

с нормальным. Поэтому (рис. 68, в) точка заднего фокуса расположена за сетчаткой. При приближении предметов к глазу точка изображения передвигается еще дальше от сетчатки. Следовательно, дальновзоркий глаз всегда работает с напряжением аккомодации. Для исправления этого недостатка необходима положительная линза (рис. 68, г).

Существуют и другие недостатки: пресбиопия (отсутствие объема аккомодации), астигматизм (различная оптическая сила глаза в различных направлениях), афакия (отсутствие хрусталика), дальтонизм (ошибка в определении цвета) и др.

### § 53. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

Во многих оптических приборах различных конструкций применяются однотипные оптические детали в виде плоскопараллельных пластин, отражательных призм, объективов, коллективов и окуляров. Эти детали и узлы имеют определенные оптические свойства, которые не зависят от принципа устройства того или иного оптического прибора.

**Плоскопараллельные пластины** применяются в виде защитных, покровных, предметных, компенсационных стекол, светофильтров, сеток и зеркал. Оптический расчет их сводится к определению толщины и диаметра. Толщина пластины устанавливается из условий прочности или возможности изготовления точных полированных поверхностей. В последнем случае толщина пластины выбирается порядка  $1/8$ — $1/10$  диаметра. При определении диаметра пластины необходимо учитывать преломление лучей внутри пластины, однако приемом редуцирования можно избежать определения величин углов преломления.

Редуцирование заключается в приведении оптической среды пластины к воздуху путем деления ее толщины на показатель преломления. Найдем разность действительной толщины и редуцированной:

$$d - d_0 = d - \frac{d}{n} = d \left( 1 - \frac{1}{n} \right) = d \frac{n-1}{n}. \quad (53,1)$$

Это уравнение тождественно уравнению (17,2). Следовательно, в редуцированной пластине точка  $P_1'$  (рис. 69) находится на том же месте, где она находилась бы в случае отсутствия пластины. Следовательно, можно рассматривать ход луча в редуцированной пластине без преломления, а так как

$$d - d_0 = L_0, \quad \text{то} \quad h_0 = h.$$

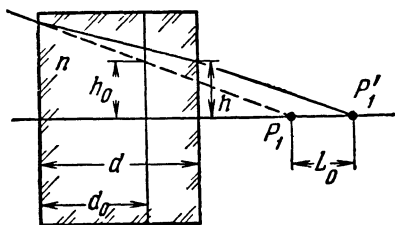


Рис. 69. Оптическое редуцирование

При переходе от редуцированных пластин к действительным необходимо учитывать удлинение хода луча на величину смещения  $L_0$ .

Редуцирование пластин упрощает расчет их диаметра. Если диаметр выходного (или входного) зрачка  $D$ , расстояние от пластины до зрачка  $b$ , толщина пластины  $d$ , показатель преломления  $n$ , а угол луча, выходящего из края зрачка и определяющего наибольший световой диаметр пластины с оптической осью  $\omega$ , то, применяя формулу высот (13,19), получим

$$D_{св} = D + 2 \operatorname{tg} \omega \left( b + \frac{d}{n} \right). \quad (53,2)$$

Так как толщина пластин обычно мала, то они вносят ничтожные аберрации. Но в некоторых случаях их специально применяют для компенсации дисторсии, например в некоторых широкоугольных фотообъективах. Толщина покровного стекла, применяемого в микроскопии ( $d=0,17$  мм), также учитывается на аберрации при вычислении микробиообъектива большого увеличения.

Астигматизм, вносимый плоскопараллельной пластинкой, установленной перед плоскостью изображения, определяется величиной астигматической разности  $\Delta_a = x_s' - x_t'$ , где

$$x_m = \left( 1 - \frac{\cos^3 i}{\cos^3 i'} \right) \frac{d}{n}, \quad (53,3)$$

а

$$x_s' = \left( 1 - \frac{\cos i}{\cos i'} \right) \frac{d}{n}. \quad (53,4)$$

Пластинка вносит и дисторсию, определяемую выражением

$$\delta l' = d \operatorname{tg} i \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} i'}{\operatorname{tg} i} \right) - L_0 \operatorname{tg} i. \quad (53,5)$$

Если же пластины устанавливаются в параллельных пучках лучей, то они не влияют на аберрации.

Зеркала с внутренним серебрением также относятся к плоскопараллельным пластинам, поставленным под углом к оптической оси. Лучи света в таких зеркалах дважды преломляются на входной поверхности.

Зеркала с наружным отражающим слоем также представляют собой плоскопараллельные пластины, но толщина их не влияет на ход лучей. Размеры таких зеркал определяются только по проекции светового пучка лучей на поверхности. Отражающим слоем обычно является алюминий, в связи с чем такие зеркала называются алюминированными. Такой слой значительно прочней серебряного.

**Отражательные призмы.** Если от одной или нескольких граней призмы происходит отражение пучков лучей, то такая призма называется отражательной.

Отражающие грани призм предназначены для полного отраже-

ния попадающих на них лучей. Если угол падения луча на отражающую грань меньше предельного угла полного внутреннего отражения  $i_m$ , то такая грань должна быть посеребрена, что исключает возможность преломления на этой поверхности.

Для призм обычно выбирают сорта оптических стекол марок К8 с  $n=1,5163$  и БК10 с  $n=1,5688$ . Для этих сред соответственно  $i_m=41^\circ 15' 42''$  и  $i_m=39^\circ 36' 01''$ .

Если на призму (рис. 70) падает луч перпендикулярно к входной поверхности, то отражающую поверхность он встречает под углом  $\alpha$ .

В частном случае прямоугольной призмы  $\alpha=45^\circ$ , а так как этот угол больше предельного угла полного внутреннего отражения, луч отразится полностью вниз.

В общем случае, когда лучи идут к поверхности призм под углом  $\neq 90^\circ$ , может возникнуть опасность преломления на отражающей поверхности. Поэтому следует определить тот критический угол  $i_1$ , начиная с которого происходит преломление на второй поверхности.

