

диаметра изображения. Примем световой диаметр линз 15 мм, а полный 16 мм. Толщина линзы найдется из графического построения кривизны поверхности из того расчета, чтобы толщина линзы по краю была 1—2 мм. Тогда $d_1 = d_2 = 3$. Полученные конструктивные данные покажем в виде таблицы:

$r_1 = \infty$	$d_1 = 3$ мм К8	Полный $\varnothing = 16,0$ мм
$r_2 = -19,35$ мм	$d_2 = 18,75$ мм	
$r_3 = 19,35$ мм	$d_3 = 3$ мм К8	Световой $\varnothing = 15,0$ мм
$r_4 = \infty$		

§ 54. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Оптические системы, предназначенные для наблюдения сильно удаленных предметов, называются *телескопическими*. Их отличительным оптическим свойством является то, что в систему лучи поступают в виде параллельных пучков и выходят из системы также в виде параллельных пучков. Эти системы применяются для визуального наблюдения предметов. Предметы наблюдаются в виде изображений, образованных оптической системой, под значительно большими углами, чем при рассмотрении их невооруженным глазом. Вследствие этого происходит искажение перспективы. Все предметы представляются приближенными к наблюдателю, а пространство предметов сжатым по направлению наблюдения.

Простейшая телескопическая система состоит из двух элементов: объектива и окуляра. Чтобы удовлетворить условию параллельности сопряженных пучков лучей в пространстве предметов и в пространстве изображений, необходимо, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Оптическая длина такой системы равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра.

Если в качестве окуляра применена положительная оптическая система (например, симметричный окуляр), то такая оптическая система, дающая обратное изображение, называется *системой Кеплера*. К таким системам относятся зрительные трубы геодезических и астрономических инструментов. Ход лучей в такой системе показан на рис. 83. Объектив является входным зрачком. Он образует изображение величиной $2l'$ в передней фокальной плоскости окуляра. Выходной зрачок системы расположен за окуляром. Глаз наблюдателя, помещенный в выходном зрачке, сможет рассмотреть все изображение, так как через выходной зрачок проходят все пучки лучей.

Если в качестве окуляра применена отрицательная оптическая система, то такая система называется *системой Галилея*. Она имеет применение в театральном бинокле. Ход лучей в тонкой системе

Галилея показан на рис. 84. Такая система дает прямое изображение, отличается малым полем зрения и имеет вследствие этого ограниченное применение.

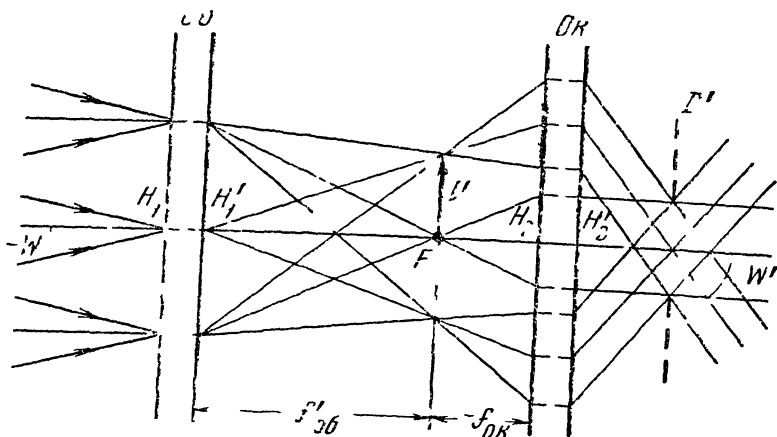


Рис 83 Оптическая схема простой зрительной трубы

Ее преимуществом является сокращение длины, что наглядно показано на рис. 85. При одинаковых фокусных расстояниях объектива и окуляра система Галилея короче системы Кеплера на два фокусных расстояния окуляра.

