



А. Е. ДЕНИСОВ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

БИБЛИОТЕЧКА
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ
Ф И З И К А

А. Е. ДЕНИСОВ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Киев
Головное издательство
издательского объединения
«Вища школа»
1980

ББК 22.34
535
Д33

УДК 535.31(07)

Денисов А. Е. Геометрическая оптика.— Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980.—(Б-ка физ.-мат. школы). 128 с. 20405. 1704050000.

В книге в научно-популярной форме излагаются основные законы геометрической оптики, сведения о принципе действия и назначении отдельных оптических деталей и систем; рассматриваются свойства глаза, схемы ряда оптических приборов и совместное действие глаза с приборами, вооружающими глаз; рассматриваются аберрации оптических систем, даются краткие сведения о технологии изготовления оптических деталей.

Предназначена для учащихся физико-математических школ. Может быть полезна также абитуриентам при подготовке ко вступительным экзаменам в вузы, учителям средних общеобразовательных школ.

Ил. 100.

Рецензенты: кандидаты физ.-мат. наук, доценты А. М. Борбат, В. М. Казанский; учитель физики И. Н. Яковлев

Редакционная коллегия: проф. Федорченко А. М., (ответственный редактор), проф. Харьков Е. И., проф. Шиманский Ю. И., доц. Борбат А. М. (заместитель ответственного редактора), доц. Бугаев А. М., доц. Меньяйлов Н. Е.

Редакция литературы по математике и физике
Зав. редакцией *Е. Л. Корженевич*

Д $\frac{20405-118}{М211(04)-80}$ 366—80 · 1704050000

© Издательское объединение
«Вища школа», 1980

ВВЕДЕНИЕ

Оптика как наука возникла в глубокой древности, в V—IV веках до нашей эры. Значительный вклад в развитие оптики внес М. В. Ломоносов, руководивший с 1726 г. оптической мастерской при русской Академии наук. В наше время дальнейшее развитие теории и практики применения оптических систем дано в работах советских ученых Г. С. Ландсберга, Д. Д. МаксUTOва, А. И. Тудоровского, Г. Г. Слюсарева, М. М. Русинова и др.

Интерес к оптическим явлениям и развитие научных представлений о них были вызваны той огромной ролью, которую играет свет в жизни человека. Свет обеспечивает возможность получения разнообразной информации об окружающих нас предметах и явлениях — от простейшей информации до высокого уровня, получаемой в результате научных опытов и наблюдений.

Глаз — прекрасный естественный оптический прибор, обладающий довольно широкими возможностями, однако он не позволяет рассмотреть как очень мелкие, так и крупные, но удаленные предметы; он не может сохранить на длительное время изображение во всех его деталях, а тем более передать его другому лицу; глаз не воспринимает изображение в темноте и т. п.

Поэтому ученые всегда стремились расширить возможности глаза. Создавалась теория зрения, теория оптических приборов, вооружающих глаз, оптических

приборов, работающих независимо от глаза, но позволяющих получать и сохранять изображения. Появилась оптика как наука, как раздел физики.

Геометрическая оптика — одна из ее частей представляет собой математическую теорию геометрических свойств распространения света. На основе геометрической оптики производится расчет оптических приборов, создаются эти приборы. Знание геометрической оптики позволяет наиболее целесообразно использовать оптические приборы для различных практических целей.

В настоящее время оптические приборы проникли во все сферы деятельности человека, они сопровождают его в быту, в научной деятельности и на производстве.

Оптика позволяет человеку глубже раскрыть тайны микромира и космоса, сохранять информацию для потомков. Оптические приборы помогают проведению производственных процессов и т. п.

Следовательно, основные понятия оптики, и в частности геометрической, необходимы каждому, независимо от специальности, которую он избрал или изберет впоследствии.

В последние годы в связи с внедрением в учебный процесс машин для контроля знаний и обучения получила широкое применение форма «выборочного ввода ответов», удобная как при контроле знаний с помощью машин, так и при самоконтроле без применения машин. Эта форма контроля усвоения материала состоит в следующем: каждый вопрос сопровождается ответами для выбора, один из которых соответствует поставленному вопросу; ответить на вопрос — значит выбрать из числа предлагаемых правильный ответ. Если ответов для выбора к тому или иному вопросу нет, а предлагается, например, решить задачу, то ответом на вопрос будет число, полученное в результате решения задачи. В такой форме и поставлены вопросы в данной книге.

Для проверки правильности ответов в конце книги приводятся коды верных ответов.

ГЛАВА I

ЗАКОНЫ И ЯВЛЕНИЯ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

1. Основные законы геометрической оптики

Геометрическая оптика базируется на четырех основных законах. Эти законы установлены экспериментально и, как многие другие законы физики, имеют ограниченную область применения. Они применимы в тех случаях, когда не учитывается природа света, т. е. не учитываются волновые и квантовые его свойства. Поэтому прежде, чем сформулировать эти законы, необходимо четко осознать их приближенный смысл.

Вторая предпосылка, предшествующая изучению основных законов геометрической оптики, состоит в том, что слово «основные» подчеркивает их главенствующую роль. В геометрической оптике есть много положений, правил, определений и понятий, которые следует воспринимать как законы, но все они в своей основе сводятся к основным законам или выполняют вспомогательную роль при их применении в конкретной ситуации.

Основные законы геометрической оптики: закон прямолинейного распространения света, закон отражения света, закон преломления света и закон независимости распространения световых лучей. На основе этих законов можно построить математическую теорию распространения света.

Свет в однородной среде распространяется прямолинейно — так формулируется **закон прямолинейного распространения света**.

Оптически однородной считается такая среда, в которой свет распространяется с постоянной скоростью. Если имеются две среды, в которых свет распространяется с различными скоростями, то среду, где свет распространяется с меньшей скоростью, называют **оптически более плотной**, а среду, где свет распространяется с большей скоростью — **оптически менее плотной**.

Закон прямолинейного распространения света применим в том случае, когда не учитывается дифракция

света — огибание светом препятствий, явление, изучаемое в физической (волновой) оптике. Этот закон позволяет ввести такие понятия геометрической оптики, как световой луч и пучок световых лучей.

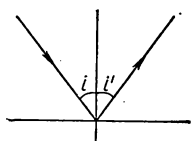


Рис. 1

Если свет от источника пропустить через бесконечно малое отверстие и представить себе, что он не будет огибать края отверстия, то прямую линию, по которой будет распространяться свет, можно считать лучом. Очевидно, что луч — понятие абстрактное. Обычно под световым лучом принято понимать направление, соответствующее распространению света в однородной среде. Пучок лучей — совокупность световых лучей. Если пучок лучей выходит из одной точки или сходится в одной точке, то такой пучок называется гомоцентрическим.

Закон отражения света: луч падающий и луч отраженный лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности; угол отражения равен углу падения.

Из рис. 1 видно, что угол падения — угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности. Аналогично определяется угол отражения. Закон справедлив для поверхности любой формы: плоской, сферической, цилиндрической и т. п. Если же на поверхность падает пучок параллельных лучей (случай весьма важный и распространенный), то отраженный пу-

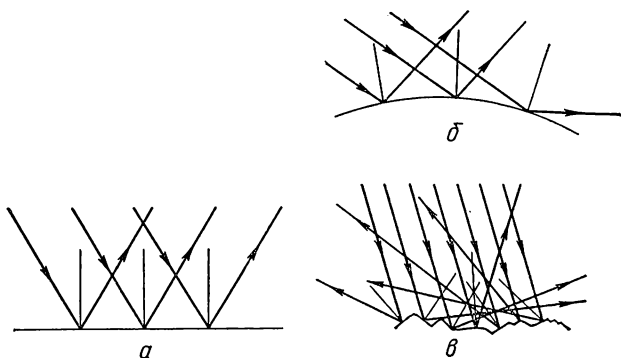


Рис. 2

чок приобретает различные формы в зависимости от формы отражающей поверхности. Например, при отражении от плоской поверхности пучок остается параллельным (рис. 2, а), при отражении от выпуклой сферической поверхности — становится расходящимся (рис. 2, б), отражаясь от матовой поверхности, свет рассеивается, т. е. отраженные лучи распространяются во всевозможных направлениях и пучок лучей определенной формы не имеет (рис. 2, в).

Если лучи света распространяются в одной среде и доходят до границы раздела первой среды со второй, то они частично или полностью отражаются. Если вторая среда непрозрачна — свет в ней не распространяется, процесс этим исчерпывается. В противном случае

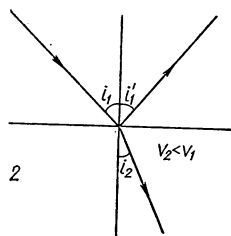


Рис. 3

световой луч не только отражается от границы раздела двух сред, но и проходит во вторую среду (рис 3). Неравномерность условий распространения света (различная скорость распространения) обуславливает преломление луча на границе раздела двух сред. Синус угла падения пропорционален скорости света в первой среде, а синус угла преломления — во второй:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} . \quad (1)$$

Отношение это является величиной постоянной, что и отражено в законе преломления света: луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром к преломляющей поверхности; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух данных оптических сред есть величина постоянная. Эта величина называется **относительным показателем преломления** двух сред (n_{21}) — второй относительно первой:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} . \quad (2)$$

Если одна из сред, например, первая, — вакуум, то показатель преломления второй среды по отношению к вакууму называется **абсолютным показателем преломления** этой среды или просто **показателем преломления**.

На основании изложенного очевидно, что абсолютный показатель преломления есть отношение скорости света в вакууме к скорости света в данной среде:

$$\frac{c}{v} = n, \quad (3)$$

где c — скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с); v — скорость света в данной среде; n — абсолютный показатель преломления.

Показатель преломления вакуума принимается равным единице. Абсолютные показатели преломления любых сред всегда больше единицы. Это означает, что скорость света в любой среде всегда меньше, чем в вакууме. Не составляет исключения в этом отношении и воздух. Его абсолютный показатель преломления зависит от температуры и давления и при нормальных условиях равен 1,000294. В геометрической оптике показатель преломления воздуха принимают равным единице.

Относительный показатель преломления двух сред связан с абсолютными показателями этих сред следующим соотношением:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (5)$$

Величину, равную произведению показателя преломления на синус угла между лучом и перпендикуляром к границе раздела сред, называют **оптическим инвариантом**. Следовательно, закон преломления света можно рассматривать как равенство оптических инвариантов для падающего и преломленного лучей.

Закон независимости распространения световых лучей заключается в том, что отдельные лучи и пучки лучей, встречаясь друг с другом и пересекаясь, не оказывают друг на друга влияния. Это справедливо без учета интерференции света, при которой возможны взаимные влияния световых пучков, обуславливающие усиление или ослабление света (явление, изучаемое в курсе физической — волновой — оптики). Однако заметим, что и в случае интерференции лучей и пучков лучей при

последующем распространении они будут такими же, как прежде.

Свойство лучей и пучков, выраженное этим законом, позволяет производить демонстрацию кинофильмов при помощи нескольких аппаратов с пересечением световых пучков, что дает возможность создавать панорамные фильмы.

Следствием законов отражения и преломления света является **обратимость хода световых лучей**: если при выходе светового луча из любой системы преломляющих и отражающих сред на последнем этапе послать луч точно назад, то он пройдет всю систему в обратном направлении и вернется к своему источнику.

Это позволяет наблюдать ход световых лучей сквозь оптические среды, не отдавая предпочтения какой-либо среде как первой (первичной) и принимая в качестве первичной ту среду, которую в данном случае удобнее рассматривать первой. Так поступают при изучении явления полного отражения, о котором говорится в следующем параграфе.

2. Явление полного отражения

Пусть луч проходит из среды оптически более плотной (ее будем называть первой) в среду оптически менее плотную (вторую). Например, из стекла в воздух (рис. 4). Угол преломления в этом случае больше угла падения.

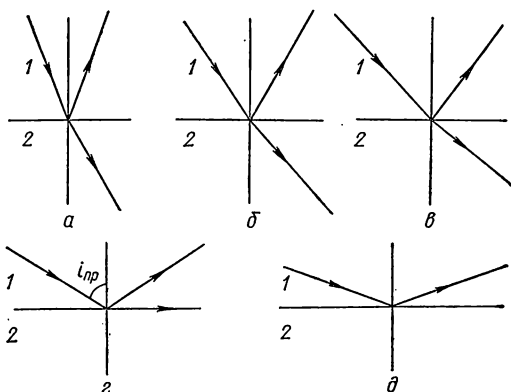


Рис. 4

Проследим теперь, как поведет себя преломленный луч, если угол падения будет увеличиваться (рис. 4, б, в). Как видим, преломленный луч оказывается ближе к границе раздела двух сред, чем падающий. Луч отраженный все время остается, подчиняясь закону отражения света. Но вот наступает предельное положение падающего луча (рис. 4, г), при котором преломленный луч предельно близко подходит к границе раздела двух сред

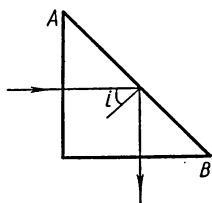


Рис. 5

и во второй среде он уже не распространяется. Теперь имеем только падающий и отраженный лучи. Угол падения в этом случае называется **предельным углом**, а явление, при котором перестает существовать преломленный луч и остается только падающий и отраженный, называется **явлением полного отражения**. Полное отражение происходит и при дальнейшем увеличении угла падения (рис. 4, д).

Пронаблюдать такое явление легко с помощью обыкновенной трехгранной стеклянной призмы. Если свет от какого-либо предмета идет через призму в глаз наблюдателя, как показано на рис. 5, и угол i больше предельного или равен ему, то грань AB будет восприниматься наблюдателем как зеркальная (полное отражение в стекле). Если же рассматривать призму со стороны грани AB , то предмета видно не будет.

Явление полного отражения с количественной стороны описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\sin i_{\text{пр}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}; \quad (n_2 = 1); \quad n_1 \sin i_{\text{пр}} = 1. \quad (6)$$

Следовательно, чем больше показатель преломления среды, в которой наблюдается явление полного отражения, тем меньше предельный угол, при котором оно начинается. Это важное обстоятельство позволяет по величине предельного угла полного отражения определять величину показателя преломления того или иного вещества, а по величине показателя преломления судить, например, о концентрации раствора. На этой основе работают приборы, именуемые рефрактометрами.

Контрольные вопросы

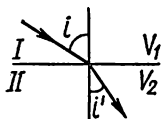
1. Какое из перечисленных оптических явлений можно объяснить законами геометрической оптики?

- 1) Дисперсия.
- 2) Интерференция.
- 3) Полное отражение.
- 4) Дифракция.

2. Для какого из перечисленных условий (с точки зрения геометрической оптики) справедлив закон прямолинейного распространения света?

- 1) Свет переходит из стекла в воду.
- 2) Свет проходит через тонкую стеклянную пластинку.
- 3) Свет проходит в воздухе сквозь отверстие диафрагмы.
- 4) Свет проходит через эквивалентную линзу.

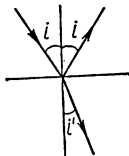
3. Какое выражение закона преломления света справедливо для данной ситуации?



1) $\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_2}{n_1}$. 2) $\frac{\sin i'}{\sin i} = \frac{v_1}{v_2}$.

3) $\frac{\sin i}{\sin i'} = n_{12}$. 4) $\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n_1}{n_2}$.

4. Укажите равенство оптических инвариантов, справедливое в данной ситуации.



1) $n_1 \sin i' = n_2 \sin i$.

2) $n_1 \sin i = n_2 \sin i'$.

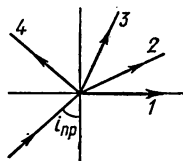
3) $n_2 \sin i = n_1 \sin i$.

4) $n_1 \sin 2i = n_2 \sin i'$.

5. Пучки лучей, идущие от двух источников света, пересекаются. Какой эффект (с точки зрения геометрической оптики) происходит в зоне пересечения?

- 1) Происходит усиление света.
- 2) Происходит ослабление света.
- 3) Пучки лучей изменяют свое направление.
- 4) Нет взаимного влияния пучков лучей.

6. Укажите, как пойдет луч света, падающий под углом, меньше предельного.



7. Луч света выходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную под предельным углом. Под каким углом этот луч шел в первой среде?

1) $i \rightarrow \frac{\pi}{4}$. 2) $i \rightarrow 0$.

3) $i \rightarrow \frac{\pi}{2}$. 4) $i \rightarrow \pi$.

8. Предельный угол полного отражения при переходе луча из воды в воздух приблизительно равен 49° . Какова скорость света в воде? ($n_{\text{в}} = 1,33$).

1) $1,5 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 2) $1,33 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

3) $0,75 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 4) $2,25 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

ГЛАВА II

ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

1. Общие понятия

Все оптические приборы, изучаемые в курсе геометрической оптики, представляют собой оптические системы, создающие изображения. Любая оптическая система состоит из нескольких оптических деталей, расположенных в строго определенном порядке. Каждая оптическая деталь в приборе имеет определенную форму и выполняет определенные функции, которые в совокупности обеспечивают работу данного оптического прибора. Таким образом, сконструировать оптический прибор или разобраться в его работе можно

только имея ясное представление о работе отдельных оптических деталей..

Оптическими деталями называют зеркала, пластины, призмы, линзы, изготовленные из стекла или других прозрачных материалов.

Зеркалом называется оптическая деталь с одной отражающей поверхностью или одной отражающей и одной преломляющей поверхностями. По форме поверхностей зеркала бывают плоскими, сферическими и др.

Плоскопараллельной пластиной или просто **пластиной** называют оптическую деталь, ограниченную двумя параллельными преломляющими поверхностями.

Призма — оптическая деталь, ограниченная с двух сторон преломляющими плоскими поверхностями, составляющими друг с другом некоторый угол. Призмы бывают различной формы и назначения. Один из видов призм называется оптическим клином. **Оптический клин** — это призма с малым углом (не более 6°) между ее преломляющими гранями.

Линзой называется оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими поверхностями, из которых по крайней мере одна имеет радиус кривизны $R \neq \infty$. Иными словами, линза может иметь две преломляющиеся поверхности, представляющие собой поверхности тел вращения (сферическую, цилиндрическую и т. п.) или одну преломляющую поверхность; тогда вторая может быть плоской.