Из геометрических соотношений углов (рис. 70) получим

$$i_1' = \alpha - i_m,$$

или

$$\sin i_1 = n \sin(\alpha - i_m). \quad (53,6)$$

Для прямоугольной призмы ( $\alpha=45^\circ$ ) из стекла сорта К8  $i_1=5^\circ 40' 06''$ , а из стекла БК10  $i_1=8^\circ 28' 16''$ .

Удвоенная величина этих углов дает представление об угловом поле зрения того участка оптического прибора, в котором размещена призма, которое не требует серебрения отражающей поверхности.

Отражательные призмы имеют значительное распространение в оптических приборах. Их основным назначением является: 1) изменение направления оптической оси в каком-либо месте прибора, 2) обращение изображения в заданном направлении.

Преломляющая призма может выполнить первое только в том случае, если изменение направления оптической оси мало ( $3-4^\circ$ ), так как в других случаях резкость изображения настолько ухудшается вследствие дисперсии, что пользование прибором становится практически невозможным. Кроме того, преломляющая призма вносит несимметричные aberrации относительно оптической оси, которые невозможно компенсировать линзовой оптикой. Отражательная призма может быть свободна от этого недостатка, но для этого она должна быть эквивалентна плоскопараллельной пластине. Для проверки этого условия призму разворачивают в плоскопараллельную пластину, т. е. находят ее изображение относительно отражающей грани. Если отражающих граней несколько, то последовательно находят эти отражения от каждой грани.

Такая призма, будучи поставлена в прибор, вносит aberrации, равные aberrациям плоскопараллельной пластины. Но если приз-

ма расположена в параллельном пучке лучей, ее aberrации не оказывают практического действия на качество изображения всего прибора. Например, если призма расположена перед объективом зрительной трубы, при помощи которой рассматривают значительно удаленные предметы, то лучи различных длин волн, разложенные на составные части, по выходе из призмы идут параллельно друг другу и собираются объективом трубы в одну точку.

Другое дело, если призма расположена в сходящихся или расходящихся пучках лучей. Тогда она вносит aberrации, которые в большинстве случаев могут компенсироваться aberrациями линзовой части прибора.

Тип призмы определяется геометрической формой в главном сечении. Рассмотрим на примере прямоугольной призмы ее основное назначение и свойства (рис. 71). Как видно из рис. 71, а и 71, б, призма поворачивает оптическую ось на  $90^\circ$  и оборачивает изображение свер-

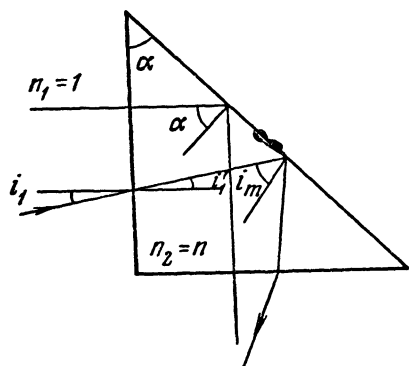


Рис 70. Явление полного внутреннего отражения в прямоугольной призме

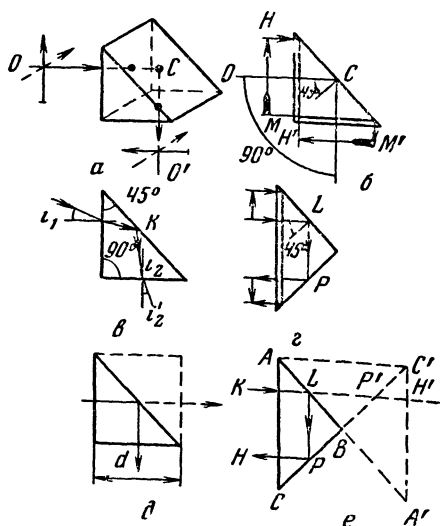


Рис. 71. Прямоугольная призма

ху вниз, т. е. в одном направлении. Развертка такой призмы показана на рис. 71, д. Призма развернулась в плоскопараллельную пластину с толщиной, равной длине хода луча в призме. Длина хода луча в призме  $d$  является важной характеристикой любой отражающей призмы. Отношение длины хода луча в призме к диаметру отверстия пучка лучей  $D$  назовем коэффициентом призмы  $k$ :

$$k = \frac{d}{D} . \quad (53, k)$$

В прямоугольной призме катет определяет величину такого отверстия, следовательно, коэффициент прямоугольной призмы равен единице.

Если лучи входят в призму со стороны гипотенузной поверхности (рис. 71, *з*), то пучок лучей изменяет направление на  $180^\circ$  и смещается. Изображение не оборачивается, так как первая отражающая грань поворачивает изображение, как и прямоугольная призма, сверху вниз, а вторая отражающая грань — снизу вверх. Развертка этой призмы показана на рис. 71, *е*. Длина хода луча  $d=2D$ , т. е.  $k=2$ .

Если на прямоугольную призму падает луч под углом  $i_1$  (рис. 71, *в*), то выходящий из призмы луч не образует с входящим в нее лучом угол в  $90^\circ$ . Конструкции некоторых призм, из числа наиболее распространенных, показаны на рис. 72.

Прямоугольную призму (рис. 72, *а*) можно превратить в призму прямого зрения (призма Дове) (рис. 72, *б*). Такая призма оборачивает изображение сверху вниз, изменяя направление оптической оси только внутри призмы, сохраняя направление вошедшего и вышедшего лучей.

Так как луч, идущий по оптической оси, преломляется, то длина хода луча в призме зависит от показателя преломления и определяется по формуле

$$d = \frac{2nD}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1}. \quad (53,8)$$

Длина основания призмы при этом равна

$$l = 2D \frac{\sqrt{2n^2 - 1}}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1}. \quad (53,9)$$

Для призмы из стекла К8  $d=3,3812 D$  и  $e=2,42299 D$ , а для призмы из стекла БК10  $d=3,2001 D$  и  $e=4,0398 D$ .

Призмой Дове (рис. 72, *б*) пользуются для того, чтобы вращать изображение (или компенсировать вращение изображения) в оптических приборах. Оптический механизм вращения показан на рис. 73. Изображение вращается со скоростью, вдвое большей скорости поворота самой призмы.

Недостатком этой призмы является то, что углы падения лучей на поверхности вверх и вниз от оптической оси несимметричны, а по абсолютной величине значительны ( $45^\circ$  и более), что вызывает астигматизм, поэтому ее применяют только в плоскопараллельных пучках лучей.