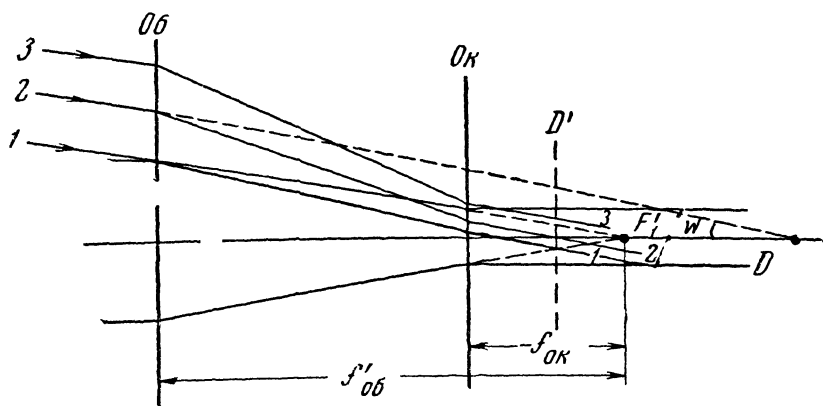


Рис. 84. Оптическая схема театрального бинокля (система Галилея)

Главными оптическими характеристиками телескопической системы являются: 1) видимое увеличение Γ ; 2) поле зрения 2ω ; 3) диаметр выходного зрачка D' .

Величина изображения l' , образованного объективом, очевидно, равна (рис 83)

$$l' = -f_{об} \cdot \text{tg } \omega,$$

а со стороны окуляра

$$l' = -f_{ок} \cdot \text{tg } \omega'.$$

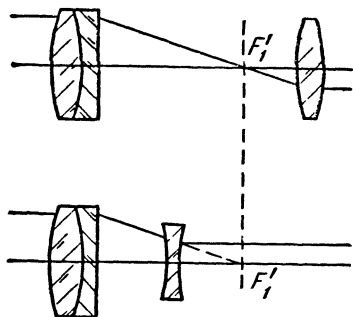


Рис 85 Сравнение длин зрительных труб

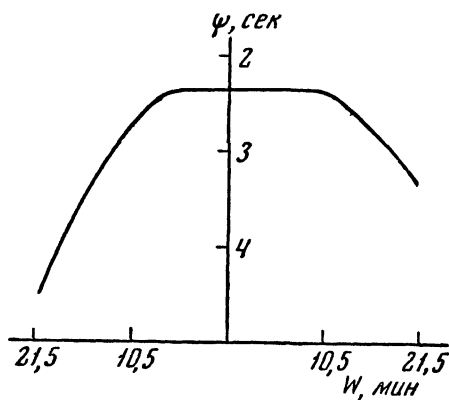


Рис 86 Разрешающая способность главной трубы ТТ2/6, $D=65$ мм

Отсюда

$$\frac{\text{tg } \omega'}{\text{tg } \omega} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}}.$$

Отношение тангенсов углов есть видимое увеличение. Тогда, переходя к $f'_{ок} = -f_{ок}$, получим

$$\Gamma = -\frac{f'_{об}}{f_{ок}}. \quad (54,1)$$

Знак минус указывает на то, что изображение обратное. Из подобия треугольников, имеющих общую вершину, установим

$$\Gamma = \frac{D}{D'}. \quad (54,2)$$

Обычно знак минус в формуле видимого увеличения опускается.

Видимым увеличением телескопической системы называется отношение диаметра входного зрачка к диаметру выходного зрачка.

Диаметр входного зрачка выбирается из условия разрешающей способности (40,2), а диаметр выходного зрачка — из условия видимого увеличения (54,2). Поле зрения телескопической системы ограничивается полем зрения окуляра. Принимая за наи-

большее угловое поле зрения окуляра $2\omega' = 100^\circ$, получим возможный угол поля зрения системы

$$\operatorname{tg} \omega_{\text{макс}} = \frac{\operatorname{tg} 50^\circ}{\Gamma}. \quad (54,3)$$

Однако следует иметь в виду, что в некоторых случаях, поступаясь качеством изображения, применяют окуляры и с полем зрения до $2\omega' = 140^\circ$.