Прямая, проходящая через оптический центр линзы, называется ее **оптической осью**. Точнее оптическую ось (иногда ее называют главной оптической осью) следовало бы определить как прямую, проходящую через вершины сферических сегментов линзы, но поскольку в тонкой линзе эти вершины и оптический центр расположены весьма близко друг от друга, то их рассматривают как одну точку, называя ее оптическим центром линзы.

Существуют и другие оптические детали: прямые и изогнутые конусы, полые призматические и цилиндрические детали, кюветы различных форм и т. п., но они находят меньшее применение и рассматривать их мы не будем.

Оптические детали изготовляют с высокой точностью. Плоские и сферические поверхности обрабатывают

с точностью до десятитысячных и сотысячных долей миллиметра. Толщина линз и пластин, применяемых для прецизионных (высокоточных) приборов, выдерживается с точностью до сотых долей, а в остальных случаях — до десятых долей миллиметра. Параллельность рабочих поверхностей пластин выдерживается с точностью до нескольких угловых минут или долей минуты, а наиболее точных пластин — до одной или нескольких угловых секунд. С такой же точностью изготавливаются и углы призм.

Крепление оптических деталей в приборах осуществляется несколькими способами. Круглые детали — линзы, пластины — закрепляются обычно в оправках способом завальцовки. Крепление круглых деталей непосредственно в корпусе прибора осуществляется резьбовыми кольцами. Некруглые пластины и призмы крепят винтами с помощью металлических планок и пружин. В некоторых случаях детали приклеивают специальным клеем.

2. Правила знаков

Каждая оптическая деталь воспринимает и каким-то образом изменяет направление хода лучей. Лучи исходят от предметов, поэтому пространство, где они расположены, принято называть **пространством предметов**.

Если с помощью одной оптической детали или их совокупности получается изображение предметов, то точки изображения также попадают в определенное пространство. Это пространство называют **пространством изображений**. Точки, углы, отрезки в пространстве изображений обозначаются теми же буквами, что и соответствующие им (сопряженные) точки, углы, отрезки в пространстве предметов, но со штрихами.

В геометрической оптике при построении хода лучей и изображений приняты определенные правила знаков, предпосылкой к которым является расположение пространства предметов справа от оптической детали или системы. При этом за положительное направление распространения света принято направление слева направо. В таком же порядке ведется отсчет преломляющих поверхностей и оптических деталей.

Правила знаков заключаются в следующем:

1. Линейные отрезки считаются положительными, если направление их отсчета от оптической системы (детали) совпадает с направлением света, и отрицательными,

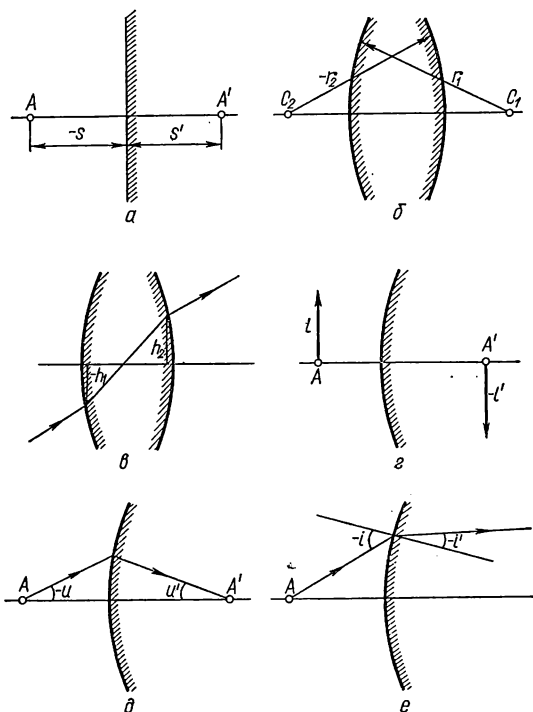


Рис. 6

ми, если они направлены в противоположную сторону (рис. 6, а);

2. Радиус кривизны поверхности считается положительным, если центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если центр кривизны находится слева от поверхности (рис. 6, б);

3. Величины толщин линз и других оптических деталей, а также воздушных промежутков между преломляющими поверхностями всегда считаются положительными;

4. Высоты пересечения лучей на поверхностях h_1 и h_2 (рис. 6, в) и величины предметов и изображений l и l' (рис. 6, г) считаются положительными, если они находятся над оптической осью прибора, и отрицательными — если находятся под ней;

5. Угол луча с оптической осью считается положительным, если для совмещения оси с лучом ось нужно вращать по часовой стрелке, и отрицательным, если ось нужно вращать против часовой стрелки (рис. 6, д);

6. Углы между лучами и нормалью к поверхности в точке падения луча i и i' (углы падения и преломления) считаются положительными, если для совмещения нормали с лучом ее нужно вращать по часовой стрелке, и отрицательными, если нормаль надо вращать против часовой стрелки (рис. 6, е).

Знак плюс при обозначениях опускается.

3. Плоские зеркала

Плоские зеркала в оптических приборах имеют два назначения: они меняют направление хода луча и дают изображение предмета. Рассмотрим первое назначение плоского зеркала.

На основании закона отражения света луч отражается от плоского зеркала под тем же углом, под которым падает. При отсутствии плоского зеркала луч распространялся бы прямолинейно. Таким образом, направление луча изменяется плоским зеркалом на угол φ (рис. 7).

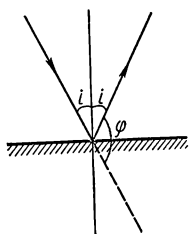


Рис. 7

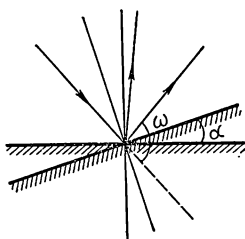


Рис. 8

Из того же рисунка видно, что величина угла φ определяется формулой

$$\varphi = 180 - 2i. \quad (7)$$

При повороте зеркала на угол α (рис. 8) направление хода луча меняется на удвоенный угол α :

$$\omega = \varphi \pm 2\alpha. \quad (8)$$

В формуле (8) знак «+» соответствует повороту зеркала против часовой стрелки, знак «—» — по часовой стрелке.

Прежде чем говорить о втором назначении плоского зеркала — получении изображения, уточним, какие бывают изображения.

Если пучок лучей, сходящихся в одной точке (гомоцентрический), дает изображение, то такое изображение называется **точечным** или **стигматическим**. Изображение, образованное пересечением самих лучей, называется **действительным**.

Изображение, образованное пересечением геометрических продолжений лучей в той области, куда фактически лучи не попадают, называется **мнимым**. Из приведенного определения очевидно, что такого изображения не существует, оно является абстракцией, которая приобретает реальный смысл для глаза: оптическая система глаза, о которой будет речь ниже, воспринимает изображение там, где может быть построено мнимое изображение.

На рис. 9 показано построение изображения в плоском зеркале. Порядок этого построения следующий. От каждой точки предмета (если предмет представляет собой отрезок прямой, достаточно двух точек) проводятся на зеркальную поверхность два произвольных луча. Затем, на основе закона отражения, строятся отраженные лучи. Пучки принадлежащих каждой точке отраженных лучей, расходящиеся, следовательно, действительного изображения они не дают, однако продолжения их дают два мнимых точечных изображения A' , B' , которые соответствуют изображениям точек A и B .

Итак, изображение в плоском зеркале мнимое, а поскольку $i' = i$, $s' = s$, т. е. изображение распола-

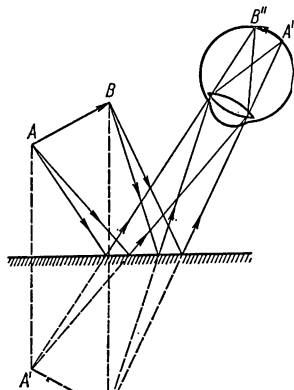


Рис. 9

гается на таком же расстоянии от зеркала, как предмет, размеры изображения равны размерам предмета.

Есть и третья характеристика изображения в плоском зеркале. Мы знаем, что на изображении в плоском зеркале то, что находится справа, воспринимается находящимся слева, и наоборот. В связи с этим такое изображение называют **неконгруэнтным** (не совпадающим).

В оптических приборах главным образом используется первое свойство плоского зеркала — менять направление хода лучей. С этой целью зеркала применяются во многих оптических приборах: сложных микроскопах, дальномерах, оптиметрах (приборах, предназначенных для определения малых отклонений детали от эталона) и т. п.

Обычные плоские зеркала, используемые в быту, имеют зеркальную амальгаму за стеклом. Это зеркала с внутренней отражающей поверхностью. Такие зеркала имеют существенный недостаток: они дают двойное изображение. Первое изображение дает внешняя поверхность стекла, а второе — зеркальная амальгама. Из-за этого недостатка зеркала с внутренним покрытием либо стараются вообще не применять в оптических приборах, либо при их применении прибегают к клиновидным стеклам, на которые наносится зеркальная амальгама. Сравнение рисунков 10, а и 10, б позволяет видеть, как

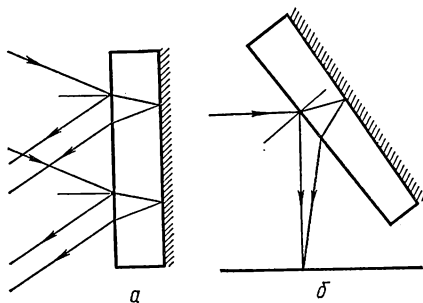


Рис. 10

за счет клиновидности стекла устраняется двоение изображения.

В точных оптических приборах используют только зеркала с внешней отражающей поверхностью.

В некоторых оптических приборах, например в даль-
номерах фотоаппаратов, используются полупрозрачные
плоские зеркала. Их функция — разделять световой пу-
чок на два пучка: один — проходящий без изменения
направления, второй — в направлении, перпендикуляр-
ном первому.

4. Система двух плоских зеркал

Если два плоских зеркала расположены параллельно
друг другу (рис. 11), то луч претерпевает поочередное
двойное отражение и остается параллельным своему

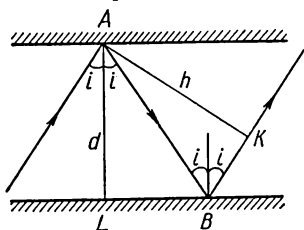


Рис. 11

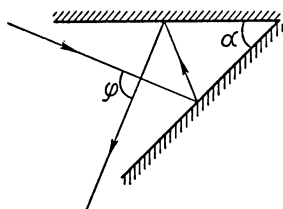


Рис. 12

первоначальному направлению, смещаясь на отрезок h , именуемый поперечным смещением.

Из треугольника ABK $h = AB \sin 2i$, из треуголь-
ника LAB $AB = \frac{d}{\cos i}$; $h = \frac{d}{\cos i} \sin 2i$, тогда

$$h = 2d \sin i. \quad (9)$$

Изображение предмета после отражения лучей от
двух плоских зеркал оказывается конгруэнтным пред-
мету. Когда зеркала непараллельны, расположены под
некоторым углом α , то в результате двойного отражения
луч меняет свое направление на угол φ , равный удвоен-
ному углу α :

$$\varphi = 2\alpha. \quad (10)$$

На этом принципе работает геодезический прибор,
предназначенный для определения прямых углов,—
двузеркальный эккер. Схема его действия показана на
рис. 12.

5. Плоскопараллельная пластина

Эта оптическая деталь по своему действию на лучи сходна с системой двух параллельных плоских зеркал: она также смещает луч, оставляя его параллельным первоначальному направлению. На рис. 13 показан ход луча сквозь плоскопараллельную пластину.

Параллельность вышедшего и вошедшего лучей можно доказать следующим образом. Напишем равенство оптических инвариантов при входе луча в стекло и выходе из него:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i'_1;$$

$$n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i'_2.$$

Поскольку плоскости пластины параллельны, то $i'_1 = i_2$, следовательно

$$n_1 \sin i_1 = n_1 \sin i'_2$$

$$\text{и } i'_2 = i_1.$$

Для определения величины поперечного смещения h рассмотрим треугольники ACD и ABC . Из первого треугольника $AC = \frac{d}{\cos i'_1}$, из второго — $AC = \frac{h}{\sin (i_1 - i'_1)}$. Равенство $\frac{d}{\cos i'_1} = \frac{h}{\sin (i_1 - i'_1)}$ позволяет выразить h следующим образом:

$$h = \frac{d \sin (i_1 - i'_1)}{\cos i'_1} = \frac{d (\sin i_1 \cos i'_1 - \cos i_1 \sin i'_1)}{\cos i'_1}.$$

Выразим i'_1 через i_1 : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i'_1$; $\sin i'_1 = \frac{n_1 \sin i_1}{n_2}$,

$\cos i'_1 = \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 i_1}$. Сделав соответствующую подстановку в выражение h и разделив его на $\cos i_1$, получаем

$$h = d \operatorname{tg} i \left(\cos i_1 - \frac{n_1}{n_2} \frac{\cos^2 i_1}{\sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 i_1}} \right). \quad (11)$$

Если величина угла в пределах 6° , то значение его синуса или тангенса можно заменить величиной угла в радианной мере. Угол, удовлетворяющий таким условиям, называется параксиальным. Для параксиального угла, например, $\sin i \approx i$. Формулу (11) для параксиальных углов можно заменить приближенной:

$$h = di_1 \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \right). \quad (12)$$

Из этой формулы следует, что при $i_1 = 0$, $h = 0$, т. е. при угле падения, равном нулю, плоскопараллельная пластина поперечного смещения не дает.

Далее, анализируя ход лучей сквозь плоскопараллельную пластину, замечаем, что отрезок $EC = s$ (назовем его продольным смещением) можно выразить из треугольника BCE : $s = \frac{h}{\sin i_1} \approx \frac{h}{i}$. Из этого следует, что при подстановке точного значения h в выражение (11) s является функцией угла падения i_1 . Если же подстановка производится из формулы (12), то получается выражение

$$s = d \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \right), \quad (13)$$

свидетельствующее о том, что для параксиальных углов s от i не зависит.

Рассмотренное обстоятельство приводит к тому, что лучи широкого гомоцентрического пучка после прохождения через плоскопараллельную пластину не пересекаются в одной точке: нарушается гомоцентричность, т. е. изображение искажается. Искажения этого нет в параксиальных лучах, а также для пучка параллельных монохроматических лучей. Такой пучок лучей после преломления пластиной остается параллельным. Оба эти свойства плоскопараллельной пластины учитываются при применении таких пластин в оптических приборах.

6. Призмы

Призмы, находящие применение в оптических приборах, действие которых обусловливается законами геометрической оптики, разделяют по назначению на отражательные, преломляющие и разделительные.

Призмы применяют с теми же целями, что и плоские зеркала, но призмы имеют ряд преимуществ: они легче и прочнее крепятся, устойчивее сохраняют взаимное расположение, обеспечивают меньшие потери света и меньшие габариты прибора.

Отражательные призмы имеют различную форму в зависимости от того, какое изменение хода луча

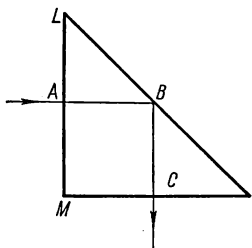


Рис. 14

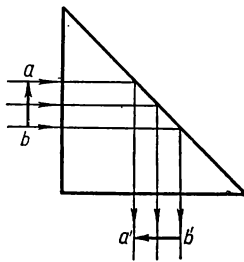


Рис. 15

и изображения они должны осуществлять. Кроме того, каждая отражательная призма характеризуется так называемым коэффициентом призмы.

Коэффициентом призмы называют отношение хода луча в призме $d = AB + BC$ (рис. 14) к диаметру отверстия входной грани $D = LM$:

$$k = \frac{d}{D} . \quad (14)$$

По известной величине k и D можно определить d .

Существует зависимость между числом отражающих граней и обращиванием изображения. Как уже говорилось выше, каждая отражательная грань призмы работает на основе полного отражения, т. е. становится как бы зеркальной, а следовательно, каждая грань дает неконгруэнтное (зеркальное) изображение. Таким образом, если отражение пучков происходит в одной плоскости, то нечетное число отражающих граней вызывает оборачивание изображения, а четное — не вызывает. Это правило недействительно, если отражение пучков происходит в разных плоскостях.

Рассмотрим теперь основные типы отражательных призм.

Трехгранная прямоугольная равнобедренная приз-

ма, показанная на рис. 14, может работать как двоякоотражательная: давать отражение от гипотенузы и от катетов. В первом случае (рис. 15) она меняет направление хода лучей на 90° и оборачивает изображение снизу вверх. Во втором — пучок изменяет направление на 180° (рис. 16) и смещается; изображение при этом не оборачивается.

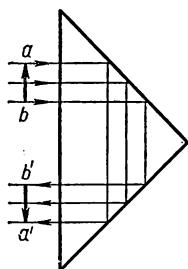


Рис. 16

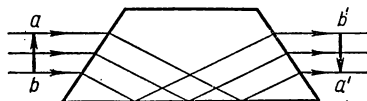


Рис. 17

Коэффициент призмы в первом случае равен единице, во втором — двум.

Прямоугольную призму можно превратить в призму прямого зрения — призму Дове (рис. 17). Она оборачивает изображение сверху вниз, сохраняя направление вошедших и вышедших лучей.

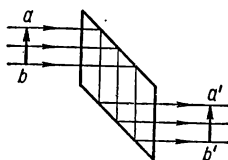


Рис. 18

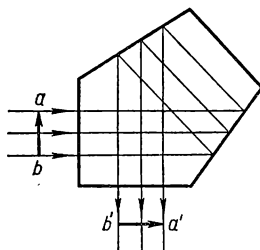


Рис. 19

Призма-ромб, как бы состоящая из двух прямоугольных призм (рис. 18), смещает лучи, оставляя направление входящих и выходящих лучей неизменным, не оборачивая изображения. Для этой призмы, как и для призмы Дове, $k = 2$.

На рис. 19 показана пентапризма. Она поворачивает лучи на 90° и не оборачивает изображения. $k = 3,4142$. Пентапризма действует как двузеркальный эккер.

Изменяет направление лучей на 45° , не оборачивая изображения, полупентапризма (рис. 20). Ее коэффициент 1,7071.

Имеются крышеобразные призмы. Бывают, например, прямоугольные крышеобразные призмы (рис. 21), одна из граней которых заменена двумя гранями, образующими между собой прямой угол (крышу). Призма с крышей изменяет направление пучка лучей на 90° , оборачивая при этом изображение сверху вниз и слева направо ($k = 1,732$).

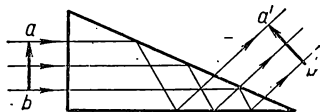


Рис. 20

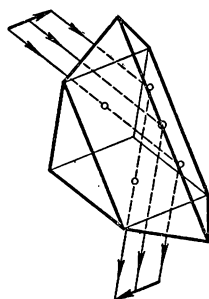


Рис. 21

Кроме рассмотренных одиночных призм применяются призмные системы. Например, в биноклях для получения прямого изображения используется система Порро, изображенная на рис. 22.

Преломляющие призмы, подобные изображенной на рис. 23, применяются главным образом в спектральных

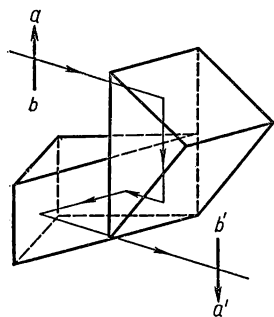


Рис. 22

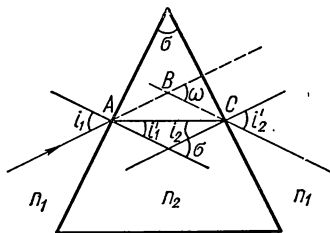


Рис. 23

приборах (спектроскопах и спектрографах). Об этих приборах учащиеся получают представление в других разделах физики курса средней школы. В приборах, изучаемых в курсе геометрической оптики, довольно часто используются призмы типа оптический клин.

Ход лучей сквозь оптический клин такой же, как показано на рис. 23, но преломляющий угол σ здесь

мал (в пределах 6°). Поэтому при выводе формулы отклонения луча оптическим клином заменяют значения синусов углов значениями углов.

Для вывода формулы отклонения луча оптическим клином вначале запишем равенство оптических инвариантов при входе луча в призму и выходе из нее в обычной форме:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i'_1;$$

$$n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i'_2.$$

Затем заменим значения синусов углов величинами самих углов:

$$n_1 i_1 = n_2 i'_1;$$

$$n_2 i_2 = n_1 i'_2.$$

Складывая эти выражения и одновременно вынося за скобку n_1 и n_2 , получаем:

$$n_1 (i_1 + i'_2) = n_2 (i'_1 + i_2). \quad (15)$$

Из $\triangle ABC$

$$\omega = (i_1 - i'_1) + (i'_2 - i_2),$$

или

$$\omega = (i_1 + i'_2) - (i'_1 + i_2). \quad (16)$$

Из (15)

$$i_1 + i'_2 = \frac{n_2}{n_1} (i'_1 + i_2). \quad (17)$$

Заметим, что $i'_1 + i_2 = \sigma$. Тогда совместное решение (16) и (17) даст выражение

$$\omega = \sigma \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right), \quad (18)$$

устанавливающее зависимость между преломляющим углом σ и углом отклонения луча ω . Оптические клинья применяются в оптических приборах для измерения углов (в дальномерах), для юстировки оптических систем и др.

Разделительные призмы позволяют получать разделение пучков световых лучей. Прямоугольная равнобедренная разделительная призма разделяет параллельный пучок лучей на две части, распространяющиеся в

противоположных направлениях. Это достигается отражением световых пучков от двух зеркальных граней призмы, как показано на рис. 24.

Призма-куб служит для тех же целей, но разделенные с ее помощью пучки распространяются во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 25). Внутреннюю поверхность призмы, от которой пучок лучей меняет на-

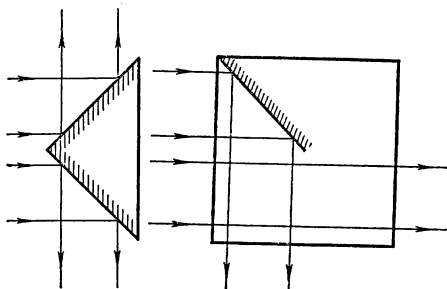


Рис. 24

Рис. 25

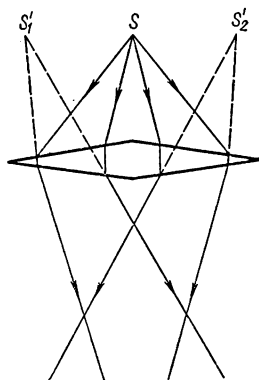


Рис. 26

правление на 90° , покрывают зеркальной амальгамой или она работает на принципе полного отражения.

Бипризма Френеля позволяет разделить гомоцентрический пучок на два также гомоцентрических пучка (рис. 26).

Кроме рассмотренных целей, разделительные призмы используются для среза той или иной части изображения, обычно вблизи оптической оси, что используется в дальномерах и в различных отсчетных оптических системах, в которых необходимо рассматривать деления шкал, пузырьки уровней и т. п.

7. Сферическая поверхность

Все оптические детали, рассматриваемые до сих пор, имели плоские преломляющие и отражающие грани. Поверхность, представляющая собой часть сферы, может также обладать преломляющими и отражающими свойствами.

Рассмотрим преломляющую сферическую поверх-

ность, оговорившись при этом, что хотя у преломляющей сферической поверхности много сходного с линзой, ее не следует считать линзой, т. к. понятие «линза» предусматривает обязательно две преломляющие поверхности. О линзах и их свойствах речь будет впереди.

Итак, на рис. 27 изображена сферическая преломляющая поверхность, на которую под параксиальным

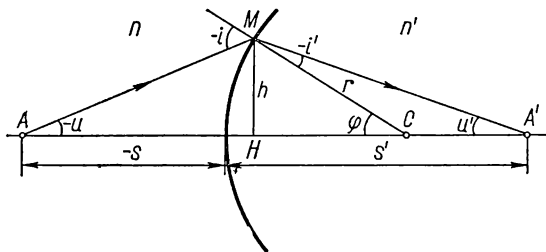


Рис. 27

углом — u к оптической оси (по правилам знаков этот угол отрицательный) послан луч AM .

Угол падения луча на поверхность — i , пусть $n' > n$, тогда угол преломления — i' меньше угла падения, и вследствие этого луч выходит за сферической поверхностью предположительно в направлении MA' .

Примем ряд обозначений:

- u' — угол, сопряженный с углом u ;
- $MH = h$ — высота пересечения луча со сферической поверхностью;
- C — центр сферической поверхности;
- r — радиус кривизны сферической поверхности;
- φ — угол между радиусом кривизны поверхности и оптической осью;
- s и s' — соответственно расстояния до сферической поверхности точек A и A' .

Предположим, что известны u, s, r, n, n' , т. е. параметры хода луча на сферическую поверхность — u, s , свойства сферической поверхности — r и характеристики сред слева и справа от сферической поверхности n и n' . Требуется определить закономерность хода луча, преломленного сферической поверхностью.

Для этого поступим уже знакомым способом: напишем равенство оптических инвариантов, и поскольку

углы параксиальны, опустим знаки «sin».

$$n \sin (-i) = n' \sin (-i');$$

$$n (-i) = n' (-i').$$

Заметим, что из $\triangle AMC - i = -u + \varphi$, а из $\triangle CMA' - i' = \varphi - u'$. Тогда $n(\varphi - u) = n'(\varphi - u')$. А так как $(\sin) \varphi = \frac{h}{r}$, $(\text{tg}) u' = \frac{h}{s'}$, $(\text{tg}) -u = \frac{h}{-s}$, $n\left(\frac{h}{r} - \frac{h}{-s}\right) = n'\left(\frac{h}{r} - \frac{h}{s'}\right)$, или

$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'}\right). \quad (19)$$

Это выражение называется **нулевым инвариантом Аббе**.

Другая форма уравнения (19)

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (20)$$

называется **уравнением нулевого луча**.

Уравнения (19) и (20) решают поставленную задачу: по заданным выше условиям они определяют ход луча после его преломления сферической поверхностью. С помощью этих уравнений можно решать и другие задачи.

Введем некоторые понятия геометрической оптики применительно к преломляющей сферической поверхности. Если лучи направить на преломляющую поверхность из пространства предметов параллельно оптической оси, то они собираются в точке, которую называют **задним фокусом**. Если же лучи идут аналогично из пространства изображений, то точку, где они собираются, принято называть точкой переднего фокуса или **передним фокусом**.

Расстояние от переднего фокуса до преломляющей поверхности (по оптической оси) — **переднее фокусное расстояние**. Аналогично определяется **заднее фокусное расстояние** *.

Предположим, что луч идет на сферическую поверхность из бесконечности, т. е. параллельно главной опти-

* Заметим, что последние два определения справедливы только для сферической поверхности; для линзы эти определения непригодны.

ческой оси, тогда $s = -\infty$, а $s' = f'$. Подставляя эти значения в уравнение (19), получим: $\frac{n}{r} = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{f'} \right)$, откуда заднее фокусное расстояние

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}. \quad (21)$$

Если же $s' = \infty$, то $s = f$; из уравнения (19) переднее фокусное расстояние преломляющей поверхности

$$f = - \frac{nr}{n' - n} . \quad (22)$$

Разделив (21) на (22), получим зависимость между фокусными расстояниями и показателями преломления сред по обе стороны преломляющей поверхности

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (23)$$

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется **оптической силой**. Следовательно, оптическая сила преломляющей сферической поверхности

$$\frac{1}{f'} = \frac{n' - n}{rn'} \quad (24)$$

либо

$$\frac{1}{f} = -\frac{n' - n}{rn} \quad (25)$$

Как уже было сказано, сферическая поверхность может быть и отражающей. В ряде случаев сферические преломляющие поверхности могут быть заменены сферическими отражающими поверхностями. При этом опти-

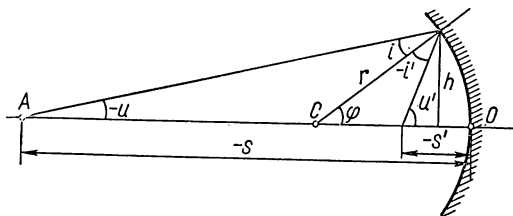


Рис. 28

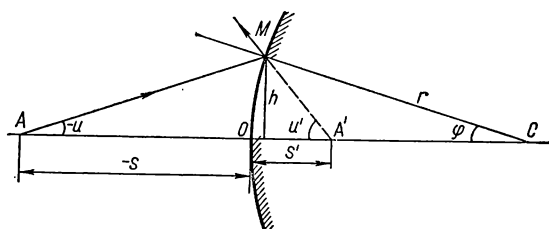


Рис. 29

ческие системы уменьшаются в габаритах и дают лучшее качество изображения.

На рис. 28 и 29 с использованием ранее принятых обозначений показано изменение хода луча при отражении соответственно от вогнутой и выпуклой поверхностей.

8. Линзы

Представим себе, что световой луч проходит поочередно, подчиняясь всем рассмотренным выше закономерностям, через две сферические преломляющие поверх-

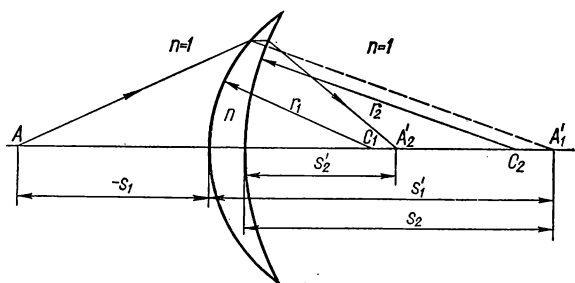


Рис. 30

ности, между которыми среда с показателем преломления n , а по обе стороны воздух, показатель преломления которого — единица. Это и будет условие работы линзы.

Для каждой сферической поверхности справедливо выражение (19). Тогда для первой поверхности (рис. 30) указанное выражение приобретает вид

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s_1} = n \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{s'_1} \right). \quad (26)$$

Для второй преломляющей поверхности выражение (19) примет вид

$$n \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_2} \right) = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{s'_2} . \quad (27)$$

(для второй преломляющей поверхности точкой изображения A следует считать A'_2 , тогда как первая поверхность дала изображение A'_1).

Складывая уравнения (26) и (27) с учетом того, что у тонкой линзы $s_2 = s'_1$, получаем

$$\frac{1}{s'_2} - \frac{1}{s'_1} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) . \quad (28)$$

Если же расстояние от линзы до фактического изображения A (точки A'_2) обозначить не s'_2 , как на рисунке, а s' и заменить s_1 на s , то выражение (28) примет вид

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) . \quad (29)$$

Как мы уже видели, если $s = \infty$, то $s' = f'$, т. е.

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) . \quad (30)$$

Формула (30) — выражение оптической силы линзы, ее называют **формулой линзы**.

Очевидно, что левая часть формулы (29) также выражает оптическую силу линзы, но поскольку отрезок s (напоминаем, на рис. 28 он обозначен s_1) отрицателен, то знак перед $\frac{1}{s}$ меняем на обратный и формула приобретает вид

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} . \quad (31)$$

Эту формулу также называют формулой линзы, и если формула (30) связывает оптическую силу линзы с характеристиками самой линзы (ее радиусами и показателем преломления среды — материала линзы), то формула (31) определяет связь между оптической силой линзы и расположениями предмета и изображения. В каждом конкретном случае отдают предпочтение одной из этих двух формул, в зависимости от условия задачи.

Формула (30) справедлива для тонкой линзы, т. е. такой линзы, толщиной которой вдоль оптической оси

можно пренебречь. Если линза не удовлетворяет этим условиям, то к выражению (30) делается поправка и формула приобретает вид

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n - 1)^2}{nr_1r_2} . \quad (32)$$

Однако в большинстве случаев расчет оптической силы реальной линзы можно производить по приближенной формуле (30), погрешность при этом небольшая.

Напоминаем, что линзы могут быть собирающие и рассеивающие и иметь разные профили сечения

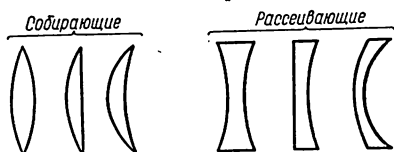


Рис. 31

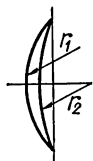
(рис. 31). Напоминаем также названия линз в том порядке, как они изображены на рисунке:

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1) двояковыпуклая; | 4) двояковогнутая; |
| 2) плоско-выпуклая; | 5) плоско-вогнутая; |
| 3) вогнуто-выпуклая; | 6) выпукло-вогнутая. |

Заметьте: в названия собирающих линз вторым словом входит слово «выпуклая», а рассеивающих — слово «вогнутая».

Формула (30) справедлива для линзы любой формы, но она претерпевает изменения, в соответствии с правилами знаков, в зависимости от формы линзы.

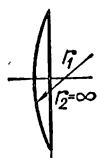
Ниже приводятся профили различных видов линз и соответствующие им варианты формулы (30).



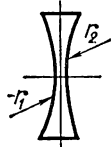
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$$



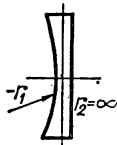
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right);$$



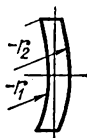
$$\frac{1}{f} = \frac{n-1}{r_1};$$



$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$$



$$\frac{1}{f} = -\frac{n-1}{r_1};$$



$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

Линзы главным образом предназначаются для получения изображений предметов. Любая линза изменяет ход лучей в пространстве изображений по сравнению с их ходом в пространстве предметов, в связи с этим размеры изображения обычно отличаются от размеров предмета. Для того чтобы охарактеризовать эти изменения, следует ввести такие понятия, как линейное (поперечное), продольное и угловое увеличения.

Линейным (поперечным) увеличением β называется отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета (рис. 32):

$$\beta = \frac{l'}{l}. \quad (33)$$

Для того чтобы охарактеризовать изменение размеров изображения по сравнению с размерами предмета вдоль оптической оси, вводится понятие **продольного увеличения α** . Это отношение отрезка, расположенного вдоль оптической оси в пространстве изображений, к

сопряженному с ним отрезку в пространстве предметов, но поскольку продольное увеличение для разных точек сильно отличается, в качестве продольного увеличения

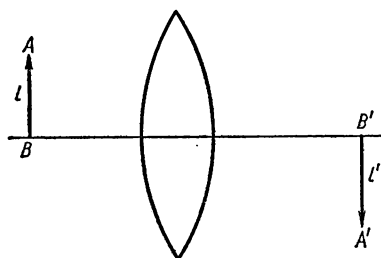


Рис. 32

рассматривают предел отношения отрезков $\Delta x'$ и Δx (рис. 33) при Δx , стремящемся к нулю, т. е. для бесконечно малых отрезков:

$$\alpha = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x'}{\Delta x} = \frac{dx'}{dx}. \quad (34)$$

Читатель уже знаком с понятием переднего и заднего фокуса преломляющей сферической поверхности; для линзы эти понятия имеют тот же смысл.

Фокусы линзы относятся к группе **кардинальных точек линзы**. Есть также **кардинальные плоскости**. Так, кардинальными являются фокальные плоскости, перпендикулярные главной оптической оси линзы и про-

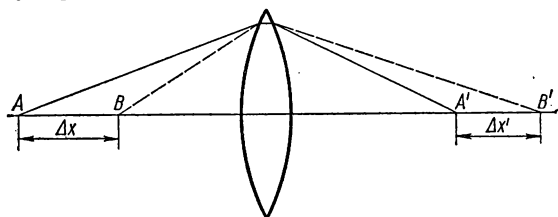


Рис. 33

ходящие через точки фокусов. Как и фокусы, фокальные плоскости бывают передней и задней. Однако ими не исчерпываются кардинальные точки и плоскости линзы.

В зоне сечения каждой линзы есть плоскости, удовлетворяющие условию: коэффициент линейного увеличения для этих плоскостей равен единице ($\beta = 1$); такие плоскости называются **главными плоскостями линзы**, а точки их пересечения с главной оптической осью — **главными точками**. Эта пара кардинальных плоскостей и точек вводится для упрощения построения изображений в линзах. Определить их положение относительно линзы можно следующим образом.

Пусть на первую сферическую поверхность линзы на высоте h над оптической осью падает луч MN параллельно оптической оси (рис. 34). Точка N является точкой пересечения этого луча с первой поверхностью линзы; продолжение луча MN в пространстве изображений — луч $K'F'$ — пересекается с главной оптической осью в заднем главном фокусе.

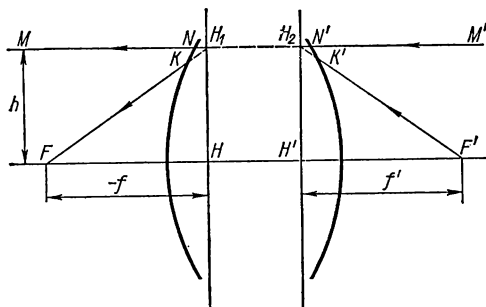


Рис. 34

Другой луч направим на линзу из переднего фокуса F . Этот луч выйдет из линзы в точке N' и пойдет параллельно главной оптической оси по направлению $N'M'$. Теперь продолжим оба луча в обратном ходе, они пересекутся в точке H_2 . Если поступить аналогично, направив лучи из пространства изображений, можно на их продолжении в обратном направлении получить точку H_1 . Обе эти точки принадлежат главным плоскостям и лежат на одинаковой высоте по отношению к оптической оси, т. е. для них и для любых других точек, полученных таким образом, выполняется условие $\beta = 1$. Если через точки H_1 и H_2 провести плоскости, перпендикулярные главной оптической оси, — это будут главные плоскости, а точки их пересечения с главной оптической осью H и H' — главные точки.

Фокусными расстояниями линзы будут расстояния между главными точками и фокусами. На рис. 34 — f — переднее фокусное расстояние, f' — заднее фокусное расстояние.

Рассмотрим еще одну пару кардинальных точек и плоскостей: узловые точки и узловые плоскости. Для этого надо изучить понятие «угловое увеличение». Под

угловым увеличением γ понимают отношение тангенсов углов, составляемых сопряженными лучами AM и $M'A'$ с оптической осью (рис. 35)

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} . \quad (35)$$

Угловое увеличение γ связано с линейным β таким выражением

$$\gamma = \frac{1}{\beta} . \quad (36)$$

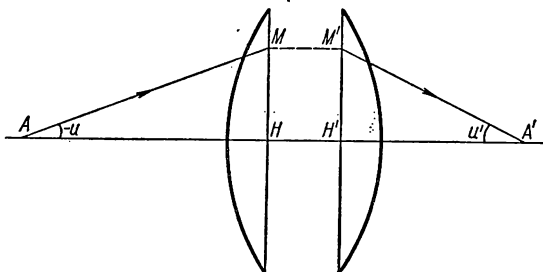


Рис. 35

Из этого выражения следует, что между угловым и линейным увеличением существует обратно пропорциональная зависимость. Ее легко понять, рассмотрев рис. 36. Из треугольников AMH и $H'M'A'$ $\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{a}{a'}$,

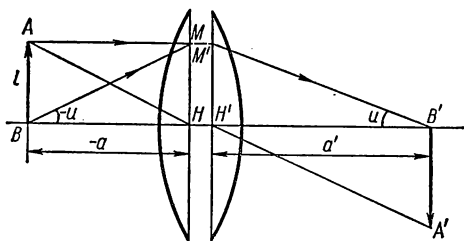


Рис. 36

а из треугольников ABH и $H'A'B'$ $\frac{a}{a'} = \frac{l}{l'}$, следовательно,

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{l}{l'} = \frac{1}{\beta} ,$$

т. е. справедливо выражение (36).

Определим **узловые точки** как точки, удовлетворяющие условию $\gamma = 1$ — угловое увеличение в узловых точках равно единице.

Для линзы, с обеих сторон которой одинаковая среда, узловые точки совпадают с главными точками. Плоскости, проходящие через узловые точки и перпендикулярные главной оптической оси, называются **узловыми плоскостями**.

Рассмотренные понятия позволяют четко и однозначно строить изображение в линзах. Принципы построения изображений в линзах нашему читателю, по видимому, известны, поэтому не излагая их подробно, подчеркнем лишь то, что, с нашей точки зрения, является в этом вопросе основным.

Прежде всего, для построения изображения каждой точки предмета необходимо не менее двух лучей. Если предмет представляет собой отрезок прямой, то для построения его изображения достаточно двух крайних точек (с этим мы уже столкнулись при построении изображения в плоском зеркале). От каждой точки в принципе исходит бесчисленное множество световых лучей. Для построения изображений выбирают такие лучи, ход которых за линзой (в пространстве изображений) заранее известен. Такими лучами являются: луч, параллельный оптической оси, и луч, идущий в переднюю главную точку линзы; первый проходит через задний фокус, второй исходит из задней главной точки, не меняя первоначального направления.

Пересечение лучей или продолжений лучей, идущих от каждой точки предмета, дает соответственно действительное или мнимое изображение точки предмета.

Если одна из точек предмета совпадает с главной оптической осью и предмет в виде отрезка прямой перпендикулярен к оптической оси, то изображение этой точки не строят, так как оно получается на главной оптической оси и найти его можно, опустив перпендикуляр из другой точки изображения на оптическую ось.

На рис. 37 приводятся различные случаи построения изображения предмета в линзах.

Полагаем, что случаи *б, в, г, д* в комментариях не нуждаются. По поводу случая *а* заметим, что он принципиально отличается от последующих расположением предмета. Если предмет бесконечно удален от линзы,

т. е. находится значительно дальше ее фокусного расстояния, то лучи от каждой его точки идут параллельно и описанный выше принцип построения изображения здесь не подходит. Предмет AB в этом случае показыва-

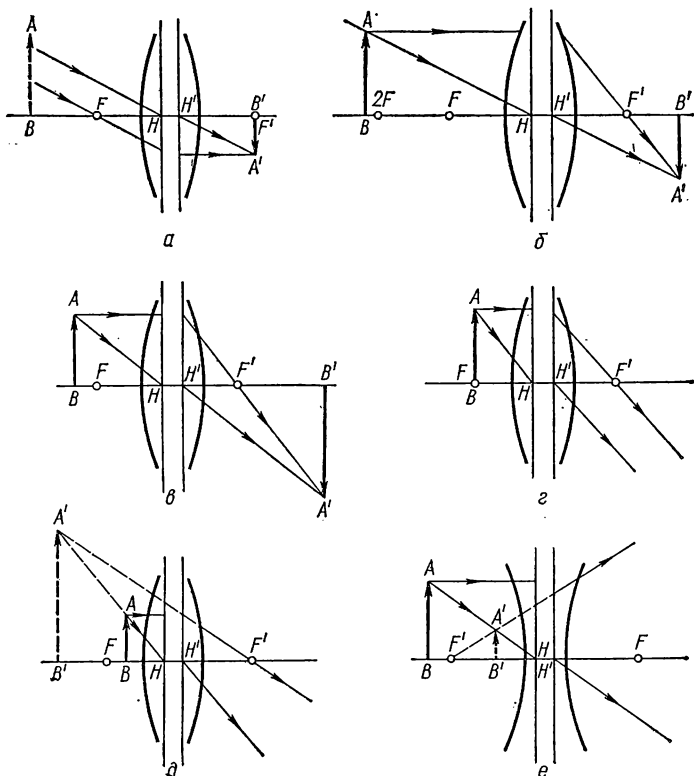


Рис. 37

ют штриховой линией, желая этим подчеркнуть, что он фактически находится не там, где обозначен, а значительно дальше от линзы.

От каждой точки предмета, расположенного в бесконечности, к линзе идут пучки бесконечно близких друг к другу параллельных лучей. На рис. 37, а показано условно таких два луча, принадлежащих точке A . Зная свойства линзы, можем утверждать, что они пере-

секутся в задней фокальной плоскости, причем, если один луч пройдет через передний фокус, он выйдет параллельно главной оптической оси и, пересекшись со вторым лучом, даст изображение точки $B - B'$.

На рис. 37, *e* показано построение изображения в рассеивающей линзе. Результаты построения изображений в рассеивающей линзе в зависимости от расположения предмета принципиально не отличаются друг от друга, лишь изображение будет различных размеров: с увеличением расстояния оно уменьшается.

Кроме рассмотренных формул для решения задач полезно знать еще некоторые выражения, устанавливающие связь между расположением предмета, линзы и изображения. Построим изображение предмета AB

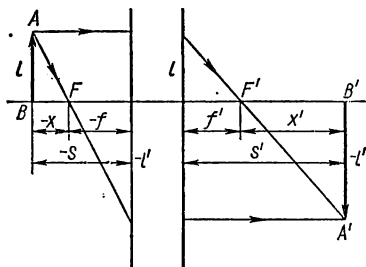


Рис. 38

(рис. 38). Из рисунка видно, что $\beta = -\frac{l'}{l} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}$, откуда

$$xx' = ff'. \quad (37)$$

Эта формула, называемая **формулой Ньютона**, дает возможность определять расположение сопряженных точек пространства предметов и пространства изображений по отношению к фокусам линзы.

Если в формуле Ньютона сделать замену $x = s - f$, $x' = s' - f'$

$$(s - f)(s' - f') = ff',$$

а затем раскрыть скобки и полученное выражение разделить на ss' , получим **формулу Гаусса**

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1, \quad (38)$$

дающую возможность по известной величине s находить величину s' .

И наконец, из рис. 39 (для простоты построения линза изображена одной преломляющей поверхностью) при рассмотрении подобия треугольников ACB и $A'C'B'$

вытекает, что

$$\frac{l'}{l} = \frac{s' - r}{s - r}. \quad (39)$$

Преобразовав это уравнение с учетом уравнения (19) (оно справедливо не только для одной преломляющей поверхности, но и для линзы), получим

$$\frac{s' - r}{s - r} = \frac{ns'}{n's}, \quad (40)$$

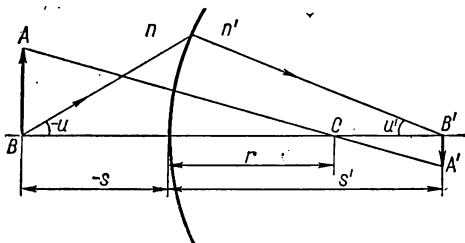


Рис. 39

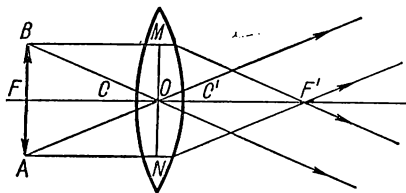
а так как $\frac{s'}{s} = \frac{n}{n'}$, то, подставив это выражение в (40), а полученное после этого выражение в (39), придем к равенству

$$nlu = n'l'u'. \quad (41)$$

Это равенство называют теоремой (законом) Лагранжа — Гельмгольца или Гюйгенса — Гельмгольца.

Контрольные вопросы

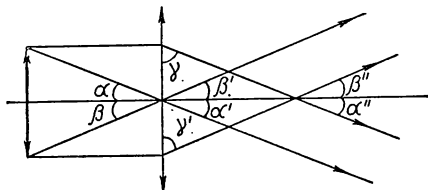
1. Укажите, в каком из ответов приведены только положительные значения отрезков.



- 1) BM, ON, OF' .
3) OF', OM, CC' .

- 2) OF', OF, CC' .
4) NF', ON, FO .

2. Укажите, в каком из ответов приведены только положительные углы.



1) $\alpha, \alpha', \alpha''$.

2) α, β', β'' .

3) $\gamma', \alpha'', \gamma$.

4) β, β', β'' .

3. Луч падает на плоское неподвижное зеркало под углом 30° . На какой угол изменится направление хода луча после отражения его от плоского зеркала?

1) 150° .

2) 120° .

3) 30° .

4) 60° .

4. Луч света падает на плоское зеркало под углом 20° . На какой угол изменится направление хода луча после отражения от плоского зеркала, если зеркало повернуть на угол 10° в сторону увеличения угла падения?

1) 140° .

2) 120° .

3) 160° .

4) 220° .

5. Солнечный луч, проходящий через отверстие в затемненном окне, падает на стол под углом 30° . Под каким углом к столу надо расположить плоское зеркало, чтобы луч отразился от него горизонтально в противоположную сторону?

1) 38° .

2) 71° .

3) 76° .

4) 109° .

6. Какое изображение дает плоское зеркало?

1) Уменьшенное, прямое, мнимое.

2) Равное по размеру предмету, неконгруэнтное, мнимое.

3) Уменьшенное, неконгруэнтное, действительное.

4) Равное по размеру предмету, прямое, мнимое.

7. Луч падает на плоское зеркало под углом i , отразившись, попадает на второе плоское зеркало, параллельное первому, и опять отражается. Укажите угол φ , характеризующий изменение направления падающего луча после двукратного отражения.

1) $\varphi = 2i$.

2) $\varphi = i$.

3) $\varphi = 0$.

4) $\varphi = 4i$.

8. Плоские зеркала расположены под углом 45° . Луч падает на одно из зеркал под углом $22,5^\circ$. На какой угол по сравнению с первоначальным направлением луча изменится его направление после отражения от второго зеркала?

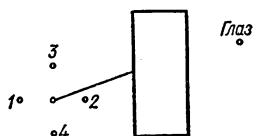
1) 45° .

2) 90° .

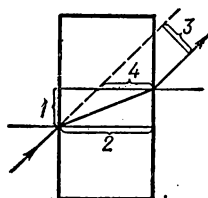
3) $22,5^\circ$.

4) 135° .

9. Между глазом и светящейся точкой помещается плоскопараллельная пластинка. Укажите, где будет изображение точки.



10. Луч проходит сквозь плоскопараллельную пластинку. Укажите продольное смещение луча.



11. Каково поперечное смещение (в мм) луча, падающего на плоскопараллельную пластинку толщиной 60 мм под углом $5,73^\circ$ ($n = 1,5$)?

12. Рассчитайте и укажите величину поперечного смещения (h) луча в плоскопараллельной стеклянной пластинке ($n = 1,5$) при угле падения $i = 5^\circ$ и толщине пластинки $d = 10$ мм.

1) ≈ 3 мм. 2) ≈ 17 мм.

3) ≈ 10 мм. 4) $\approx 2,5$ мм.

13. Сечение призмы имеет форму равностороннего треугольника. Луч света падает из воздуха на одну из граней перпендикулярно к ней. Найти угол ϕ между лучом падающим и лучом вышедшим из призмы ($n_{\text{ст}} = 1,5$):

1) 30° . 2) 90° .

3) 120° . 4) 60° .

14. Как изменяет направление хода луча и изображение дах-призма?

1) Изменяет направление луча на 90° ; оборачивает изображение сверху вниз, слева направо.

2) Изменяет направление луча на 45° , оставляя изображение без изменения.

3) Вращает изображение на 180° , сохраняя направление лучей.

4) Смещает лучи, оставляя изображение без изменения.

15. К какому типу призм относится призма приведенного сечения?



1) Разделительная.

2) Отражательная.

3) Преломляющая.

16. Стеклянная призма ($n = 1,5$) изменяет направление хода луча на 3° . Каков преломляющий угол призмы, если она используется как оптический клин?

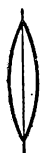
1) 3° .

2) 9° .

3) 6° .

4) 15° .

17. Укажите выражение оптической силы линзы указанного профиля.



$$1) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$2) \frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$3) \frac{1}{f} = -\frac{n-1}{r}.$$

$$4) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

18. Какая из приведенных формул выражает оптическую силу двояковогнутой симметрической тонкой линзы?

$$1) \frac{1}{f} = (n-1) \frac{2}{r} \quad 2) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$3) \frac{1}{f} = -(n-1) \frac{1}{r} \quad 4) \frac{1}{f} = -(n-1) \frac{2}{r}.$$

19. Укажите формулу оптической силы линзы приведенного профиля.



$$1) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$2) \frac{1}{f} = (n-1) \left(-\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$3) \frac{1}{f} = -\frac{n-1}{r}.$$

$$4) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

20. Вычислить в диоптриях оптическую силу линзы (f линзы 50 см).

21. Которая из приведенных формул выражает оптическую силу плоско-выпуклой тонкой линзы?

$$1) \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

$$2) \frac{1}{f} = -(n-1) \frac{1}{r}.$$

$$3) \frac{1}{f} = (n-1) \frac{1}{r}.$$

$$4) \frac{1}{f} = (n-1) \frac{2}{r}.$$

22. Плоско-выпуклая линза с радиусом кривизны 30 см и показателем преломления 1,5 дает изображение с двукратным увеличением. Найти расстояние от предмета до экрана, на котором получено изображение. (Результат в сантиметрах разделить на 90).

23. Найти фокусное расстояние линзы в метрах, если при расстоянии предмета от нее 30 см высота изображения равна — 6 см. Высота предмета 3 см. (Результат умножить на 10).

Г Л А В А И I I

ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗ НЕСКОЛЬКИХ КОМПОНЕНТОВ

1. Общие сведения

Последовательное действие отдельных оптических деталей, состоящее в отражении и преломлении световых лучей, может привести к определенной заданной цели. Так, например, микроскоп дает возможность глазу воспринимать изображение предмета более крупным, чем сам предмет. Такая совокупность оптических деталей называется **оптической системой**.

Если центры сферических поверхностей оптических деталей, входящих в систему, расположены на одной прямой, то оптическая система называется **центрированной**, а прямая, соединяющая центры всех оптических поверхностей, — **оптической осью системы**. Система, в которой центры оптических поверхностей не лежат на одной оптической оси, называется **кособокой**. Отдельные линзы или несколько линз, входящих в оптическую систему, называют **компонентами оптической системы**.

Идеальная оптическая система — система, не дающая искажений. Такая система должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) каждой точке предмета соответствует одна точка изображения;
- 2) изображение прямой линии является также прямой линией;
- 3) изображение плоскости является также плоскостью;
- 4) если плоскость предмета перпендикулярна к оси,

то и плоскость изображения также перпендикулярна к оптической оси;

5) линейное увеличение для всех отрезков предмета, лежащих в плоскости, перпендикулярной к оптической оси, является постоянной величиной.

Фактически любая реальная система не может удовлетворять всем этим условиям, но ее можно считать идеальной для так называемых параксиальных лучей.

Параксиальными, или нулевыми, лучами называют лучи, идущие бесконечно близко к оптической оси или под весьма малыми к ней углами. В этом случае углы между этими лучами и оптической осью будут также параксиальными.

Все свойства одиночной линзы рассматривались выше с позиций идеальной оптической системы. По существу, одиночная линза также является оптической системой, т. к. ее действие — результат поочередного преломляющего эффекта двух преломляющих поверхностей.