Разновидностью семейства прямоугольных призм является призма-ромб (рис. 72, *в*), как бы состоящая из двух прямоугольных призм. Она не оборачивает изображения. Ход луча  $d=2D$ ,  $K=2$ . Призма смещает лучи, оставляя направление входящего и выходящего лучей неизменным. Она находит себе частое применение в бинокулярных приборах для изменения глазного базиса. Верхняя ось может быть неподвижной, а нижняя качаться.

Пентапризма (рис. 72, *г*) поворачивает луч на  $90^\circ$  и не оборачивает изображения. Длина хода луча в ней  $d=3,4142 D$ ,  $k=3,4142$ .

Свойством этой призмы является то, что луч, вышедший из призмы, с вошедшим лучом всегда сохраняет угол  $90^\circ$ . Этим обстоятельством пользуются в тех случаях, когда в измерительных целях необходимо строго сохранять между лучами угол  $90^\circ$ , например в дальномерах.

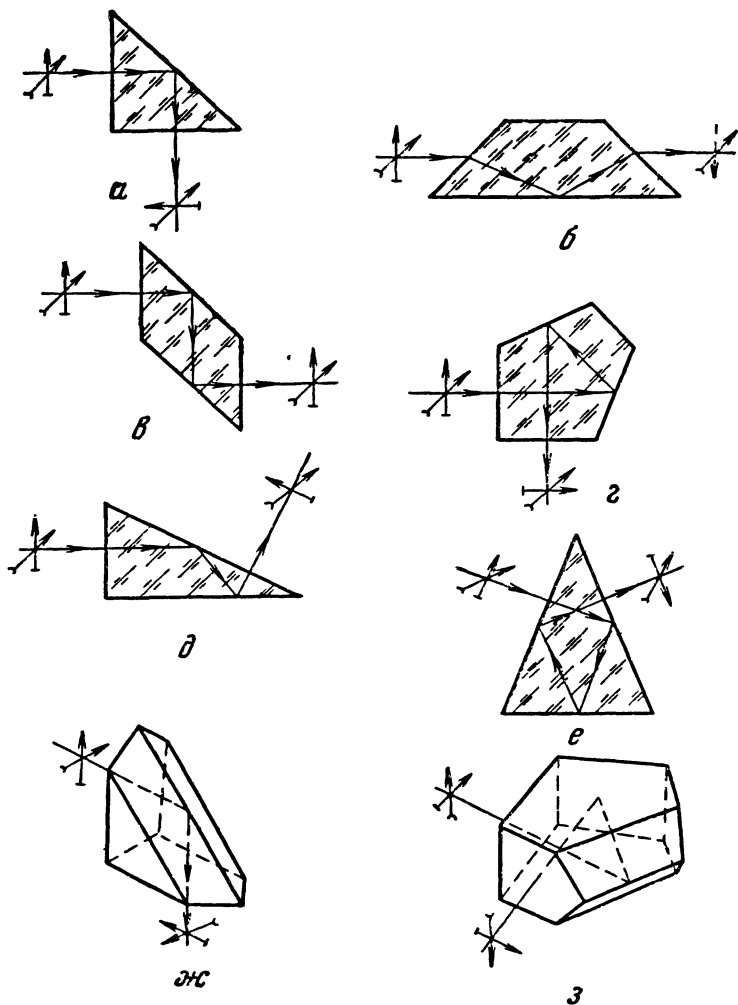


Рис 72 Призмы: *a* — прямоугольная; *б* — призма Дове, *в* — призма-ромб, *г* — пентапризма; *д* — окулярная призма; *е* — призма Шмидта; *ж* — прямоугольная призма с крышей; *з* — пентапризма с крышей

Половина пентапризмы позволяет образовать призму, называемую полупентапризмой (рис. 72, *д*). Она изменяет направление лучей на  $45^\circ$  и не оборачивает изображения. Длина хода луча в призме  $d = 1,7071 D$ , или  $k = 1,7071$ .

Призма нашла себе применение как окулярная призма, изменяющая направление оптической оси прибора на  $45^\circ$  и создающая удобное положение наблюдателю

Особое место среди призм занимают крышеобразные призмы (дах призмы) (рис 72 ж, з) Любую отражающую призму можно превратить в крышеобразную, если одну из отражающих граней заменить двумя, составляющими между собой угол в  $90^\circ$  Назначение крышеобразной призмы — повернуть изображение слева направо Поэтому в оптическом приборе оправдывается появление только одной крышеобразной призмы

Прямоугольная призма с крышей в главном сечении такая же, как обычная прямоугольная Призма с крышей изменяет направление оптической оси на  $90^\circ$  и оборачивает изображение и сверху вниз и справа налево Длина хода ее луча  $d = 1,732 D$ , или  $k = 1,732$  Увеличение хода луча

объясняется тем, что ширина призмы равна  $D$ , а высота должна быть больше, так как в том месте, где крыша на входной и выходной поверхностях образует угол, происходит срезание пучков лучей Это обстоятельство следует иметь в виду для всех крышеобразных призм Изготовление крыши на уже готовой обычной призме уменьшает световое отверстие Крышеобразная пентапризма имеет  $k = 5,031$

В оптических приборах находят себе применение комбинации различных призм, называемые призмными системами (рис 74) В современных призмных биноклях применяется система Малюфеева, изобретенная им в 1827 г и известная под названием системы Порро I рода Такая система из двух прямоугольных призм позволяет получить полное оборачивание изображения

Установим зависимость между числом отражающих граней и оборачиванием изображения Если отражение пучков лучей происходит в одной плоскости, то нечетное число отражающих граней вызывает оборачивание изображения, а четное не вызывает Последнее правило является недействительным, если отражение пучков лучей происходит в разных плоскостях

Призмы ограничивают поле зрения оптических приборов Призма (рис 75) находится перед отверстием оптической системы на расстоянии  $b$  Диаметр отверстия  $D$  В отверстие поступает параллельный пучок лучей Призма развернута в плоскопараллельную пластинку и редуцирована

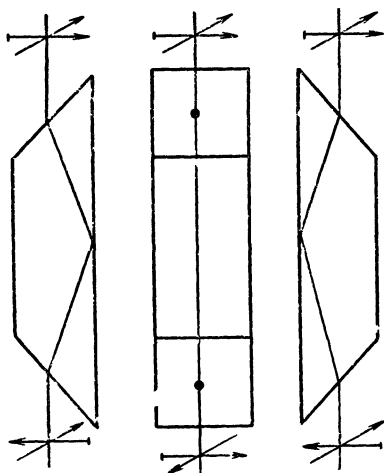


Рис 73 Вращение изображения при вращении призмы Дове

Из рис 75 следует

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{d}{n} + b\right)}.$$

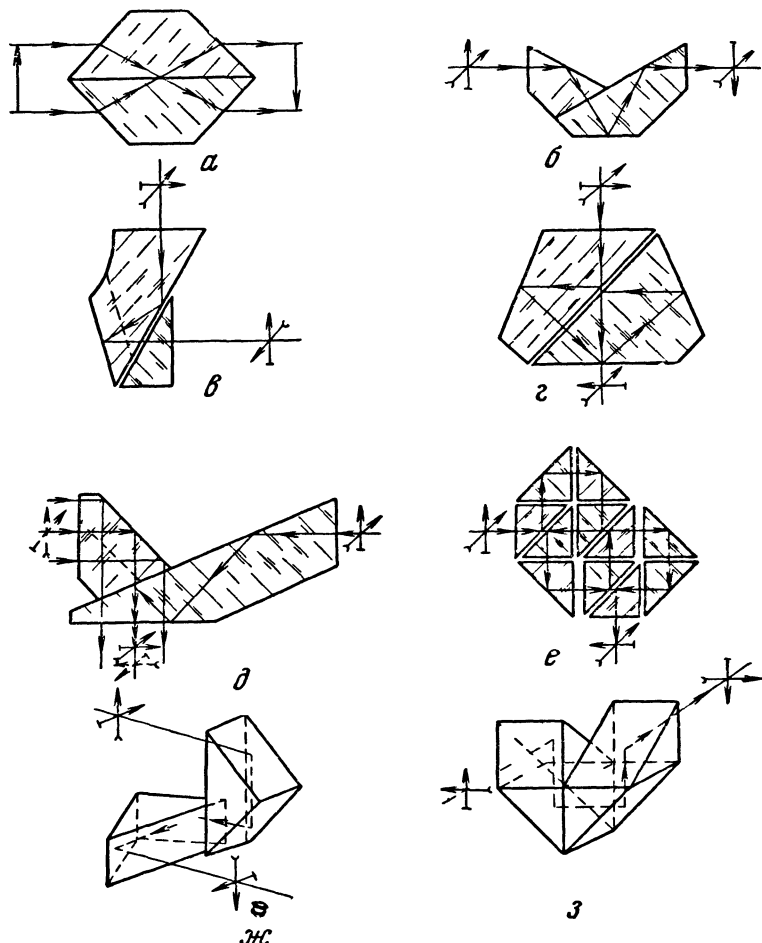


Рис 74 Призмные системы *a* — призма куб, *б* — призма Аббе, *в* — башмачная призма с клином, *г* — призма Пехана, *д* — разделяющая призма дальномера, *е* — система прямоугольных призм, *ж* — система Порро I рода, *з* — система Порро II рода

Но  $d = kD_k$ , где  $k$  — коэффициент призмы, тогда

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}. \quad (53,10)$$



Например, прямоугольная призма с крышей, с отверстием  $D_k = 70$  мм из стекла К8 с  $n = 1,5163$ , расположенная перед оптической системой (объективом) со световым отверстием  $D = 20$  мм на расстоянии  $b = 25$  мм, пропускает в оптическую систему пучки лучей под углом  $\omega = 18^\circ 5'$ .

Как видно из рис. 75, в систему проходят лучи и под большим углом, например лучи, показанные пунктиром, но их количество меньше, поэтому освещенность изображения, созданного этими лучами, уменьшена. Для практических целей выбирают отверстие  $D$ , необходимое для работы, и вычисляют возможное поле зрения, исходя из полного заполнения светового отверстия лучами, идущими под углом  $\omega$ .

Рассмотрим влияние призмы на поле зрения в расходящихся пучках лучей (рис. 76). Угловое поле зрения таких систем определяется лучом, показанным пунктиром, направляющимся из края предмета  $T$  в центр светового отверстия  $P$ .

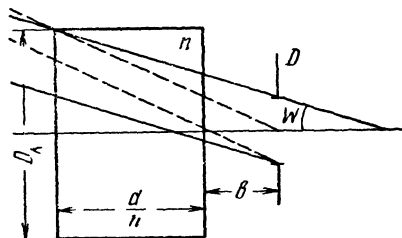


Рис 75 Призма ограничивает поле зрения оптической системы

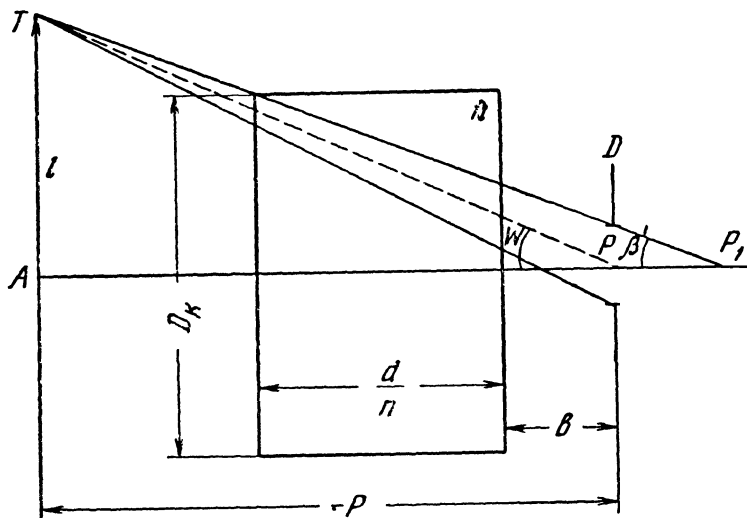


Рис. 76. Влияние призмы на поле зрения при положении предмета на конечном расстоянии от оптической системы

Из рис. 76 следует

$$\operatorname{tg} \omega = -\frac{l}{\rho}.$$

Кроме того,

$$\operatorname{tg} \beta' = -\frac{2l-D}{2\rho} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}.$$

Находим  $l$ :

$$l = \frac{D}{2} - \frac{\rho(D_k - D)}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)}.$$

Подставив последнее выражение для  $\operatorname{tg} \omega$ , получим

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{D_k - D}{2\left(\frac{kD_k}{n} + b\right)} - \frac{D}{2\rho}. \quad (53,11)$$

Для того же численного примера, при  $p = -600$ , имеем  $\omega = 14^\circ 15'$ .

Призмы отрицательно влияют на поле зрения, уменьшая его с увеличением  $k$ .

Если отражательная призма, эквивалентная плоскопараллельной пластине, располагается в параллельном ходе лучей, то она не влияет на aberrации той оптической системы, совместно с которой применяется. Но если она размещается в сходящихся или расходящихся пучках, то aberrации, вносимые ею, следует учитывать путем сложения с aberrациями того объектива, в ходе лучей которого она стоит.

**Пример 23.** Призма рефрактометра имеет показатель преломления  $n = 1,806$ . Определить показатель преломления испытуемого стекла, если измеренный угол полного внутреннего отражения равен  $63^\circ 14' 30''$ .

**Решение.** Дано  $n = 1,806$ ;  $i_m = 63^\circ 14' 30''$ .

Применим формулу

$$n' = n \sin i_m = 1,6126.$$

**Пример 24.** В фотографический аппарат, применяемый для репродукции, введена прямоугольная призма с размером катета  $70$  мм из стекла с  $n = 1,5163$ . Определить астигматическую разность, вносимую призмой, для точек изображения, соответствующих полю зрения  $2\omega = 40^\circ$ .

**Решение.** Используем формулы (53,3) и (53,4), для которых углы преломления  $i'$  найдем по формуле (6,1), учитывая, что  $i_1 = 20^\circ$ :

$$\sin i' = \frac{\sin i}{n} = 0,22556,$$

$i' = 13^\circ 02' 10''$ ;  $\cos i = 0,93970$ ;  $\cos i' = 0,97423$ . Так как  $d = 70$  мм, то  $x_m' = 4,74$  мм и  $x_s' = 1,64$  мм, а следовательно,

$$\Delta a = x_s' - x_m' = 3,10 \text{ мм}.$$

**Объективом** называется линза или система линз оптического прибора, обращенная к предмету. Объектив характеризуется фокусным расстоянием  $f'$ , относительным отверстием и полем зрения  $2\omega$ . В большинстве случаев объектив образует действительное изображение предмета.

Наиболее часто в различных оптических приборах применяется ахроматический двухлинзовый склеенный объектив (см. рис. 52). В некоторых случаях в геодезических и астрономических инструментах он применяется не склеенным.

Угловое поле зрения двухлинзовых объективов достигает 8—12°. Поэтому в тех случаях, когда необходимы более широкоугольные объективы, применяются конструкции фотографических многолинзовых объективов.

Если перед широкоугольным объективом необходимо разместить призмы, то в целях достижения их наименьшего размера необходимо призмы разместить во входном зрачке, а для этого входной зрачок должен быть расположен перед объективом

(рис. 75)  $b = -\frac{d}{2n}$ . Так как обычные или фотографические объективы, как правило, имеют входной зрачок внутри, то в качестве объективов применяют конструкции окуляров. При этом окуляры применяют повернутыми на 180° (в обратном ходе) против их обычного положения, чтобы их обычный выходной зрачок совпал со входным зрачком объектива.

**Коллективом**, или коллектором, называется линза, устанавливаемая в плоскости действительного изображения или вблизи ее, назначение которой заключается в том, чтобы отклонить к оптической оси наклонные пучки лучей.

На рисунке 77  $A_1A_1'$  есть отверстие в первой оптической системе, из которого выходит пучок лучей  $A_1BA_1'$ , в направлении  $B_1B_1'$ , показанном пунктиром. Если бы не было линзы, то лучи удалились бы от оптической оси и не смогли бы попасть в отверстие второй оптической системы  $A_2A_2'$ . Лучи, вышедшие из точек  $A_1$  и  $A_1'$ , пересекаются в точке  $B$ . Здесь находится изображение  $l'$ . Коллектив преломляет лучи и направляет их в отверстие  $A_2A_2'$  по направлениям  $A_2B_2$  и  $A_2'B_2'$ . Таким образом, коллектив проектирует выходной зрачок предшествующей оптической системы на входной зрачок последующей. Покажем, что линза, расположенная в плоскости изображения, не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы.

На рисунке 78 показаны две бесконечно тонкие системы  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , где  $\Phi_2$  есть оптическая сила коллектива, установленного в фокальной плоскости первой системы  $\Phi_1$ .

По формуле оптической силы двух систем (49,5) имеем

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - f'\Phi_1\Phi_2,$$

где  $\Phi_2 = \frac{1}{f'}$ , тогда  $\Phi = \Phi_2$ . Аналогичным образом можно рассмот-

реть и взаимодействие коллектива и второй системы  $A_2A_2'$  (рис. 77).

Коллектив не влияет на ход пучка лучей, идущего из точки на оси оптической системы, а влияет на ход наклонных лучей.

Найдем оптическую силу коллектива  $\Phi_2$ , расположенного в фокальной плоскости между двумя оптическими системами с опти-

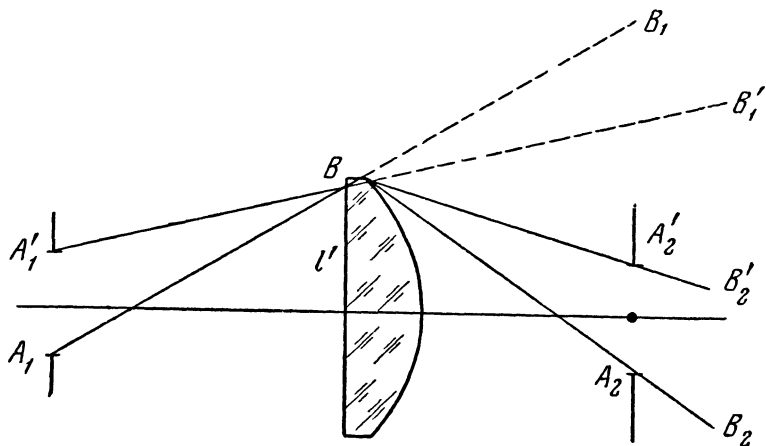


Рис. 77. Коллектив (коллектор)

ческими силами  $\Phi_1$  и  $\Phi_3$  (рис. 79). Рассмотрим общий случай, когда луч выходит из точки  $P_1$  перед первой системой, а по выходе из третьей системы пересекает оптическую ось в точке  $P_3'$ . Коллектив расположен в заднем фокусе первой оптической системы и в переднем фокусе второй.

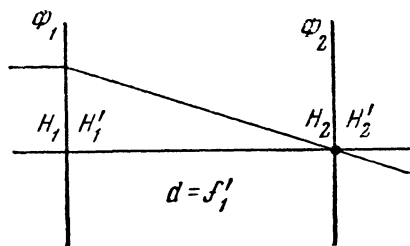


Рис. 78. Коллектор не влияет на фокусное расстояние эквивалентной системы

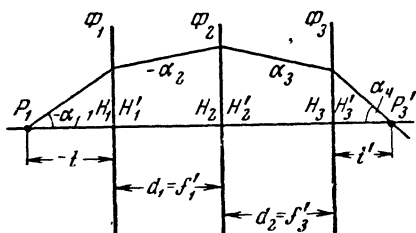


Рис. 79. К выводу формулы коллектора

Воспользуемся формулами углов и высот (48,3) и (13,19). Примем  $h_1 = 1$ , тогда  $\alpha_1 = \frac{1}{t}$ , далее

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1 \Phi_1 = \frac{1}{t} + \Phi_1$$

и

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1,$$

а так как

$$d_1 = \frac{1}{\Phi_1},$$

$$h_2 = 1 - \left( \frac{1}{t} + \Phi_1 \right) \frac{1}{\Phi_1} = - \frac{1}{t\Phi_1}.$$

Аналогично найдем  $\alpha_3$  и  $h_3$ , имея в виду, что

$$d_2 = \frac{1}{\Phi_3};$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = \frac{1}{t} + \Phi_1 - \frac{\Phi_2}{t\Phi_1}$$

и

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2 = - \frac{1}{t\Phi_1} - \left( \frac{1}{t} + \Phi_1 - \frac{\Phi_2}{t\Phi_1} \right) \frac{1}{\Phi_3}.$$

Далее,  $\alpha_4 = \alpha_3 + h_3 \Phi_3$  и  $\alpha_4 = \frac{h_3}{t'}$ , тогда после подстановки

$\alpha_3$  и  $h_3$  и преобразований получим

$$\Phi_2 = \Phi_1 (1 + t\Phi_1) + \Phi_3 (1 - t'\Phi_3). \quad (53,12)$$

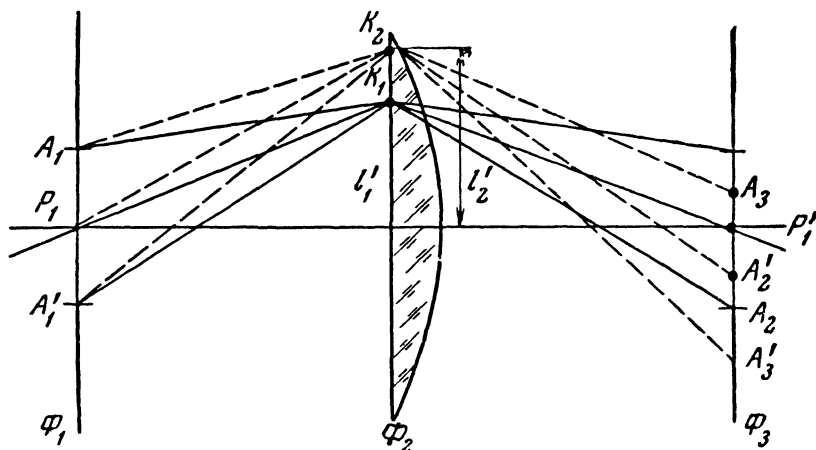


Рис. 80. Сферическая аберрация коллектора

Правильной работе коллектива мешает сферическая аберрация. При отсутствии сферической аберрации средние лучи  $P_1K_1$  и  $P_1K_2$  (рис. 80) пересекали бы в пространстве изображений точку  $P'_1$ . Оптическая сила коллектива выбрана таким образом, чтобы средний луч пучка лучей  $A_1K_1A'_1$  после преломления пересекал оптиче-

скую ось в центре отверстия  $P_1'$ . Вследствие сферической аберрации средний луч пучка  $A_1K_2A_1'$ , являющийся главным лучом, пересекает это отверстие в точке  $A_2'$ . Поэтому часть пучка лучей из точки  $K_2$ , а именно  $A_2A_3'$ , не пройдет далее. Сферическая аберрация коллектива влияет на распределение освещенности по полю изображения.

Если оптическая сила коллектива подобрана так, чтобы луч из точки  $K_2$  проходил через точку  $P_1'$ , то средний луч пучка из точки  $K_1$  пересекает оптическую ось правее точки  $P_1$  и в этом случае задерживаются лучи в верхней части пучка, выходящего из точки  $K_1$ .

Покажем действие сферической аберрации коллектива в виде плоско-выпуклой линзы с данными:

$$\begin{array}{ll} r_1 = 100 \text{ мм} & n_1 = 1 \\ & d_1 = 20 \text{ мм} \quad n_2 = 1,5187 \\ r_2 = \infty & n_3 = 1 \end{array}$$

Фокусное расстояние коллектива 192,8 мм. Лучи выходят из точки  $P_1$  на расстоянии 385,6 мм перед коллективом. Сферическая аберрация такой линзы, показанная ниже, вызывает сферическую аберрацию в зрачках.

Т а б л и ц а 6

Апертурный угол $u_1$		3°30'	5°42'22"	7°09'39"
Сферический коллектив	сферические аберрации	-24,1	-61,5	-93,9
Асферический коллектив	$\delta's$ , мм	0,012	0,008	-0,045

Применение же асферического коллектива, выпуклая поверхность которого удовлетворяет уравнению  $x = Ay^2 + By^4 + Cy^6 + Dy^8 + Ey^{10} + Fy^{12}$ , где  $A=0,005$ ;  $B=-0,1974 \cdot 10^{-7}$ ;  $C=0,1797 \cdot 10^{-11}$ ;  $D=-0,1223 \cdot 10^{-14}$ ;  $E=0,5401 \cdot 10^{-18}$  и  $F=0,8258 \cdot 10^{-22}$ , не только устраняет эту аберрацию, но и резко улучшает изображение в точках изображения, удаленных от оптической оси.

**Окуляр.** Для того чтобы нормальный глаз человека мог рассмотреть изображение, образованное оптической системой, без напряжения аккомодации, необходимо, чтобы из системы лучи выходили в виде параллельных пучков. Эту роль выполняет последняя линзовая система прибора, называемая окуляром. При помощи окуляра глаз рассматривает изображение, образованное предшествующими окуляру частями оптической системы. Окуляр

как бы выполняет роль лупы. Только через лупу рассматривают предметы непосредственно, а через окуляры — изображение предметов.

Окуляр характеризуется следующими величинами: 1) фокусным расстоянием  $f'$ ; 2) видимым увеличением  $\bar{\Gamma} = \frac{250}{f_1}$ ; 3) полем зрения  $2\omega'$ ; 4) диаметром выходного зрачка  $D'$ ; 5) положением выходного зрачка  $t'$ ; 6) расстоянием от рассматриваемого предмета (изображения) до первой поверхности  $S_F$ .

Принципиальная оптическая схема окуляра показана на рис. 81. Поверхности окуляра показаны пунктиром. Предмет расположен в плоскости изображений (передняя фокальная плоскость окуляра). Глаз наблюдателя устанавливается в центре выходного зрачка. Условие наблюдения требует достаточного удаления выходного зрачка от окуляра, чтобы все пучки лучей попали в зрачок глаза. Расстояние  $s_F$  имеет значение в случае расположения сетки

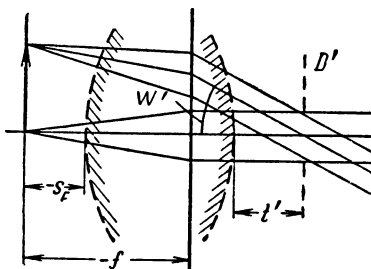


Рис. 81. Окуляр

в передней фокальной плоскости окуляра или призмы между передней фокальной плоскостью и первой поверхностью окуляра. Для фокусировки на резкость изображения сетки необходимо изменять расстояние между сеткой и окуляром, а малое  $s_F$  не позволяет разместить призму в этом пространстве.

Отметим, что с увеличением фокусного расстояния становится возможным применять более широкоугольные окуляры. Увеличение поля зрения окуляров препятствуют aberrации окуляра, в первую очередь астигматизм и кривизна поля. Если найти линейные aberrации, соответствующие одинаковым aberrациям в диоптриях при различных фокусных расстояниях, то окажется, например, что для меридиональной кривизны изображения  $L_m = 3,6$  и  $f' = 10$  мм имеем угол поля зрения  $\omega' = 18^\circ$ , а для  $f' = 40$ —50 мм угол поля зрения  $\omega' = 35^\circ$ .

Простейшим окуляром может быть простая линза. Но она редко применяется без коллектива, роль которого была уже рассмотрена. Поэтому, как минимум, каждый окуляр состоит из двух линз. Первая линза со стороны передней фокальной плоскости окуляра называется *коллективом*, а со стороны глаза — *глазной*. Эти наименования сохранились и для более сложных окуляров.

В тех случаях, когда поле зрения не превосходит  $2\omega' = 30^\circ$ , рекомендуется применять окуляры, состоящие из двух плоско-выпуклых линз.

Наиболее распространенные конструкции окуляров показаны на рис. 82.

**Окуляр Гюйгенса.** Линзы плоской стороной обращены к наблю-

дателью, и плоскость изображения, образованная предыдущей системой, расположена между линзами. Такие окуляры обычно применяются в микроскопах. Их достоинством является сокращение длины системы, а недостатком — затруднения в установке сетки в фокальной плоскости. Вычисление конструктивных данных

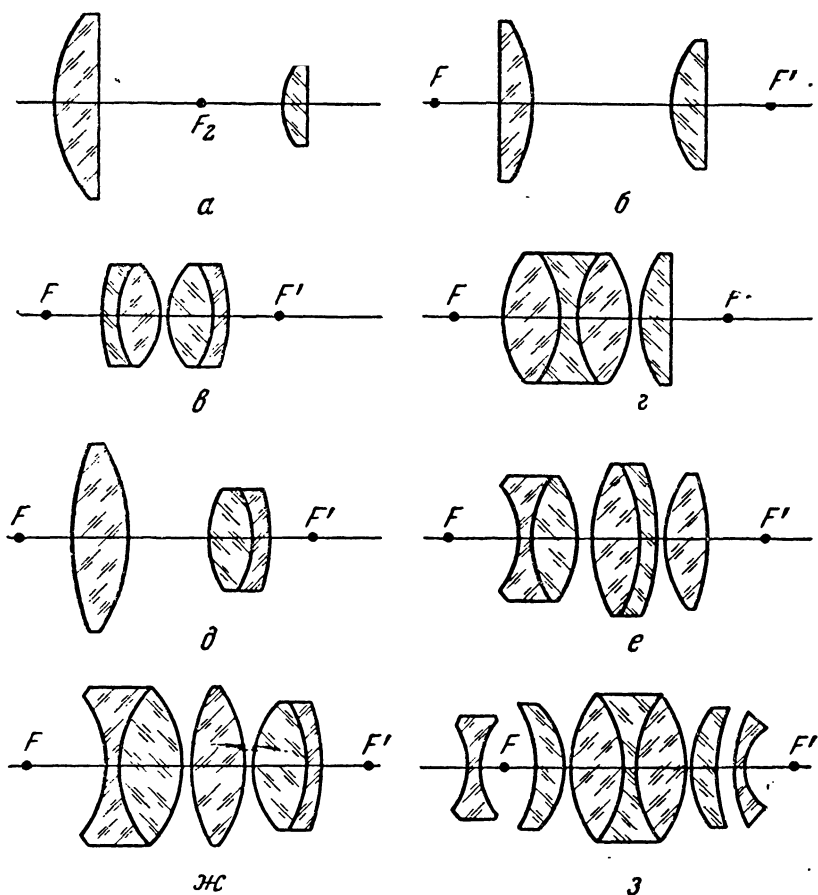


Рис. 82. Типы окуляров: *a* — окуляр Гюйгенса,  $2\omega = 30^\circ$ ; *b* — окуляр Рамсдена,  $2\omega = 30^\circ$ ; *v* — симметричный окуляр,  $2\omega = 40^\circ$ ; *z* — ортоскопический окуляр,  $2\omega = 40^\circ$ ; *d* — окуляр Кельнера,  $2\omega = 45^\circ$ ; *e* — окуляр с удаленным зрачком,  $2\omega = 50^\circ$ ; *ж* — окуляр Эрфле,  $2\omega = 60^\circ$ ; *з* — широкоугольный окуляр,  $2\omega = 88^\circ$

такого окуляра с фокусным расстоянием  $f'$  рекомендуется производить с соблюдением следующих условий.

1. Для окуляров с увеличением не свыше  $5\times$ :

$$f'_1 = 0,85f'; \quad f'_2 = 0,57f'; \quad d = 0,92f'; \quad \text{стекло К9.}$$



2 Для окуляров с увеличением не свыше  $8^{\times}$

$$f'_1 = 1,25f', f'_2 = 0,7f', d = 1,05f', \text{ стекло } \Phi 1.$$

3 Для окуляров с увеличением не свыше  $15^{\times}$

$$f'_1 = 1,6f', f'_2 = 0,85f', d = 1,15f'.$$

Стекла для окуляра  $10^{\times}$  марок  $\Phi 1$  и  $K9$ , а для  $15^{\times}$  —  $T\Phi 1$  и  $K9$   
**Окуляр Рамсдена.** Одинаковые плоско-выпуклые линзы обращены выпуклыми сторонами друг к другу. Применяя формулу оптической силы (49,5), при  $\Phi_1 = \Phi_2$  имеем

$$\Phi = 2\Phi_1 - d\Phi_1^2,$$

где  $d$  — расстояние между линзами

Отсюда, используя решение с наибольшими  $f'$ , получим

$$\Phi_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - d\Phi}}{d}. \quad (53,13)$$

Найдем зависимости между  $d$  и  $f'_1$ , а также  $f'_1$  и  $f'$ , исходя из условия

$$d = 0,75f'. \quad (53,14)$$

Зависимость между  $d$  и  $f'_1$  может быть выражена уравнением

$$d = xf'_1.$$

Подставив это уравнение в формулу для  $\Phi$ , получим

$$\Phi = \Phi_1(2 - x).$$

Далее введем последнее уравнение в (53,14)

$$\frac{0,75}{\Phi_1(2 - x)} = xf'_1,$$

и после подстановки получим  $\lambda = 0,5$ , тогда

$$d = 0,5f'_1 \quad (53,15)$$

и

$$f_1 = 1,5f'. \quad (53,16)$$

Вершинное фокусное расстояние найдем по формуле (49,6), положив  $\Phi_1 = \Phi_2$ ,

$$a' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1(2 - \Phi_1 d)}.$$

Учитывая положение главной плоскости в плоско-выпуклой линзе с толщиной  $d_3$  на расстоянии  $\frac{d_3}{n}$ , окончательно получим

$$-s_F = s'_F = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi_1 (2 - \Phi_1 d)} - \frac{d_3}{n}. \quad (53,17)$$

Для тонкой системы

$$s'_F = 0,333f'_1. \quad (53,18)$$

Окуляр в приборе обычно имеет некоторое перемещение (фокусировку) вдоль оптической оси с целью приспособления к недостаткам глаз наблюдателя в пределах до  $\pm 7$  диоптрий ( $L_r$ ). Фокусировка окуляра позволяет близорукому или дальнозоркому глазу производить наблюдение без напряжения.

Для определения линейного перемещения окуляра, соответствующего тому или иному числу диоптрий, можно воспользоваться формулой (37,1), в которой под  $x_m$  понимается линейное смещение  $x$ , а под  $L_m$  — число диоптрий  $L_r$ . Тогда формула фокусировки окуляром примет вид

$$x = \frac{L_r f'^2}{1000}. \quad (53,19)$$

Для близорукого глаза окуляр вдвигается, а для дальнозоркого выдвигается.

**Пример 25.** Определить конструктивные элементы окуляра типа Рамсдена с видимым увеличением  $10^{\times}$ .

**Решение:** Дано:  $\bar{\Gamma} = 10$ , отсюда  $f' = \frac{250}{\bar{\Gamma}} = 25$  мм.

Применим формулы (53,16), (53,15):

$$f'_1 = 1,5f' = 1,5 \cdot 25 = 37,5 \text{ мм},$$

$$d_2 = 0,5f'_1 = 0,5 \cdot 37,5 = 18,75 \text{ мм},$$

$$-s_F = s'_F = 10,52 \text{ мм}.$$

Кривизну поверхностей найдем по формуле плоско-выпуклой линзы (21,4). В качестве сорта оптического стекла линз окуляра примем сорт К8 с  $n = 1,5163$ ,

$$r = (n - 1)f'_1 = 0,5163 \cdot 37,5 = 19,35 \text{ мм}.$$

Толщины и диаметры линз примем одинаковыми, хотя наибольший диаметр обычно должна иметь коллективная линза.

Диаметр линзы определяется полем зрения. Так как для окуляра типа Рамсдена  $2\omega' = 30^\circ$ , то ожидаемый диаметр изображения в передней фокальной плоскости равен  $2f' \operatorname{tg} 15^\circ$ , т. е. для данного случая 13,4 мм. Диаметр линзы обычно несколько больше

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