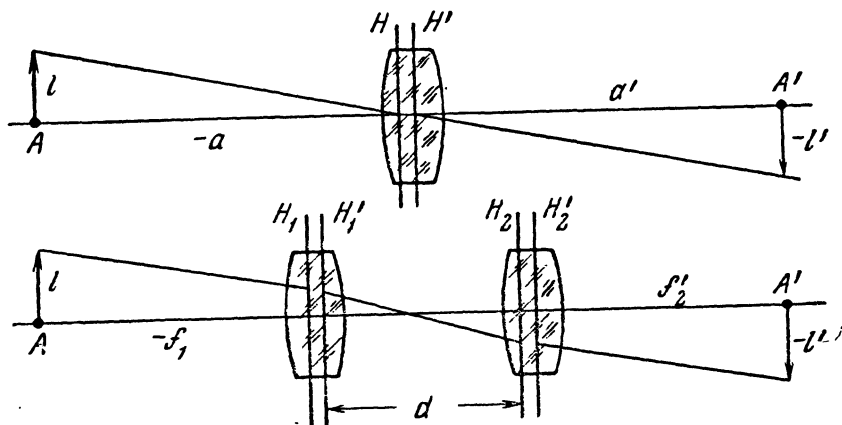


Рис. 87. Оборачивающая система

При рассмотрении необходимой разрешающей способности зрительных труб надо учитывать разрешающую способность глаза. За разрешающую способность глаза обычно принимают $60''$, хотя исследования* указывают на значительно большие возможности глаза. Так, например, глаз различает черные штрихи на белом фоне даже в том случае, когда их угловая величина достигает $6''$. Исходя из формулы (23,1), запишем необходимую разрешающую способность зрительной трубы (в секундах)

$$\psi = \frac{60}{\Gamma}. \quad (54,4)$$

Учитывая формулу (51,3), получаем зависимость между диаметром входного зрачка и видимым увеличением зрительной трубы, т. е. формулу полезного увеличения зрительной трубы

$$\Gamma_{\text{п}} = 0,5D. \quad (54,5)$$

Полезным увеличением называется то наименьшее увеличение

* См. С. В. Кравков. Глаз и его работа. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1950, стр. 382.

зрительной трубы, при котором разрешающая сила объектива может быть полностью использована глазом наблюдателя.

В действительности для геодезических зрительных труб, для которых особенно важно полное использование разрешающей способности глаза, между диаметром входного зрачка и видимым увеличением существует в среднем зависимость (по данным зрительных труб СССР и Германии)

$$\Gamma_n = 0,74D. \quad (54,6)$$

Оценку разрешающей способности телескопических систем всегда производят в угловой мере. На рис. 86 показана характеристическая кривая разрешающей способности главной трубы триангуляционного теодолита, измеренная при наблюдении без фильтра. Асимметрия кривой разрешающей способности является показателем нарушения центрированности оптической системы.

В табл. 7 указывается разрешающая способность некоторых стечественных приборов в центре поля.

Таблица 7

Инструмент	Видимое увеличение	Диаметр входного зрачка	Разрешающая способность	
			теоретическая	действительная
Главная труба триангуляционного теодолита ТТ2/6	52	65	1",9	2",3
Поверительная труба триангуляционного теодолита ТТ2/6	40	40	3",1	4",0
Оптический теодолит ОТ	30	60	2",0	2",3
Прецизионный нивелир НПГ	44	55	2",2	2",6

Длина простой зрительной трубы равна

$$L = f'_{об} + f'_{ок}. \quad (54,7)$$

Если оптическая система должна быть длинной (цистоскоп, перископ, смотровые трубки и т. п.), то между объективом и окуляром помещают оборачивающие системы. Они предназначаются для поворота изображения на 180° вокруг оптической оси и удлинения хода лучей в приборе. Применяются линзовые оборачивающиеся системы двух типов, однообъективные и двухобъективные (рис. 87). В двухобъективной системе между объективами лучи идут в виде параллельных пучков. Длина однообъективной системы равна

$$L_{oc} = -a + a'.$$

Длина двухобъективной системы равна

$$L_{oc} = -f_1 + d + f'_2.$$

Таким образом, общая длина телескопической системы, включающей оборачивающие системы, определяется уравнением

$$L = f'_{об} + \sum L_{oc} + f'_{ок}. \quad (54,8)$$

Каждую оборачивающую систему можно характеризовать линейным увеличением. Оборачивающие системы влияют на видимое увеличение всего прибора. Если $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ — линейные увели-

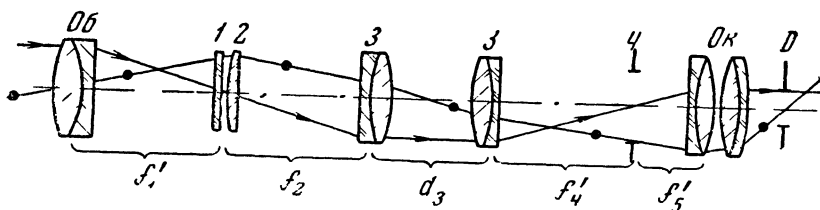


Рис 88 Зрительная труба с прямым изображением 1 — сетка; 2 — коллектор, 3 — оборачивающая система, 4 — полевая диафрагма

чения оборачивающих систем, то видимое увеличение может быть найдено по формуле

$$\Gamma = -\beta_1 \beta_2 \dots \beta_k \frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \quad (54,9)$$

Сложные зрительные трубы вместо оборачивающих линзовых систем (рис. 88) могут иметь и призмённые оборачивающие системы (например, призмённый бинокль).