2. Система нескольких тонких линз

Любой современный оптический прибор (исключение составляют простейшие лупы) является системой, состоящей из нескольких, а иногда из большого количества компонентов. Даже отдельные части оптического прибора (объектив, окуляр) собираются из нескольких линз.

Во многих случаях при рассмотрении оптической системы бывает удобно группу линз (компонентов) заменить одной линзой. Например, говоря о принципе действия микроскопа, систему линз, из которых состоит объектив, рассматривают как одну линзу, так же поступают и с окуляром. Прибегая к такому приему, имеют в виду результаты совместного действия системы нескольких оптических компонентов.

Линзу, которая заменяет действие сложной оптической системы, состоящей из двух или нескольких линз, называют **эквивалентной линзой**. Рассмотрим действие эквивалентной линзы, состоящей из нескольких компонентов.

Пусть две линзы с оптическими силами $\frac{1}{f_1} = \Phi_1$ и $\frac{1}{f_2} = \Phi_2$ расположены в воздухе ($n = 1$) и заданы

их главными плоскостями (рис. 40). Луч, параллельный главной оптической оси, падающий на первую линзу под углом $\alpha_1 = 0$, преломляется и выходит из первой линзы под углом α_2 к оптической оси. Но на пути этого луча расположена вторая линза, которая еще раз преломляет луч, направляя его под углом α_3 к оптической оси. Таким образом, совместное действие двух линз сводится к тому, что луч выходит из системы под углом

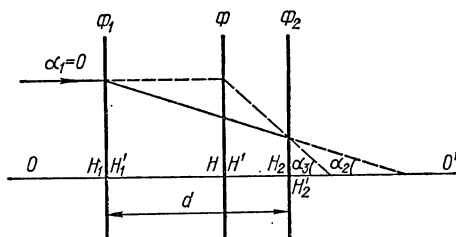


Рис. 40

α_3 к главной оптической оси. Очевидно, что если бы одна линза изменила ход луча от угла α_1 до α_3 к оптической оси, то она заменила бы действие двух рассмотренных линз и ее можно было бы назвать эквивалентной линзой. Оптическая сила такой эквивалентной линзы

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2. \quad (39)$$

Очевидно, что если $d = 0$, то $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, т. е. система превращается в один оптический компонент с оптической силой, равной сумме оптических сил отдельных линз.

Построим изображение предмета, получаемое с помощью двух компонентов (рис. 41). Простой анализ формул $\beta_1 = \frac{l'_1}{l_1}$, $\beta_2 = \frac{l'_2}{l'_1}$, $\beta = \frac{l'_2}{l_1}$ показал, что

$$\beta = \beta_1\beta_2, \quad (40)$$

т. е. линейное увеличение эквивалентной линзы равно произведению линейных увеличений входящих в нее компонентов. Аналогично обстоит дело и с угловым увеличением:

$$\gamma = \gamma_1\gamma_2. \quad (41)$$

Для получения других параметров эквивалентной линзы рассмотрим рис. 42. На рисунке точки F_1 и F'_1 являются фокусами первого компонента системы, H_1

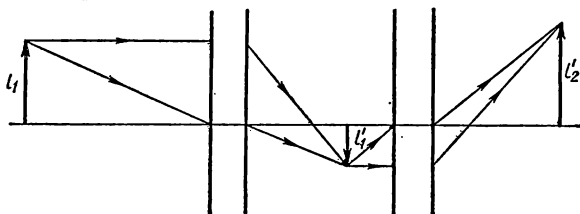


Рис. 41

и H_1' — его главные точки; соответственно F_2 и F'_2 , H_2 и H_2' — главные фокусы и главные точки второго компонента. Расстояние $F'_1F_2 = \Delta$ называется оптическим интервалом.

Параллельный оптической оси луч проходит в точках M_1 и M'_1 через главные плоскости первого компонен-

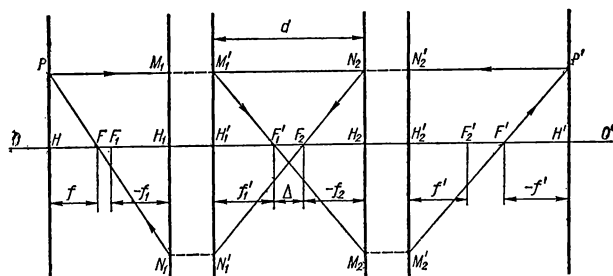


Рис. 42

та и через его задний фокус F'_1 и пересекает в точках M_2 и M'_2 главные плоскости второго компонента системы. Выходя из второго компонента, луч пересекает главную оптическую ось в точке F' — фокусе системы (эквивалентной линзы).

Продолжение луча M'_2F' до пересечения с направлением луча $P'N_2$ дает точку P' , которая принадлежит второй главной плоскости эквивалентной линзы.

Луч $P'N_2$ в обратном ходе пересечет главные плоскости второго компонента в точках N_2, N_2' и пройдет

через точку переднего главного фокуса этого компонента F_2 ; затем пересечет главные плоскости первого компонента в точках N_1' и N_1 и главную оптическую ось в точке F переднего фокуса эквивалентной линзы. В пересечении с лучом PM_1 образуется точка P , принадлежащая передней главной плоскости эквивалентной линзы.

Таким образом, графически определены положения главных плоскостей, главных точек и главных фокусов эквивалентной линзы, состоящей из двух компонентов.

Показанные на рис. 41 величины, характеризующие свойства эквивалентной линзы, выражаются формулами:

$$\Delta = d - f_1' + f_2; \quad (42)$$

$$x_{F'} = - \frac{f_2 f_2'}{\Delta}; \quad (43)$$

$$x_F = \frac{f_1 f_1'}{\Delta}; \quad (44)$$

$$f' = - \frac{f_1' f_2'}{\Delta}; \quad (45)$$

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}; \quad (46)$$

$$HH' = - \frac{f_1 d}{\Delta}; \quad (47)$$

$$\Phi = \frac{\Delta}{f_1 f_2}. \quad (48)$$

Если система состоит более чем из двух компонентов, то для расчета параметров эквивалентной линзы можно по рассмотренной выше методике определять параметры пары совместно действующих линз; затем эквивалентную этой паре линзу рассматривать совместно с третьей линзой, как следующую пару и т. д. Оптическая сила эквивалентной линзы, состоящей из p компонентов,

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{1}{h_1} \sum_{k=1}^{k=p} h_k \Phi_k, \quad (49)$$

где h_1 — высота входа луча в линзу по отношению к оптической оси. Любое число тонких линз, склеенных

вплотную без оптического интервала, даст оптическую силу

$$\Phi = \sum_{t=1}^{t=2} \Phi_t. \quad (50)$$

3. Виды оптических систем

Основные виды оптических систем предназначены для получения изображений предметов, поэтому и классифицируются они по признакам расположения предмета и изображения.

Таких систем в принципе четыре: фотографические, телескопические, системы микроскопа и проекционные, или репродукционные. Кроме того, особым видом оптических систем являются осветительные, выполняющие вспомогательную роль по отношению к основным.

Фотографическая система характерна тем, что предмет расположен в бесконечности, а изображение находится на конечном расстоянии. Примером такой системы является фотографический объектив (схема хода луча показана на рис. 43, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования бесконечно удаленных предметов, при условии что в пространстве изображений изображение располагается на конечном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется с помощью светочувствительного материала, или непосредственно рассматривается наблюдателем на матовой поверхности. Такие же системы используются и в телевизионных установках.

На рис. 43, б показана схема **телескопической системы**: предмет расположен в бесконечности, изображение находится также в бесконечности. Примером такой системы является зрительная труба и всевозможные ее разновидности: различные геодезические приборы (нивелиры, теодолиты), бинокли, стереотрубы, прицелы, дальномеры, перископы и т. п.

Характерной особенностью этой системы и ее отличием от фотографической является то, что лучи из нее выходят параллельным пучком, а следовательно, действительного изображения они не дают. Изображения, даваемые такими системами, можно увидеть непосред-

ственно глазом, т. е. телескопические системы работают в сочетании с оптической системой глаза.

Предмет расположен на конечном расстоянии, а изображение — в бесконечности в системе микроскопа (рис. 43, в). К этому виду оптических систем относятся микроскопы различной сложности и назначения: раз-
нообразные лупы, отсчетные, биологические, поляри-

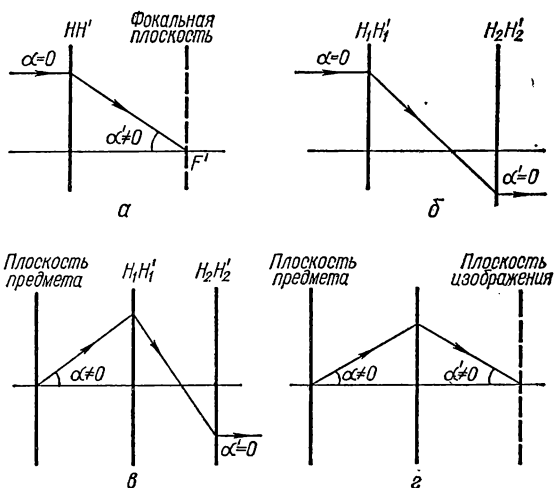


Рис. 43

зационные микроскопы; фотограмметрические приборы (приборы, позволяющие определять размеры, форму и положение объектов по фотоснимкам), стереометры, компараторы, стереопланиграфы и др. Для этой системы приборов, как и для телескопических систем характерна работа совместно с глазом.

В проекционных, или репродукционных, системах предмет расположен на конечном расстоянии и изображение находится также на конечном расстоянии (рис. 43, г). К числу проекционных систем относятся: кинопроекционный аппарат, эпископы, диаскопы, эпидиаскопы.

Оптическая схема любой проекционной системы состоит из осветительной и оптической частей. Осветительная часть включает в себя источник света, конденсоры, зеркала, назначение которых заключается в наи-

лучшем освещении того или иного предмета. Характеристики осветительной системы должны соответствовать оптической части прибора. Оптическая часть представляет проекционный объектив. В сложных оптических системах, требующих изменения направления пучка лучей, применяются, кроме того, призмы и зеркала, а в особых случаях и дополнительные объективы.

Если проецируемый предмет непрозрачен и проекция получается в отраженных от него лучах (например, картинка из учебника), то такой вид проекции называется **эпископическим**. Если предмет прозрачен (изображение на фото- или киноплёнке), то изображение от него образуется лучами света, проходящими сквозь предмет. Такой вид проекции называется **диаскопическим**, или **проекцией в проходящих лучах света**. Существуют приборы, в которых две указанные возможности сочетаются. Такие приборы называются **эпидиаскопами**.

Осветительные системы используются в приборах для освещения предмета, рассматриваемого или проецируемого с помощью оптического прибора. Они должны позволить наилучшим образом использовать даваемый источником света световой поток для достижения максимальной и равномерной освещённости изображения. Осветительные системы бывают линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

При освещении предметов осветительными системами возможны три случая:

1. Освещаемый предмет l находится в бесконечности. Источник света s помещается в переднем фокусе оптической системы K . Такую осветительную систему называют **коллиматором**, или **системой прожекторного действия** (рис. 44, а). Как следует из названия, система используется в прожекторах, которые могут быть применены как вспомогательные источники света, например при киносъёмке.

2. Освещаемый предмет l находится на конечном расстоянии и оптическая система K , называемая в этом случае **конденсором**, обеспечивает получение изображения источника света S на предмете (рис. 44, б). Случай характерен для работы **эпископа**, однако такая осветительная система может быть использована и при **диаскопической проекции**, если яркость света источника на освещаемой поверхности будет равномерна.

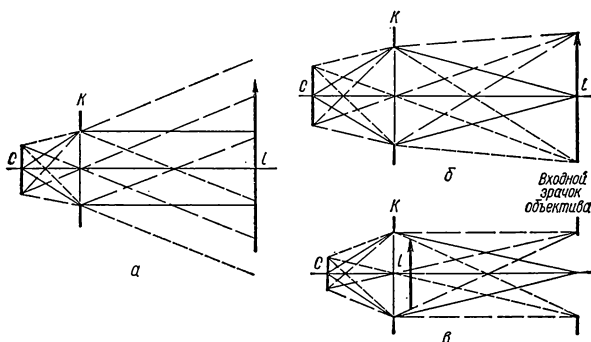


Рис. 44

3. Освещаемый предмет l помещается в ходе лучей, выходящих из конденсора K , проецирующего изображение источника света C во входной зрачок последующей оптической системы; предмет располагают вблизи конденсора (рис. 44, в). Эта осветительная система используется при неравномерной яркости излучателя, так как в этом случае каждая точка освещаемого предмета освещается лучами, исходящими из всех точек излучающей поверхности.

Контрольные вопросы

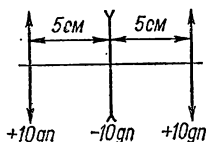
1. При каких условиях реальную оптическую систему можно считать идеальной?

- 1) Система работает в параллельных лучах.
- 2) На систему падает пучок наклонных лучей.
- 3) Система работает в параксиальных лучах.
- 4) Исключены хроматические aberrации.

2. Какова оптическая сила сложной линзы, состоящей из двух линз $\Phi_1 = +2$ дп, $\Phi_2 = +3$ дп, находящихся на расстоянии 90 см друг от друга?

- 1) $+5$ дп.
- 2) $+10,4$ дп.
- 3) $-0,4$ дп.
- 4) $+1$ дп.

3. На рисунке показана центрованная система из трех линз. Определить фокусное расстояние этой системы:

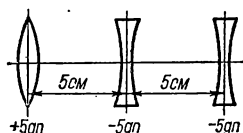


- 1) -10 дп.
- 2) -40 дп.
- 3) 10 дп.
- 4) $12,5$ дп.

4. Имеется система двух собирающих линз с $f_1 = 3,0$ см, $f_2 = 1,5$ см. Определить ее оптическую силу, если $d = 1,5$ см:

- | | |
|------------|-------------|
| 1) 0,7 дп. | 2) 0,33 дп. |
| 3) 4,5 дп. | 4) 0,5 дп. |

5. Центрированная оптическая система состоит из трех линз, как показано на рисунке. Определить оптическую силу эквивалентной линзы:



- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1) 15 дп. | 2) -5 дп. |
| 3) $\approx -3,5$ дп. | 4) ≈ 4 дп. |

6. Имеется центрированная оптическая система, состоящая из двух линз с фокусными расстояниями $f_1 = 0,3$ м, $f_2 = 0,5$ м, $\Delta = 0,2$ м. Определить положение задней главной плоскости эквивалентной линзы относительно задней главной плоскости второй линзы.

- | | |
|-----------|------------|
| 1) 1 м. | 2) 0,5 м. |
| 3) 0,6 м. | 4) -2,5 м. |

7. Определить главное фокусное расстояние сложной линзы, если фокусные расстояния линз, входящих в нее, $f_1 = 20$ см, $f_2 = 0,05$ м, а оптический интервал между ними 10 см.

- | | |
|------------|-----------|
| 1) 0,2 м. | 2) 0,1 м. |
| 3) 0,01 м. | 4) 0,5 м. |

8. Имеется центрированная оптическая система, состоящая из двух линз с фокусным расстоянием $f_1 = 0,3$ м, $f_2 = 0,5$ м, $\Delta = 0,2$ м. Определить положение передней главной плоскости эквивалентной линзы относительно передней главной плоскости первой линзы.

- | | |
|-------------|------------|
| 1) -0,15 м. | 2) -0,6 м. |
| 3) 1 м. | 4) 0,5 м. |

ГЛАВА IV

ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОМЕТРИИ

1. Основные фотометрические величины

Фотометрия — раздел физической оптики, в котором рассматриваются методы измерения световой энергии. Следовательно, предметом изучения геометрической оптики фотометрия не является, но изучать работу оптических приборов без учета энергетических свойств света невозможно. Поэтому прежде чем рассматривать работу оптических приборов, необходимо ознакомиться с элементарными сведениями из фотометрии.

Основным понятием фотометрии является световой поток. Представим себе источник света бесконечно малых размеров (источник — материальная точка). Такой источник света называют **точечным**. Если свет от точечного источника распространяется во всех направлениях равномерно, можно утверждать, что от него идут электромагнитные волны, обладающие определенной энергией W . Глаз воспринимает только часть этой энергии Q . Расположив на пути световой волны некоторую поверхность и определив величину световой энергии, переносимой световой волной через эту поверхность за единицу времени τ , получим величину светового потока, проходящего через данную поверхность

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} . \quad (51)$$

Из этого выражения видно, что световой поток не что иное, как мощность светового излучения, проходящего через данную площадь.

Величину светового потока, приходящегося на единицу телесного угла, называют **силой света** I . Если световой поток посылается точечным источником, как в нашем примере, во всех направлениях равномерно, то

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} . \quad (52)$$

Если световой поток в различных направлениях неодинаков, то формулу (52) следует рассматривать как среднее значение силы света источника. Ее тогда называют **средней сферической силой света**.

Силу света можно рассматривать и внутри единичного телесного угла ω :

$$I = \frac{\Phi}{\omega} . \quad (53)$$

Сила света в определенном направлении $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$. Измеряется она в канделах (кд).

Кандела — сила света, испускаемого с площади $1/600\,000\text{ м}^2$ сечения полного излучателя в перпендикулярном к этому сечению направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па. Это одна из основных единиц Международной системы единиц (СИ).

По-видимому, в определении кандеры нуждается в пояснении понятие «полный излучатель». Полным излучателем называют тело, которое полностью поглощает все падающие на него лучи и, следовательно, совершенно не отражает свет. Само тело при этом может светиться, например за счет тепловой энергии. Таким образом, для полного излучателя характерно то, что исходящий от него свет принадлежит самому излучателю и не имеет примеси отраженного света. В приведенном определении имеется в виду собственное излучение платины при указанных условиях.

Световой поток, испускаемый источником света во всех направлениях, через силу света выражается так:

$$\Phi = 4\pi I. \quad (54)$$

На основании формулы (53) световой поток можно рассматривать относительно любого телесного угла ω , как $\Phi = I\omega$. Тогда за единицу светового потока принимается люмен (лм) — кандера, умноженная настерадиан ($1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$). Если световой поток неравномерный, то его величина внутри телесного угла определяется формулой

$$\Phi = \int^{\omega} I d\omega.$$

Светимостью R называют величину, равную отношению светового потока Φ , испускаемого светящейся поверхностью S , к площади этой поверхности

$$R = \frac{\Phi}{S}. \quad (55)$$

При световой неоднородности поверхности светимость определяется по формуле $R = \frac{d\Phi}{dS}$. За единицу светимости принимается люмен на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$). Здесь следует оговориться, что поскольку речь идет о светящейся поверхности и единица измерения светимости характеризует величину светового потока, излучаемого единицей светящейся поверхности, то $\text{лм}/\text{м}^2$ следует понимать как «люмен с квадратного метра».

Яркостью B_{ϕ} светящейся поверхности в некотором направлении ϕ называют величину, равную отношению силы света I в этом направлении к площади S проекции

светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к данному направлению, т. е.

$$B_{\varphi} = \frac{I}{S \cos \varphi} \cdot \quad (56)$$

Чтобы наглядно представить это определение, выделим на светящейся поверхности площадку σ (рис. 45). Нормаль к этой площадке n ; направление, под которым рассматривается площадка, OC ; оно расположено под углом φ к нормали n . Если спроецировать площадку σ на плоскость, перпендикулярную OC , то получится площадка S . Приходящаяся на эту площадку сила света и характеризует яркость источника в направлении OC .

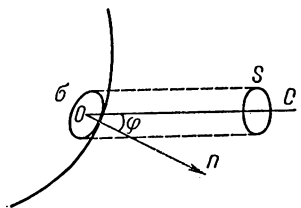


Рис. 45

Яркость B_{φ} есть величина, зависящая от направления, в котором рассматриваются светящиеся поверхности, но для светящихся поверхностей некоторых источников она может

от направления не зависеть. Это так называемые источники Ламберта. Подобием таких источников являются источники, обладающие матовой поверхностью, рассеивающей свет во всех направлениях.

За единицу измерения яркости принимается кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$), иначе эту величину называют нит (нт).

Освещенность — величина, характеризующая световую энергию, приходящуюся на освещаемую поверхность.

Освещенностью E называют величину, равную отношению падающего на поверхность светового потока Φ к площади S этой поверхности:

$$E = \frac{\Phi}{S} \cdot \quad (57)$$

Эта формула справедлива, если сила света не меняется при переходе от одного направления к другому. Если же сила света изменяется с изменением направления, то $E = \frac{d\Phi}{dS}$.

Единица освещенности — люкс (лк). Это люмен на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$). Заметим, что между единицей

освещенности и единицей светимости имеется внешнее сходство: их математическое выражение одинаково. Однако физический смысл, выражаемый этими единицами, различен. Единица светимости — это «люмен с квадратного метра», а единица освещенности — «люмен на квадратный метр». Поэтому единица освещенности имеет особое название — люкс.

На основании формулы (53) $\Phi = I\omega$, а величина телесного угла, вырезающего из центра сферы радиусом r на его поверхности площадь S , выражается формулой $\omega = \frac{S}{r^2}$. Подставляя последние два выражения в формулу (57), получаем

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \quad (58)$$

Это хорошо знакомый из курса физики средней школы **закон освещенности**. Поскольку освещенность, создаваемая точечным источником света, обратно пропорциональна квадрату расстояния от освещаемой поверхности, этот закон называют **законом обратных квадратов**. Если освещаемая поверхность расположена под углом i к направлению распространения луча, то

$$E = \frac{I \cos i}{r^2} \cdot \quad (59)$$

Это так называемый **закон косинусов для освещенности поверхности**.

2. Фотометрия (световые измерения)

Световые измерения подразделяются на объективные и субъективные, или визуальные. Первые выполняются при помощи приборов без участия глаза, вторые — на основе восприятия определенных световых эффектов глазом.

Основными фотометрическими приборами являются люксметры. Они относятся к группе приборов, дающих объективные данные о результатах световых измерений, и используются во многих ситуациях, когда необходимо производить фотометрические измерения: при фотографировании, архитектурном проектировании, при проверке условий труда в системе исследований по охране труда и т. п.

Для того чтобы можно было составить представление о связи величины освещенности с различными конкретными световыми условиями, приведем несколько количественных характеристик освещенности.

Нормальная освещенность на рабочих местах учащихся при чтении, письме должна составлять 300—400 лк. При выполнении графических работ освещенность должна быть доведена до 500 лк; такой же должна быть освещенность на классной доске. Под прямыми лучами Солнца в средних широтах освещенность достигает 100 000 лк, а в пасмурный день на открытом месте — 1000 лк. В помещении в пасмурный день у окна освещенность составляет 60—100 лк. Минимальная освещенность, при которой еще можно работать с книгой, писать, шить, составляет 10 лк. Полная Луна создает освещенность на открытом месте 0,2 лк, а звездное небо (без Луны) — 0,0003 лк.

Наиболее распространенные люксметры представляют собой сочетание фотоэлемента с гальванометром. При этом используется один из основных законов фотоэффекта: сила фототока насыщения пропорциональна падающему световому потоку. Однако люксметр будет давать правильные показания только в том случае, когда спектральный состав воспринимаемого им светового потока будет близким к тому, который воспринимает глаз. Этому условию достаточно хорошо удовлетворяют селеновые фотоэлементы; используются для этой цели и специальные светофильтры, одеваемые на фотоэлемент люксметра.

Если нужно измерить освещенность какой-либо поверхности, то на эту поверхность помещают люксметр так, чтобы его фотоэлемент был обращен навстречу падающему на эту поверхность световому потоку. Световой поток вызывает соответствующий ему фототок, который фиксирует гальванометр. Шкала гальванометра может быть проградуирована в люксах, и тогда он даст непосредственное показание освещенности, вызванной данным световым потоком.

В люксметрах, используемых при фотографировании (фотоэкспонетрах) шкала гальванометра градуируется в условных единицах, позволяющих определить экспозицию при фотографировании.

С помощью люксметра можно измерить и яркость и светимость источника света. Для этого фотоэлемент обращают в направлении источника света и также измеряют величину возникшего при этом фототока. При этом используются специальные светофильтры, наде-

ваемые на фотоэлемент люксметра, и производится пересчет показаний гальванометра на единицы светимости и яркости при помощи пересчетных коэффициентов.

Кроме люксметра, принцип действия которого описан, для измерения различных фотометрических величин используются разного рода фотометры (по существу, люксметр также является одним из видов фотометров). Рассмотрим наиболее распространенные виды фотометров и их конкретное назначение.

Простейший фотометр, схема которого

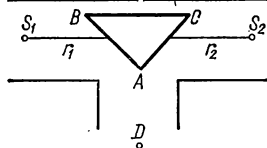


Рис. 46

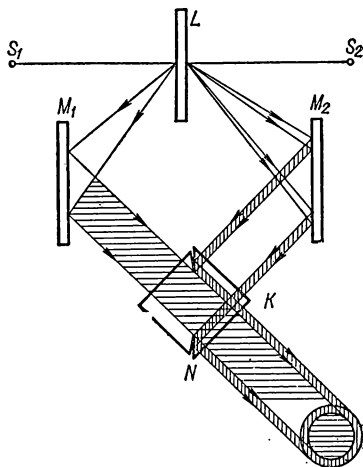


Рис. 47

показана на рис. 46, предназначен для определения силы света источника. С его помощью производятся визуальные измерения.

Принцип действия такого фотометра состоит в следующем. Эталонный источник света S_1 , сила света которого I_1 известна, располагается на расстоянии r_1 от грани AB белой трехгранной призмы. Источник S_2 , силу света (I_2) которого необходимо определить, перемещают по отношению к грани AC призмы, приближая или удаляя его (вся система расположена в Т-образной зачерненной внутри трубке). Находящийся в точке D глаз наблюдателя фиксирует освещенность граней AB и AC . Когда освещенность обеих граней станет одинаковой, фиксируют расстояние r_2 ; на основании равенства освещенностей $E_{AB} = E_{AC}$ и закона освещенности записывается соотношение

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \quad (60)$$

из которого при известных I_1 , r_1 , r_2 находят I_2 — истинную силу света источника.

Более совершенный прибор, служащий тем же целям, — фотометр Люммера — Бродхуна (рис. 47).

В этом фотометре роль белой трехгранной призмы выполняет белая пластина L ; свет от источников S_1 и S_2 попадает на ее обращенные к источникам поверхности. Отражаясь от них диффузно (рассеянно), свет попадает на одну из основных деталей фотометра — призму Люммера. Эта призма фактически состоит из двух стеклянных прозрачных призм, одна из которых обычная прямоугольная, а грань второй, соответствующая гипотенузе, — сферическая, сошлифованная на плоскость в центре. Призмы приполированы плоскостями гипотенузных граней и сжаты так, что в месте соприкосновения обе представляют как бы один кусок стекла. Плоскость соприкосновения призм имеет форму круга.

При работе фотометра свет, отраженный от поверхностей пластины L , попадает на вспомогательные зеркала M_1 и M_2 , а от них на призму Люммера. Пучок лучей от зеркала M_1 проходит через центральную часть призмы без изменения; пучок лучей от зеркала M_2 (его крайние части) в призме Люммера претерпевает полное отражение и, меняя свое направление на 90° , выходит параллельно среднему пучку лучей. Таким образом, в поле зрения наблюдателя, воспринимающего лучи от грани NK призмы Люммера, возникает в центре круг, соответствующий световому потоку от источника S_1 , и кольцо, образуемое световым потоком от источника S_2 . Если освещенность пластины L с обеих сторон одинакова, то глаз не воспринимает раздела между кругом и кольцом: в поле зрения виден сплошной круг одинаковой освещенности. Как только это достигнуто (за счет перемещения источника света S_2), можно приступить к расчету силы света I_2 по формуле (60).

Сила света и освещенность иногда достигают весьма больших величин и меняются в значительных пределах. В этих случаях нельзя ограничиваться простым применением рассмотренных приборов и приходится пользоваться разного рода светофильтрами, ослабляющими величину светового потока. Используются для этого простые светопоглощающие фильтры в виде стекол и светофильтры, действие которых поддается регулированию.

Примерами последних является фотометрический ослабитель — поглощающий клин (рис. 48), действие которого можно уяснить, ознакомившись с рисунком, и вращающийся диск с вырезом (рис. 49). Величину отверстия выреза в диске и скорость его вращения можно регулировать, уменьшая тем самым время распространения светового потока в определенном направлении, а следовательно, уменьшая его суммарную интенсивность.

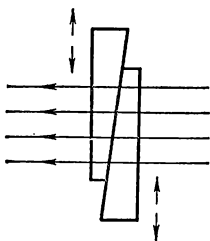


Рис. 48

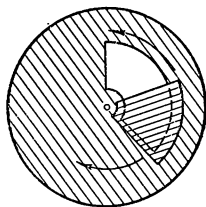


Рис. 49

При использовании этих приемов необходимо, разумеется, в расчеты вносить поправки на соответствующее предварительное уменьшение интенсивности светового потока.

Не меньший интерес представляет измерение слабых интенсивностей света. С этой целью используется «метод гашения». Он основан на способности глаза хорошо оценивать пороговую яркость — минимальное значение яркости, воспринимаемое глазом. Это значение яркости довольно стабильно для различных наблюдателей. Метод гашения заключается в том, что измеряемая яркость уменьшается до порогового значения. Способ уменьшения яркости позволяет определить, во сколько раз она уменьшена. Так, от значения пороговой яркости можно перейти к значению яркости измеряемой. Метод позволяет определять яркости порядка десятитысячных долей кд/м^2 .

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяются фотометрические оптические приборы?
 - 1) Для увеличения угла зрения.
 - 2) Для измерения световых величин.
 - 3) Для фотографирования.
 - 4) В осветительных целях.

2. Для измерения какой из перечисленных величин непосредственно используется люксметр?

- 1) Освещенности.
- 2) Светового потока.
- 3) Силы света.
- 4) Потерь световой энергии при отражении.

3. Предмет при фотографировании освещается электрической лампой, расположенной от него на расстоянии 2 м. Во сколько раз надо увеличить экспозицию, если эту же лампу отодвинуть на расстояние 3 м от предмета?

- 1) 1,5.
- 2) 2,25.
- 3) 5.
- 4) 0,7.

4. На мачте высотой 8 м висит лампа силой света 1 кд. Принимая лампу за точечный источник света, определить, на каком расстоянии от основания мачты освещенность поверхности земли равна 1 лк.

- 1) 18,3 м.
- 2) 64 м.
- 3) 8 м.
- 4) 16 м.

5. Над центром круглой площадки висит лампа. Освещенность в центре площадки 40 лк, на краю площадки 5 лк. Под каким углом падают лучи на край площадки?

- 1) 30° .
- 2) 45° .
- 3) 60° .
- 4) 15° .

6. Как изменится освещенность в центре экрана, если по другую сторону источника света на том же расстоянии поместить плоское зеркало? Плоскости экрана и зеркала параллельны. Коэффициент отражения зеркала равен 1.

- 1) Приблизительно в 1,1 раза.
- 2) — » — в 3 раза.
- 3) — » — в 2,2 раза.
- 4) — » — в 4 раза.

7. Найти освещенность на поверхности Земли, вызываемую нормально падающими солнечными лучами. Яркость Солнца равна $1,2 \cdot 10^9$ нт.

- 1) $8 \cdot 10^4$ лк.
- 2) 10^3 лк.
- 3) $1,2 \cdot 10^9$ лк.
- 4) $6 \cdot 10^3$ лк.

8. Спираль электрической лампочки с силой света 100 кд заключена в матовую сферическую колбу диаметром 5 см. Найти светимость лампы. Потерей света в оболочке лампы пренебречь.

- 1) $4 \cdot 10^4$ лм/м².
- 2) $1,6 \cdot 10^5$ лм/м².
- 3) 10^4 лм/м².
- 4) $2 \cdot 10^3$ лм/м².

9. Найти яркость лампы в 100 кд, заключенной в матовую сферическую колбу диаметром 10 см. Потерей света в оболочке колбы пренебречь.

- 1) $5,1 \cdot 10^4$ нт.
- 2) 10^4 нт.
- 3) $1,27 \cdot 10^4$ нт.
- 4) $1,6 \cdot 10^5$ нт.

10. Найти яркость бумажного листа площадью 30×40 см, на который падает световой поток 60 лм. Коэффициент отражения 0,31.

- 1) 50 нт.
- 2) 150 нт.
- 3) 60 нт.
- 4) 21 нт.

11. Какова светимость волоска электрической лампы, если излучаемый световой поток равен 400 лм, длина волоска 60 см, а диаметр его 0,04 мм?

- 1) $3,3 \cdot 10^7$ лм/м². 2) $5,4 \cdot 10^3$ лм/м².
 3) 360 лм/м². 4) $5,4 \cdot 10^6$ лм/м².
 12. На экран $2 \times 1,5$ м с коэффициентом отражения 0,8 падает световой поток 150 лм. Определить светимость экрана.
 1) 50 лм/м². 2) 40 лм/м².
 3) 75 лм/м². 4) 100 лм/м².
 13. Определить яркость экрана с коэффициентом отражения 0,8 и площадью $2 \times 1,5$ м, на который падает световой поток 150 лм.
 1) 75 нт. 2) 50 нт.
 3) $\approx 6,4$ нт. 4) $\approx 25,2$ нт.

ГЛАВА V

ДИАФРАГМЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. Роль диафрагм и их виды

Диафрагмами называются непрозрачные экраны, имеющие отверстия для пропускания световых лучей. Кроме того, роль диафрагм в оптических системах могут выполнять оправы линз и габариты вспомогательных элементов, введенных в оптическую систему с какими-либо специальными целями. Таким образом, в сложной оптической системе может быть довольно много диафрагм. Все они, как правило, располагаются перпендикулярно к оптической оси, и центры их совпадают с оптической осью системы.

Диафрагмы в оптических системах играют весьма важную роль. В принципе их роль сводится к ограничению пучка лучей, проходящих сквозь систему, но вследствие этого от диафрагм зависит величина, качество и освещенность изображения, а также протяженность той части пространства (вдоль оптической оси), которая может быть достаточно резко изображена на плоскости.

Из всех диафрагм оптической системы одна в наибольшей степени ограничивает осевой и наклонный пучки лучей, проходящих через оптическую систему. Ее изображение видно из осевой точки предмета под наименьшим углом по сравнению с аналогичными изображениями других диафрагм. Такая диафрагма называется **апертурной**. Диафрагма, предназначенная для ограничения изображения в оптической системе (поля зрения)

называется **полевой диафрагмой**. Полем зрения называется та часть пространства, точки которого могут давать изображение. Следовательно, полевая диафрагма ограничивает какую-то часть предмета, изображение которого может быть получено в помощью данной оптической системы.

2. Апертурная диафрагма. Зрачки

Если оптическая система состоит из двух компонентов, то апертурная диафрагма cd может располагаться между компонентами системы (рис. 50).

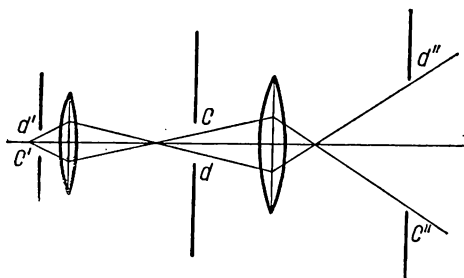


Рис. 50

Изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов $c'd'$ называется **входным зрачком**, а изображение этой диафрагмы в пространстве изображений $c''d''$ — **выходным зрачком**.

Угол, под которым виден радиус зрачка входа из осевой точки предмета, называют **апертурным углом** u , а угол, под которым виден радиус выходного зрачка из точки пересечения оси с плоскостью изображения, — **выходным апертурным углом** u' (рис. 51).

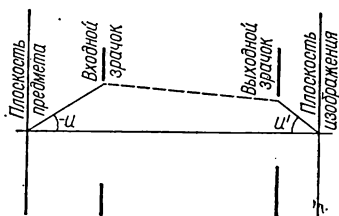


Рис. 51

Лучи, проходящие через центр зрачка, а также через центр апертурной диафрагмы, называются **главными лучами**.

Апертурная диафрагма в оптической системе может совпадать с одним из зрачков. Если ее положение совпадает со входным

зрачком, то входной зрачок становится реальным отверстием, а выходной зрачок—его изображением. В случае расположения апертурной диафрагмы в плоскости выходного зрачка наблюдается обратная картина.

Апертурная диафрагма, ограничивая пучок лучей, входящих в оптическую систему, определяет величину светового потока, проходящего сквозь систему, и в итоге освещенность изображения. Кроме того, она в значительной мере обуславливает качество получаемого изображения.

Одной из характеристик качества изображения является его резкость (четкость). Изображение, при прочих равных условиях, получается более четким в том случае, когда направления осей пучков в каждой точке изображения параллельны главной оптической оси. Это особенно проявляется при цветном фотографировании, когда световой поток просвечивает толстый слой многослойной пленки.

В случае параллельности осей пучков, вызывающих изображение, число засвеченных зерен эмульсионного слоя будет меньшим и изображение резче. Этого можно добиться, располагая апертурную диафрагму в передней фокальной плоскости системы (рис. 52). Такой ход лучей называется **телецентрическим**.

В оптических приборах, работающих совместно с глазом, выходной зрачок должен совпадать со зрачком глаза. Если рассматривать прибор и глаз как единую оптическую систему,

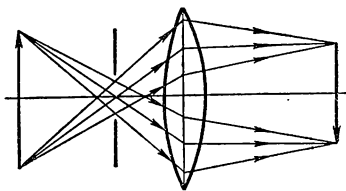


Рис. 52

му, то такое расположение выходного зрачка прибора оказывается наиболее благоприятным в отношении восприятия освещенности изображения глазом.

Чтобы охарактеризовать освещенность изображения в любой оптической системе, вводится понятие «**светосила системы**».

Для характеристики светосилы в различных системах используются разные приемы. Так, например, светосила микроскопа обычно характеризуется квадратом числовой апертуры $(n \sin u)^2$. Из приведенного выражения понятно, что **числовой апертурой** называется

произведение показателя преломления среды на входе системы на синус апертурного угла.

3. Полевая диафрагма. Люки

Полевая диафрагма — это та из диафрагм, изображение которой видно из входного зрачка системы под наименьшим углом. Ее изображение в пространстве предметов — входной люк, в пространстве изображений — выходной люк.

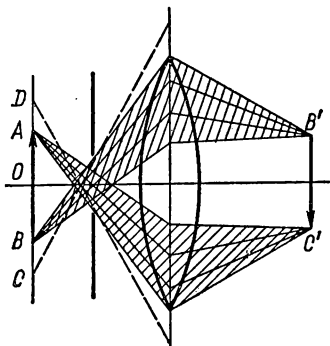


Рис. 53

Действие полевой диафрагмы показано на рис. 53. В случае, показанном на рисунке, поле зрения ограничено оправой линзы, которую будем считать передней линзой системы. Из рисунка видно: сквозь линзу проходят лучи от точек A, B , принадлежащих предмету, но лучи, идущие от точек CD , в линзу (в систему) не попадают, следовательно, изображение в

оптической системе (поле зрения) ограничивается отрезком AB .

В приборах, действующих совместно с глазом, полевая диафрагма имеет форму круга, в фотографических и проекционных — форму прямоугольника. Для резкого ограничения поля зрения входной люк должен совпадать с плоскостью объекта. Например, в зрительных трубах полевая диафрагма должна быть расположена в задней фокальной плоскости объектива, где получается изображение, даваемое объективом, т. е. рассматриваемый объект по отношению к окуляру; в проекционных приборах — в плоскости проецируемого предмета (диакадра, кинокадра). Там же лежит и входной люк. В этих случаях резкое изображение выходного люка совпадает с плоскостью изображения: сетчаткой глаза, экраном и т. п.

4. Совместное действие апертурной и полевой диафрагм. Виньетирование

Для любой оптической системы характерно действие на пучки лучей обеих входящих в нее диафрагм: полевой и апертурной. Их совместное действие показано на рис. 54. Внимательное рассмотрение рисунка позволяет представить различие в действии одной и другой диафрагм, и в частности различие между апертурным углом и углом, ограничивающим поле зрения прибора. На ри-

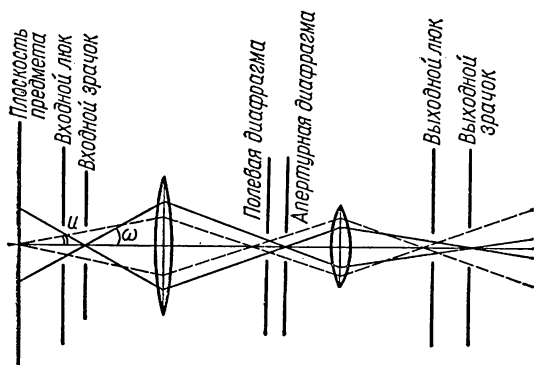


Рис. 54

сунке угол u — апертурный, а угол ω определяет поле зрения прибора (при условии, что показанные на рисунке лучи — крайние лучи пучков).

Если в оптическую систему попадают косые пучки лучей, то совместное действие диафрагм может привести к их частичному или полному затемнению.

Рассмотрим несколько пучков лучей, идущих от различных точек плоскости предмета (рис. 55). Очевидно, осевой пучок лучей будет ограничен апертурной диафрагмой и полевая диафрагма на него влияния не окажет. Пучок лучей, идущих от точки B , будет частично срезан (загорожен) полевой диафрагмой; от точки C пучок будет еще больше срезан, а точка D будет граничной точкой поля зрения системы: ни один луч от точек, лежащих дальше точки D от оптической оси в плоскости предмета, в оптическую систему не попадает. Это явление среза, затемнения, загромождения полевой диафрагмой

части пучка лучей, проходящей через входной зрачок системы, называется **виньетированием**.

В случае виньетирования изображение в оптической системе будет иметь максимальную освещенность в центре (от точек предмета, расположенных вблизи оптической оси). По мере удаления точек предмета от оптической оси освещенность точек изображения будет уменьшаться. Для граничной точки поля зрения освещенность будет минимальной. Чтобы охарактеризовать степень

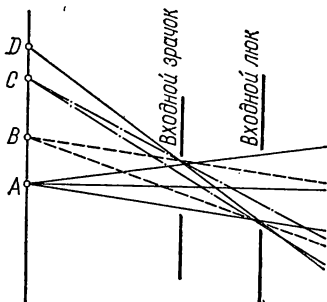


Рис. 55

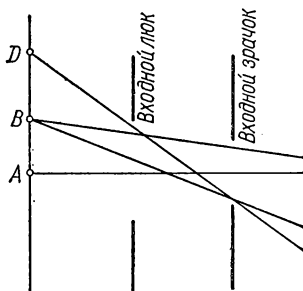


Рис. 56

виньетирования от данной точки (данного наклонного пучка лучей), вводится понятие «действующее отверстие зрачка» и «коэффициент виньетирования».

Действующим отверстием зрачка называется часть площади входного зрачка, заполненная лучами данного наклонного пучка, проходящего в систему.

Коэффициентом виньетирования для данного наклонного пучка лучей является отношение действующего входного зрачка к общей его площади.

При перемещении входного люка к входному зрачку и к предметной плоскости поле зрения будет увеличиваться, а при совпадении входного зрачка со входным люком оно расширится до бесконечности. Но это обстоятельство не играет той положительной роли, которую формально оно, казалось бы, должно играть: лучи, входящие в оптическую систему под большим наклоном к оптической оси, нельзя использовать из-за явления аберрации, о котором будет рассказано в следующей главе.

При дальнейшем приближении люка к предметной плоскости (рис. 56) поле зрения снова будет уменьшаться.

Когда входной люк совпадает с предметной плоскостью, поле зрения окажется резко очерченным (об этом уже говорилось в предыдущем параграфе) и явление виньетирования исчезнет.

Контрольные вопросы

1. Укажите результат действия апертурной диафрагмы.
 - 1) Уменьшение поля зрения прибора.
 - 2) Уменьшение светового потока, попадающего в прибор.
 - 3) Уменьшение хроматической аберрации.
 - 4) Виньетирование изображения.
2. Что называют зрачком оптической системы?
 - 1) Изображение апертурной диафрагмы.
 - 2) Изображение полевой диафрагмы.
 - 3) Отверстие окуляра оптической системы.
 - 4) Отверстие оптической системы, ограничивающее только наклонный пучок лучей.
3. Что определяет светосила прибора?
 - 1) Количество световой энергии, поступающей в прибор.
 - 2) Апертурный угол.
 - 3) Видимое увеличение.
 - 4) Освещенность изображения.
4. Каков результат действия полевой диафрагмы?
 - 1) Ограничение поля зрения прибора.
 - 2) Уменьшение светового потока.
 - 3) Ограничение апертурного угла.
 - 4) Уменьшение хроматических аберраций.
5. Что называют люком оптической системы?
 - 1) Изображение апертурной диафрагмы.
 - 2) Изображение полевой диафрагмы.
 - 3) Отверстие окуляра оптической системы.
 - 4) Отверстие оптической системы, ограничивающее только наклонный пучок лучей.
6. Каков результат совместного действия на наклонные пучки лучей, попадающие в оптический прибор входного зрачка и люка?
 - 1) Уменьшение аберраций.
 - 2) Увеличение поля зрения прибора.
 - 3) Виньетирование.
 - 4) Изменение видимого увеличения.
7. Укажите определение коэффициента виньетирования.
 - 1) Отношение действующего отверстия входного зрачка к его общей площади.
 - 2) Отношение отверстия апертурной диафрагмы к отверстию полевой диафрагмы.
 - 3) Отношение отверстия зрачка к отверстию люка.
 - 4) Отношение отверстия полевой диафрагмы к отверстию апертурной диафрагмы.

ГЛАВА VI

АБЕРРАЦИИ

1. Общие сведения об aberrациях

В главе III рассмотрены идеальные оптические системы, работающие без погрешностей. Для реальных оптических систем характерны погрешности изображения. Эти погрешности называются **aberrациями**. Напомним, что при рассмотрении идеальной оптической системы говорилось о параксиальных лучах и не учитывался сложный состав белого света. Фактически приходится иметь дело с широкими пучками лучей, идущими под различными углами к оптической оси и с белым сложным по составу (немонохроматическим) светом. В результате возникает две группы aberrаций: монохроматические и хроматические. **Монохроматические aberrации** — искажения изображений, возникающие в простых монохроматических лучах. **Хроматические aberrации** — aberrации, обусловленные зависимостью показателя преломления от длины волны. Основными видами монохроматических aberrаций являются: сферическая aberrация, кома, отступление от закона синусов, астигматизм, кривизна поля, дисторсия. К хроматическим aberrациям относятся: хроматизм положения, хроматическая разность сферических aberrаций, сферохроматическая aberrация и хроматизм увеличения. Все виды aberrаций в той или иной мере отражаются на качестве изображения: результат их воспринимается как размытость (нерезкость) изображения, искривление прямых линий, отличие формы изображения от формы предмета, уменьшение контрастности изображения, его цветовая окраска.

2. Сферическая aberrация

Этот вид aberrации проявляется для широкого пучка лучей от точки, лежащей на оптической оси. **Сферическая aberrация** заключается в том, что лучи, падающие в оптическую систему на различных расстояниях от оптической оси, в пространстве предметов пересекают оптическую ось в различных точках. Понять этот эффект

легко, если представить линзу состоящей из нескольких частей. Каждую линзу, разделив ее в поперечном сечении, как показано на рис. 57, можно рассматривать как бы состоящей из нескольких призм: 1, 2, 3, 4 и подобия плоскопараллельной пластины 5.

Известно, что трехгранная призма преломляет падающий на нее луч и отклоняет его к основанию (призмы 1, 2 — вниз, призмы 3, 4 — вверх). Степень отклонения луча призмой определяется величиной ее преломляю-

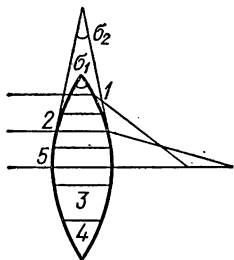


Рис. 57

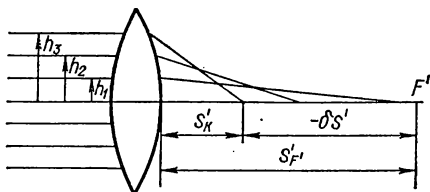


Рис. 58

щего угла σ . Легко убедиться на основании рисунка, что преломляющие углы призмы 1, 4 больше, чем призмы 2, 3, а следовательно, проходящие симметрично через призмы 1, 4 лучи отклоняются к их основаниям (к оптической оси) больше, чем лучи, проходящие через призмы 2, 3. Таким образом, в различных кольцевых зонах линзы различна ее оптическая сила, и возрастает она по мере удаления от оптической оси. Что касается средней части линзы, которая представлена близкой по форме к плоскопараллельной пластине, то эта зона линзы работает в параксиальных лучах.

На рис. 58 показана сферическая аберрация при условии, что точка, лежащая на оптической оси, находится в бесконечности. Если точка на оптической оси расположена в бесконечности, то сферическая аберрация зависит от высоты h луча по отношению к оптической оси на входном зрачке системы, а если точка находится вблизи оптической системы, то сферическую аберрацию удобнее определять в зависимости от величины угла u , предельное значение которого равно величине апертурного угла (рис. 59).

Сферическая aberrация проявляется двояко: как продольная и поперечная. **Продольной сферической aberrацией** (точнее, мерой продольной aberrации) называется расстояние между точками схода реального и параксимального пучков лучей. На рис. 58, 59 для крайних лучей это отрезок — $\delta s'$.

Реальные лучи света, для которых определяют сферическую aberrацию, называют крайними, или мериди-

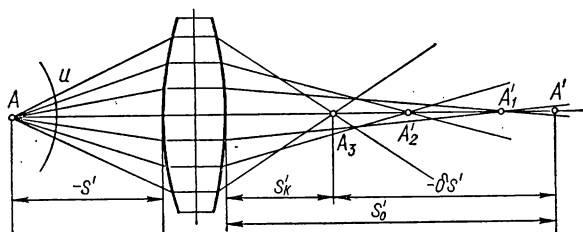


Рис. 59

альными. Для случая, изображенного на рис. 58, сферическая aberrация

$$-\delta s' = s'_k - s'_{F'}. \quad (61)$$

Во втором случае (рис. 59)

$$-\delta s' = s'_k - s'_0, \quad (62)$$

где расстояние $s'_0 = f' + x'$ (x' определяется по формуле Ньютона (37)). Приведенные формулы определяют сферическую aberrацию крайних лучей, т. е. всей линзы, но каждая пара лучей, расположенных симметрично относительно оптической оси, дает свою величину сферической aberrации. Например, для некоторой i -й пары лучей сферическая aberrация будет:

$$\delta s'_i = s'_i - s'_{F'}, \quad (63)$$

где s'_i — расстояние от вершины задней поверхности системы до точки схода i -й пары лучей. Заметим, что положительная линза имеет отрицательную aberrацию, а отрицательная — положительную.

Вследствие сферической aberrации в плоскости изображения получается кружок рассеяния, или так называемая **поперечная сферическая aberrация** (рис. 60).

Мерой поперечной сферической aberrации является радиус кружка рассеяния $\delta z'$ в фокальной плоскости оптической системы для параксиальных лучей. Она, как и продольная, будет максимальной для крайних лучей, симметричных относительно главной оптической оси. Величина $\delta z'$ определяется формулой

$$\delta z' = \delta s' \operatorname{tg} u', \quad (64)$$

в которой u' — угол между рассматриваемым лучом и оптической осью в пространстве изображений.

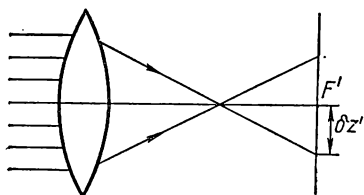


Рис. 60

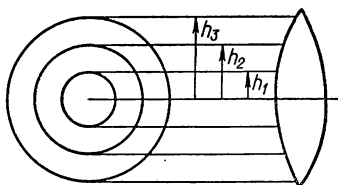


Рис. 61

Как следует из приведенных рисунков и описания к ним, величина сферической aberrации зависит от высоты h входа луча в оптическую систему $\delta s' = f(h)$, $\delta z' = \varphi(h)$. Поэтому удобно, разделив линзу на кольцевые зоны, соответственно величинам h (рис. 61) оценивать величину сферической aberrации относительно соответствующей зоны. При небольших значениях радиуса зоны продольная и поперечная aberrации зависят от величин зон следующим образом:

$$\delta s' = Ah^2; \quad (65)$$

$$\delta z' = Bh^3. \quad (66)$$

Коэффициенты A и B зависят от оптической силы линзы, показателя преломления и формы преломляющих поверхностей линзы. Обычно выражения (65), (66) представляют графически. Например, $\delta s' = f(h)$ — рис. 62.

Сопоставляя изложенное, можно сделать вывод относительно различных способов уменьшения сферической aberrации. Проще всего, добиться уменьшения сферической aberrации уменьшением диаметра входного зрачка системы. Тем самым будет уменьшено число зон линзы, и проходящий через входной зрачок системы пучок лучей будет по своим свойствам ближе к паракси-

альному. Однако, этот способ не всегда можно использовать, так как уменьшение отверстия входного зрачка ограничивает величину светового потока, входящего в систему, а следовательно, освещенность изображения.

Второй способ основан на том, что собирающая и рассеивающая линзы дают aberrации разных знаков, и их можно компенсировать подбором соответствующих линз

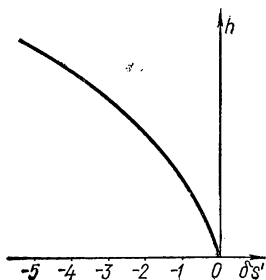


Рис. 62

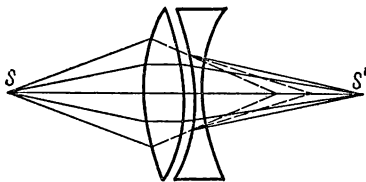


Рис. 63



Рис. 64

(рис. 63). Компоненты подбираются так, чтобы aberrация для зон высшего порядка была скомпенсирована в наибольшей степени, благодаря чему характеристическая кривая aberrации приобретает вид, показанный на рис. 64.

Сферическая aberrация — одна из aberrаций, которые проявляются в наибольшей степени. Она отличается от всех остальных видов aberrаций тем, что остается для точек, находящихся на оптической оси, даже в тех случаях, когда все остальные виды aberrации удается устранить. Сферическая aberrация в изображении проявляется в виде его размытости (нерезкости). Плоскость, в которой изображение имеет наибольшую резкость, называется **плоскостью наводки**. Плоскость, соответствующая наименьшему кружку рассеяния, называется **плоскостью установки**. Эти плоскости в большинстве случаев не совпадают. Их положение зависит от величины входного зрачка системы.

3. Кома

Кома — аберрация широкого пучка лучей, наклонного относительно оптической оси. При сферической аберрации возникает пятно рассеяния, симметричное относительно любых двух взаимноперпендикулярных осей (круглосимметрия). При коме симметрия нарушается.

Для удобства характеристики такой асимметрии (или симметрии, в случае сферической аберрации) используются два термина, характеризующие взаимно перпендикулярные плоскости.

Одну произвольно выбранную плоскость, которая содержит оптическую ось, называют **меридиональной**, а плоскость, перпендикулярную к ней, — **сагиттальной плоскостью**. Понятно, что таких пар плоскостей имеется бесчисленное множество, но удобно условно принять меридиональной плоскостью плоскость чертежа. Тогда можно сказать, что кома — искажение размеров изображения в меридиональной и сагиттальной плоскостях, причем степень искажения в этих плоскостях различна.

Пусть точка расположена вне оптической оси в бесконечности. Проследим на рис. 65, как проходит пучок наклонных лучей от нее через оптическую систему. Луч, обозначенный «0», проходит через среднюю часть линзы, практически не меняя своего направления при выходе из системы; луч 1 в соответствии с его первоначальным направлением отклоняется оптической системой в направлении оптической оси незначительно, а луч 2 — в большей степени. В итоге на идеальную фокальную плоскость лучи попадут не в том порядке, в котором они вошли в оптическую систему. Этим и будет обусловлена несимметричность изображения в меридиональной плоскости, называемая **меридиональной комой**.

Будучи вытянутым в меридиональной плоскости, изображение окажется сжатым в плоскости сагиттальной. Это сжатие обусловит **сагиттальную кому**.

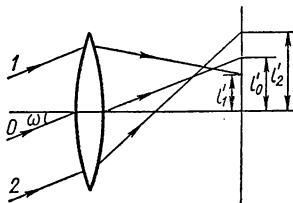


Рис. 65

Если изображение будет иметь aberrацию «кома» от предмета в форме круга, то оно будет выглядеть в виде несимметричного овала (рис. 66).

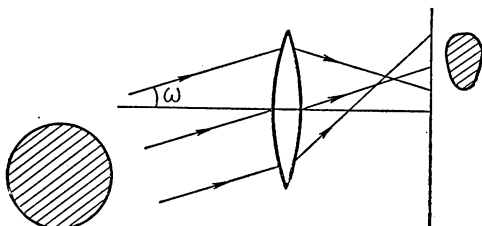


Рис. 66

Мерой асимметрии в меридиональной плоскости (количественной характеристикой меридиональной комы) является величина

$$k = \frac{(l'_1 - l'_2) - l'_0}{2}, \quad (67)$$

где l'_1 , l'_2 , l'_0 — высоты точек пересечения боковых и среднего лучей с идеальной фокальной плоскостью.

Степень проявления комы пропорциональна квадрату угла ω наклона пучка к оптической оси и зависит от ширины пучка.

Кома, как и сферическая aberrация, является наиболее ощутимой aberrацией, проявляющейся при широких наклонных пучках по всему полю зрения. В оптических приборах кому обычно исправляют совместно со сферической aberrацией подбором линз.

4. Отступление от закона синусов

Условия работы некоторых оптических систем таковы, что в них от очень малых деталей предмета попадают широкие пучки лучей (рис. 67). Это получается либо потому, что рассматриваемые мелкие предметы или детали предметов расположены весьма близко от объектива системы (микроскоп), либо предмет расположен далеко, но его угловые размеры малы (зрительная труба).

При такой ситуации, даже в тех случаях, когда устранена сферическая абберация для точки, лежащей на оптической оси, изображение может оказаться нерезким. Для резкого изображения такого участка необходимо второе условие: под какими бы углами ни попадали лучи в систему, они должны давать одинаковое линейное увеличение. Это условие называется **условием или за-**

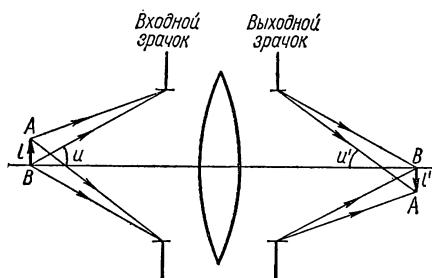


Рис. 67

коном синусов, а невыполнение его вызывает абберацию, которая называется **отступлением от закона синусов**.

Количественное выражение закона синусов состоит в следующем:

$$\frac{n}{n'} \frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{l'}{l} = \beta. \quad (68)$$

Обычно закон синусов выражается в виде

$$nl \sin u = n'l' \sin u'. \quad (69)$$

Отступление от закона синусов характеризуется выражением

$$\delta\beta = \beta_k - \beta_0, \quad (70)$$

где β_0 — линейное увеличение для параксиальной области, β_k — линейное увеличение для k -го меридионального луча, выходящего из точки на оптической оси.

Условие, при котором для какой-либо пары сопряженных точек предмета и изображения одновременно соблюден закон синусов и устранена сферическая абберация, называется **условием апланатизма**. Оптические системы, в которых за счет соответствующего подбора компонентов выполнено условие апланатизма, называются **апланатами**, или **апланатическими системами**.

5. Астигматизм

Астигматизм — aberrация узкого пучка лучей, наклонного к главной оптической оси. Он заключается в том, что лучи наклонного относительно оптической оси узкого пучка, идущие во взаимно перпендикулярных плоскостях (меридиональной и сагиттальной), после прелом-

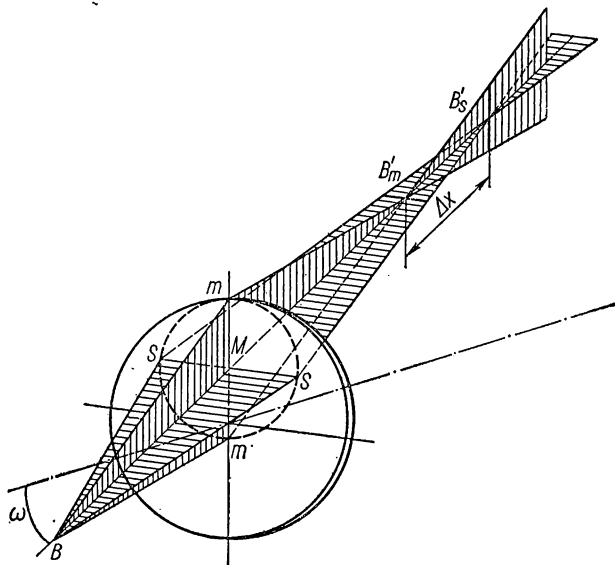


Рис. 68

ления в оптической системе собираются не в одну, а в две точки. Происходит это вследствие нарушения симметрии пучка лучей при преломлении, что, в свою очередь, обуславливается различными условиями преломления в меридиональной и сагиттальной плоскостях из-за различия кривизны поверхности (рис. 68).

Рассмотрим пучок лучей, идущих в оптическую систему из точки B . Главный луч пучка направляется в систему под углом ω к оптической оси и пересекается со сферической поверхностью системы в точке M . Пучок лучей образует на сферической поверхности площадку $msms$, показанную штриховой линией. В пучке выделим два взаимно перпендикулярных сечения — меридиональное Bmm' и сагиттальное Bss' . Поскольку кривизна сфе-

рической поверхности оптической системы различна для лучей, идущих в этих плоскостях, то преломление лучей в них будет разным. В результате меридиональные лучи дадут изображение точки B в точке B'_m , а сагиттальные — в точке B'_s .

Расстояние между этими точками называется астигматической разностью, которая, являясь мерой астигматизма, выражается формулой,

$$\Delta x = x'_s - x'_m, \quad (71)$$

где x'_s — отрезок MB'_s ; x'_m — MB'_m .

Фактически изображения точки B не будет, так как оно создается всем пучком лучей, а пучок лучей при астигматизме определенной точки не имеет. Если поместить экран в точке B'_m , то изображение точки B получится в виде горизонтального отрезка прямой. Если экран будет помещен в точке B'_s изображение получится в виде вертикального отрезка прямой. На экране, расположенном в промежуточном положении между точками B'_m и B'_s изображение будет иметь вид горизонтального или вертикального овала, а в середине — вид окружности. Поэтому изображение точки (предмета) в оптической системе, для которой характерен астигматизм, получается нерезким и искаженным при любом положении экрана. Исключением является случай, когда предмет представляет собой отрезок прямой, расположенный в меридиональной или сагиттальной плоскости.

Если объектом (предметом) является двухмерная фигура, например сетка, нельзя одновременно получить

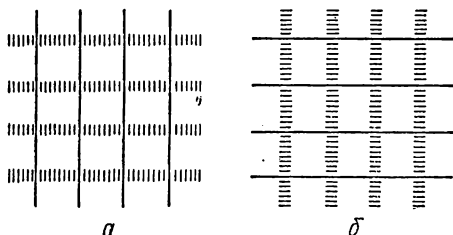


Рис. 69

резкое изображение обеих систем линий. На рис. 69 показаны изображения сетки на экране, помещенном в точке B'_s (рис. 69, а) и в точке B'_m (рис. 69, б).

6. Кривизна поля

Кривизна поля — аберрация, состоящая в том, что изображение плоской поверхности располагается по поверхности неплоской. Эта аберрация по своей физической сущности тесно связана с астигматизмом. При астигматизме между точками B'_m и B'_s есть положение, в котором изображение получается в виде круга. Круговая симметрия изображения в этом положении не означает, что и резкость изображения будет равномерной по кругу. Меридиональное и сагиттальное изображения точек не лежат в плоскости, сопряженной с предметной. Поэтому, если оптическая система изображает плоскость, перпендикулярную к оптической оси, то в пространстве изображений получаются две искривленные несферические поверхности, не совпадающие друг с другом. Изображение плоского предмета на экране, плоскость которого совпадает с сопряженной плоскостью, получается резким только вблизи оптической оси.

Радиусы кривизны поверхностей изображения, возникающих при этой аберрации, можно определить по следующим формулам:

$$R_m = \frac{l'^2}{2x'_m} \quad (72)$$

для меридиональной поверхности) и

$$R_s = \frac{l'^2}{2x'_s} \quad (73)$$

(для сагиттальной поверхности).

Среднее арифметическое кривизны обеих поверхностей, рассчитанное по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_s} \right), \quad (74)$$

характеризует среднюю кривизну поверхности изображения.

Оценка величины астигматизма и кривизны поля производится для параллельного пучка лучей по форму-

лам:

$$L_m = - \frac{1000x'_m}{f'^2} \cos \omega; \quad (75)$$

$$L_s = - \frac{1000x'_s}{f'^2} \cos \omega, \quad (76)$$

где f' — фокусное расстояние окуляра системы, x'_m , x'_s — суммарные аберрации всей системы в передней фокальной плоскости окуляра.

Несмотря на то что астигматизм и кривизна поля имеют одну и ту же физическую основу, кривизна поля может существовать независимо от астигматизма, т. е. тогда, когда астигматизм устранен.

Кривизну поля оценивают как среднее арифметическое по формуле

$$k = \frac{L_s + L_m}{2}. \quad (77)$$

Величины k , L_s , L_m измеряются в диоптриях.

Из сказанного следует, что для получения качественного плоского изображения, необходимо устранить и астигматизм и кривизну поля. Это достигается подбором большого числа компонентов системы с учетом характера поверхностей и сортов оптического стекла.

Системы, в которых устранен астигматизм и кривизна поля, называются **анастигматами**.

Заметим, что для оптических систем, работающих совместно с глазом, полное устранение кривизны поля не является крайне необходимым: кривизна поля компенсируется кривизной сетчатки и аккомодацией глаза. Оптическая система, работающая совместно с глазом, дает практически качественное изображение, если кривизна поля не превышает 2 дп.

Фотографические объективы дают качественное изображение только при условии, что они анастигматы.

7. Дисторсия

Дисторсия — аберрация в оптических системах, при которой нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Происходить это может потому, что линейное увеличение в различных частях

изображения различно. Условие, при котором линейное увеличение по всему полю изображения одинаково, называется **условием ортоскопии**. Нарушение этого условия вызывает дисторсию. Характерным примером иска-

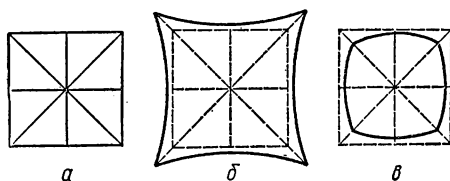


Рис. 70

жения изображения в результате дисторсии является искажение формы квадрата. На рис. 70, а показан вид квадрата, изображение которого получается с помощью оптической системы. Если система обладает дисторсией, изображение получается в виде, изображенном на рис. 70, б или 70, в. В первом случае дисторсию назы-

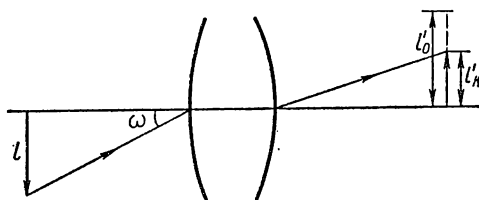


Рис. 71

вают **подушкообразной**, или **положительной**, во втором — **бочкообразной**, или **отрицательной**. Первые названия обусловлены формой искаженного изображения, вторые — тем, что величина фактического изображения больше теоретического на рис. 70, б и меньше — на рис. 70, в. Резкость изображения при дисторсии не нарушается.

Для выражения количественных характеристик дисторсии необходимо рассмотреть ход луча через оптическую систему при дисторсии. На рис. 71 луч от предмета входит в оптическую систему под углом ω к оптической оси. Если бы дисторсии не было, размер изображения l'_0 определился бы на основании формулы

линейного увеличения $\beta = \frac{l_0^*}{l}$; фактически размер изображения (для главного луча) получается l'_k .

Сравнение этих величин позволяет выразить абсолютную дисторсию:

$$\delta l' = l'_k - l'_{0r} \quad (78)$$

а выражение

$$\Delta = \frac{l'_k - l'_0}{l_0} \quad (79)$$

является относительной дисторсией. Относительная дисторсия обычно выражается в процентах.

Устранить дисторсию весьма трудно. В фотообъективах, геодезических приборах (там, где она особенно вредна) ее значение составляет приблизительно 0,5%.

8. Хроматизм положения

Напоминаем, что при прохождении белого света через трехгранную призму происходит дисперсия света: свет, преломляясь по-разному, в зависимости от величины показателей преломления, разлагается на составные цвета. В § 2 этой главы было показано, что отдельные части линзы можно рассматривать как трехгранные призмы, следовательно, дисперсия света происходит и тогда, когда он проходит через линзу. Разложение лучей белого света на составные части со смещением изображения в различных лучах спектра относительно друг друга называется **хроматической аберрацией**. Если луч белого света идет из бесконечности (параллельно оптической оси), проходя через оптическую систему и разлагаясь на составные цвета, он пересекает оптическую ось в различных точках. Это проявление хроматической аберрации называется **хроматизмом положения**. Поскольку это имеет место и для параксиальных лучей, возникает второе название этой аберрации — **хроматическая разность нулевых лучей** (рис. 72).

Количественная оценка хроматизма положения дается отрезком Δf между точ-

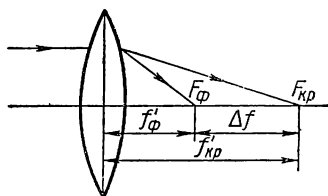


Рис. 72

ками пересечения с оптической осью красного и фиолетового лучей (крайних лучей видимой части спектра):

$$\Delta f = f_{кр} - f'_{\phi}. \quad (80)$$

Глаз воспринимает лучи спектра в пределах длин волн $\lambda_{кр} = 656,3$ нм и $\lambda_{\phi} = 486,1$ нм. В зависимости от условий работы оптической системы пределы длин волн для количественной оценки хроматизма положения могут быть взяты другие. Для собирающей линзы $\Delta f > 0$, для рассеивающей $\Delta f < 0$.

Хроматизм положения можно уменьшить подбором в систему в качестве компонентов нескольких собирающих и рассеивающих линз с разной степенью дисперсии. Процесс исправления хроматизма положения называется **ахроматизацией**. Оптические системы, в которых хроматизм положения частично устранен за счет совмещения фокусов каких-либо двух лучей, называются **ахроматическими**, или **ахроматами**. Если для двух лучей спектра хроматическая aberrация устранена (достигнута ахроматизация), то оставшийся спектр называется **вторичным спектром**. Если в оптической системе совпали три различных луча спектра, система называется **апохроматом**.

9. Хроматизм увеличения

Хроматизм увеличения состоит в том, что для различных цветов, на которые разлагается белый свет в оптической системе, бывает различное увеличение (рис. 73). Этот вид хроматической aberrации проявляется в изображении с окраской по контуру.

Количественная оценка хроматизма увеличения:

$$\Delta l' = l'_{\phi} - l'_{кр}. \quad (81)$$

Оптические системы, в которых уменьшены оба вида хроматической aberrации, называются **стабильно ахроматизированными**.

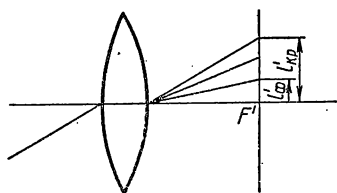
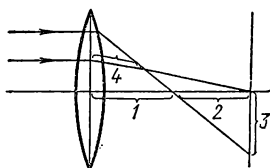


Рис. 73

Большинство оптических систем (в частности объективов) не ахроматизированы стабильно, но хроматические aberrации в них сведены до малых значений, не мешающих работе.

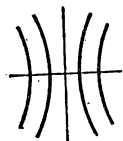
Контрольные вопросы

1. Какие лучи реальной оптической системы не дают aberrации?
 - 1) Параллельные главной оптической оси.
 - 2) Монохроматические.
 - 3) Нулевые.
 - 4) Главные.
2. Какая из перечисленных характеристик оптической системы может измениться за счет aberrаций?
 - 1) