводят в вычислитель значения H и V_c . Баллистические параметры орудия введены в вычислитель заранее, при установке прицела на борт самолета.

На базе введенных данных вычислитель вырабатывает напряжения, обратно пропорциональные фиктивному полетному времени снаряда t_f . Этими напряжениями запрашиваются основная и дополнительная обмотки построителя угловых поправок.

В основную обмотку гироскопического построителя поправок из вычислителя поступает ток $I_0 = k_s / \sqrt{t_f}$ в соответствии с формулой (19.26). При слежении визирным лучом за целью корпус прицела разворачивается вместе с самолетом с угловой скоростью ω_{Π} . В этих условиях зеркало гироскопа поворачивается относительно своего нулевого положения на угол, соответствующий повороту визирной линии прицела от ее нулевого положения на угол упреждения. Если при слежении за целью самолет не разворачивается ($\omega_{\Pi} = 0$), что имеет место при атаках с курсовыми углами $q = 0$ (атака сзади, в хвост цели) и $q = 180^\circ$ (лобовая атака), то прицел угла упреждения не вырабатывает (напомним, что при относительной угловой скорости цели, равной нулю, вводить поправки на упреждение не нужно).

В дополнительные обмотки гироскопического построителя из вычислителя поступает ток. Зеркало гироскопа поворачивается, смещая визирную линию на угол прицеливания. Суммарный поворот визирной линии ψ_z равен геометрической сумме углов упреждения и прицеливания.

Глава 20

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Мореплавание, дальние полеты самолетов и космических кораблей невозможны без аппаратуры, обеспечивающей проведение их по заданной траектории в назначенное время. Эта задача решается методами и приборами мореходной, воздушной и космической навигации, которые позволяют определить местоположение, ориентацию опорных осей аппарата относительно принятой системы координат, величину и направление скорости движения, направление и расстояние до цели и т. д.

В навигации широкое применение находят астрономические методы, основанные на определении положения известных небесных светил относительно выбранной системы координат. Реализация этих методов осуществляется при помощи астрономических оптических и оптико-электронных навигационных приборов.

Астронавигационным приборам свойственна автономность измерения, ограниченная только видимостью небесных светил (в приземной области) и высокая точность определения координат места, не зависящая от длительности, дальности, высоты и скорости полета.

В соответствии с назначением астронавигационные оптико-электронные приборы можно разделить на следующие группы:

- приборы для ориентации опорных осей КА в пространстве;

- приборы для определения местоположения летательного аппарата;

- астрономические курсовые приборы.

Чтобы определить задачи, решаемые каждой группой приборов, и уяснить принципы устройства самих приборов, дадим краткие сведения из основ астронавигации.

20.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ СВЕТИЛ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПРОСТРАНСТВЕ

Системы небесных координат

Для определения положения светила и КА в пространстве в астрономии применяют несколько систем координат. Положение планет относительно Солнца и орбиты Земли наиболее удобно определять в эклиптической системе координат, положение светил относительно Земли удобно определять в экваториальной и горизонтальной системах небесных координат. В любой системе сферических небесных координат применяется вспомогательная сфера произвольного радиуса, называемая небесной сферой, с центром в одной из точек пространства. Светила проектируются на эту сферу.

Эклиптическая система координат (рис. 20.1). **Эклиптикой** называется большой круг небесной сферы, образованный в результате пересечения плоскости орбиты Земли с небесной сферой.

Основными кругами эклиптической системы координат являются эклиптика и круг широты светила. Кругом широты светила называют большой круг небесной сферы, проходящей через светило M и полюсы эклиптики P и P' .

Положение светила в этой системе координат определяется **астрономической долготой λ** и **астрономической широтой β** . Долгота отсчитывается от точки весеннего равноденствия вдоль эклиптики в направлении годового движения Земли до точки пересечения круга широты светила с эклиптикой.

Экваториальная система координат (рис. 20.2). Основной определяющей плоскостью является плоскость небесного экватора, совпадающая с плоскостью земного экватора. Продолжение оси вращения Земли образует ось мира, а ее пересечение с небесной сферой — Северный P и Южный P' полюсы мира.

Большой круг небесной сферы, проходящей через полюсы мира и светило, называется **кругом склонения светила**. Положение

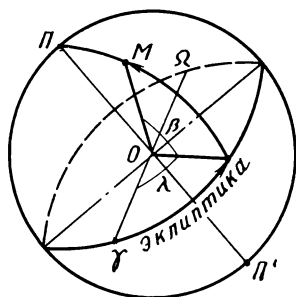


Рис. 20.1. Эклиптическая система координат

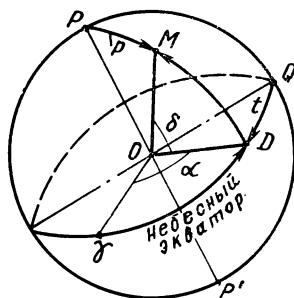


Рис. 20.2. Экваториальная система координат

ние светила на небесной сфере определяется **прямым восхождением α** и **склонением светила δ** .

Прямое восхождение отсчитывается от точки весеннего равноденствия в направлении, противоположном видимому суточному вращению небесной сферы.

Склонение светила отсчитывается по кругу склонения светила в обе стороны от небесного экватора от 0 до $\pm 90^\circ$.

Иногда вместо склонения пользуются полярным **расстоянием** светила. Полярное расстояние p — это угол между осью мира и направлением из центра небесной сферы на светило.

Видимое вращение небесной сферы из-за суточного вращения Земли происходит относительно оси мира, а следовательно, экваториальные координаты светил не изменяются. Это позволяет в данной системе координат строить карты звездного неба. Зная экваториальные координаты космического корабля, можно определить его положение среди звезд.

Иногда положение светила определяется склонением светила и его часовым углом. Угол между плоскостью небесного меридиана * и кругом склонения светила называется **часовым углом**

* **Меридианом** (меридианом наблюдателя) называют линию пересечения небесной сферы с плоскостью, проходящей через полюсы мира и линию отвеса (Oz), проведенную через точку на поверхности Земли, в которой находится наблюдатель.

светила t . Часовой угол светила измеряется дугой экватора QD , отсчитывается от точки Q экватора на запад, в направлении суточного вращения небесной сферы от 0 до 360° . Для наблюдателя, находящегося на нулевом (гринвичском) меридиане, часовой угол светила называют гринвичским часовым углом $t_{гр}$. За счет видимого суточного вращения небесной сферы часовой угол изменяется равномерно. Это позволяет выражать часовой угол не только в угловой мере, но и в единицах измерения времени (часах, минутах, секундах).

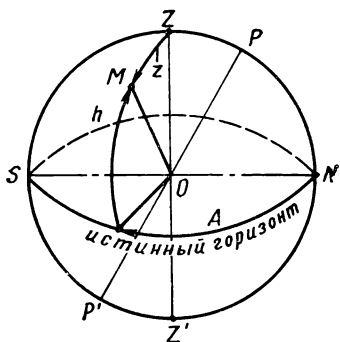


Рис. 20.3. Горизонтальная система координат

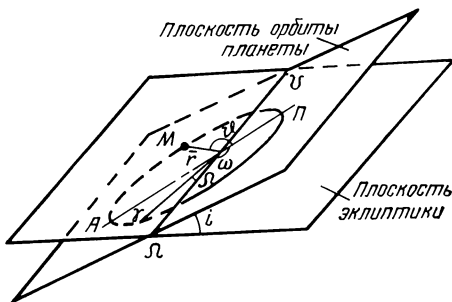


Рис. 20.4. Элементы планетных орбит

Горизонтальная система координат (рис. 20.3). Основной определяющей плоскостью является плоскость истинного горизонта.

Полюсом этой системы координат является точка пересечения отвесной линии с небесной сферой, называемая зенитом Z . Большой круг небесной сферы, проходящий через зенит, противоположную ему точку (надир Z') и светило (или космический корабль), называется вертикалом светила a . Положение объекта в горизонтальной системе координат определяется азимутом A и высотой h или зенитным расстоянием светила z . Азимут отсчитывается от точки севера N на восток, а высота измеряется дугой вертикала от истинного горизонта до светила в пределах от 0 до $\mp 90^\circ$.

Если спроектировать светило на поверхность Земли, получим точку, в которой его высота равна 90° . Эта точка называется **географическим местом светила** (ГМС). Из-за вращения Земли эта точка перемещается по земной поверхности. По аналогии точка, в которой высота космического корабля равна 90° , может быть названа **географическим местом космического корабля**.

Переход от одной системы координат к другой осуществляется по формулам сферической тригонометрии. Рассмотренные выше системы сферических координат обладают одним существенным недостатком: по ним нельзя определить положение све-

тила в пространстве. Решение же подавляющего числа задач космической навигации требует знания положения в пространстве космического корабля и небесных тел. С этой целью при полетах внутри Солнечной системы можно воспользоваться прямоугольной гелиоцентрической системой координат. Начало координат совмещается с центром Солнца. Положение объекта в этой системе определяется сферическими координатами и длиной радиуса-вектора. Элементы планетных орбит (рис. 20.4) см. в работе [15].

Методы навигации

Методы навигации — совокупность измерений первичных параметров и вычислительных операций, позволяющих определить скорость движения и координаты местонахождения объекта.

По способу получения координат места, астрономические методы навигации делят на следующие группы:

- методы счисления пути;
- методы поверхностей положения;
- обзорно-сравнительные методы.

Методы счисления пути рассчитаны на получение координат места интегрированием во времени измеренных ускорений или скоростей. К этой группе относятся методы воздушного, инерциального, радиолокационно-доплеровского и астро-доплеровского счисления пути.

Рассмотрим возможность создания оптико-электронных навигационных приборов на основе астро-доплеровского метода счисления пути.

Для определения скорости движения космического летательного аппарата относительно принятой системы координат может быть использован эффект Доплера относительно выбранных опорных небесных светил, собственные движения которых известны. Если КА и небесное светило движутся навстречу друг другу с относительной скоростью $V_{отн}$, то с помощью спектрографа, установленного на КА, можно обнаружить смещение $\Delta\lambda$ линий спектра света, излучаемого небесным светилом. Величина смещения длины волны связана с относительной скоростью зависимостью

$$\frac{V_{отн}}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \text{ или } V_{отн} = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

где c — скорость света;

λ — длина волны.

Таким образом, по смещению длины спектра можно определить скорость относительно КА небесного светила. Если в качестве навигационной системы координат используется, например, экваториальная декартова система координат $OXYZ$, то для навигации КА необходимо измерить три составляющие его скорости полета V_x , V_y , V_z относительно указанной системы координат.

нат. В настоящее время измерены скорости нескольких тысяч небесных тел относительно экваториальной системы координат. Зная векторы скорости небесных светил, а следовательно, и их составляющие V_{xi} , V_{yi} , V_{zi} по осям принятой системы координат, и определив по смещениям линий спектра света скорости относительно этих светил, можем вычислить скорости V_x , V_y , V_z полета корабля по формуле

$$V_{\text{отн } i}^2 = (V_{xi} - V_x)^2 + (V_{yi} - V_y)^2 + (V_{zi} - V_z)^2,$$

где $i=1, 2, 3$ — номера светил.

По известным координатам места старта и полученным скоростям V_x , V_y , V_z можно вычислить путь, пройденный КА за время t , а следовательно, и его текущие координаты x , y , z . Техническая реализация спектрометров нужной чувствительности довольно трудна. Поэтому астро-доплеровский метод счисления пути можно отнести пока к разряду возможных и перспективных методов космической навигации. Астро-доплеровские системы позволяют измерить скорость космического корабля относительно Солнца с ошибкой до 1 м/с и относительно звезд (при выделении одновременно пяти спектральных линий) с ошибкой до 90 м/с.

Методы поверхностей положения заключаются в определении координат с использованием трех поверхностей положения, полученных в результате физических измерений. К этой группе методов относятся астрономические, радиотехнические, магнитные, изобарические и др.

При астрономической навигации координаты места могут быть определены с помощью астрономических поверхностей положения. Рассмотрим некоторые из них. Если с помощью бортовых приборов удается измерить расстояние до центра небесного тела R , то геометрическим местом точек при $R=\text{const}$ будет сфера, т. е. поверхность постоянных расстояний до центра небесного тела. Полагая, что координаты x_M , y_M , z_M центра небесного тела M относительно какой-либо навигационной системы координат известны, получим уравнение сферы, позволяющее найти связь между измеренным радиусом R и координатами места наблюдателя x , y , z :

$$R^2 = (x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + (z - z_M)^2.$$

Для решения уравнения с тремя неизвестными величинами x , y , z необходимо иметь по крайней мере три уравнения

$$R_i^2 = (x - x_{Mi})^2 + (y - y_{Mi})^2 + (z - z_{Mi})^2,$$

где $i=1, 2, 3$ — номера светил.

Совместное решение этих уравнений дает координаты двух точек, в которых пересекаются три сферические поверхности, определяемые этими уравнениями. Одна из точек пересечения поверхностей определяет координаты места летательного аппарата.

Поскольку точность измерения угловых величин с помощью оптико-электронных приборов обычно выше, чем точность измерения расстояний, то предпочтение может быть отдано поверхностям положения, полученным в результате измерения углов. Так, например, если измерить угол γ между направлением на центр какой-либо планеты и центр звезды, то при $\gamma = \text{const}$ получим поверхность постоянных углов между планетой и звездой, представляющую собой конус с вершиной в центре планеты. Составив уравнения трех поверхностей положения и решая их совместно, можно также вычислить координаты места летательного аппарата.

Обзорно-сравнительные методы навигации основаны на сравнении оптического, инфракрасного, радиолокационного и других изображений Земли, планет или звездного неба с географическими картами, географическими или звездными глобусами.

Обзорно-сравнительные методы различаются по способу обзора местности или окружающего пространства и степени автоматизации процессов сравнения изображений.

20.2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Астрономические методы и приборы навигации позволяют определить местонахождение наблюдателя или какого-либо аппарата путем наблюдения, визирования и автоматической пеленгации объектов космического пространства. Такими объектами являются звезды, планеты, их естественные и искусственные спутники. Объекты космического пространства обладают как собственным (первичным) так и отраженным (вторичным) излучением. Собственное температурное излучение объекта определяется температурой поверхности, формой, размерами и свойствами излучающей поверхности. Отраженное излучение зависит от источника излучения. Для наблюдения и пеленгации навигационных объектов используется их излучение в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. При проектировании визуальных и оптико-электронных систем приборов астронавигации необходимо знать интегральную мощность и спектральный состав излучения, а в некоторых случаях, и его пространственную диаграмму.

В связи с этим дадим краткую характеристику излучения основных навигационных объектов космического пространства.

Звезды. Солнце

Звезды. Подобно Солнцу, звезды — гигантские раскаленные самосветящиеся газовые шары с огромной температурой, находящиеся от нас на громадных расстояниях.

При выборе звезд в качестве астрономических ориентиров важное значение имеет положение звезды на небесной сфере, ее яркость и спектральный состав излучения. Для удобства ориентировки на звездном небе оно условно разделено на 88 участков-созвездий. Звезды в созвездиях обозначаются буквами греческого алфавита в порядке убывания их яркости, кроме того, наиболее яркие звезды имеют названия.

Оценивая яркость звезд, правильнее говорить о блеске звезд. Пока угловые размеры звезд не могут быть измерены, освещенность, которую они создают на Земле, является единственной величиной, характеризующей мощность их излучения. Под **блеском** понимается освещенность, которую создает звезда у границы земной атмосферы (земной поверхности или другом каком месте) на площадке, перпендикулярной направлению распространения лучей.

Блеск звезд можно оценивать различными способами: визуально, т. е. глазом, фотографически (сравнивая плотности изображения звезд на негативе), с помощью фотоэлектрических приемников энергии излучения. Все эти приемники излучения имеют различную чувствительность к излучению на разных длинах волн. Отсюда возникает различие между визуальной, фотографической, фотоэлектрической и другими оценками блеска звезд. В современной электрофотометрии используется в качестве основной фотометрическая система, введенная Джонсоном и Морганом (США) и обозначенная буквами *UBV* (по начальным буквам английских слов ультрафиолетовые лучи *Ultraviolet*, синие — *Blue* и визуальные — *Visual*).

В этой системе блеск звезд измеряется на длинах волн вблизи 0,350, 0,435 мкм и 0,555 мкм, а для более длинноволновой области спектра — 0,680 мкм (*R* — красные лучи) и 0,825 мкм (*I* — инфракрасные лучи). Кривые относительной спектральной чувствительности приемников энергии излучения для этой системы показаны на рис. 20. 5.

Количественно блеск звезд оценивается в звездных величинах. Шкала звездных величин установлена так, чтобы отношение *n* блеска звезды предыдущей звездной величины E_m к блеску звезды последующей звездной величины E_{m+1} было постоянным:

$$\frac{E_m}{E_{m+1}} = n = \text{const.}$$

Тогда, в общем виде зависимость между блеском и звездными величинами сравниваемых звезд можно выразить формулой

$$\frac{E_{m_i}}{E_{m_k}} = n^{(m_k - m_i)}. \quad (20. 1)$$

В 1856 году, по предложению Погсона, отношение блеска любых двух звезд при разности $(m_k - m_i)$ в пять звездных вели-

чин было принято равным 100. При этом условии отношение блеска при разности в одну звездную величину, т. е. число n равно 2,512,

$$\frac{E_{m_i}}{E_{m_k}} = n^5 = 100, \text{ откуда } n = \sqrt[5]{100} = 2,512.$$

Если условиться, что некоторая звезда имеет блеск соответствующей по шкале нулевой звездной величины $m_i = m_0 = 0$, то звездные величины других светил ($m_k = m$) можно достаточно просто определить по отношению к этой опорной звезде: $\frac{E_{m_0}}{E_m} = n^m$.

Если прологарифмировать эту зависимость, то получим

$$m = \frac{1}{\lg 2,512} \lg \frac{E_{m_0}}{E_m} \text{ или } m = -2,5 \lg \frac{E_m}{E_{m_0}}, \quad (20.2)$$

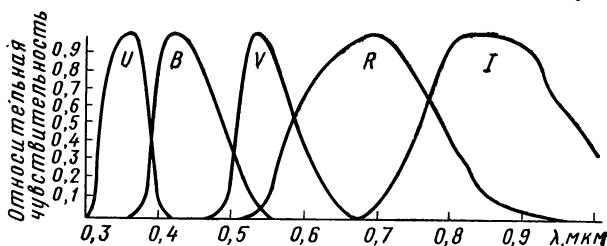


Рис. 20. 5. Кривые относительной спектральной чувствительности ПЛЭ в системе VBV

где E_m — освещенность в люксах или энергетическая освещенность в Вт/м², создаваемая звездой;

E_{m_0} — некоторая стандартная освещенность или энергетическая освещенность, создаваемая звездой нулевой звездной величины.

Нулевой член F_{m_0} ряда звездных величин произволен*.

Формула (20.2) выражает связь между звездной величиной и яркостью (блеском) звезды и позволяет в зависимости от метода измерения освещенности рассчитать данные каталога звезд, определяющие их визуальные, фотографические, фотоэлектрические и другие звездные величины.

Для более точной характеристики блеска светил звездные величины выражаются не только целыми, но также и дроб-

* Наиболее часто при расчетах визуальной шкалы звездных величин у границы земной атмосферы принимают $E_{m_0}^k = 2,77 \cdot 10^{-6}$ лк, а на земной поверхности (с учетом поглощения в атмосфере) $E_{m_0}^3 = 2,10 \cdot 10^{-6}$ лк. Тогда величина $2,5 \lg E_{m_0}$ соответственно равна $-13,89$ и $-14,20$ и видимая звездная величина определяется выражениями

$$m^k = -13,89 - 2,5 \lg E_m^k$$

и

$$m^3 = -14,20 - 2,5 \lg E_m^3$$

ными числами, а наиболее яркие светила имеют даже отрицательную звездную величину.

В инженерных расчетах обычно приходится решать обратную задачу. Зная звезду, выбранную в качестве навигационного ориентира, по каталогу находят ее звездную величину и по приведенным формулам определяют освещенность, создаваемую этой звездой на входном зрачке астронавигационного прибора.

В нашей звездной системе существуют миллиарды звезд. Однако звезд, обладающих большим блеском, сравнительно немного. Невооруженным глазом можно различить звезды до шестой звездной величины. Таких звезд на небесной сфере насчитывается около 6000.

Рассмотренная шкала звездных величин определяет блеск звезд при наблюдении их с орбиты Земли и не позволяет судить ни об общей энергии, излучаемой звездой, ни о яркости ее поверхности. Действительно, вследствие различия в расстояниях сравнительно холодная звезда только из-за своей относительной близости к нам будет иметь значительно меньшую звездную величину (т. е. казаться ярче), чем горячий гигант, удаленный на значительно большее расстояние. Чтобы судить о действительной энергии, излучаемой звездой, достаточно освещенность, создаваемую этой звездой, отнести к общему стандартному расстоянию.

Звездная величина, которую имела бы звезда, если ее наблюдать с расстояния 10 парсек *, называется абсолютной звездной величиной M . Связь между звездными величинами, полученными с орбиты Земли и абсолютными звездными величинами определяется по формуле

$$M = m + 5 - 5 \lg r, \quad (20.3)$$

где r — расстояние до звезды, выраженное в парсеках.

Поток энергии, излучаемый звездой по всем направлениям, называется светимостью. Обычно светимость звезды L выражается по отношению к Солнцу и вычисляется по ее абсолютной звездной величине по формуле

$$\lg \frac{L}{L_{\odot}} = 0,4(4,77 - M) = 1,91 - 0,4M, \quad (20.4)$$

где $L_{\odot}$ — общая светимость (или общая радиация) Солнца, равная $3,86 \cdot 10^{26}$ Вт.

Спектральная и цветовая классификация звезд. Звезды имеют непрерывный спектр, на который накладываются спектральные линии, чаще всего линии поглощения. В спектрах некоторых звезд наблюдаются яркие (эмиссионные) линии. Важнейшие различия спектров заключаются в количест-

* 1 парсек = $30,857 \cdot 10^{12}$ км = 206265 астрономических единиц (ае) = 3,263 светового года.

ве и интенсивности наблюдаемых спектральных линий, а также в распределении энергии в непрерывном спектре.

Количественным критерием принадлежности звезды к тому или иному спектральному классу является отношение интенсивностей определенных спектральных линий.

В основу современной спектральной классификации легла Гарвардская классификация, согласно которой спектральные классы обозначаются буквами латинского алфавита: *O, B, A, F, G, K, M*. Чтобы более точно охарактеризовать спектральный состав излучения в каждом классе, звезды подразделяются еще на группы, обозначаемые номерами от 0 до 9, прибавляемыми к буквам. Когда в дальнейшем среди звезд одного и того же класса выявились группы карликов, гигантов и сверхгигантов, то в обозначениях спектральных классов стали указывать последовательность, к которой относится звезда. Так, например, *A4V, F8Ib, KOIII* и т. д.

Исследования показали, что звезды, принадлежащие к различным спектральным классам, отличаются своими температурами. Поскольку звезды излучают не как абсолютно черные тела, то их излучение принято определять **эффективной температурой**.

Эффективной температурой называется температура такого абсолютно черного тела, каждый квадратный сантиметр которого во всем спектре излучает такой же поток энергии, как и 1 см^2 данного тела.

Распределение энергии вдоль спектра излучения звезды определяется ее цветовой температурой.

Чтобы установить зависимость между цветом и температурой звезды, вводится объективная характеристика, называемая показателем цвета, и эмпирически устанавливается ее связь с эффективной температурой звезды.

Показателем цвета CI (Color Index) называется разность между фотографической и визуальной звездными величинами, либо вообще разность звездных величин в каких-либо двух измерениях, например $B - V$, $U - V$ и т. д.

Таким образом, зная звездную величину, эффективную температуру излучающей поверхности звезды и спектральную чувствительность приемника энергии излучения, можно выполнить энергетический расчет астронавигационного прибора, определить величину входного зрачка оптической системы, обеспечивающую визирование и пеленгацию светила.

Солнце — самая близкая к нам звезда. Среднее расстояние от Земли до Солнца равно одной астрономической единице, т. е. 149598500 ± 500 км. Диаметр Солнца 1390000 км (в $109,1$ раза больше диаметра Земли); угловые размеры видимого с Земли диска Солнца составляют при максимальном приближении (начало января $32'36''$, а при максимальном удалении (начало июля) — $31'32''$. Солнце представляет собой раскаленное газовое тело.

В недрах Солнца происходят реакции, которые являются источником энергии, излучаемой Солнцем в мировое пространство. Самые внешние слои Солнца, излучение которых можно наблюдать, называются солнечной атмосферой. Она состоит из трех слоев: фотосферы, хромосферы и короны. **Фотосферой** называется основная часть солнечной атмосферы, в которой образуется видимое излучение, имеющее непрерывный спектр.

В хромосфере и короне плотность вещества быстро уменьшается с высотой и внешние слои солнечной атмосферы оказываются сильно разреженными. Поэтому даже при очень высокой температуре, примерно около миллиона градусов, излучение этих слоев атмосферы Солнца сравнительно невелико.

Яркость хромосферы в сотни раз меньше, чем фотосферы. Яркость солнечной короны в миллион раз меньше, чем фотосферы. Яркость солнечного диска непостоянна, по мере приближения к краю она резко убывает. При этом изменяется и спектральный состав солнечного излучения.

Фотосфера излучает почти всю приходящую к нам солнечную энергию, характеризующую солнечной постоянной, равной

$$2 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{мин}} \text{ или } 0,14 \text{ Вт/см}^2$$

эффективной температурой, равной 5800 К;
цветовой температурой, равной 6500 К ($\lambda = 0,47 \div 0,54 \text{ мкм}$);
средней яркостью, равной $2,0 \cdot 10^9 \text{ кд/м}^2$.

Наряду с тепловым излучением Солнце посылает в пространство потоки заряженных частиц материи (корпускулярное излучение) и радиоизлучение.

Характеристики излучения Земли, Луны, Марса и Венеры

Солнце — центральное тело Солнечной системы, в состав которой входят большие планеты с их спутниками, малые планеты или астероиды, кометы, метеорные рои и т. д.

В настоящее время известно девять больших планет Солнечной системы: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон и 31 спутник этих планет. Размеры планет сравнительно с размерами Солнца невелики, а их орбиты располагаются примерно в одной плоскости — в плоскости земной орбиты.

Ближайшие соседи Земли и ее спутницы Луны — планеты Венера и Марс. Ниже даны краткие геометрические и физические характеристики этих планет, а также характеристики их излучения в космическое пространство.

* **Солнечной постоянной** называют полное количество солнечной энергии, падающей за 1 мин на 1 см² поверхности, нормальной к направлению приходящих солнечных лучей и не закрытой земной атмосферой.

Земля. Геометрическая фигура Земли определяется поверхностью воды спокойного океана и представляет собой геоид, близкий к эллипсоиду вращения.

При решении многих навигационных задач принимается, что Земля — шар с радиусом $R_3 = 6371$ км, длина дуги меридиана равна 40000 км.

Максимальные погрешности вследствие принятого допущения могут составлять 0,5% в определении длин и 12' в определении направлений.

Земля окружена газовой оболочкой — атмосферой. Атмосфера участвует во вращательном движении Земли вокруг своей оси. Кроме того, она находится в сложном движении относительно поверхности Земли. За счет этого движения физическое состояние атмосферы непрерывно изменяется.

Атмосфера представляет собой механическую смесь газов и взвешенных жидких и твердых частиц. Основные газы — азот, кислород и аргон (99,97%). Кроме того, в состав атмосферного воздуха в переменных количествах входят водяной пар, углекислый газ и в ничтожных количествах водород, гелий, неон, ксенон, криптон, озон, а также метан и закись азота.

Установлено, что относительный процентный состав основных газов обычно остается постоянным до высот 100—120 км. Абсолютное же содержание всех газов с высотой убывает.

По характеру изменения физических свойств атмосфера условно делится на несколько слоев, или сфер. Толщина земной атмосферы достигает сотен километров, но ее плотность резко уменьшается с увеличением высоты (приблизительно 85% атмосферной массы лежит ниже высоты 16 км).

Излучение земной поверхности и атмосферы в космическое пространство зависит от температуры и природы земной поверхности и атмосферы, наличия облаков, распределения поглощающих молекул в атмосфере и от того, есть или нет рассеянное излучение от Солнца. Излучение на определенных длинах волн, как показало наблюдение со спутников, подвержено значительным колебаниям, связанным с изменением перечисленных факторов.

Схематический ход спектральной яркости освещенной Солнцем стороны Земли, которая может наблюдаться из-за пределов земной атмосферы со спутников, показан на рис. 20. 6.

На графике можно выделить три спектральных участка.

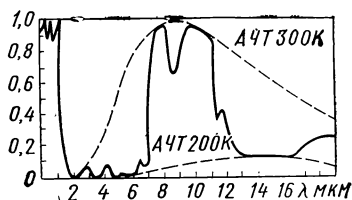


Рис. 20. 6. Кривая относительной спектральной плотности энергетической яркости освещенной Солнцем стороны Земли

Первый участок связан с излучением отраженного солнечного света и занимает диапазон длин волн до 3 мкм. Наблюдаемое излучение зависит от количества рассеянного солнечного света, на который, в свою очередь, оказывает влияние природа земной поверхности.

Количество рассеянного света сильно зависит также от распределения и типа облаков и наличия дымки.

Отражательные свойства поверхности Земли и атмосферы можно характеризовать так называемым сферическим альбедо A_c — отношением светового потока $\Phi_{отр}$, рассеиваемого освещенной половиной сферы, к потоку Φ_0 , падающему на эту сферу, т. е. $A_c = \Phi_{отр}/\Phi_0$.

Для Земли сферическое альбедо принимается равным 0,4. Освещенность, создаваемую Землей на входном зрачке оптического астронавигационного прибора за счет отраженного солнечного света, можно также определить, зная визуальную звездную величину Земли.

Т а б л и ц а 20. 1

ψ в град	m_V	E_0 в лк	ψ в град	m_V	E_0 в лк
0	—4,57	$186 \cdot 10^{-6}$	90	—2,79	$36,3 \cdot 10^{-6}$
30	—4,09	$120 \cdot 10^{-6}$	120	—1,82	$14,9 \cdot 10^{-6}$
60	—3,53	$71,8 \cdot 10^{-6}$	150	—0,51	$4,45 \cdot 10^{-6}$

В табл. 20.1 приведены значения звездной величины m_V и освещенности E_0 при наблюдении Земли с расстояния в одну астрономическую единицу в зависимости от фазы ψ (ψ — угол Солнце — Земля — КА).

Учитывая, что освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, легко определить освещенность на входном зрачке прибора при заданном удалении летательного объекта от Земли.

В области спектра длиной излучения волн свыше 4 мкм рассеянный солнечный свет становится пренебрежимо малым по сравнению с собственным излучением атмосферы.

Второй участок, который можно выделить на графике спектральной яркости освещенной Солнцем стороны Земли, связан с излучением в космическое пространство земной поверхности. В сравнительно прозрачных спектральных участках атмосферы (от 8 до 9 мкм, от 10 до 12 мкм) в ясную погоду это излучение почти без изменений уходит в космос. Основные различия в величине излучения наблюдаются от экватора к полюсам и обусловлены изменениями температуры земной поверхности. Пунктирной кривой показана яркость черного тела при температуре

300 К, что приблизительно соответствует температуре земной поверхности.

Третий участок занимает диапазон длин волн $14 \div 18$ мкм. В спектральных районах сильного поглощения излучение земной поверхности поглощается еще до выхода в космос. Чем больше коэффициент поглощения, тем от более высоких и более холодных слоев атмосферы выходит в космос излучение.

Пунктирной кривой показана яркость черного тела при температуре 200 К, что приблизительно соответствует температуре стратосферы.

Если говорить о контрасте, существующем между инфракрасным излучением Земли и излучением космического пространства, то можно принять, что Земля при наблюдении через слой атмосферы со спутника имеет среднюю эффективную температуру излучения около 250 К, а космическое пространство — 4 К.

Луна. Среднее расстояние от Земли до Луны 384 400 км. Диаметр Луны 3476,4 км (0,27 диаметра Земли). Ускорение силы тяжести, вместе с тем и вес всякого предмета на Луне в 6 раз меньше, чем на Земле.

Из-за отсутствия атмосферы на единицу площади лунной поверхности падает солнечной радиации в 3 раза больше, чем на единицу площади поверхности Земли. Поверхность Луны на протяжении двухнедельного лунного дня нагревается до сравнительно высокой температуры, а за столь же длительную лунную ночь сильно охлаждается. Измерения позволили получить следующие данные. Температура в центральной части Луны, т. е. в подсолнечной точке, оказалась равной 134°C , на середине 122° и на самом краю диска 67°C . Температура ночной стороны Луны составляет около -150°C .

Энергетическая яркость освещенной и неосвещенной стороны Луны, соответственно составляет 0,046 и 0,0004 (Вт/ср. м²).

Сферическое альbedo Луны принимается равным 0,073. По поверхности Луны альbedo неодинаково и колеблется от 0,054 до 0,176.

Марс и Венера — самые близкие к Земле и наиболее изученные планеты.

Расстояние от Земли до Марса изменяется от 56 до 100 млн. км. Экваториальный диаметр 6889 км, сплюснутость —

$\frac{1}{105}$ Общая масса газа, расположенного над единицей площади поверхности Марса, в 4,4 раза меньше, чем на Земле. Поэтому инфракрасное излучение Марса обусловлено в основном излучением поверхности самой планеты. По данным, полученным с помощью аппаратуры, установленной на советских автоматических межпланетных станциях «Марс-2» и «Марс-3» температура поверхности вдоль трассы облета изменялась от $+13$ до -93°C , а в области Северной полярной шапки температура опускалась до -110°C . Вблизи поверхности атмосфера Марса состоит в

основном из углекислого газа; водяного пара в тысячи раз меньше, чем в земной атмосфере.

Венера расположена к Солнцу ближе, чем Земля (ее удаление от Солнца 108,1 млн. км), поэтому она получает от него света и тепла больше в два с лишним раза.

Советские автоматические межпланетные станции «Венера», производившие спуск на ночной стороне планеты, а станция «Венера-8» на дневной, достаточно подробно исследовали как атмосферу, так и поверхность планеты. Было установлено, что атмосфера планеты на 97% состоит из углекислого газа. Содержание азота не превышает 2%, кислорода менее 0,1%, водяного пара вблизи облачного слоя менее 1%, аммиака 0,01—0,1%. Заметных различий в высотных профилях температуры и давления на дневной и ночной сторонах Венеры не обнаружено.

В месте посадки станции «Венера-8» температура атмосферы составила $470 \pm 8^\circ \text{C}$, давление $90 \pm 1,5 \text{ кгс/см}^2$.

В табл. 20.2 приведены характеристики, определяющие инфракрасное излучение Марса и Венеры.

Таблица 20.2

Характеристика	Марс		Венера	
	Экваториальная зона	Полярная зона	Поверхность планеты	Верхние слои атмосферы
Сферическое альbedo	0,15		0,59	
Температура, К	280	205	430	225
Энергетическая яркость, Вт/(ср. м ²)	0,011	0,0032	0,063	0,6046
Длина волны, соответствующая максимуму в спектре излучения, мкм	10	14	7	11,5

Дневное и ночное небо

Подавляющее большинство астрофизических данных, имеющих в настоящее время, получено при наблюдении с земной поверхности. Условия наблюдения с поверхности Земли непрерывно меняются в зависимости от времени суток и состояния атмосферы. Из-за постоянной турбулентности атмосферы нашей планеты не удастся использовать теоретическую разрешающую способность телескопов, а свечение неба ограничивает пределы разрешения телескопов по яркости.

В области спектра излучения длин волн короче 4 мкм свечение дневного небосвода интенсивно из-за рассеяния лучей атмосферным воздухом. В области длин волн более 4 мкм рассеянная

солнечная энергия уже мала и становится заметным тепловое излучение атмосферы.

Яркость безоблачного неба колеблется в пределах от нескольких тысяч кд/м² до 10000÷20000 кд/м². Наибольшую яркость небосвод имеет вблизи солнечного диска. В среднем яркость ясного неба днем принимается равной 4,0 кнт и неба, покрытого белыми облаками, 12 кнт. Рассеянный свет ясного неба создает на горизонтальной плоскости у поверхности Земли освещенность, составляющую от 20 до 30% освещенности, определяемой прямым светом Солнца. В момент восхода и захода Солнца при безоблачном небе освещенность горизонтальной плоскости близка к 500 лк. При пасмурной погоде, когда небо сплошь затянуто облаками, освещенность на горизонтальной поверхности днем в средних широтах 10000—20000 лк.

Основными причинами свечения ночного неба являются люминесцентные свечения верхних слоев атмосферы, зодиальный и звездный свет, солнечный свет, рассеянный в нижних слоях атмосферы и т. д.

В среднем яркость ночного неба без Луны принимается равной $1 \cdot 10^{-4}$ (кд/м²).

20.3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ ОПОРНЫХ ОСЕЙ КЛА В ПРОСТРАНСТВЕ

С расширением космических исследований все большее значение приобретает запуск ориентированных спутников и автоматических межпланетных станций. Поскольку научная, метеорологическая и другая аппаратура, устанавливаемая на них, требует точной привязки к местности, к системам ориентации предъявляются все более жесткие требования. Управление положением КА в пространстве осуществляется датчиками, выдающими соответствующие сигналы на системы обработки ошибок положения аппарата. В зависимости от небесного светила, по которому осуществляется ориентация, различают солнечные, звездные и планетные датчики.

Солнечные и звездные датчики

Ориентация КА по Солнцу осуществляется с помощью датчиков «грубой» и «точной» ориентации.

Датчики грубой ориентации предназначены для поиска, захвата и приведения излучения Солнца в поле зрения датчика точной ориентации. Поэтому эти датчики имеют большое поле зрения и относительно невысокую точность.

Датчики точной ориентации предназначены для точного наведения и автоматического слежения.

В качестве солнечных датчиков используются, например, фотоэлектрические устройства с разделением светового пучка лучей,

отличающиеся простотой и надежностью. Для ориентации по каждой из осей КА датчики обычно состоят из двух кремниевых фотогальванических или сульфидно-кадмиевых фотопроводниковых элементов, включенных по дифференциальной схеме.

На рис. 20.7, *а* схематически показана конструкция солнечных датчиков с теньевым экраном. Принцип работы датчика ясен из рисунка.

Для увеличения крутизны выходного сигнала дифференциальной схемы солнечного датчика вблизи нулевой точки, где нужна высокая точность, используются различные схемы. Две из них приведены на рис. 20.7, *б*, *в*.

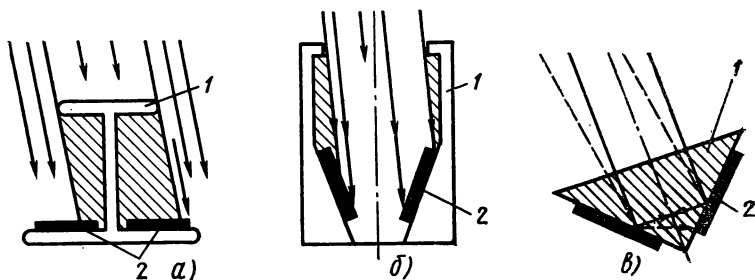


Рис. 20.7. Принципиальные схемы солнечных датчиков:

а—с теньевым экраном; *б*—с угловым расположением приемников; *в*—с прямоугольной призмой;
1—теньевой экран; 2—приемник энергии излучения

Датчик, приведенный на рис. 20.7, *в*, состоит из призмы 1 с критическим углом отражения и приемника энергии излучения 2. Здесь желаемый эффект достигается в результате изменения внутреннего отражения на гранях призмы. При малых углах отклонения лучей отражение на одной из граней прекращается и выходной сигнал на приемнике энергии излучения резко возрастает. Датчик обладает чрезвычайно большой крутизной выходного сигнала вблизи нулевой точки.

Особую группу составляют солнечные датчики, которые служат главным образом для регистрации положения КА относительно Солнца, а не для управления пространственным положением. Такие датчики используют на вращающихся КА и обеспечивают на выходе цифровую информацию. Датчик позволяет определить азимут и угол места Солнца относительно датчика при условии, что угловое положение относительной третьей оси известно.

Ориентация КА с помощью звездных датчиков может осуществляться либо по одиночным звездам, либо по звездному полю. В первом случае датчики имеют в целях повышения помехозащищенности малое поле зрения и требуют довольно точного предварительного наведения.

Во втором случае поле зрения датчиков может быть существенно увеличено и обеспечен самостоятельный поиск участка звездного неба, заданного для ориентации.

На рис. 20.8 приведена упрощенная принципиальная схема одного такого датчика. С помощью объектива в фокальной плоскости создается изображение участка звездного неба, на кото-

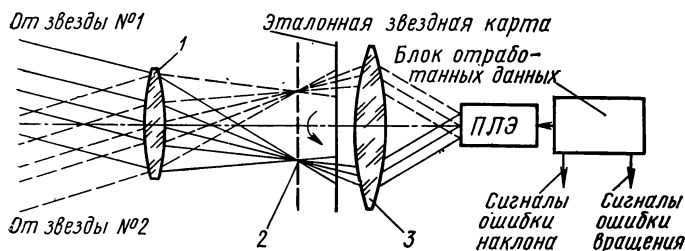


Рис. 20.8. Схема звездного датчика:

1—объектив; 2—фокальная плоскость; 3—конденсор

рый ориентирована одна из осей летательного аппарата. За фокальной плоскостью, в расходящихся пучках, помещена эталонная звездная карта, выбранного для ориентации участка небесной сферы. Карта может быть выполнена в виде тонкого диска с группой отверстий малого диаметра, расположение которых соответствует заданной картине звезд. Диаметр отверстия выбирается заведомо меньшим ширины расходящегося пучка. При правильной ориентации системы относительно звездного поля световые пучки от каждой звезды проходят через соответствующие отверстия карты и с помощью конденсора собираются на приемнике энергии излучения. При наклоне космического аппарата по любой из трех осей происходит сдвиг и деформация пятна изображения звезды, что используется как сигнал ошибки, содержащий информацию о величине и направлении отклонения.

Построители местной вертикали

Одним из способов ориентации космического объекта является ориентация его опорной оси (оси рыскания) принятой системы координат по местной вертикали. Под местной вертикалью понимается направление силы притяжения к планете (спутнику планеты) в данной точке. Для сферической и однородной по плоскости планеты можно считать, что местная вертикаль совпадает с направлением на центр тяжести и центр видимого диска планеты.

Для определения местной вертикали применяются гравитационные, инерциальные, радиолокационные и оптические методы.

Оптические методы наиболее просты, надежны и точны для

определения местной вертикали. При этом могут быть использованы два физических явления: отражение Землей (или другой планетой) солнечного света; собственное излучение планеты в мировое пространство. Использование отраженного солнечного света ограничено, так как КА часть времени может находиться на теневой стороне планеты, а также потому, что Земля имеет фазы.

Гораздо удобнее использовать собственное излучение планеты. Так как собственное излучение Земли и ближайших небесных тел — Луны, Марса, Венеры — сосредоточено в инфракрасном диапазоне длин волн, местную вертикаль, определенную по собственному излучению планеты, называют инфракрасной вертикалью (ИКВ). Так же обычно называют и сам прибор — построитель вертикали.

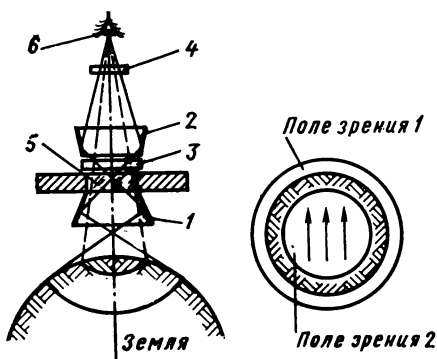


Рис. 20.9. Принципиальная схема визуального построителя вертикали:

1, 2—кольцевые зеркала; 3—светофильтр; 4—сетка; 5—иллюминатор; 6—глаз наблюдателя

Оптические построители местной вертикали (ПМВ) можно разделить на две группы:

ПМВ с использованием видимого излучения;

ПМВ инфракрасного диапазона.

Построители местной вертикали с использованием видимого излучения в свою очередь делятся на визуальные (неавтоматические) и автоматические построители местной вертикали.

Визуальные построители вертикали. Эти приборы позволяют космонавту, наблюдая за линией горизонта, определить направление на центр видимого диска планеты, а следовательно, ориентировать опорную ось системы координат корабля по направлению местной вертикали. Кроме того, с их помощью определяется высота полета летательного аппарата над поверхностью планеты и ориентация корабля относительно линии пути. На рис. 20.9 приведена схема визуального ориентатора космического корабля «Восток».

При полете космического корабля на высоте около 300 км над поверхностью Земли, ее угловой размер составляет примерно 145° . Следовательно, космонавт не видит полного диска планеты и не может определить направления на центр ее. При наблюдении через ориентатор космонавт может видеть полностью горизонт планеты при визировании через зеркала (поле зрения 1) и поверхность планеты при визировании непосредственно через иллюминатор 5 (поле

зрения 2). Лучи, идущие от линии горизонта, попадают на отражатель 1 и через стекло иллюминатора проходят на отражатель 2, который направляет их через сетку в глаз космонавта. При правильной ориентации корабля относительно вертикали космонавт видит горизонт в форме кольца, концентричного полю зрения 1. Через центральную часть иллюминатора он просматривает находящийся под ним участок земной поверхности. Положение продольной оси корабля относительно направления полета наблюдается по «бегу» земной поверхности в поле зрения ориентатора.

Воздействуя на органы управления, космонавт может развернуть корабль так, что линия горизонта будет видна в визире-ориентаторе в форме концентрического кольца, а направление «бега» земной поверхности будет совпадать с курсовой чертой сетки. Таким образом космонавт сможет правильно ориентировать корабль на линии пути.

При необходимости визир-ориентатор можно закрывать шторкой.

Итак, с помощью визира-ориентатора можно определять направление вертикали, проекцию траектории на земную поверхность (линию пути) и контролировать угловую ориентацию корабля относительно вертикали и линии пути.

Инфракрасные построители местной вертикали. В зависимости от способа определения инфракрасной вертикали построители ИКВ могут быть разделены на три основные группы. Первая группа — ИКВ, основанные на сканировании малым полем зрения линии горизонта. Вторая группа — ИКВ, принцип действия которых основан на сравнении освещенностей, создаваемых противоположными участками визируемого горизонта планеты.

Третья группа — ИКВ, основанные на визировании всего диска планеты широким полем зрения с модуляцией потока с помощью специальных анализирующих элементов. Рассмотрим некоторые конструктивные схемы построителей. На рис. 20. 10, а приведена схема определения местной вертикали построителем с синусоидальной разверткой горизонта.

Зеркало 1 устанавливается под углом, соответствующим направлению на линию горизонта при средней высоте полета и вращается со скоростью сканирования относительно вертикальной оси прибора, совпадающей с осью рыскания КЛА. Одновременно с угловой скоростью в k раз большей скорости сканирования вращается клин 2. В результате при совпадении оси рыскания КА с направлением местной вертикали проекция мгновенного поля зрения прибора описывает траекторию, показанную на рис. 20. 10, б.

При отклонении вертикальной оси прибора от направления местной вертикали на выходе приемника энергии излучения будет вырабатываться синусоидальное напряжение с несущей ча-

стой f_n , модулированное по амплитуде управляющей частотой — частотой огибающей $f_{ог}$.

Формирование управляющего сигнала, характеризующего отклонение КА от направления местной вертикали по крену и тангажу, осуществляется при помощи электронной усилительно-преобразующей системы, блок-схема которой приведена на рис. 20. 10, в. Промодулированный частотами f_n и $f_{ог}$ сигнал усиливается узкополосным резонансным услителем (УНЧ), настроенным на частоту f_n . Отфильтрованный сигнал с выхода усили-

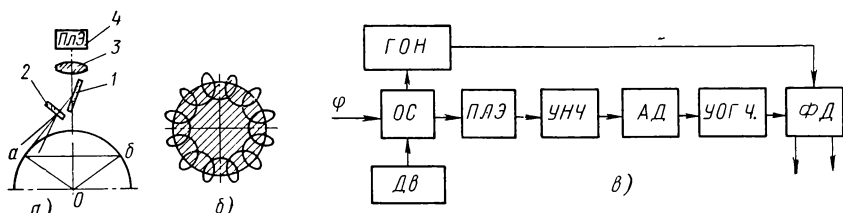


Рис. 20. 10. Схема определения местной вертикали сканирующим построителем:

а—принципиальная оптическая схема; б—кривая сканирования горизонта; в—блок-схема;
 1—зеркало; 2—оптический клин; 3—объектив; 4—приемник энергии излучения

теля поступает на детектор несущей частоты (АД), где выделяется сигнал, промодулированный частотой $f_{ог}$. Этот сигнал, содержащий информацию о положении оси рыскания КА, после усиления в усилителе огибающей частоты (УОГЧ) подается на фазовый детектор (ФД), в котором происходит сравнение его фазы с фазой сигнала, снимаемого с генератора опорных напряжений (ГОН). Благодаря механической связи его ротора со сканирующим зеркалом оптической системы (ОС), приводимом во вращение двигателем (Дв), фаза напряжения, снимаемого с ГОН, однозначно определяет положение сканирующего луча в его круговом движении.

Итак, в результате сравнения фазы сигнала усилителя огибающей частоты и фазы напряжения с генератора опорных напряжений, имеющего также частоту $f_{ог}$, получим после фазового детектора два напряжения u_y и u_z .

Величины этих напряжений при малых отклонениях оси рыскания КА от направления местной вертикали будут пропорциональны отклонениям в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, а их знак будет показывать направление этих отклонений. Напряжения u_y и u_z используются для формирования управляющих сигналов в системе стабилизации космического аппарата по каналам тангажа и крена.

Наиболее простой приборной реализацией принципа сравнений освещенностей, создаваемых противоположными участками визируемого горизонта планеты, является установка на борту

КА четырехканального несканирующего прибора, поля зрения которого расположены попарно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом их оптические оси отклонены от опорной оси КА (оси рыскания) на один и тот же угол. Величина этого угла зависит от высоты орбиты и выбирается такой, чтобы при правильной ориентации космического аппарата для всех каналов меньшую, одинаковую часть поля зрения, занимала излучающая поверхность планеты, остальную — космическое пространство. Отклонение оси прибора от направления местной вертикали приведет к тому, что в одном канале большую часть поля зрения будет занимать излучающая поверхность планеты, а в противоположном канале — космическое пространство. В результате на приемники энергии излучения будут попадать разные потоки энергии.

При одинаковых характеристиках приемников и малых отклонениях оси рыскания КА от направления местной вертикали разность напряжений с каждой пары приемников будет пропорциональна углу отхода опорной оси космического аппарата от местной вертикали по крену и тангажу. Техническая реализация приборов, основанных на сравнении освещенностей проще сканирующих построителей местной вертикали. Однако последние позволяют обеспечить более высокую точность определения вертикали.

20.4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И КУРСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Местоположение и курс корабля или летательного аппарата могут быть определены аналитическим путем по данным об измеренных высотах, расстояниях или угловых размерах навигационных объектов космического пространства. Вычисление координат места может осуществляться оператором и автоматическими астронавигационными системами—астроориентаторами. Направление движения аппарата, его курс, определяется с помощью астрономических курсовых приборов (АКП).

Астрономические секстанты и ориентаторы

Секстанты применяют для решения навигационных задач как при мореплавании, так и при полетах в приземном пространстве и в космосе. Секстант представляет собой угломерный прибор. Существенной особенностью его является то, что визирование обоих предметов, между которыми измеряется угол, осуществляется не последовательно, а одновременно и заключается в совмещении изображений обоих наблюдаемых объектов в поле зрения прибора. С целью определения географических координат места судна или летательного аппарата, с помощью секстанта измеряют высоты небесных светил относительно искусственного или видимого горизонта. Для определения направления верти-

кали (искусственного горизонта) в секстантах используется жидкостный уровень или гироскоп.

На рис. 20.11 приведена принципиальная схема ручного секстанта.

При наблюдении в ночное время уровень 1 освещается электрической лампочкой 2, от которой лучи света, пройдя через светофильтр 3, попадают на откидное зеркало 7 и на грань приз-

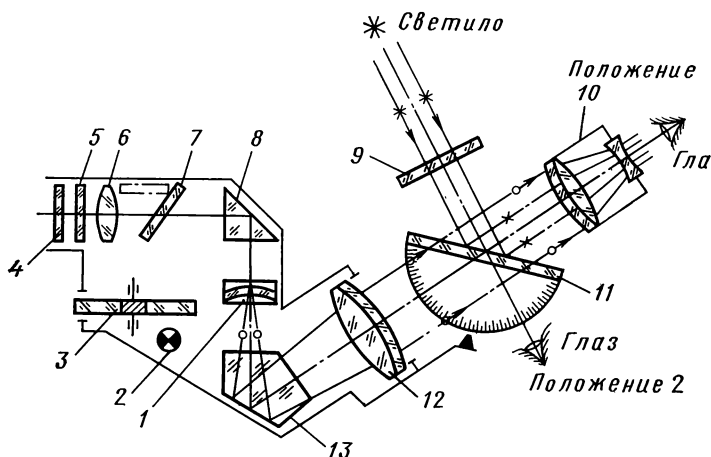


Рис. 20.11. Принципиальная оптическая схема ручного секстанта:

1—уровень; 2—лампочка; 3—диск со светофильтрами; 4—светофильтр; 5—матовое стекло; 6—линза; 7—откидное зеркало; 8—призма; 9—светофильтр; 10—зрительная труба; 11—главное зеркало; 12—объектив; 13—неподвижная призма

мы 8. Уровень расположен в фокальной плоскости объектива 12, поэтому после него параллельный пучок лучей попадает на главное зеркало 11. Измерение высот светил можно производить в двух (относительно глаза наблюдателя) положениях секстанта: нижнем (положение 1) и верхнем (положение 2). Наблюдение Солнца обычно ведут в положении 1. Ночные наблюдения звезд и планет выгоднее вести в положении 2, наблюдая светило в проходящих через главное зеркало лучах, а пузырек уровня — в отраженных от главного зеркала. При этом облегчается опознавание светила и повышается яркость его изображения.

Зрительная труба 10 служит для повышения точности совмещения изображений пузырька и наблюдаемого светила.

При наблюдениях Солнца или Луны в дневное время уровень освещается солнечным светом при помощи линзы 6, матового стекла 5 и светофильтра 4. Зеркало 7 должно быть откинuto в положение, показанное пунктиром. Светофильтры 4 и 9 обеспечивают контраст между изображениями светила и пузырька уровня.

Отсчет углов высоты светила осуществляется следующим образом. Лучи от светила, отразившись от главного зеркала 11, попадают в глаз наблюдателя. Лучи от пузырька уровня, определяющего вертикаль, отражаются от грани неподвижной призмы 13 и попадают на главное зеркало. Если качанием последнего

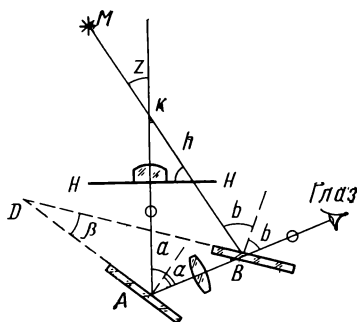
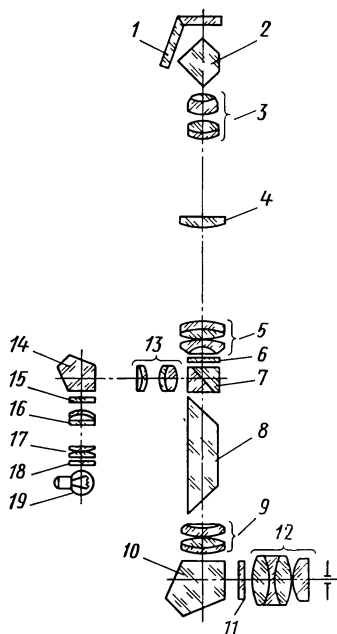


Рис. 20.12. К определению связи между зенитным расстоянием светила и углом поворота главного зеркала секстанта

Рис. 20.13. Оптическая схема перископического секстанта: 1—защитное стекло; 2—призма-куб; 3—объектив; 4—коллектив; 5, 9—линзы оборачивающей системы; 6—светофильтр; 7—разделительная призма-куб; 8—призма Дове; 10—пенто-призма; 11—сетка; 12—окуляр; 13, 15—объективы уровня; 14—призма; 16—уровень; 17—кондensor; 18—фильтр; 19—лампа



совместить изображение светила и пузырька, то при этом угол поворота главного зеркала 11 относительно отражающей грани призмы 13 будет определять зенитное расстояние светила. Покажем это (рис. 20.12). Чтобы совместить изображение светила M с центром пузырька уровня, главное зеркало необходимо поместить в положение, указанное на рисунке. Из треугольников AKB и ADB получим

$$\begin{aligned} z &= 180^\circ - 2a - (180^\circ - 2b) = 2(b - a), \\ \beta &= 180^\circ - (90^\circ + a) - (90^\circ - b) = b - a. \end{aligned} \quad (20.5)$$

Откуда $z = 90^\circ - h = 2\beta$,

т. е. измеренное зенитное расстояние равно удвоенному углу между плоскостями неподвижного и главного зеркала.

В настоящее время применяются также перископические панорамные секстанты с ручной наводкой и неавто-матическим слежением за светилом. Главная отличительная особенность этих секстантов состоит в том, что во время маневри-

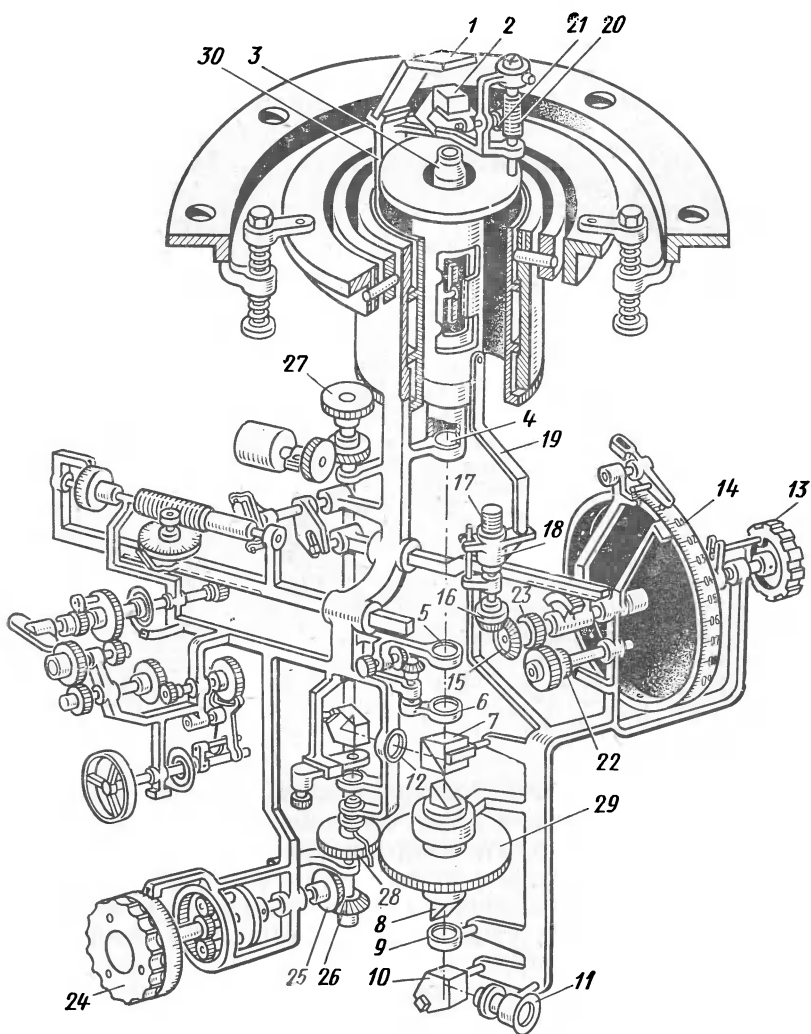


Рис. 20.14. Кинематическая схема перископического секстанта:

1—11—см. рис. 20.13; 13—рукоятка поворота визирной призмы; 14—угломерный барабан; 15, 16—конические шестерни; 17—ходовой винт; 18—гайка; 19—тяга; 20—червяк; 21—червячное колесо; 22—шкала; 23—рейка осредняющего механизма; 24—рукоятка курсовых углов; 25, 26, 27, 28, 29—шестерни; 30—визирная головка; 31—часовой механизм

рования самолета штурману не требуется поворачиваться вместе с прибором в направлении выбранного светила.

В панорамном секстанте окуляр, через который осуществляется наблюдение за изображениями светила и искусственного горизонта, остается неподвижным, а перископическая часть секстанта может поворачиваться на угол 360° . В качестве устройства, имитирующего горизонт или вертикаль, используется пузырьковый уровень.

На рис. 21. 13 и 21. 14 даны соответственно оптическая и кинематическая схемы авиационного перископического панорамного секстанта СП-1М. Секстант устанавливается в герметизированных кабинах самолетов. Секстант имеет перископическую зрительную трубу с дополнительной оптической системой, проектирующей изображение пузырька уровня в поле зрения прибора. Для сохранения герметичности кабины самолета установлен стеклянный колпак, состоящий из семи плоскопараллельных пластин, склеенных в виде шестигранника с крышкой. Далее расположены два склеенных под углом защитных стекла 1 поворотной головки прибора, в которой находится визирная призма-куб. Призма-куб 2 направляет лучи в объектив 3. В фокальной плоскости установлен коллектив 4. Между линзами 5 и 9 оборачивающей системы в параллельном ходе лучей расположена разделительная призма-куб 7, предназначенная для ввода изображения пузырька уровня, призма Дове 8, служащая для компенсации поворота изображения при вращении головной призмы-куба по горизонту, и светофильтр 6.

Пузырек уровня 16 находится в фокальной плоскости проектирующих объективов 13 и 15. Уровень подсвечивается лампой 19 через конденсор 17 и фильтр 18. Призма 14 направляет лучи от уровня в основную оптическую систему. За оборачивающей системой расположена пентапризма 10, сетка 11 и окуляр 12.

Поворот призмы-куб в вертикальной плоскости для измерения угловой высоты светил производится с помощью угломерного механизма. Маховичок 13 угломерного механизма (рис. 20. 14) имеет на оси коническую шестерню 15, которая сцеплена с конической шестерней 16, закрепленной на ходовом винте 17. При вращении винта перемещается гайка 18, на которую замыкается тяга 19. Тяга вместе с гайкой перемещается (по вертикали) на шариках, при этом фланец стакана толкает червячную рейку 20, которая сцеплена с червячным сектором 21, закрепленным на оправе призмы-куб, и поворачивает ее.

Отсчет вертикальных углов: десятки градусов отсчитывают по грубой шкале 22, градусы и минуты — по шкале 14 угломерного барабана. Поворот визирной головки 30 с призмой-куб по горизонту производится с помощью маховичка 24 шестернями 25—27. При повороте визирной головки в ту же сторону, но с вдвое меньшей скоростью, с помощью шестерен 28 и

29 поворачивается оправа с призмой Дове, чем обеспечивается отсутствие наклона изображения.

Одиночные измерения высоты светила с помощью секстанта не всегда позволяют получить достаточно точный результат из-за воздействия ускорений на пузырек сферического уровня. При этом величины случайных погрешностей измерения достигают нескольких десятков угловых минут. Погрешности значительно уменьшаются при использовании осредняющего механизма 23.

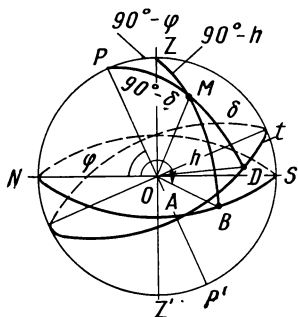


Рис. 20.15. Параллактический треугольник светила

С его помощью определяется среднее значение высоты при непрерывном измерении в течение заданного периода осреднения. Осредняющий механизм приводится в действие часовым механизмом 19.

Осредняющий механизм дает среднее значение измеряемого угла при непрерывном измерении в течение заданного времени работы часового механизма интегратора. Время работы часового механизма 20, 30, 40 с. Осреднение производится в пределах отклонения визирной линии на $\pm 12'$ от начального положения.

Главный недостаток панорамного секстанта — трудность удержания вблизи центра поля зрения совмещенных изображений светил и пузырька уровня.

Современные секстанты обеспечивают пеленгацию светила по высоте (без учета ошибок вертикали) с точностью до $0,5'$ (статическая) и $2'$ (динамическая); азимут светила определяется с точностью до $30'$.

Основные недостатки таких приборов:

отсутствие непрерывности измерений;

сравнительно невысокая точность определения координат места;

значительная затрата времени на измерения и обработку результатов;

необходимость специальной подготовки операторов (большого опыта в измерениях и расчетах).

Несмотря на указанные недостатки секстанты широко применяются для периодического уточнения места летательного аппарата и устранения накопившихся погрешностей других средств навигации.

Астроориентаторы. Астроориентаторы представляют собой устройства, с помощью которых по светилам определяют координаты наблюдателя. В качестве примера рассмотрим принцип действия астрономического ориентатора, основанного на измерении высот двух светил.

бы определить место летательного аппарата, необходимо одновременно измерить высоты двух светил. При этом получим систему уравнений с двумя неизвестными φ и λ .

$$\begin{aligned}\sin h_1 &= \sin \delta_1 \sin \varphi + \cos \delta_1 \cos \varphi \cos (t_{\text{гр}} \pm \lambda); \\ \sin h_2 &= \sin \delta_2 \sin \varphi + \cos \delta_2 \cos \varphi \cos (t_{\text{гр}} \pm \lambda).\end{aligned}$$

Блок-схема автоматического астроориентатора имеет вид, представленный на рис. 20. 16.

Пеленгация светил осуществляется телескопами T_1 и T_2 стабилизированных в плоскости истинного горизонта с помощью специального устройства — вертикали.

С выхода фотоэлектрических следящих систем снимаются сигналы, пропорциональные значениям измеренных высот светил $h_{1 \text{ изм}}$ и $h_{2 \text{ изм}}$. Элементы сравнения ЭС₁ и ЭС₂ сопоставляют значения измеренных и вычисленных ($h_{1 \text{ выч}}$, $h_{2 \text{ выч}}$) высот светил.

Вычисленные значения высот выдаются счетно-решающими устройствами СРУ1 и СРУ2, в которые вводятся экваториальные координаты светил δ и $t_{\text{гр}}$, а также приближенные значения географических координат места самолета $\approx \varphi$, $\approx \lambda$, определяемые с помощью каких-либо других навигационных устройств. Разностные сигналы от ЭС1 и ЭС2 усиливаются соответствующими усилителями (УС₁ и УС₂) и поступают на двигатели отработки широты ($\Delta \varphi$) и долготы ($\Delta \lambda$). Последние перемещают стрелки указателей координат φ и λ . Одновременно с двигателями на СРУ1 и СРУ2 поступают сигналы $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$, необходимые для вычисления правых частей уравнения.

Астрономические курсовые приборы

Астрономические курсовые приборы (АКП) предназначены для измерения курса самолета, выполнения разворота на заданный курс и осуществления полета по заданному маршруту.

Астрономический компас представляет собой прибор, в котором воспроизводится параллактический треугольник светила. С помощью формул сферической тригонометрии, в частности формулы котангенсов, можно определить значение азимута светила:

$$\text{ctg } A = \sin \varphi \text{ ctg } (t_{\text{гр}} \pm \lambda) - \cos \varphi \text{ tg } \delta \text{ cosec } (t_{\text{гр}} \pm \lambda). \quad (20. 6)$$

При этом необходимо знать географические координаты самолета, а также склонение светила и его гринвичский часовой угол.

Истинный курс ИК (рис. 20. 17) определяется от полуденной линии как разность между вычисленным значением азимута светила и измеренным значением курсового угла КУ светила

$$\text{ИК} = A - \text{КУ}. \quad (20. 7)$$

Любой АКП имеет три основных механизма — пеленгаторное устройство, предназначенное для пеленгации светил, индикатор-

ное устройство для указания курса и счетно-решающее устройство, учитывающее движение самолета и вращение Земли вокруг оси. Последний механизм служит для ориентации пеленгаторного устройства АКП относительно направления текущего меридиана или заданного большого круга.

В зависимости от конструктивного оформления пеленгаторного устройства различают:

неавтоматические АКП с визуальной пеленгацией светил;

приборы с автоматической индикацией момента пеленгации, но с ручным управлением поисковым движением пеленгаторной части;

автоматические приборы с оптико-электронной следящей системой в пеленгаторном устройстве.

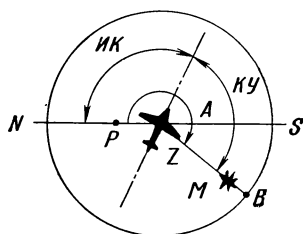
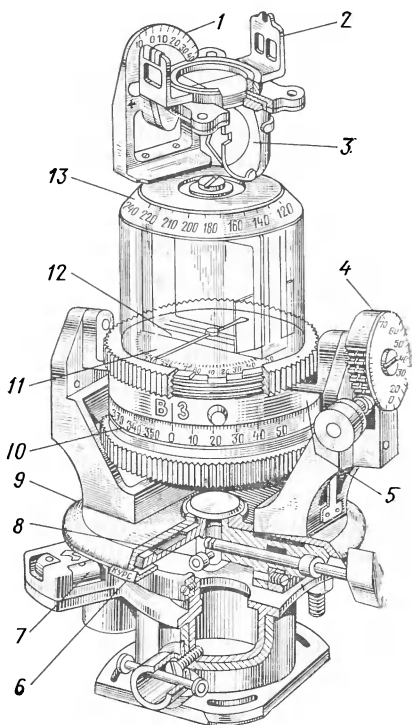


Рис. 20. 17. К определению истинного курса

Рис. 20. 18. Оптико-механический астрокомпас АК-59П:

1—шкала склонений; 2—визирная рамка; 3—поляризационный визир; 4—шкала широт; 5—карданное кольцо; 6—индекс; 7—уровни; 8—основание; 9—азимутальный круг; 10—шкала долготы; 11—шкала часовых углов; 12—солнечный визир; 13—шкала часовых углов для звездного визира



В качестве примера рассмотрим астрокомпас АК-59П.

Оптико-механический астрокомпас АК-59П применяется для определения истинного курса путем пеленгации Солнца, Луны, планет и звезд. Астрокомпасом можно пользоваться днем и ночью, а также в сумерках, после захода Солнца и до появления вечерних звезд и после исчезновения утренних звезд до восхода Солнца. Пеленгование неавтоматизированное, в видимой части

спектра излучений. На заходе и восходе пеленгация Солнца осуществляется в поляризованном атмосферой свете.

Конструкция астрокомпаса показана на рис. 20. 18. Пеленгатор астрокомпаса содержит три вида визирных устройств: визир 12 для пеленгации Солнца, визирную рамку 2 для пеленгации звезд, Луны и планет и визирное устройство 3 для пеленгации Солнца в поляризованном свете.

Поисковое движение при совмещении плоскости пеленгации со светилом осуществляется вокруг вертикальной оси. Отсчет курса самолета производится против индекса 6 («курс») по шкале азимутального круга 9. Ось вращения плоскости пеленгации, совпадающая с осью мира, наклоняется относительно горизонтальной плоскости на угол φ — широту места самолета. Углы наклона отсчитываются по шкале 4. Солнечное визирное устройство 12 вращается часовым механизмом. Часовой механизм позволяет установить гринвичский часовой угол $t_{\text{гр}}$ по шкале 11, а в дальнейшем этот угол механизмом изменяют со скоростью 360° за 24 ч среднего солнечного времени. Пеленгатор вместе с часовым механизмом может поворачиваться в карданном кольце 5 на угол долготы места самолета, отсчитываемый по шкале долгот 10. В результате этого пеленгаторное устройство 12 поворачивается относительно плоскости круга склонения Солнца на часовой угол

$$t = t_{\text{гр}} \pm \lambda.$$

Звездная визирная система не имеет связи с часовым механизмом, поэтому гринвичский часовой угол устанавливает вручную по шкале 13. Склонение светила задается поворотом визирного устройства вокруг горизонтальной оси, а углы склонения отсчитываются по шкале 1. Механизм астрокомпаса укреплен на основании 8. Правильность положения определяется по уровням 7.

Инструментальная погрешность определения курса по солнечному и звездному визирным устройствам составляет не более $\pm 2^\circ$, а по поляризационному визирному устройству — не более $\pm 3^\circ$.

Астрокомпас применяют на самолетах различной дальности действия. При наличии на самолете дистанционного астрономического компаса астрокомпас типа АК-59П иногда используют в качестве аварийного дублирующего.

20.5. ИМИТАТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Имитаторы излучения небесных тел служат для юстировки астронавигационных приборов в процессе сборки и регулировки, снятия характеристик и проверки приборов на функционирование как в условиях лаборатории (цеха), так и при установке на летательном аппарате. Кроме того, имитаторы используются для

исследования режима работы приборов и поведения материалов под воздействием мощного солнечного излучения.

Наиболее широко известны имитаторы солнечного излучения, излучения звезд и имитаторы излучения системы «Земля — Атмосфера — Космос».

Идеальный имитатор должен точно воспроизводить пространственные яркостные и спектральные характеристики излучения объекта.

Для солнечных имитаторов по яркости и спектру к идеальному источнику излучения ближе всего электрическая дуга на угольных электродах. Однако у нее мал срок службы электродов и из-за осаждения угольной пыли сильно загрязняются отражатели, линзы и т. д. Наиболее практичными являются компактные ртутно-ксеноновые и ксеноновые лампы высокого давления. Последние обладают мощным пиком излучения в области спектра 0,8—1 мкм, который может быть сглажен фильтром.

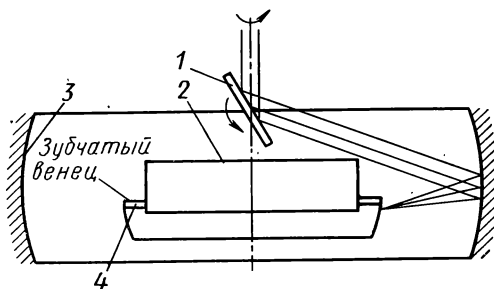


Рис. 20. 19. Оптическая схема имитатора излучения системы «Земля—Атмосфера—Космос»:

1—сканирующее зеркало; 2—цилиндрический «фон»; 3—кольцевое сферическое зеркало; 4—излучатель

В результате получается спектр, достаточно близкий к солнечному.

Параллельность и однородность пучка обеспечивается коллиматорной оптической системой при должном распределении яркости источника и соответствующих характеристиках оптической системы.

Для настройки и проверки выходных характеристик инфракрасных построителей местной вертикали, в отличие от звездных или солнечных имитаторов, необходимо воспроизводить излучение объекта весьма больших угловых размеров.

Оптическая схема имитатора теплового излучения системы «Земля — Атмосфера — Космос» (ИЗАК) приведена на рис 20. 19.

Условия геометрического и энергетического подобия имитируемой модели теплового излучения системы «Земля — Атмосфера — Космос» достигаются следующим образом.

Сферический излучатель с зубчатым венцом (инфракрасный горизонт) расположен в «плоскости» наименьшего кружка расхождения сферического зеркала. Фокусное расстояние сферического зеркала выбрано из условия получения допустимой величины сходимости пучка лучей теплового излучения, попадающего на входной зрачок оптической системы проверяемого прибора.

Высота кольцевого сферического зеркала, «фона» и излучателя (ширина пояса) выбраны с учетом величины прокатки проверяемого прибора вокруг горизонтальной оси.

Радиус кольцевого сферического излучателя рассчитывается из условий получения наилучшей фокусировки имитатора, т. е. так же как и радиус сферического зеркала из условия минимальной сходимости пучка лучей, попадающих на входной зрачок проверяемого прибора.

Конструкция имитатора реализует принципиальную схему имитатора.

Кольцевое сферическое зеркало диаметром 1 м изготовлено из алюминиевого сплава. Внутренняя поверхность сферического зеркала отполирована. Зеркало имеет специальную конструкцию, обеспечивающую большую жесткость и служит корпусной основой для имитатора.

Нагревательным элементом в конструкции излучателя является спираль, расположенная в фарфоровой втулке. Спираль засыпана кварцевым сухим мелким песком для равномерного нагрева рабочей поверхности излучателя. Нагрев излучателя осуществляется за счет контакта нагретого песка через кожух с внутренней поверхностью венца излучателя. Температура поверхности венца излучателя регулируется в процессе настройки имитатора и измеряется с помощью термпары.

Имитация излучения переходного слоя модели «Земля — Атмосфера — Космос» осуществляется с помощью зубцов, расположенных на венце излучателя. Форма зуба рассчитывается из условия воспроизведения излучения переходного слоя имитируемой модели для конкретной величины поля зрения проверяемого прибора и его формы. Высота зуба рассчитывается из условия воспроизведения углового размера переходного слоя. «Фон» выполнен в виде цилиндра, расположенного над излучателем.

Для устранения температурного влияния «фон» и излучатель разделены специальным экраном. Температура поверхности «фона» фиксируется с помощью термпары.

В последних моделях имитаторов применена конструкция фона с охлаждением жидким хладагентом, а нагрев излучателя — при помощи нагретого масла. Эти изменения способствуют более равномерному излучению от имитатора.

В верхней части имитатора на посадочной плите расположен механизм наклона, позволяющий наклонять проверяемый прибор таким образом, что ось ИКВ проходит через энергетический центр имитатора.

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЦЕЛЫ БОМБОМЕТЕНИЯ

21.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ
О БАЛЛИСТИКЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ БОМБ

Чтобы осуществить попадание сброшенной с самолета бомбы в цель, необходимо знать траекторию ее падения.

Баллистика авиационных бомб — наука, занимающаяся изучением законов движения бомб. Основная задача баллистики авиационных бомб заключается в расчете баллистических данных, позволяющих производить прицельное бомбометание.

После отрыва бомбы от самолета центр ее тяжести описывает в пространстве некоторую траекторию, а сама бомба совершает колебательные движения около центра тяжести. Баллистика авиационной бомбы изучает движение центра тяжести бомбы. При движении бомбы в воздушной среде на нее действует сила тяжести Q и сила сопротивления воздуха R (рис. 21.1). Сила тяжести в определенных широтных поясах обычно принимается постоянной и основное внимание уделяется изучению

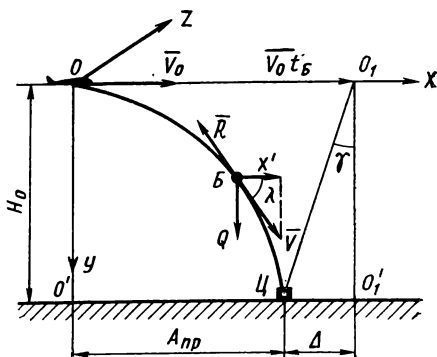


Рис. 21.1. Траектория падения бомбы, сброшенной с горизонтально летящего самолета

силы сопротивления воздуха, природа которой очень сложна. Сила сопротивления воздуха складывается из сопротивления встречных молекул воздуха (сила давления) и силы трения, возникающей на боковой поверхности бомбы. При движении бомбы со скоростями, близкими или большими скорости звука, возникают новые физические явления, проявляющиеся в появлении волн уплотнений, которые влекут за собой резкое увеличение силы сопротивления воздуха.

Зная силы и ускорения, действующие на бомбу, сброшенную с самолета, можно составить уравнения ее движения.

Пусть бомба сбрасывается в некоторой точке O с начальной скоростью V_0 , совпадающей по направлению с осью OX (горизонталь). Скорость V_0 и высота H_0 определяют начальные условия бомбометания. Так как нет никаких боковых сил, действующих на бомбу (влияние ветра будет учитываться при составлении прицельной схемы бомбометания), то она падает в плоскости $ХОУ$, называемой плоскостью бомбометания.

В момент сбрасывания бомбы

$$x_0 = y_0 = z_0 = 0, \quad x'_0 = V_0, \quad y'_0 = z'_0 = 0.$$

Проектируя силы, действующие на бомбу, на оси OX и OY , получим уравнения движения:

$$mx'' = -R \cos \lambda; \quad x'' = -j \cos \lambda;$$

или

$$my'' = mg - R \sin \lambda \quad y'' = g - j \sin \lambda,$$

где m — масса бомбы;

g — ускорение силы тяжести;

$j = R/m$ — ускорение силы сопротивления воздуха; обычно записывается в виде $j = EV$. Здесь E — зависимость, учитывающая аэродинамические свойства бомбы, изменение плотности воздуха по высоте и изменение сопротивления воздуха от скорости бомбы.

Принимая во внимание, что

$$\cos \lambda = \frac{x'}{V}, \quad \sin \lambda = \frac{y'}{V},$$

получим

$$x'' = -Ex';$$

$$y'' = g - Ey' \quad (21.1)$$

Данные уравнения могут быть решены лишь приближенными методами численного интегрирования, так как функция E задается в виде табличных данных.

Решив уравнения, можно определить время падения бомбы t_b , продольный относ бомбы $A_{пр}$, т. е. проекцию траектории движения бомбы за время t_b на горизонтальную плоскость в направлении оси OX , и другие величины.

При бомбометании с горизонтального полета время падения бомбы и продольный относ является функциями H_0 , V_0 , т. е. параметров, определяющих начальные условия бомбометания и характеристического времени падения бомбы θ , определяющего баллистические качества бомбы. **Характеристическим временем** бомбы называется время падения бомбы, сброшенной с горизонтально летящего самолета с высоты 2000 м при скорости полета 40 м/с в условиях стандартной атмосферы.

В результате вычисления указанных величин составляются баллистические таблицы. Для бомбометания с горизонтального полета баллистические таблицы для каждого типа бомбы θ в зависимости от H_0 и V_0 определяют время падения и **линейное отставание** бомбы $\Delta = V_0 t_0 - A_{пр}$ или **угловое отставание**

$$\frac{\Delta}{H_0} = \operatorname{tg} \gamma. \quad (21.2)$$

Таблицы рассчитываются для бомбометания в условиях стандартной атмосферы, поэтому в реальных условиях величины t_0 и Δ будут несколько отличаться от табличных. Наибольшее влияние при этом оказывают отклонение давления на уровне моря в реальной атмосфере от нормального и отклонение температуры воздуха от стандартного распределения по высоте. Некоторое влияние оказывают также вращение (кориолисово ускорение) и кривизна поверхности Земли, а также ряд других факторов.

При бомбометании с негоризонтального полета в начальные условия бомбометания войдет угол λ_0 , т. е. угол между горизонтальной осью OX и направлением вектора скорости самолета $\vec{V}_0$. В этом более общем случае время падения, продольный относ и отставание бомбы являются функциями H_0 , V_0 , λ_0 и θ .

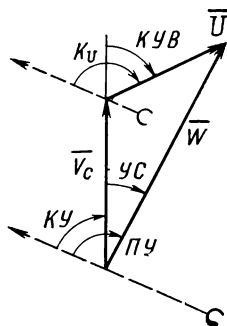
21.2. ПРИЦЕЛИВАНИЕ ПРИ БОМБОМЕТАНИИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Схемы прицеливания

Прицельной схемой называется геометрическое построение, определяющее положение самолета относительно цели в момент сбрасывания бомбы при условии, что траектория падения бомбы проходит через цель.

Рис. 21.2. Навигационный треугольник скоростей:

КУ—курсовой угол;
ПУ—путевой угол;
УС—угол сноса;
КУВ—курсовой или бортовой угол ветра;
 K_v —направление ветра в пространстве



Рассмотрим некоторые схемы прицеливания при бомбометании с горизонтального полета.

Бомбометание по неподвижной цели при боковом ветре. При ветре скорость движения самолета относительно поверхности Земли (абсолютная скорость) может быть найдена из навигационного треугольника скоростей (рис. 21.2). Она складывается из вектора воздушной скорости самолета $\vec{V}_c$ (движение самолета относительно воздуха) и вектора ветра $\vec{U}$ (переносное движение самолета вместе с воздухом). Абсолютное движение самолета характеризуется вектором путевой скорости $\vec{W}$, определяемым как $\vec{W} = \vec{V}_c + \vec{U}$.

В зависимости от принятого начала отсчета различают истинный, магнитный, компасный курсовые углы и т. д. УС (угол сноса; чаще всего обозначается через α) или бортовой угол ветра — ε или δ .

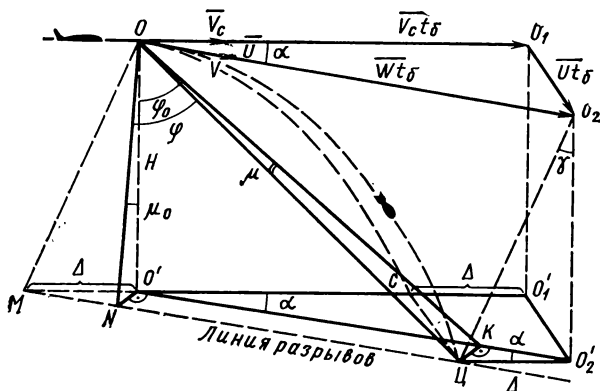


Схема бомбометания при боковом ветре приведена на рис. 21.3. При отсутствии ветра фиктивный самолет после сбрасывания бомбы, двигаясь в направлении линии OO_1 , называемой линией курса, за время падения бомбы пролетел бы расстояние $OO_1 = V_{ct_6}$. При ветре он пролетит в направлении OO_2 (линия пути) расстояние, равное Wt_6 . Совершенно очевидно, что при отсутствии ветра бомба упала бы в точке C и отстала бы от самолета на величину Δ — **линейного отставания**. Так как бомба после отрыва от самолета перемещается относительно воздуха только в направлении вектора $\vec{V}_c$ (в боковом направлении она перемещается совместно с воздухом), то только в плоскости $OO_1O_1'O'$ на нее будет действовать сила сопротивления (в боковом направлении она равна нулю). Поэтому отставание бомбы следует откладывать от точки O_2' в направлении, параллельном проекции линии курса $O'O_1'$. При этом отставание по величине будет таким же, как и при отсутствии ветра, т. е. $O_2'C = O_1'C = \Delta$. В результате бомба упадет в точку прицеливания Π . Линия $M\Pi$, проходящая через цель параллельно проекции линии пути, называется **линией разрывов**.

364

Рассмотрим возможные варианты определения положения точки сбрасывания относительно цели.

Вариант 1. Положение самолета в момент бросания бомбы задается высотой H , углом сноса α , углом прицеливания φ_0 , измеряемом в вертикальной плоскости $OO_2O_2'O'$ (плоскости пути самолета), и углом бокового смещения визирного луча μ . Из прицельной схемы видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{O'O'_2 - O'_2K}{OO'} = \frac{A_{\text{пр}}}{H} = \frac{Wt_6 - \Delta \cos \alpha}{H} = \frac{Wt_6}{H} - \operatorname{tg} \gamma \cos \alpha, \quad (21.3)$$

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{K\Pi}{OK} = \frac{A_{\text{бок}}}{H/\cos \varphi_0} = \frac{\Delta \sin \alpha}{H} \cos \varphi_0 = \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha \cos \varphi_0. \quad (21.4)$$

Таким образом, бомбоприцел должен вычислять и осуществлять построение углов φ_0 и μ , при этом сам прицел необходимо развернуть относительно продольной оси самолета на угол сноса α .

Вариант 2. Положение самолета задается высотой H , углом сноса α , углом прицеливания φ и углом наклона плоскости прицеливания — μ_0 . Для реализации данной прицельной схемы бомбоприцел следует развернуть относительно продольной оси самолета на угол сноса, затем отклонить визирную систему на угол μ_0 в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости пути, и уже в наклонной плоскости прицеливания $OO_2\Pi M$ визирный луч разворачивается на угол φ . Из прицельной схемы следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{N\Pi}{ON} = \frac{A_{\text{пр}}}{H/\cos \mu_0} = \frac{Wt_6 - \Delta \cos \alpha}{H} \cos \mu_0, \quad (21.5)$$

$$\operatorname{tg} \mu_0 = \frac{ON}{OO'} = \frac{A_{\text{бок}}}{H} = \frac{\Delta \sin \alpha}{H} = \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha. \quad (21.6)$$

Сравнивая выражения, определяющие углы μ и μ_0 , получим

$$\operatorname{tg} \mu = \operatorname{tg} \mu_0 \cos \varphi_0. \quad (21.7)$$

Вариант 3. В тех случаях, когда нежелателен разворот прицела на угол сноса, положение самолета определяется высотой бомбометания H и углами прицеливания φ_x и φ_z , измеряемыми соответственно в продольном и боковом направлениях. Углы прицеливания согласно следующим зависимостям (рис. 21.4):

$$\operatorname{tg} \varphi_x = \frac{O'K}{OO'} = \frac{Wt_6 \cos \alpha - \Delta}{H} = \frac{W_x t_6}{H} - \operatorname{tg} \gamma, \quad (21.8)$$

где

$$W_x = W \cos \alpha = V_c + U \cos \epsilon,$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{K\Pi}{OK} = \frac{W_z t \delta}{H} \cos \varphi_x,$$

где

$$W_z = U \sin \varepsilon.$$

Таким образом, задача сводится в основном к определению составляющих ветра, а затем к решению полученных зависимостей и построению рассчитанных углов φ_x и φ_z .

Вариант 4. Положение самолета может быть задано, наконец, с помощью высоты бомбометания H , наклонной дальности до цели $L_{\text{нак}}$ и курсового пеленга цели $\Pi_{\text{ц}}$, т. е. в полярной системе

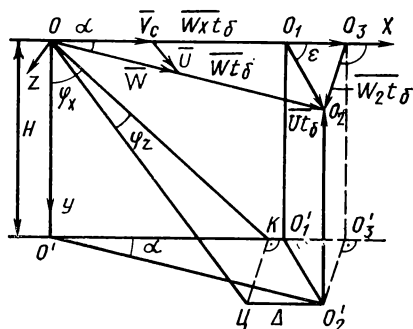


Рис. 21.4. Определение положения самолета относительно цели в системе координат H , φ_x , φ_z

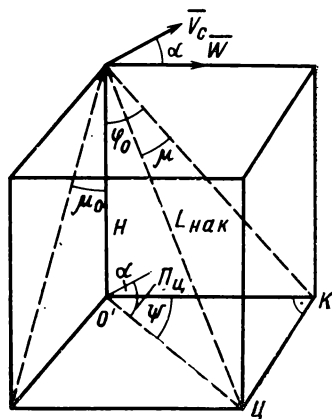


Рис. 21.5. Связь между прямоугольными и полярными координатами цели

координат. В этой системе работают бортовые радиолокационные станции. Между оптическим прицелом и радиолокатором осуществляется связь, обеспечивающая пересчет прямоугольной системы координат в полярную. Из рис. 21.5 следует, что

$$L_{\text{нак}} = \frac{H}{\cos \varphi_0 \cos \mu}, \quad (21.9)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ц}} &= \alpha + \psi, \\ \operatorname{tg} \psi &= \frac{OK}{O'K} = \frac{H}{\cos \varphi_0} \operatorname{tg} \mu \frac{1}{H \operatorname{tg} \varphi_0} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \mu}{\sin \varphi_0} = \frac{\operatorname{tg} \mu_0 \cos \varphi_0}{\sin \varphi_0} = \frac{\operatorname{tg} \mu_0}{\operatorname{tg} \varphi_0}. \end{aligned} \quad (21.10)$$

Схема прицеливания при бомбометании по горизонтально движущейся цели. На рис. 21.6 изо-

бражена проекция на земную поверхность движения самолета, летящего на высоте H . Для попадания бомбы в цель необходимо, чтобы в момент сбрасывания бомбы цель находилась на расстоянии $CD = V_{ц} t_0$ от точки падения бомбы D . Для определения прицельных данных воспользуемся принципом обращенного движения, т. е. будем считать цель неподвижной, а самолету сообщим дополнительную скорость, равную скорости цели, но противоположного направления. Для этого вектор скорости ветра $\bar{U}$ суммируем с вектором $-\bar{V}_{ц}$. Результирующий вектор $\bar{U}_{пр}$ называется **приведенным** (фиктивным) **вектором** ветра. Таким образом, вводя понятие приведенного ветра, приходим к прицельной схеме бомбометания по неподвижной цели. Из схемы легко получить, что

$$\operatorname{tg} \varphi_0 v_{ц} = \frac{W_{ц} t_0 - \Delta \cos \alpha_{ц}}{H}, \quad (21.11)$$

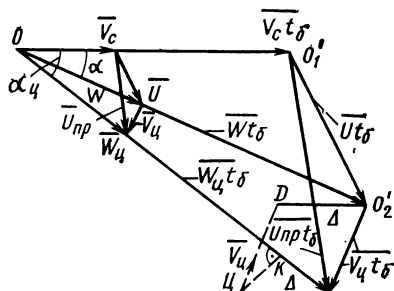


Рис. 21.6. Схема прицеливания при бомбометании по горизонтально движущейся цели

$$\operatorname{tg} \mu v_{ц} = \operatorname{tg} \gamma \sin \alpha_{ц} \cos \varphi_0 v_{ц}, \quad (21.12)$$

где $W_{ц}$ и $\alpha_{ц}$ — путевая скорость и угол сноса самолета относительно цели;

$\varphi_0 v_{ц}$ и $\mu v_{ц}$ — соответственно углы прицеливания и бокового смещения визирного луча при бомбометании по горизонтально движущейся цели.

Ввод поправок в угол прицеливания при бомбометании серий и строим. Бомбометание серий из n бомб применяется, если цель имеет малую протяженность в направлении линии пути самолета. Расстояние между точками разрывов первой и последней бомбы называется **линейной длиной** серии — $L_{сер}$, расстояние между точками разрыва двух соседних бомб — **линейным интервалом** серии — $l_{сер}$, а временной промежуток между разрывами двух соседних бомб — **временным интервалом** серии — $\Delta t_{сер}$.

Величины $L_{сер}$ и $l_{сер}$ обычно задаются штурману в зависимости от протяженности цели, тогда временной интервал серии рассчитывается как $\Delta t_{сер} = \frac{L_{сер}}{W(n-1)}$. Бомбометание серий осуществляется так, чтобы цель располагалась в середине линейной длины серии.

Из рис. 21.7 легко получить, что

$$\operatorname{tg} \varphi_{0\text{сер}} = \frac{A_{\text{пр}} + \frac{L_{\text{сер}}}{2}}{H} = \frac{Wt_6}{H} - \operatorname{tg} \gamma \cos \alpha + \frac{L_{\text{сер}}}{2H}, \quad (21.13)$$

где $\varphi_{0\text{сер}}$ — угол прицеливания при бомбометании серий.

Бомбометание строем производится по площадным целям одновременно несколькими самолетами. При этом прицеливание осуществляет только головной самолет и бомбы сбрасываются по его команде. При бомбометании строем цель должна находиться сзади точки разрыва бомбы, сброшенной с головного самолета, на расстоянии, равном половине глубины

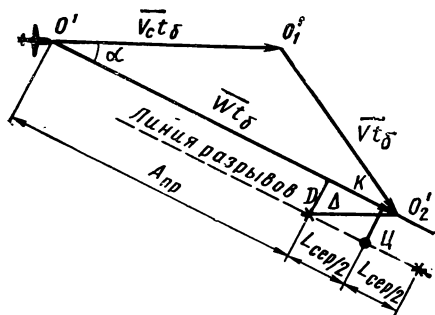


Рис. 21.7. Схема прицеливания при серийном бомбометании

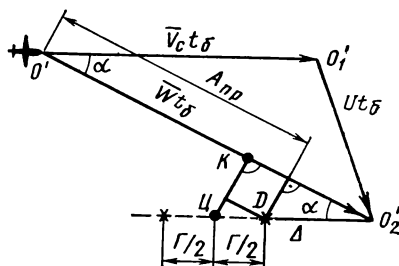


Рис. 21.8. Схема прицеливания при групповом бомбометании

строга Γ (глубина строя измеряется в направлении курса). Из схемы прицеливания (рис. 21.8) можно получить, что

$$\operatorname{tg} \varphi_{0\text{г}} = \frac{A_{\text{пр}} - \frac{\Gamma}{2} \cos \alpha}{H} = \frac{Wt_6}{H} - \operatorname{tg} \gamma \cos \alpha - \frac{\Gamma}{2H} \cos \alpha. \quad (21.14)$$

Задачи и основные способы прицеливания по направлению и дальности

Задача прицеливания при бомбометании состоит в том, чтобы к моменту бросания бомбы, выполнив совокупность операций по наводке самолета, придать самолету такое положение, которое обеспечивало бы попадание сброшенной бомбы в намеченную точку (цель). При всех способах бомбометания процесс прицеливания распадается на два этапа: прицеливание по направлению (боковая наводка) и прицеливание по дальности (продольная наводка).

Задача прицеливания по направлению сводится к тому, чтобы обеспечить на некотором отрезке времени дви-

жения самолета, включающем и момент сбрасывания бомбы (точка O на рис. 21.9), такое направление его воздушной скорости, при котором линия пути самолета проходит в стороне от цели с наветренной стороны на расстоянии бокового отбоя бомбы, т. е. задача сводится к определению необходимого для прицельного бомбометания курса самолета K_T .

Из сказанного вытекает, что задачу прицеливания по направлению можно рассматривать как бы состоящей из двух основных частей:

— определения требуемого угла изменения курса самолета $\Delta K_T = K_0 - K_T$;

— выполнения разворота самолета на данный угол с требуемой для прицельного бомбометания точностью до наступления момента сбрасывания.

Основные способы прицеливания по направлению. При проектировании механизмов боковой наводки принимают некоторые допущения, упрощающие практическое решение задачи. В основном, это два допущения:

1. Самолет разворачивается как бы мгновенно в одной точке.

2. Боковая наводка считается выполненной, когда линия пути проходит через цель; возникающей при этом угловой ошибки наведения самолета $A_{бок}/A_{пр}$ при $A_{пр} \gg A_{бок}$ пренебрегают.

Все основные способы прицеливания по направлению могут быть разделены на две группы:

1. Способы, основанные на подборе угла сноса α . При этом не требуется знать величину и направление ветра.

К этой группе относятся способ измерения угла сноса, способ кратного угла и синхронный способ.

2. Векторные способы прицеливания по направлению. В этом случае требуется предварительно определить вектор ветра. К этим способам относятся навигационный способ боковой наводки и векторный — со стабилизированной линейкой вектора ветра.

Прицеливание по дальности. После осуществления боковой наводки выполняется второй этап прицеливания — прицеливание по дальности. Задача этого этапа заключается в том, чтобы определить на линии боевого пути такую точку, расстояние от которой до проекции цели на плоскости пути равнялось бы продольному отбоя бомбы, т. е. задача сводится к определению момента (точки) сбрасывания бомбы. Эта точка чаще

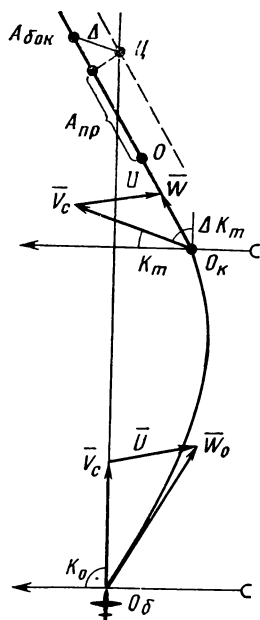


Рис. 21.9. Схема прицеливания по направлению

всего определяется моментом наступления равенства текущего угла визирования углу прицеливания, т. е. $\varphi_t = \varphi$.

Для определения значения угла прицеливания φ в первую очередь требуется знать величину путевой скорости W . Поэтому в соответствии со способами определения величины W разделяют и методы осуществления прицеливания по дальности. Различают навигационный, базисный, синхронный и векторный способы прицеливания по дальности. Наибольшее распространение в настоящее время получили два последних способа.

Навигационный способ прицеливания по дальности позволяет определить величины W и α , а следовательно, рассчитать и угол прицеливания φ , для заранее выбранного направления подлета к цели по известным значениям V_c , U и K_U .

Базисный способ позволяет определить вектор путевой скорости измерением времени пролета базы, а на основании W рассчитать и φ ; при этом необходимо, чтобы в процессе измерений курс самолета совпадал с боевым курсом, так как для других курсов значение W , а следовательно, и φ будет другим. При известной базе и времени ее пролета $W = B/t_{\text{баз}}$.

При синхронном способе прицеливания по дальности на основе непрерывного (синхронного) слежения визирным лучом за целью определяется основная составляющая угла прицеливания, равная $\frac{W t_6}{H}$. Угловая поправка на отставание

обычно вырабатывается в прицеле автоматически, поправки на серию и строй вводятся по шкалам вручную. Основная составляющая угла прицеливания и поправки суммируются затем в механизме сбрасыванием.

Для осуществления синхронного слежения за целью и определения величины $\frac{W t_6}{H}$ служит специальный механизм синхронизации. Принципиальная схема и расчет одного такого механизма представлены ниже, при рассмотрении устройства бомбардировочного прицела.

При векторном способе прицеливания по дальности величина путевой скорости определяется из векторного построителя, а затем вычисляется угол прицеливания. Так как линейка вектора ветра векторного построителя стабилизирована в пространстве, то прицелы, работающие по данному способу, позволяют производить бомбометание с любого направления подлета к цели. В этом и заключается основное отличие и преимущество векторного способа прицеливания от навигационного.

21.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРИЦЕЛИВАНИЯ ПРИ БОМБОМЕТАНИИ

Для выполнения прицельного бомбометания необходимо иметь такие исходные данные, как H , V_c , $\bar{U}$, θ , $L_{\text{сер}}$, n , Γ , $V_{\text{ц}}$.

Ряд данных (θ , $L_{\text{сер}}$, n , Γ) обычно определяются заданием на бомбометание. Вектор скорости цели $V_{\text{ц}}$ определяется штурманом по типу цели. Рассмотрим способы получения H , $V_{\text{ц}}$, U .

Измерение высоты полета

Приборы, измеряющие высоту полета, называются высотомерами. По методу измерения высоты высотомеры делятся на барометрические, звуковые, световые, радиовысотомеры и др. При бомбометании различают следующие высоты (рис. 21.10):

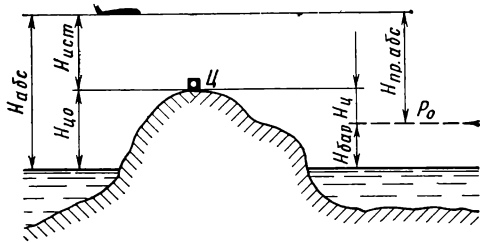


Рис. 21.10. К определению высоты полета самолета

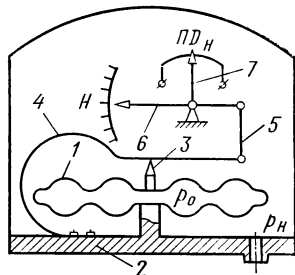


Рис. 21.11. Принципиальная схема высотомера:

1—анероидная коробка; 2—основание; 3—опорная игла; 4—пружина; 5—рычажная система; 6—стрелка указателя; 7—движок потенциометра

$H_{\text{абс}}$ — абсолютную высоту, т. е. высоту полета относительно уровня моря; $H_{\text{ист}}$ — истинную высоту, т. е. высоту самолета над пролетаемой местностью. Знание истинной высоты необходимо для прицеливания при бомбометании. Применяемые на самолете барометрические высотомеры измеряют абсолютную высоту полета. Истинная высота в этом случае определяется как разность между абсолютной высотой и высотой местности (цели) над уровнем моря — $H_{\text{ц0}}$, т. е.

$$H_{\text{ист}} = H_{\text{абс}} - H_{\text{ц0}}. \quad (21.15)$$

Световые, звуковые высотомеры и радиовысотомеры измеряют непосредственно истинную высоту полета.

Рассмотрим принцип устройства барометрических высотомеров, входящих обычно в комплект бомбардировочного оборудования самолета. Барометрический метод измерения высоты полета основан на использовании явления измерения давления воздуха с увеличением высоты. Связь между высотой и давлением выражается зависимостью

$$H = \left[1 - \left(\frac{p_H}{p_0} \right)^{\tau R} \right] \frac{T_0}{\tau} \text{ для } H \text{ от } 0 \text{ до } 11000 \text{ м}$$

$$H = 11000 - RT_{11} \ln \frac{p_{11}}{p_H} \text{ для } H \text{ более } 11000 \text{ м,}$$

где p_H , p_0 и p_{11} — абсолютное давление в Н/м² соответственно на высоте H , начальной высоте и $H = 11000$ м;

R — газовая постоянная воздуха;

T_0 , T_{11} — абсолютная температура на начальной высоте и высоте, равной 11 км;

τ — температурный градиент.

Из этих формул видно, что измеряемая высота является функцией пяти параметров

$$H = f(p_H, p_0, T_0, \tau, R).$$

Отсюда следует, что барометрический метод позволяет вычислить высоту полета относительно любого уровня, если известны значения p_H , p_0 , T_0 , τ и R . Обычно в качестве начального уровня в барометрических высотомерах принимается уровень моря, а их градуировка производится для условий Международной стандартной атмосферы (МСА). В этом случае высота однозначно зависит от давления p_H , т. е. $H = f_1(p_H)$. Все барометрические высотомеры и построены на решении этой зависимости.

Конструктивно барометрические высотомеры выполняются по следующей принципиальной схеме (рис. 21.11). Анероидные коробки 1 укреплены на основании 2 и несут на себе иголку 3, на которую опирается пружина 4. Так как внутри анероидных коробок имеется давление p_0 , а в полость высотомера подается воздух, имеющий давление p_H , то они под действием избыточного внутреннего давления будут расширяться, перемещать иголку, пружину и через рычажную систему 5, стрелку 6 указателя и движок 7 потенциометра датчика высоты на величину δ , пропорциональную разности давлений, т. е. $\delta = k(p_0 - p_H)$. При $p_0 = \text{const}$ и $p_H = f_2(H)$ величина перемещения $\delta = f_3(H)$.

Показания барометрических высотомеров будут абсолютно правильны лишь в условиях стандартной атмосферы. В реальной атмосфере они обладают методическими погрешностями, возникающими вследствие отклонения давления на уровне моря в реальной атмосфере от принятого начального давления p_0 в условиях стандартной атмосферы, и отклонения закона распределения температуры по высоте в реальной атмосфере от нормального распределения, принятого в МСА.

Если давление на уровне моря отклоняется от нормального, то истинная высота определяется по зависимости

$$H_{\text{ист}} = H_{\text{пр.абс}} - (H_{\text{ц}_0} \pm H_{\text{бар}}) = H_{\text{пр.абс}} - H_{\text{ц}}, \quad (21.16)$$

где $H_{\text{ц}} = H_{\text{ц}_0} \pm H_{\text{бар}}$ — высота цели над уровнем, соответствующим давлению p_0 ;
 $H_{\text{пр. абс}}$ — приборное значение абсолютной высоты;
 $H_{\text{бар}}$ — барометрическое превышение цели над уровнем моря.

Обычно величины $H_{\text{ц}}$ и $H_{\text{бар}}$ заранее известны штурману на основании данных о местоположении цели и метеорологической разведки. Погрешность высотомеров, связанная с изменением давления на уровне моря, является величиной постоянной для данных метеорологических условий в районе цели по всей шкале высотомера, а поэтому может быть компенсирована смещением начала отсчета на шкале прибора в ту или другую сторону.

Отклонение распределения температуры по высоте от стандартного приводит к случайному изменению плотности и давления в различных слоях воздуха. Поэтому температурная погрешность высотомера не может быть компенсирована простым смещением начала отсчета и чаще всего учитывается пересчетом приборных значений высоты по зависимости

$$H_{\text{абс}} = \frac{H_{\text{пр. абс}} T_{\text{ср}}}{T_{\text{ср. ст}}}, \quad (21, 17)$$

где $T_{\text{ср}}$ и $T_{\text{ср. ст}}$ — соответственно средняя температура воздуха при реальном и стандартном ее распределении по высоте.

Очевидно, что $T_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (T_{\text{з}} + T_{\text{н}})$ и

$$T_{\text{ср. ст}} = 288^\circ - 0,00325 H_{\text{пр. абс}} \text{ для } H < 11000 \text{ м};$$

$$T_{\text{ср. ст}} = 252,25 \text{ К для } H > 11000 \text{ м}.$$

Здесь $T_{\text{з}}$ и $T_{\text{н}}$ температура соответственно на уровне Земли и на высоте бомбометания $\tau = 0,0065$ град/м.

Измерение воздушной скорости

Приборы или датчики, предназначенные для измерения воздушной скорости самолетов, основаны на определении разности статического и динамического давлений. Принципиальная схема датчика воздушной скорости приведена на рис. 21. 12. Приемник воздушного давления ПВД устанавливается во встречном потоке воздуха и представляет собой двойной цилиндр. Внутренний цилиндр открыт с торца и в нем создается динамическое давление $p_{\text{дин}}$ тем большее, чем больше скорость полета $V_{\text{с}}$. Внешний цилиндр закрыт с торца и имеет на удалении порядка $10d$ от своей головной части отверстия, благодаря которым внутри его полости устанавливается статическое давление — $p_{\text{ст}}$, равное давлению на высоте полета. Легко видеть, что перемещение иглы 3 анероидных коробок 4 и связанной с ней

пружины 5 через рычажную систему 6 будет передано на стрелку 7 указателя и движок 8 потенциометра датчика скорости пропорционально разности давлений, поданных от ПВД в полости анероидных коробок и указателя, т. е. $\delta = k(p_{\text{дин}} - p_{\text{ст}})$. Так как $(p_{\text{дин}} - p_{\text{ст}}) = f(V_c)$, то $\delta = \delta(V_c)$.

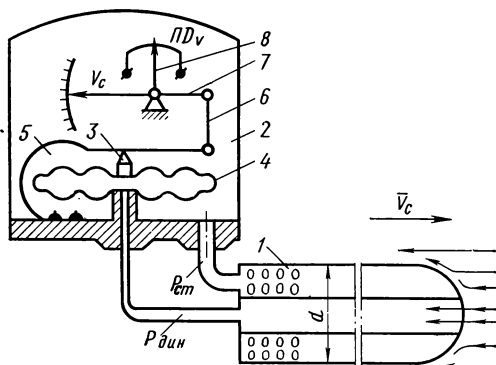


Рис. 21.12. Принципиальная схема датчика скорости:

1—приемник воздушного давления (ПВД); 2—указатель скорости; 3—опорная игла; 4—анероидная коробка; 5—пружина; 6—рычажная система; 7—стрелка указателя; 8—двигок потенциометра

Так же как и барометрические высотомеры, указатели скорости имеют методические погрешности, которые связаны с искажением воздушного потока в зависимости от места установки на самолете ПВД и с отклонением распределения температуры в реальной атмосфере от стандартной. Поэтому приборное значение скорости $V_{c, \text{пр}}$ пересчитывается по зависимости вида

$$V_c = (V_{c, \text{пр}} + \Delta V_c) \frac{\sqrt{T_H}}{\sqrt{T_{H \text{ ст}}}}, \quad (21.18)$$

где

V_c — истинная скорость самолета;
 ΔV_c — аэродинамическая поправка на место установки ПВД, определяемая экспериментально путем продувки модели в аэродинамической трубе и являющейся величиной постоянной для каждого типа самолета и места установки ПВД;

$T_H, T_{H \text{ ст}}$ — температура на высоте полета соответственно для реальной и стандартной атмосфер; первая измеряется, а вторая определяется как $T_{H \text{ ст}} = 288 - 0,0065 H$ для $H < 11000$ м и $T_{H \text{ ст}} = 216,5$ К для $H > 11000$ м.

Определение ветра

Данные о векторе ветра экипаж получает либо на основании метеорологической разведки района предполагаемого бомбометания, либо определяет (измеряет) непосредственно сам в районе цели. Последнее, очевидно, более точно. Экипаж может оп-

ределить вектор ветра, например, способом штилевой синхронизации. Способ штилевой синхронизации основан на измерении величины и направления смещения изображения наземного ориентира от перекрестия визирной системы прицела в его поле зрения при выполнении штилевой синхронизации, т. е. при непрерывном слежении визирным лучом за ориентиром в случае отсутствия ветра (штиля).

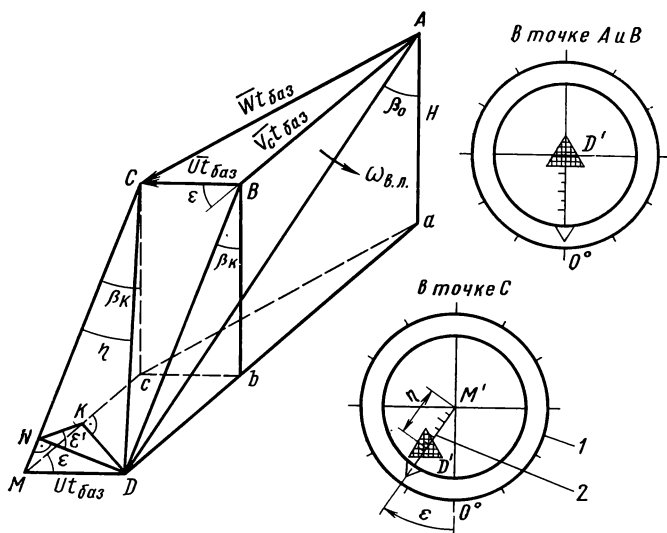


Рис. 21.13. Определение ветра методом штилевой синхронизации:

1—шкала измерения бортового угла ветра; 2—шкала измерения скорости ветра

В точке A (рис. 21.13) штурман набрасывает перекрестие визирной системы прибора на ориентир D и задает визирному лучу скорость штилевой синхронизации. При отсутствии ветра и полете самолета с неизменным курсом в течение времени $t_{\delta аз}$ он придет в точку B , а визирный луч по-прежнему будет направлен на ориентир D . При ветре самолет будет снесен в точку C , а перекрестие будет направлено на точку M . При этом в его поле зрения ориентир D сместится относительно перекрестия в направлении, обратном направлению вектора ветра. Бортовой угол ветра измеряется по круговой шкале 1, на оправе окуляра прибора в плоскости, перпендикулярной линии визирования. Поэтому угол ε измеряется в плоскости NKD , параллельной плоскости сетки и перпендикулярной визирному лучу CM . Тогда следует, что

$$\operatorname{tg} \varepsilon' = \frac{KD}{KN} = \frac{MK \operatorname{tg} \varepsilon}{MK \sin (90^\circ - \beta_K)} = \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{\cos \beta_K}. \quad (21.19)$$

Легко видеть, что ε измеряется без ошибок при $\beta_K=0$. Это условие выполнить не удастся, так как при встречном ветре ориентир D в случае $\beta_K=0$ будет экранироваться фюзеляжем самолета. Поэтому чаще всего принимают $\beta_K=10^\circ$ и при этом полагают $\varepsilon=\varepsilon'$.

Отрезок $D'M'$ в масштабе построителя определяет скорость ветра, т. е. $kU=f'_{06} \operatorname{tg} \eta$.

Величина смещения изображения ориентира в поле зрения прицела (отрезок $D'M'$) может быть определен как

$$D'M' = f'_{06} \operatorname{tg} \eta = f'_{06} \frac{ND}{NC} = \frac{f'_{06} \sqrt{1 - \sin^2 \beta_K \cos^2 \varepsilon}}{H} \cdot \frac{H}{U t_{6аз} \cos \beta_K} - \cos \varepsilon \sin \beta_K. \quad (21.20)$$

Из этой зависимости следует, что при $\frac{H}{t_{6аз}} = \operatorname{const} (f'_{06}$ и β_K также имеют постоянное значение), величина угла η зависит только от U , а, следовательно, отрезок $D'M'$ в масштабе шкалы ветра определяет величину скорости ветра.

Для выполнения условия $\frac{H}{t_{6аз}} = \operatorname{const}$ необходимо определенным образом задать начальный угол визирования β_0 . Так как

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \frac{H \operatorname{tg} \beta_K + V_c t_{6аз}}{H} = \operatorname{tg} \beta_K + \frac{t_{6аз}}{H} V_c, \quad (21.21)$$

то при $\frac{t_{6аз}}{H} = \operatorname{const}$ и $\beta_K = \operatorname{const}$ начальный угол визирования является функцией скорости полета самолета. Таким образом процесс измерения вектора скорости ветра осуществляется следующим образом. По специальной шкале, проградуированной как $\beta = f(V_c)$, устанавливается β_0 и при наложении перекрестия на ориентир включается мотор путевой скорости, который обеспечивает угловую скорость визирному лучу, соответствующую штилевой синхронизации. По мере отхода изображения ориентира с перекрестия штурман непрерывно совмещает в поле зрения прибора линейку ветра с изображением ориентира и в момент достижения $\beta = \beta_K$ производит отсчеты величины и направления ветра. Точность данного способа измерения ветра равна 2—4% от величины воздушной скорости.

21.4. ВЕКТОРНО-СИНХРОННЫЙ БОМБАРДИРОВОЧНЫЙ ПРИЦЕЛ

Бомбардировочным прицелом называется комплекс устройств, с помощью которого осуществляется прицельное сбрасывание бомб. Оптический прицел бомбометания (ОПБ) в общем случае состоит из следующих блоков или механизмов: 1) визирной системы, с помощью которой осуществляется поиск,

наблюдение и слежение за целью в процессе прицеливания; 2) механизма стабилизации, выполняющего построение вертикали, принятой в качестве начала отсчета всех углов при бомбометании и стабилизацию визирной линии относительно поверхности земли при колебаниях самолета; 3) счетно-решающего устройства, обеспечивающего построение необходимых прицельных данных; 4) механизма боковой наводки, который вырабатывает требуемую величину изменения курса и выдает команду в автопилот на разворот самолета на вычисленный угол; 5) механизма автоматического сбрасывания, с помощью которого осуществляется автоматический сброс бомб; 6) вспомогательные механизмы, выполняющие различные вспомогательные операции; например, механизм предупреждения автоматического сбрасывания и т. д.

Общие сведения о прицеле

Векторно-синхронный бомбардировочный прицел предназначен для прицеливания при бомбометании с горизонтального полета по подвижным и неподвижным целям с произвольного направления выхода на цель. Прицел обеспечивает построение угла прицеливания векторным и синхронным способами, прицеливание по направлению векторным и всеми способами, основанными на подборе угла сноса, свободу маневрирования самолета по высоте, скорости и курсу за счет автоматического ввода этих параметров в прицел, непрерывный и автоматический ввод баллистических данных, измерение ветра методом штилевой синхронизации, автоматический сброс бомб с выдачей сигнала предупреждения и открытия бомболюков.

Визирование цели при наличии видимости осуществляется через телескопическую или коллиматорную оптические системы. При отсутствии видимости цели прицеливание производится с помощью экрана индикаторной трубки самолетной радиолокационной станции, с которой прицел имеет электрическую связь.

Оптическая схема и поле зрения телескопической визирной системы представлены на рис. 21. 14 и 21. 15.

Куб-призмы выполняют роль оборачивающей системы, а башмачная призма служит лишь для излома оптической оси прибора, вызванном удобством наблюдения.

Стабилизация поля зрения прибора обеспечивается гироскопической системой, имеющей механическую связь через цилиндрические дифференциалы с головными куб-призмами. Удержание гироскопа в вертикали осуществляется механизмом автокоррекции. Сам прицел устанавливается на курсовом стабилизаторе автопилота и имеет с последним механическую и электрическую связь.

Конструктивно прибор выполнен в виде отдельных агрегатов, электрически связанных между собой.

Прицел является основным агрегатом комплекта, в котором непосредственно вырабатываются угол прицеливания φ_0 и угол бокового смещения визирного луча μ , а также команды на автопилот, необходимые для выполнения прицеливания по направлению.

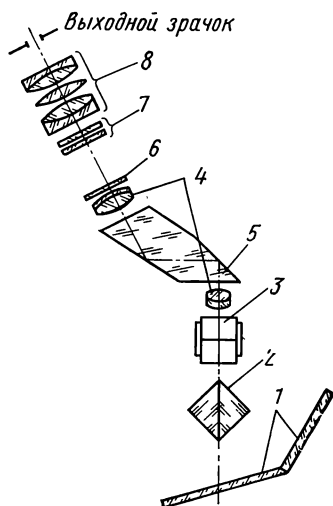


Рис. 21.14. Оптическая схема визирной системы прицела:

1—защитное стекло; 2—куб-призма углов визирования; 3—куб-призма бокового смещения визирного луча; 4—объектив; 5—башмачная призма; 6—светофильтр; 7—сетки для прицеливания и измерения вектора ветра; 8—окуляр

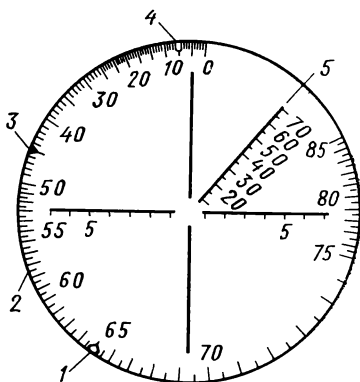


Рис. 21.15. Поле зрения прицела:

1—петелька углов визирования; 2—шкала углов визирования и прицеливания; 3—индекс углов прицеливания; 4—двойной штрих, указывающий момент окончания измерения вектора ветра; 5—шкала для измерения скорости ветра

Решающий прибор (РП) предназначен для автоматизации процесса прицеливания, в частности, для автоматического построения времени падения бомбы и углового отставания, а при векторном способе также — путевой скорости самолета и составляющих $(H/t_6)^*$ и $U \sin \varepsilon$, т. е. величин, которые используются в приборе для построения угла прицеливания и угла сноса. К РП подключены датчик высоты и воздушной скорости, а также компас, который обеспечивает стабилизацию линейки вектора ветра в пространстве при маневрах самолета.

Высотный блок служит для расширения высотного диапазона прибора, а в коробке управления размещены элементы, управляющие автокоррекцией гироскопа. Датчики высоты и воздушной скорости предназначены для автоматического ввода в

РП соответственно приборной высоты и скорости полета самолета. Преобразователь тока служит для питания гиromотора и элементов цепи автокоррекции. Наконец, электронный блок объединяет электронные реле, управляющие следящими и счетно-решающими потенциометрическими системами.

Ввод в прицел исходных данных и баллистики

Для построения угла прицеливания, угла бокового смещения визирного луча и выполнения прицеливания по направлению, необходимо ввести в прицел целый ряд данных. Такие величины как приборное значение абсолютной высоты, значение скорости самолета и изменение курса самолета поступают в прибор автоматически от соответствующих датчиков. Значения величины и направления ветра, температурные поправки, поправки на показания приемника воздушного давления, высоту цели, характеристическое время падения бомбы и поправки в угол прицеливания на серию и строй вводятся штурманом вручную, по соответствующим шкалам. На основании этих исходных данных вырабатываются истинная высота и воздушная скорость самолета, время падения и угловое отставание бомбы и другие величины, позволяющие построить прицельные данные.

Истинная высота полета вырабатывается в РП с помощью потенциометрических счетно-решающих устройств приближенным значением $H_{ист}^*$ как $H_{ист}^* = H_{пр.abc}^* - H_{ц}$, где

$$H_{пр.abc}^* = \frac{H_{пр.abc} T_{ср}}{288 - 0,00325 H_{пр.abc}^*}.$$

Приборная высота $H_{пр.abc}$ поступает в РП от дистанционного датчика высоты, а температура на уровне цели T_3 и высоте полета T_H вводятся с помощью рукояток 9 и 14 (рис. 21.16). С помощью шкального суммирующего механизма и пары шестерен обеспечивается поворот движка потенциометра $П T_{ср}$ пропорционально величине $T_{ср}$, определяемой как $\frac{1}{2} (T_3 + T_H)$. Тогда

на электрическом месте, решающем зависимость $H_{пр.abc}^* (288 - 0,00325 H_{пр.abc}^*) = H_{пр.abc} T_{ср}$, будет неизвестна лишь одна величина абсолютной высоты полета $H_{пр.abc}^*$. Она определяется уравниванием электрического моста за счет перемещения движка потенциометра $П H_{пр.abc}^*$, движение на который поступает от двигателя 1 через электромагнитную муфту H . То же движение через конический дифференциал вызывает поворот коноидов 16 и 17, шкалы высот 18. При равновесии электрического моста поворот этих элементов будет пропорционален $H_{пр.abc}^*$. С помощью рукоятки 19 по шкале 20 устанавливается высота цели $H_{ц}$. Тогда в результате суммирования на коническом дифференциале $H_{пр.abc}^*$ и $H_{ц}$ поворот указанных ко-

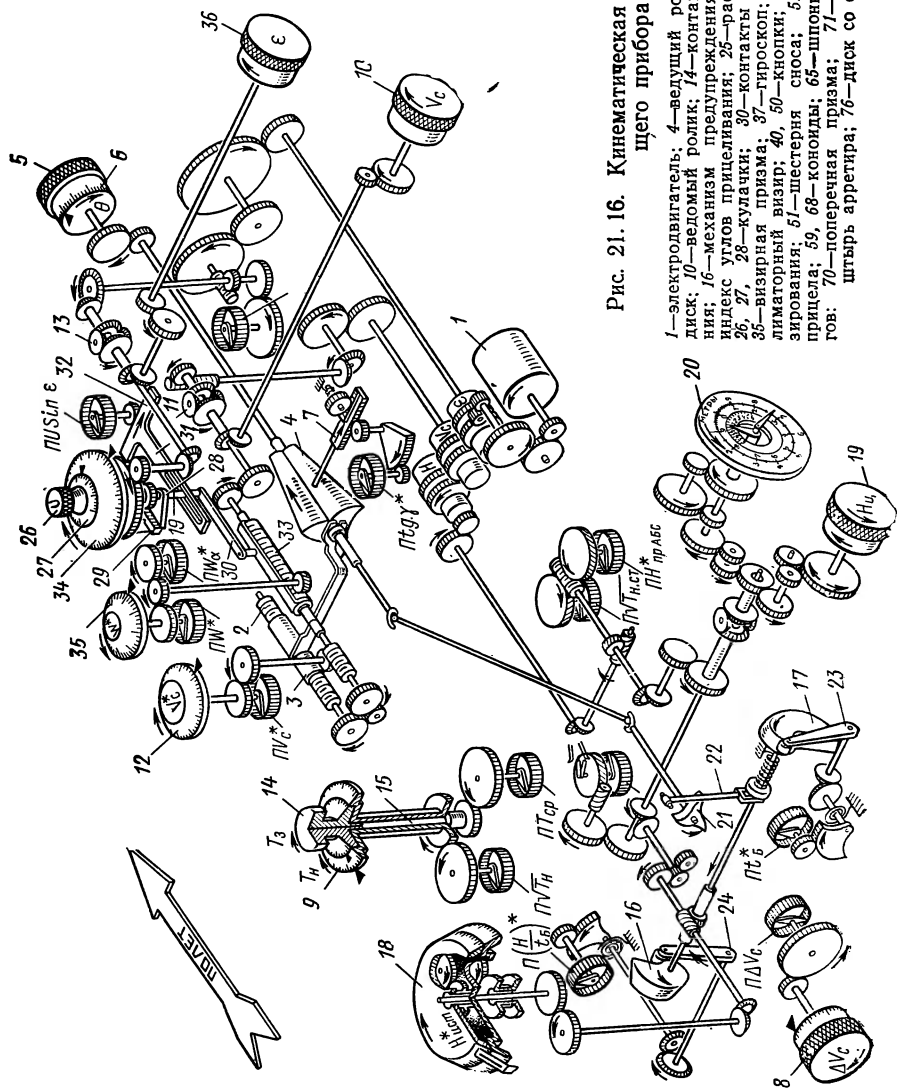


Рис. 21. 16. Кинематическая схема решающего прибора:

1—электроприводитель; 4—ведущий ролик; 5—фрикционный диск; 10—свободный ролик; 14—контакты углов прицепления; 16—механизм предупреждения сорасования; 21—индекс углов прицепления; 25—распределительный вал; 26, 27, 28—кулачки; 30—контакты углов визирования; 35—визирная призма; 37—гирокон; 38—шторка; 39—коллиматорный визир; 40, 50—кнопки; 43—индекс углов визирования; 51—шестерня сноса; 52—сектор; 53—сектор прицела; 59, 68—концы; 65—шпонка; 69—система рычагов; 70—поперечная призма; 71—дифференциал; 74—штырь арретира; 76—диск со светофильтрами.

ноидов и шкалы высот будет пропорционален истинной высоте полета самолета $H_{ист}^*$.

При сбрасывании бомбы по цели, имеющей значительное превышение $H_{ц}$ над уровнем моря, необходимо учесть влияние на величину угла прицеливания изменения плотности воздуха на уровне цели по сравнению с бомбометанием по цели, расположенной на уровне моря. Это обеспечивается изменением величины характеристического времени θ , подлежащего вводу в РП, согласно таблице, построенной по зависимости $\theta' = f(\theta, H_{ц})$ и помещенной на передней стенке РП.

Истинная воздушная скорость вычисляется в РП по формуле

$$V_c^* = \frac{(V_{с.пр} + \Delta V_c) \sqrt{T_H}}{\sqrt{288 - 0,0065 H_{пр.абс}^*}}.$$

Приборная воздушная скорость $V_{с.пр}$ поступает от дистанционного датчика скорости в электрическое суммирующее и множительное устройство. Аэродинамическая поправка вводится на потенциометр $\Pi \Delta V_c$ при вращении рукоятки 8, а рукояткой 9 на функциональный потенциометр $\Pi \sqrt{T_H}$ вводится температура на высоте полета самолета. Поскольку на потенциометре $\Pi H_{пр.абс}^*$ отрабатывается абсолютная высота полета самолета и с этим потенциометром связан движок функционального потенциометра $\Pi \sqrt{T_{H.ст.}}$, то на нем будет задаваться величина $\sqrt{T_{H.ст.}}$. По введенным в РП величинам с помощью двигателя 1 и электромагнитной муфты V на потенциометре ΠV_c^* будет отработана величина истинной воздушной скорости V_c^* . Одновременно пропорционально этой величине переместится трехлопастный коноид 4 и движок потенциометров ΠW^* и ΠW_a^* .

Величина воздушной скорости самолета может быть также введена в РП вручную с помощью рукоятки 10.

Вектор ветра вручную вводится в РП и стабилизируется в пространстве благодаря связи линейки ветра векторного построителя дистанционной передачей с компасом. Величина ветра вводится рукояткой 26, а бортовой угол ветра ϵ — рукояткой 36. Предварительно вектор ветра может быть определен методом штилевой синхронизации. Для установки начального угла визирования при измерении ветра в прицеле предусмотрена специальная шкала 33, которая кинематически связана с рукояткой визирования 49 и проградуированная в функции $\beta_0 = f(V_c)$ (рис. 21.17), а для отсчета скорости ветра в поле зрения прицела введена дополнительная сетка с линейной шкалой, не мешающей обзору. С последней жестко связана круговая шкала, которая нанесена вокруг окуляра оптической системы и служит для отсчета курсового угла ветра.

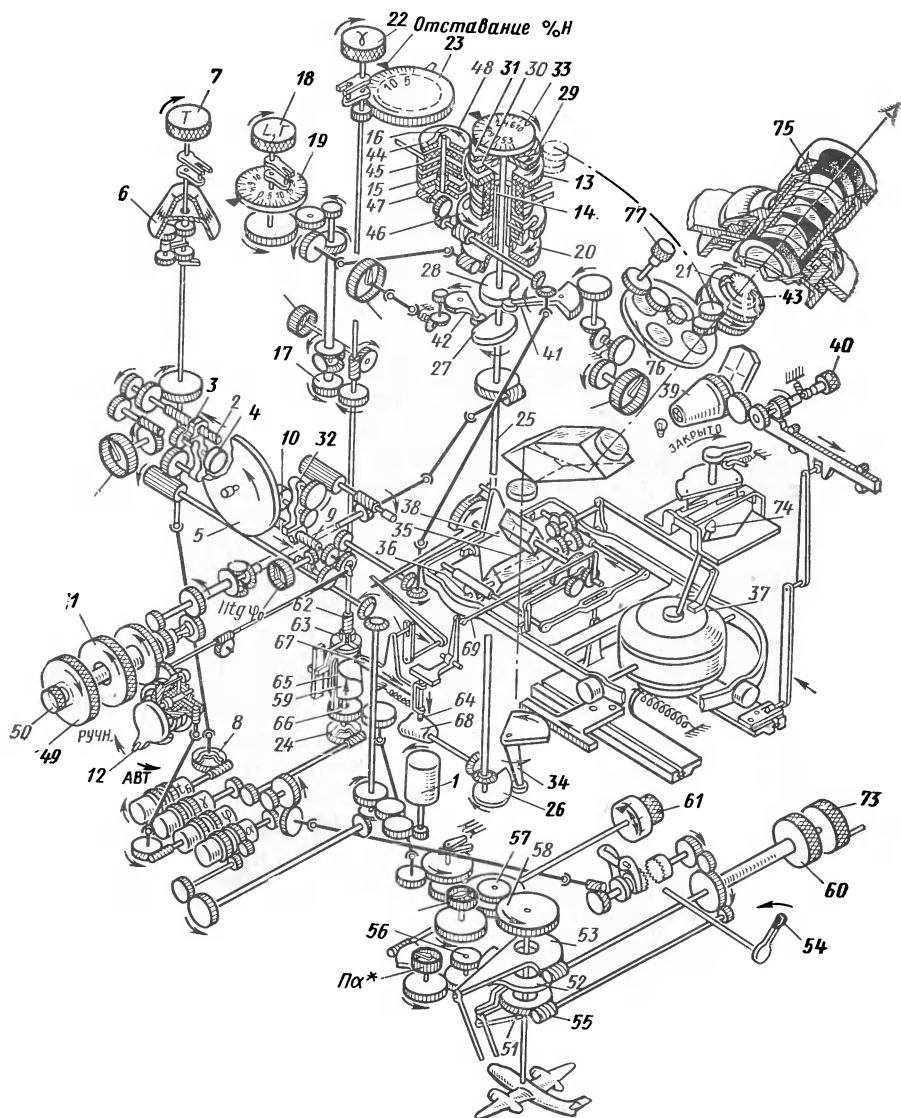


Рис. 21. 17. Кинематическая схема прицела:

1—электродвигатель; 4—ведущий ролик; 5—диск; 6—шкала времени падения бомбы; 7, 12, 17, 22—рукоятка установки времени падения бомбы; 8, 24—фрикционная муфта; 9—ходовой винт; 10—ведомый ролик; 11—рукоятка синхронизации; 18—рукоятка; 19—шкала; 22—рукоятка; 23—шкала; 25—распределительный вал; 26—кулачок; 32—каретка; 35—визирная призма; 46—колесо с механизма сбрасывания; 49—рукоятка визирования; 58—шестерня; 59, 68—коноиды; 69—система рычагов; 70—призма; 71—дифференциал

Баллистические величины — время падения бомбы и угловое отставание автоматически вырабатываются в РП и электрически передаются в прицельную головку. Они также могут быть введены в прицел по соответствующим шкалам вручную.

Время падения бомбы t_6^* строится в РП в функции лишь истинной высоты полета и характеристического времени падения бомбы на коноиде 17 и потенциометре Πt_6^* . Вращение коноида 17 осуществляется в схеме пропорциональным $H_{ист}^*$, а осевое перемещение пропорциональным θ при повороте рукоятки 5. На одном валу с коноидом 17 находится коноид 16, который служит для построения на потенциометре $\Pi \left(\frac{H}{t_6}\right)^*$ величины $\left(\frac{H}{t_6}\right)^*$.

Для компенсации ошибки в построении угла прицеливания, возникающей вследствие ввода в прицел приближенного значения t_6^* (при определении t_6^* в РП не учитывается влияние V_c), в РП вырабатывается фиктивное (измененное) угловое отставание.

Величина углового отставания строится по зависимости $\gamma^* = f(V_c, \theta)$ в трех диапазонах высоты, внутри которых H принимается некоторым средним значением, обеспечивающим минимум ошибки в построении γ^* . Угловое отставание вырабатывается в РП с помощью 3-лопастного коноида 4 на потенциометре $\Pi \operatorname{tg} \gamma^*$. При этом поворот коноида пропорционален характеристическому времени падения бомбы в одном из трех соответствующих диапазонах высот, а осевое перемещение пропорционально истинной воздушной скорости самолета.

Построение прицельных данных

Построение угла прицеливания выполняется по зависимости

$$\operatorname{tg} \varphi_0^* = \left(\frac{W t_6}{H}\right)^* - \operatorname{tg} \gamma^* + \frac{L_{сеп} - \Gamma}{2H}, \text{ где слагаемое } \left(\frac{W t_6}{H}\right)^*$$

определяется либо синхронным, либо векторным способом, а затем суммируется в механизме сбрасывания с поправками на угловое отставание, серию и строй. Угловое отставание вырабатывается в РП и автоматически с помощью потенциометрической следящей системы вводится в прицел или, так же как поправка на серию и строй, вводится в механизм сбрасывания 46, вручную с помощью рукояток 22 и 18 по шкалам 23 и 19 (см. рис. 22.17).

При синхронном способе прицеливания величина $\left(\frac{W t_6}{H}\right)^*$ вводится в механизм сбрасывания при повороте штурманом рукоятки синхронизации 11 в процессе обеспечения синхронизации перемещений визирного луча и цели. Из

рис. 21.18 видно, что для выполнения синхронизации необходимо, чтобы $\omega_{в.л} = \frac{W}{H} \cos^2 \varphi_t$ или так как поворот визирного луча осуществляется за счет поворота призмы продольного визирования, то $\omega_{п} = \frac{1}{2} \omega_{в.л}$. Это движение призмы получает от синхронизатора, в качестве которого применен дисковый фрикцион с двумя роликами, принципиальная схема которого изображена на рисунке.

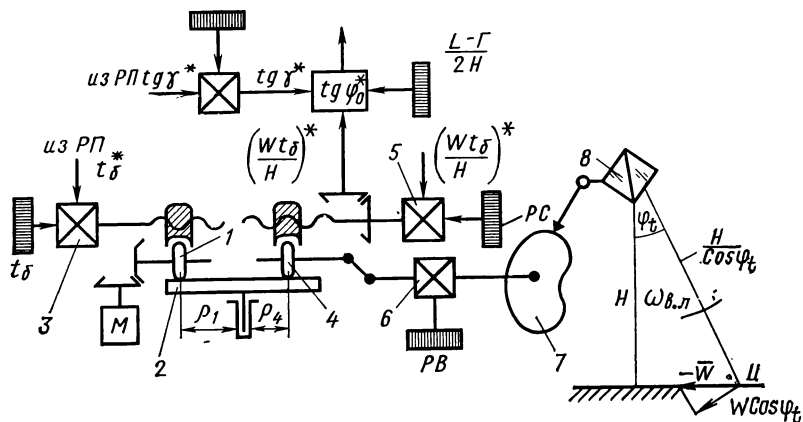


Рис. 21.18. Схема механизма синхронизации:

1—ведущий ролик; 2—диск; 3, 5, 6—дифференциалы; 4—ведомый ролик; 7—кулачок; 8—визирная призма

Электродвигатель M с постоянным числом оборотов вращает ведущий ролик 1 фрикционного механизма. Установка ролика относительно центра диска 2 определяется условием $\varrho_1 = k_1 t_6^*$. Значение приборного времени падения бомбы вводится на перемещение ролика 1 через дифференциал 3, либо автоматически из РП, либо вручную. Для того чтобы получить на выходном валу синхронизатора угловую скорость, пропорциональную $(W/H)^*$, необходимо установить ведомый ролик 4 относительно оси диска на расстояние, пропорциональное $(\frac{Wt_6}{H})^*$. Это осуществляется рукояткой синхронизации РС, кинематически связанной через дифференциал 5 с ходовым винтом ведомого ролика. Действительно, приняв $\varrho_4 = k_2 (\frac{Wt_6}{H})^*$, при равных радиусах роликов получим

$$\omega_4 = \omega_1 \frac{\varrho_4}{\varrho_1} = \omega_1 \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{Wt_6}{H} \right)^* \frac{1}{t_6^*} = k_3 \left(\frac{W}{H} \right)^*$$

Ролик 4 через дифференциал 6, к которому подключена рукоятка визирования РВ, соединен с кулачком 7, выполненным по закону, обеспечивающему поворот призмы 8 визирной системы согласно закону $\cos^2 \varphi_t$. Легко видеть, что при выполнении условия синхронизации рукоятка синхронизации будет повернута на угол, пропорциональный $\left(\frac{Wt_6}{H}\right)^*$ т. е. $\varphi_{p.c} \equiv \left(\frac{Wt_6}{H}\right)^*$. Значение этого угла поступает в механизм сбрасывания и на шестерни, связанные с индексом углов прицеливания и контактом сброса.

Практически ввод в прицел величины $\left(\frac{Wt_6}{H}\right)^*$ осуществляется следующим образом (см. рис. 21.17). При выходе на боевой курс с помощью рукоятки углов визирования 49 и синхронизации 11 штурман совмещает перекрестие с целью и подбирает скорость слежения, обеспечивающую непрерывное удержание перекрестия на цели. При вращении рукоятки визирования движения через конический дифференциал поступают на распределительный вал 25, кулачок 26 и далее на поворот визирной призмы 35. При вращении рукоятки синхронизации вращается винт 9 и каретка 32 вместе с ведомым роликом 10 смещается относительно центра фрикционного диска 5. Последний вращается со скоростью обратно пропорциональной t_6^* , так как приводится в движение от ведущего ролика 4, вращающегося с постоянной угловой скоростью от мотора 1 и отстоящего от центра диска на величину, пропорциональную t_6^* . Это смещение ведущего ролика осуществляется либо автоматически от электромагнитной муфты t_6^* , либо вручную с помощью рукоятки 7 по шкале 6. При выполнении условия синхронизации рукоятка синхронизации будет повернута на угол $\varphi_{p.c} \equiv \left(\frac{Wt_6}{H}\right)^*$ и эта величина от винта 9 через кинематическую цепочку поступает в механизм сбрасывания 46, где и отстраивается угол прицеливания с учетом поправок на отставание, серию и строй.

При векторном способе прицеливания величина путевой скорости определяется с помощью векторного построителя, находящегося в РП. Снятое с векторного построителя значение W^* делится на отношение $\left(\frac{H}{t_6}\right)^*$ вырабатываемое в РП на коноиде 16. Таким образом, при векторном методе

$$\left(\frac{Wt_6}{H}\right)^* = \frac{W^*}{(H/t_6)^*}.$$

Величина путевой скорости вырабатывается в векторном построителе приближенным значением W^* по зависимости

$$W^* = V_c^* + U \cos \varepsilon + W_{cp} (1 - \cos \alpha_{cp}). \quad (21.22)$$

При вводе в РП вектора скорости ветра палец 19' смещается от центра катушки 34 на величину, пропорциональную скорости ветра, и поворачивается относительно оси червяка 33 на величину бортового угла ветра. Серьга 30, длина которой пропорциональна величине $W_{\text{ср}}$, шарнирно связана с пальцем 19' и червяком 33. Конец серьги при вводе ветра перемещает червяк 33 вдоль оси на величину, пропорциональную $U \cos \varepsilon + W_{\text{ср}}(1 - \cos \alpha_{\text{ср}})$. Перемещение червяка вызывает поворот щеток потенциометров $\text{П}W^*$ и $\text{П}W_{\alpha}^*$ пропорционально этой же величине. На поворот червяка от электромагнитной муфты $V_{\text{с}}$ поступает величина воздушной скорости $V_{\text{с}}$. В результате суммарное перемещение движков потенциометров будет пропорционально W^* . Потенциометр $\text{П}W$ используется в схеме, вырабатывающей угол прицеливания векторным способом, а потенциометр $\text{П}W_{\alpha}^*$ в схеме, вырабатывающей угол сноса. Для этой же цели с синусной линейки 32 векторного построителя при помощи потенциометра $\text{П}U \sin \varepsilon$ снимается величина $U \sin \varepsilon$.

Операция деления W^* на $\left(\frac{H}{t_6}\right)^*$ осуществляется с помощью электрического счетно-решающего механизма. Величина $\left(\frac{W t_6}{H}\right)^*$ отрабатывается на потенциометре $\text{П} \operatorname{tg} \varphi_0$, расположенном в прицеле. При этом в соответствующее положение устанавливается ведомый ролик фрикционного механизма, индекс углов прицеливания и контакт механизма сбрасывания.

Построение угла бокового смещения визирного луча в прицеле осуществляется по зависимости $\operatorname{tg} \mu^* = \operatorname{tg} \gamma^* \sin \alpha^* \cos \varphi_0^*$ с помощью двух коноидов 59 и 68. Коноид 59 в осевом направлении перемещается пропорционально $\operatorname{tg} \gamma^*$ при автоматическом или ручном вводе в прицел величины углового отставания и поворачивается на угол сноса при развороте прицела вокруг неподвижной шестерни 58 (см. рис. 21.17). Величина, пропорциональная произведению $\operatorname{tg} \gamma^* \sin \alpha^*$, получаемая в виде поперечного перемещения щупа 64, умножается на $\cos \varphi_0^*$, так как коноид 68 поворачивается от распределительного вала 25 пропорционально φ_0^* . Тогда осевое перемещение толкателя 64 будет пропорционально $\operatorname{tg} \mu^*$ и через систему рычагов 69 и дифференциал 71 поступит на призму 70, посредством которой визирный луч отклоняется на угол μ^* . Наличие дифференциала и связи призмы с рамкой гироскопа 37 обеспечивает стабилизацию визирного луча при поперечных кренах самолета.

Механизм боковой наводки

С помощью этого механизма осуществляется прицеливание по направлению, которое в прицеле может быть выполнено подбором угла сноса, и векторным способом.

Прицеливание по направлению способами,

ся в зацеплении с шестерней сноса, работая как рейка, поворачивает последнюю, а через нее муфту автопилота и движок ПКА, вызывая через автопилот разворот самолета. Таким образом, при вращении рукоятки *A* на один и тот же угол разворачиваются прицел и самолет.

При вращении рукоятки *B* движение через пару цилиндрических колес с передаточным отношением *i* поступает на червяк *10*, вызывая разворот шестерни сноса и через ПКА разворот самолета. Поэтому при вращении рукоятки *B* прицел остается стабилизированным в заданном направлении и разворачивается один лишь самолет.

При одновременном повороте рукояток на один и тот же угол (работа так называемым «водным захватом») прицел разворачивается на угол ψ_0 , а самолет на угол, равный $(\psi_0 + i\psi_0) = (1 + i)\psi_0 = \eta\psi_0 = K$. Таким образом, одновременное вращение рукояток разворота и сноса обеспечивает выполнение боковой наводки способом кратного угла.

Поочередная работа рукоятками *A* и *B* позволяет осуществить прицеливание по направлению способом промера угла сноса и синхронным способом.

Прицеливание по направлению векторным способом. Схема прицеливания по направлению векторным способом приведена на рис. 21. 20. Из приведенной схемы следует, что для выполнения боковой наводки самолет необходимо развернуть (изменить его курс) на угол ΔK_T , равный

$$\Delta K_T \cong \Delta \text{ПУ} + \alpha_k - \alpha_0 \cong \Delta \text{ПУ} + \Delta \alpha,$$

где $\Delta \alpha$ — изменение угла сноса за время разворота самолета. Последняя зависимость решается при одновременном построении и учете изменения угла μ .

Для измерения угла $\Delta \text{ПУ}$ необходимо знать положение вектора *W* в пространстве. С этой целью в процессе боковой наводки прицел стабилизируют по путевой скорости или, как говорят, по углу сноса. Для этого в каждый момент времени определяется текущее значение угла сноса и прицел разворачивается на его величину относительно продольной оси самолета. Величина угла сноса вырабатывается по зависимости

$$\sin \alpha^* = \frac{U \sin \epsilon}{W_\alpha^*} \quad (21. 23)$$

с помощью потенциометрического мостового счетно-решающего устройства.

Для обеспечения стабилизации прицела по углу сноса необходимо включить муфту автопилота, выключить муфту прицела и замкнуть рукояткой 54 кинетическую цепь ЭММ α^* — шестерня сноса 51. Тогда если прицел не развернут на угол сноса, то движение от ЭММ α^* поступит на вращение червяка 55, связанного

с шестерней сноса. При этом прицел будет обкатываться вокруг стабилизированной шестерни сноса до тех пор, пока не наступит равновесие электрического моста, а движок принимающего потенциометра Па^* не повернется на угол α^* . Движок потенциометра Па^* вращается в этом случае из-за обката соединенных с ним шестеренок по стабилизированному сектору 52, жестко связанному с шестерней сноса, при развороте прицела. Чтобы выполнить прицеливание по направлению, необходимо при включенной муфте автопилота включить муфту прицела, а затем выключить муфту автопилота. Затем рукояткой разворота совместить продольную курсовую черту с целью, при этом прицел и самолет разворачивается на угол $\Delta\text{ПУ}$. Так как в процессе разворота непрерывно перестраивается векторный треугольник и изменяется угол сноса, то значение $\Delta\alpha^*$ автоматически поступает на шестерню сноса от ЭММ α^* . В итоге боковой наводки самолет изменит свой курс на угол $\Delta K_T = \Delta\text{ПУ} + \Delta\alpha^*$, а прицел развернется относительно продольной оси самолета на угол $\alpha_h^* = \alpha_0^* + \Delta\alpha^*$.

21.5. БОМБОМЕТАНИЕ С НЕГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Для увеличения зоны прицельного бомбометания, которая обычно определяется величиной продольного отбоя бомбы, а также для повышения точности бомбометания исследованы и нашли применение различные виды бомбометания с негоризонтального полета. В этом случае

$$A_{\text{пр}} = f(H, V_c, \lambda, \theta),$$

где λ — угол, который составляет вектор воздушной скорости самолета с горизонтальной плоскостью. Величина $A_{\text{пр}}$ из-за дополнительного параметра λ может меняться в достаточно широких пределах даже для самолетов, летающих в ограниченных диапазонах изменения скорости и высоты V_c и H . Увеличение возможной зоны прицельного бомбометания, снижающей вероятность поражения самолета средствами ПВО, и повышение его точности за счет бросания бомб с малых высот дает определенные преимущества бомбометанию с негоризонтального полета. Различают два основных вида бомбометания с негоризонтального полета: бомбометание с пикирования и бомбометание с кабрирования.

Бомбометание с пикирования

Пикированием называется неустановившийся режим полета самолета, характеризующийся непрерывным уменьшением высоты при незначительных изменениях курса.

При бомбометании с пикирования уменьшается продольный отбоя бомбы, траектория ее падения спрямляется и располагается ближе к линии визирования. Благодаря этому, а также вследствие того, что бомбометание с пикирования выполняется обыч-

Существенной особенностью бомбометания с пикирования является то, что прицеливание осуществляется при непрерывно

изменяющихся значениях высоты полета самолета и его вектора воздушной скорости. Это существенно изменяет как теорию бомбометания, так и методику его выполнения.

Обозначим время от момента входа самолета в пикирование до момента сброса бомбы через t_c и назовем это временем совместного движения бомбы и самолета на траектории пикирования.

Очевидно, что за это время фиктивный самолет пролетел бы горизонтальный участок пути $OO_1 = V_{c.bx} t_c$. По аналогии с бомбометанием с горизонтального полета назовем отрезки A_c и Δ_c соответственно продольным отсогом и линейным отставанием самолета. Обозначая через t_b время ладения бомбы, будем иметь $O_1O_2 = V_{c.bx} t_b$, а A_b и Δ_b соответственно продольный отсогом и линейное отставание бомбы. Из рисунка легко видеть, что полный отсогом бомбы от точки, соответствующей моменту входа в пикирование, будет определяться как $A_c + A_b$, а полное линейное отставание — как $\Delta_c + \Delta_b$. Тогда момент входа в пикирование может быть определен углом прицеливания φ_{bx} , рассчитываемом по зависимости

$$\text{tg } \varphi_{\text{BX}} = \frac{A_c + A_6}{H_{\text{BX}}} = \frac{V_{\text{c,BX}}(t_c + t_6) - (\Delta_c + \Delta_6)}{H_{\text{BX}}}. \quad (21.24)$$

Угол прицеливания в момент сбрасывания бомбы определяется как

$$\operatorname{tg} \varphi_{6p} = \frac{A_6}{H_{6p}} = \frac{V_{c. \text{BX}} t_6 - \Delta_6}{H_{6p}}, \quad (21.25)$$

390

В процессе прицеливания при бомбометании с пикирования удобнее строить не угол $\varphi_{бр}$, а угол упреждения в точке сбрасывания $\psi_{бр}=90^\circ - \varphi_{бр} - \lambda_{бр}$, который измеряется между линией визирования и вектором скорости самолета. Если пренебречь углом атаки, то угол $\psi_{бр}$ можно задавать непосредственно от продольной оси самолета. Таким образом отпадает необходимость иметь в прицеле механизм, обеспечивающий построение вертикали в условиях неустановившегося режима полета самолета (пикирования).

При бомбометании при ветре необходимо определять $\varphi_{вх}$, $\varphi_{бр}$, а также угол бокового смещения визирного луча $\mu_{вх}$ и $\mu_{бр}$.

При бомбометании с пикирования различают три основных способа бомбометания: из расчетной точки, с программной траектории и на выходе из пикирования.

При бомбометании с пикирования из расчетной точки используются таблицы углов упреждения, рассчитанные по зависимости

$$\psi_{бр}=90^\circ - \varphi_{бр} - \lambda_{бр} = \psi(H_{бр}, V_{с.бр}, \lambda_{бр}, \theta). \quad (21.26)$$

Летчик по предварительно выбранной скорости и высоте бомбометания, углу пикирования в точке сбрасывания бомбы, для заданного типа бомбы определяет по таблицам $\psi_{бр}$ и вводит его в прицел. Затем он должен вывести самолет в расчетную точку сбрасывания бомбы, в которой фактическое значение параметров $V_{с.бр}$, $H_{бр}$, $\lambda_{бр}$ будут равны расчетным, а визирная линия совмещена с целью. Эта задача выполняется с помощью коллиматорных прицелов, в которых угол $\psi_{бр}$ вводится либо с помощью сетки со шкалой, либо за счет поворота полупрозрачного отражателя. При осуществлении данного способа бомбометания самолет выводится не в расчетную точку сбрасывания бомбы, а в некоторую зону. Отсюда и основной недостаток способа — точное бомбометание может быть выполнено лишь в случаях сбрасывания бомбы в момент нахождения самолета в расчетной точке сбрасывания бомбы, что весьма сложно для осуществления.

Бомбометание с программной траектории позволяет производить сбрасывание бомбы в диапазоне определенного отрезка времени нахождения самолета на участке программной траектории его движения. Движение по заданной программной траектории осуществляется потому, что летчик, управляя самолетом, непрерывно удерживает на цели визирную линию, которая также перемещается относительно продольной оси самолета. Поскольку на конечном участке программной траектории самолет движется по траектории свободно падающей бомбы, то сбрасывание бомбы может быть произведено в любой точке этого участка траектории, что позволяет обеспечить большую точность бомбометания, чем при сбрасывании бомб из расчетной точки.

Для выполнения бомбометания на выводе из пикирования у нас в стране и за рубежом были созданы прицелы, обеспечивающие практически автоматическое прицеливание и бомбометание.

Прицельная схема бомбометания при выводе из пикирования приведена на рис. 21. 22. На участке AC траектории пикирования вектор воздушной скорости самолета должен быть направлен на цель. В это время в вычислитель и счетно-решающее устройство

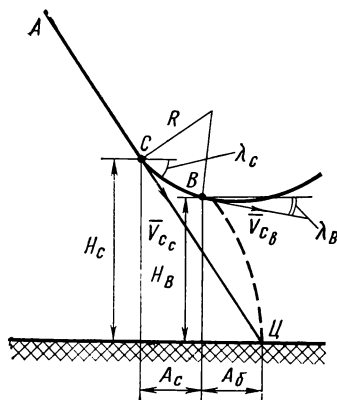


Рис. 21. 22. Схема прицеливания при бомбометании на выводе из пикирования

прицела непрерывно вводятся текущие значения высоты, скорости и угла пикирования самолета. По этим данным, а также по расчетной величине коэффициента перегрузки и по характеристическому времени падения бомбы непрерывно вырабатывается некоторый параметр сбрасывания $\beta_{расч}$ в виде угла поворота контактов в механизме автоматического сбрасывания. Когда самолет будет находиться в диапазоне возможного прицельного бомбометания, вычислителем дается сигнал и летчик может вывести самолет из пикирования. Точка C соответствует моменту начала вывода самолета из пикирования и в этой же точке прицел прекращает вычисление параметра сбрасывания, т. е. конечное значение $\beta_{расч}$ вырабатывается в прицеле для

момента начала вывода самолета из пикирования.

Для данной схемы характерно, что вычисление параметра сбрасывания происходит не по данным, относящимся к точке сбрасывания бомбы, а по данным точки, соответствующей моменту вывода самолета из пикирования. Это возможно потому, что параметры точки B могут быть легко выражены через параметры точки C , если известна траектория вывода самолета из пикирования.

При принятом расчетном значении коэффициента перегрузки и постоянной воздушной скорости самолета траектория вывода самолета из пикирования будет частью окружности постоянного радиуса. При этом величина параметра сбрасывания $\beta_{расч}$ будет пропорциональна изменению угла пикирования от λ_C до λ_B или изменению высоты H_C до H_B . Так как определение момента сбрасывания бомбы через изменение этих величин связано с большими ошибками, то момент сбрасывания определяется по времени полета самолета от точки C до точки B , которое может быть измерено со значительно большей точностью. Для этой цели, а также для того, чтобы обеспечить летчику возможность вывода самолета из пикирования с произвольной перегрузкой в

прицеле, имеется специальное устройство — интегратор. В момент начала вывода самолета из пикирования освобождается грузик интегратора, скорость перемещения которого определяет изменение параметра сбрасывания, а перемещение — его величину β_t . В момент достижения $\beta_t = \beta_{расч}$ происходит замыкание контактов механизма автоматического сбрасывания и сброс бомб. При наличии ветра и движении цели в счетно-решающем устройстве вычисляется поправка к расчетному параметру сбрасывания, в зависимости от продольных составляющих векторов ветра и цели. Одновременно на визир выдается боковой угол упреждения.

Бомбометание с кабрирования

Бомбометанием с кабрирования называют такой способ бомбометания, при котором сбрасывание бомбы осуществляется в режиме набора самолетом высоты полета. Оно может осуществляться как в режиме полета с постоянным углом кабрирования

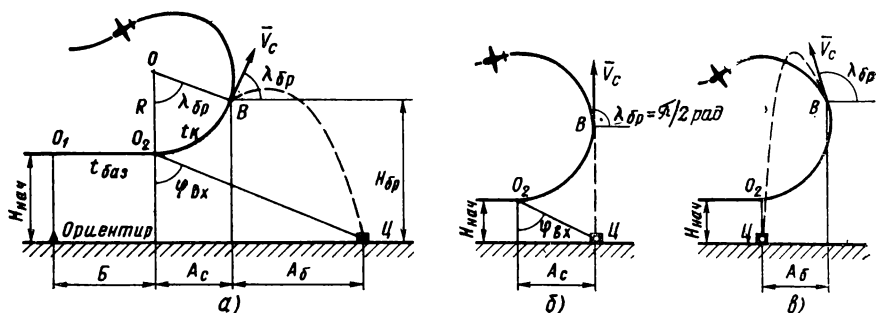


Рис. 21. 23. Схемы бомбометания с кабрирования:

а — с пологого кабрирования; б — с отвесного кабрирования; в — при угле кабрирования более $\pi/2$

вания, так и с изменяющимся (как правило, увеличивающимся) углом кабрирования. Таким образом, кабрирование — это неустановившийся режим полета, характеризующийся непрерывным увеличением высоты при незначительном изменении курса. Как и в случае бомбометания с пикирования $A_{пр} = f(H, V_c, \lambda, \theta)$. Продольный относ бомбы при кабрировании больше, чем при бомбометании с горизонтального полета, а поэтому ошибки бомбометания также будут больше. Однако бомбометание с кабрирования имеет существенное преимущество перед другими видами бомбометания: оно обеспечивает возможность подхода к цели на малой высоте, что значительно увеличивает скрытность подхода к цели даже при наличии у противника современных средств обнаружения самолетов. В связи с этим различные способы бомбометания с кабрирования предполагают подход к цели

на малой высоте, переход на этой высоте в кабрирование и сбрасывание бомбы либо при установившемся режиме, либо на вертикальном маневре набора самолетом высоты. Основную трудность при этом представляет обнаружение цели и определение момента перехода в кабрирование.

Схема бомбометания с пологого кабрирования ($\lambda_{бр} < \pi/2$) представлена на рис. 21. 23, а. Подход к цели осуществляется на минимально возможной высоте $H_{нач}$, в точке O_2 самолет переходит в кабрирование и в точке B производится сбрасывание бомбы. Горизонтальная дальность до цели в момент перехода в кабрирование должна равняться сумме продольного отбоя бомбы $A_б$ и горизонтального перемещения самолета $A_с$ за время кабрирования t_k . Относ бомбы $A_б$ определяется по баллистическим таблицам для бомбометания с кабрирования в основном как функция $H_{бр}$ и $\lambda_{бр}$. Горизонтальное перемещение самолета вычисляется как

$$A_с = \frac{V_{ср}^2 \sin \lambda_{бр}}{g n_{ср}}, \quad (21. 27)$$

где $V_{ср}$ и $n_{ср}$ — средняя скорость и перегрузка самолета при кабрировании.

В момент перехода в кабрирование цель обычно не видна. Поэтому для обеспечения выхода на цель и определения момента перехода в кабрирование заранее должны выбраться ориентиры, в створе которых находится цель. В этом случае момент выхода в кабрирование будет характеризоваться временем пролета $t_{баз}$ базового расстояния Б, по истечении которого самолет должен начинать кабрирование. Момент сбрасывания бомбы можно задавать либо достижением требуемой высоты $H_{бр}$, либо угла кабрирования $\lambda_{бр}$. Однако, так как их определение связано с большими ошибками, то момент сбрасывания бомбы задается временем кабрирования t_k , которое может быть рассчитано как

$$t_k = 2\pi R \frac{\lambda_{бр}}{2\pi} \frac{1}{V_{ср}}, \quad (21. 28)$$

где R — радиус дуги траектории самолета при кабрировании.

Схема бомбометания с отвесного кабрирования ($\lambda_{бр} = \pi/2$) представлена на рис. 21. 23, б. В этом случае продольный отбоя бомбы равен нулю и маневр самолета должен быть рассчитан и выполнен так, чтобы в момент, когда угол кабрирования станет равным $\pi/2$, самолет точно находился над целью. Тогда бомба, сброшенная в этот момент, вначале поднимается вверх, а затем по этой же траектории опустится вниз и попадет в цель. Горизонтальная дальность до цели $A_с$ в момент начала входа в кабрирование определяется по вышеприведенной формуле. В свою очередь момент начала ввода самолета в кабрирование определяется либо визированием цели, либо по выдержке

времени. Момент сбрасывания бомбы определяется по достижении $\lambda_{бр} = \pi/2$, при этом даже небольшие отклонения $\lambda_{бр}$ от $\pi/2$ в момент сбрасывания вызывают значительные ошибки бомбометания.

Наконец, возможно бомбометание при угле кабрирования $\lambda_{бр} > \pi/2$. В этом случае самолет, находясь над целью, переводится в кабрирование и выполняет петлю Нестерова (см. рис. 21.23, в). В некоторой точке B производится сбрасывание бомбы, при этом она, описывая крутую траекторию, попадает в цель, имея относ. A_6 . Момент прихода самолета в точку бросания бомбы может быть определен по углу кабрирования $\lambda_{бр}$ или времени кабрирования.

Преимущество этого способа бомбометания с кабрирования перед двумя предыдущими заключается в том, что ввод самолета в кабрирование осуществляется точно над целью. Это значительно облегчает выход самолета на цель и определение момента ввода в кабрирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанов Е. П., Ильин В. Б. Аэрофотосъемочное оборудование. М., «Недра», 1972, 184 с.
2. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М., «Недра», 1968, 268 с.
3. Бабушкин С. Г. и др. Оптико-механические приборы. М., «Машиностроение», 1965, 362 с.
4. Воробьев Л. М. Астрономическая навигация летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1968, 279 с.
5. Городецкий Ю. Г. Конструкция, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. М., «Машиностроение», 1971, 376 с.
6. Гребенников О. Ф. Киносъемочная аппаратура. М., «Машиностроение», 1971, 350 с.
7. Гусев Н. А. Маркшейдерско-геодезические инструменты и приборы. М., «Недра», 1968, 318 с.
8. Ефимов М. В. Прицеливание баллистических ракет, изд-во МО СССР, М., 1968, 119 с.
9. Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов. М., «Машиностроение», 1972, 367 с.
10. Кулагин С. В. Проектирование фото- и киноприборов. М., «Машиностроение», 1971, 328 с.
11. Лазарев Л. П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1970, 539 с.
12. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. М., «Машиностроение», 1970, 271 с.
13. Плотников В. С. и др. Расчет и конструирование оптико-механических приборов. М., «Машиностроение», 1972, 256 с.
14. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы. Л., «Машиностроение», 1969, 511 с.
15. Селезнев В. П. Навигационные устройства. М. «Машиностроение», 1974, 600 с.

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Р а з д е л I. Лабораторные приборы	
Глава 1. Микроскопы	5
1. 1. Устройство глаза и его оптические характеристики	5
1. 2. Основы теории микроскопа	8
1. 3. Разрешающая способность микроскопа. Нормальное и полезное увеличение	14
1. 4. Объективы микроскопов	17
1. 5. Окуляры микроскопов	20
1. 6. Методы освещения препаратов. Осветители светлого и темного поля	22
1. 7. Микропроекция и микрофотография	27
1. 8. Механические узлы и принадлежности микроскопов	29
1. 9. Биологические микроскопы	33
1. 10. Стерескопические микроскопы	36
1. 11. Ультрафиолетовые и инфракрасные микроскопы	38
1. 12. Металлографические микроскопы	41
Глава 2. Общие элементы оптико-механических измерительных приборов	43
2. 1. Основные метрологические показатели измерительных приборов	43
2. 2. Классификация оптико-механических измерительных приборов	45
2. 3. Оптические системы оптико-механических измерительных приборов	46
2. 4. Автоколлимационные устройства	55
2. 5. Отсчетные устройства	58
Глава 3. Приборы для линейных и угловых измерений	67
3. 1. Приборы для относительных линейных измерений	67
3. 2. Приборы для абсолютных линейных измерений	74
3. 3. Приборы для измерения радиусов кривизны	78
3. 4. Приборы для измерения углов призм и клиньев	80
Глава 4. Приборы для контроля формы и чистоты обработки поверхностей	85
4. 1. Пробные стекла	85
4. 2. Интерферометры	87
4. 3. Автоколлимационные и теневые приборы	91
4. 4. Приборы для контроля чистоты обработки	93
Глава 5. Приборы для контроля оптического стекла	99
5. 1. Характеристики оптического стекла	99

	Стр.
5.2. Рефрактометры	99
5.3. Установки для измерения оптической однородности, коэффициента светопоглощения и двойного лучепреломления	104
Глава 6. Спектральные приборы	109
6.1. Оптическая схема спектрального прибора	110
6.2. Классификация спектральных приборов	112
6.3. Основные характеристики оптических систем спектральных приборов	113
6.4. Призмённые спектральные приборы	117
6.5. Приборы с дифракционными решетками	125
Глава 7. Фотометрические приборы	132
7.1. Основы фотометрии	132
7.2. Приборы визуальной фотометрии	136
7.3. Фотоэлектрические фотометры	139
Раздел II. Фото- и киноприборы	
Глава 8. Основы теории фотопроцессов	146
8.1. Фотоматериалы с галогенными солями серебра	146
8.2. Процесс получения черно-белого фотоизображения	148
8.3. Получение цветных изображений на многослойных фотоматериалах	152
8.4. Сенситометрические испытания фотоматериалов и аппаратура для их осуществления.	154
Глава 9. Фото- и кинообъективы	161
9.1. Основные характеристики объективов	161
9.2. Способы фокусировки объективов	166
9.3. Особенности проекционных и аэрофотосъемочных объективов	172
9.4. Диафрагмы объективов	175
9.5. Визирные устройства фото- и киноаппаратов	176
Глава 10. Устройства для обработки выдержек (фотозатворы)	180
10.1. Разновидности фотозатворов и их основные характеристики	180
10.2. Центральные фотозатворы	183
10.3. Шторные фотозатворы	186
10.4. Прочие разновидности фотозатворов	188
10.5. Устройства для изменения продолжительности выдержки	190
Глава 11. Лентопротяжные механизмы киноаппаратов	192
11.1. Схема лентопротяжного механизма	192
11.2. Зубчатые барабаны	195
11.3. Скачковые механизмы	197
11.4. Прочие узлы лентопротяжного механизма киноаппарата	200
Глава 12. Фотоэкспонометры и экспонометрические устройства	204
12.1. Основная экспонометрическая формула	204
12.2. Фотоэкспонометры	206
12.3. Экспонометрические устройства	210
Глава 13. Фотоаппараты	215
13.1. Типы современных фотоаппаратов	215
13.2. Фотоаппараты для специальных видов съемки	216
13.3. Аэрофотоаппараты	220
Глава 14. Киноаппараты	228
14.1. Киносъемочные аппараты	228
14.2. Киноаппараты для скоростной и высокоскоростной киносъемки	230
14.3. Кинопроекторные аппараты	233

Раздел III. Оптические приборы наземной, авиационной и космической техники

Глава 15.	Геодезические приборы	238
15. 1.	Применение, особенности и классификация геодезических приборов	238
15. 2.	Основные узлы геодезических приборов	240
15. 3.	Угломерные приборы и нивелиры	247
15. 4.	Оптиколокационные дальномеры	249
Глава 16.	Наблюдательные и угломерные приборы	256
16. 1.	Общие сведения	256
Глава 17.	Оптические дальномеры	261
17. 1.	Назначение дальномеровых и основные способы измерения дальности	261
17. 2.	Оптические внутрибазные дальномеры	263
17. 3.	Измерительные устройства внутрибазных дальномеров	268
Глава 18.	Прицельные устройства наземных установок	275
18. 1.	Назначение и общие сведения. Прицельные схемы стрельбы	275
18. 2.	Оптические прицелы ствольного и реактивного оружия	280
18. 3.	Перископы подводных лодок	286
18. 4.	Оптические устройства для азимутального прицеливания баллистических ракет	291
Глава 19.	Авиационные стрелковые прицелы	302
19. 1.	Краткие сведения о стрелковом вооружении самолетов	302
19. 2.	Прицеливание при воздушной стрельбе	304
19. 3.	Оптические системы прицелов воздушной стрельбы	307
19. 4.	Дальномерные устройства	313
19. 5.	Гиромагнитные построители угловых поправок	319
19. 6.	Функциональная схема прицела для неподвижного оружия	326
Глава 20.	Астрономические навигационные приборы	327
20. 1.	Определение местоположения небесных светил и космических аппаратов в пространстве	328
20. 2.	Краткая характеристика излучения объектов космического пространства	333
20. 3.	Приборы для ориентации опорных осей КЛД в пространстве	343
20. 4.	Приборы для определения местоположения и курса летательного аппарата	349
20. 5.	Имитаторы излучения объектов космического пространства	358
Глава 21.	Оптические прицелы бомбометания	361
21. 1.	Основные понятия о баллистике неуправляемых бомб	361
21. 2.	Прицеливание при бомбометании с горизонтального полета	363
21. 3.	Определение исходных данных для прицеливания при бомбометании	370
21. 4.	Векторно-синхронный бомбардировочный прицел	376
21. 5.	Бомбометание с негоризонтального полета	389
Список литературы		396



*Сергей Васильевич Кулагин, Виктор Николаевич Дикарев,
Геннадий Михайлович Мосягин, Евгений Николаевич Лебедев,
Вячеслав Евгеньевич Зубарев, Адель Сергеевна Гоменюк*

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Редактор *Г. П. Филипповская*
Техн. редактор *Т. С. Старых*

Художник *А. Я. Штаркман*
Корректор *Л. Е. Хохлова*

Сдано в набор 31/I 1975 г.

Подписано в печать 16/IV 1975 г.

Т-04667

Формат 60×90¹/₁₆

Печ. л. 25,0

Уч.-изд. л. 24,35

Бумага № 2

Тираж 12000 экз.

Изд. зак. № 3668

Цена 1 р. 03 к.

Издательство «Машиностроение» 107885 Москва, Б-78 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Хохловский пер., 7. Тип. зак. 2554