Габариты телескопической системы определяются длиной и диаметром. Длина системы зависит от фокусных расстояний объектива, окуляра, объективов оборачивающих систем и расстоянии между объективами оборачивающих систем. Диаметр системы зависит от относительных отверстий, углов поля зрения, коэффициента виньетирования и положения зрачков.

Расчет габарита предшествует составлению технических условий на систему. Кроме основных характеристик в технические условия включаются требования к виду изображения (прямое или обратное), длине системы, наличию качающихся или вращающихся деталей и т. п.

Расчет габарита разделяется на две части: 1) определение фокусных расстояний компонентов и расстояний между ними; 2) расчет диаметров деталей и узлов.

Первоначально определяются фокусные расстояния всех компонентов, составляющих систему, и расстояния между ними. При расчете габарита толщины всех линзовых деталей и узлов принимаются равными нулю, тогда все линзы, объективы и окуляр изображаются в виде главных плоскостей, а отражающие призмы и пластины редуцируются к воздуху.

Оптическая система, заданная основными характеристиками $(\Gamma, 2\omega, D, L)$, может быть осуществлена при различных фокусных расстояниях компонентов

Покажем основы расчета габарита сложной телескопической системы, имеющей двухобъективную оборачивающую систему (рис 88) Для внесения определенности в расчет положим известным фокусное расстояние окуляра Выбор его обуславливается соображениями удобного размещения глаза наблюдателя (например, $f_5' = 20 \text{ мм}, 25 \text{ мм}, 30 \text{ мм}$ или 40 мм)

Заданными характеристиками являются 1) видимое увеличение Γ , 2) поле зрения 2ω , 3) диаметр выходного зрачка D' , 4) длина оптической системы от объектива до окуляра L , 5) коэффициент виньетирования $k\omega$, 6) фокусное расстояние окуляра f_5' , 7) положение входного зрачка от объектива t , 8) линейное увеличение β оборачивающей системы, равное отношению f_4' к f_3' (обычно $\beta = -1$)

Формулы для расчета габарита следующие *

$$f_1 = -\frac{\Gamma f_5'}{\beta} \quad f_3^2 \frac{D' (1 - K_\omega)}{f_5'^2 \Gamma \operatorname{tg} \omega_1} + f_3 (1 - \beta) + f_5 (\Gamma + 1) - L = 0$$

$$f_4' = -\beta f_3' \quad d_3 = L - f_1 - f_3' - f_4' - f_5$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1} \left(1 + \frac{t}{f_1} \right) + \frac{1}{f_3} \left(1 - \frac{d_3}{2f_3'} \right)$$

$$D_1 = D k_\omega - 2t \operatorname{tg} \omega_1 \quad D_2 = 2 \operatorname{tg} \omega_1 f_1$$

$$D_3 = \frac{D f_3}{f_1} \quad D_4 = D_3$$

Если вычисленный диаметр объектива D_1 меньше диаметра входного зрачка D , то за световой диаметр объектива принимается диаметр входного зрачка D Диаметр окуляра определяется наибольшими высотами действительного луча, проходящего через окуляр под наибольшим углом поля зрения Определение диаметров компонентов, составляющих оптическую систему, дублируется вычислением высот и углов осевого и наклонных лучей по формулам (48,3) и (48,4) При вычислении осевого луча начальными параметрами служат

$$u_1 = 0 \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{D}{2} .$$

В результате получается $u_{\text{посл}} = 0$, что является проверкой правильности выполненных вычислений (проверка телескопичности)

При определении хода наклонного пучка лучей выполняют вычисление трех лучей, верхнего, главного и нижнего, по тем же

* Для $\operatorname{tg} \omega_1$ принимается положительное значение.

формулам. При вычислении главного луча начальными параметрами служат

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega, \quad h_1 = t \operatorname{tg} \omega,$$

где t — расстояние от первого компонента системы (объектива) до входного зрачка. Вычисление главного луча позволяет найти расстояние от последнего компонента системы (окуляра) до выходного зрачка:

$$t' = \frac{h_{\text{посл}}}{\operatorname{tg} u_{\text{посл}}}.$$

При вычислении верхнего и нижнего пучка учитывается коэффициент виньетирования K_w .

При вычислении верхнего луча начальными параметрами являются

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega \quad \text{и} \quad h_1 = t \cdot \operatorname{tg} \omega + \frac{K_w D}{2},$$

а для нижнего

$$\operatorname{tg} u_1 = \operatorname{tg} \omega \quad \text{и} \quad h_1 = t \cdot \operatorname{tg} \omega - \frac{K_w D}{2}.$$

В результате вычислений всех трех последних лучей $u_{\text{посл}}$ должны быть одинаковыми. Наибольшие высоты на каждом компоненте системы определяют световые диаметры ($\Phi = 2h$).

Телескопические приборы охватывают большую группу оптических приборов. В различных отраслях техники эти приборы получили свое самостоятельное развитие, обусловленное условиями эксплуатации и точностями определения тех или иных параметров.

Основными группами приборов являются: 1) астрономические, 2) геодезические, 3) зрительные трубы, 4) бинокли, 5) перископы, 6) прицелы винтовочные, 7) прицелы пулеметно-минометные, 8) прицелы танковые, 9) прицелы артиллерийские, 10) прицелы авиационные, 11) дальнометры.

Некоторые из оптических приборов настолько хорошо конструктивно отработаны, что сохраняют оптическое устройство и конструкцию на протяжении многих десятилетий. К таким оптическим приборам относится стереотруба (рис. 89), предназначенная для стереоскопического рассмотрения из-за укрытий. Подобные биноклярные оптические приборы состоят из двух однотипных половинок для левого и правого глаза. Зрительные трубы являются составной частью многих приборов в пиromетрии, фотограм-

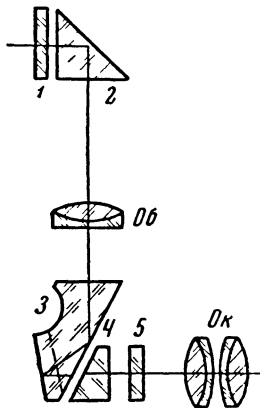


Рис. 89. Оптическая система стереотрубы: 1 — защитное стекло; 2 — головная призма; 3 — башмачная призма с крышкой; 4 — клин; 5 — сетка

метрии, гравиметрии, спектроскопии, фотометрии, гониометрии, микроскопии и т. д. Данные об окулярах некоторых зрительных труб приведены в табл. III в приложении.

§ 55. ЛУПА И МИКРОСКОП

Оптическая система, предназначенная для наблюдения близко расположенных предметов в увеличенном виде, называется *микроскопом*. Простейшим микроскопом является *лупа*. Каждая лупа характеризуется: 1) видимым увеличением $\bar{\Gamma}$, 2) полем зрения $2l$.

Схема действия лупы показана на рис. 90. Предмет $2l$ размещается в переднем фокусе лупы. Зрачок глаза D_r наблюдателя размещается в выходном зрачке лупы. Наблюдатель видит изображение под углом ω' , но не на бесконечности, а на расстоянии наилучшего зрения — 250 мм, что объясняется психологией восприятия.

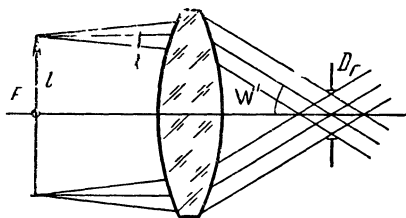


Рис. 90. Лупа

Под видимым увеличением лупы понимают отношение видимого размера изображения к видимому размеру предмета. А так как $l' = 250 \text{ tg} \omega'$, а $l = f \text{ tg} \omega$, то

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f} \cdot \quad (55,1)$$

Величину $\bar{\Gamma}$ принято называть окулярным увеличением.

Поле зрения лупы ограничивается aberrациями и ее диаметром.

Из практики применения луп можно указать эмпирическую зависимость между полем зрения и видимым увеличением (в миллиметрах):

$$2l = \frac{150}{\bar{\Gamma}} \cdot \quad (55,2)$$

Световой диаметр лупы $D_{св}$ определяется размером поля зрения. Как следует из рис. 90:

$$D_{св} = 2l + D_r \cdot \quad (55,3)$$

Плоско-выпуклая линза, обращенная плоской стороной к глазу, может служить лупой с увеличением не свыше 4^{\times} . Такая лупа часто применяется для отсчета по шкалам. Лупы 6^{\times} , 10^{\times} и 12^{\times} обычно состоят из трех склеенных линз. Такая лупа называется *апланатической*. Конструктивные данные апланатической лупы 6^{\times} приведены ниже: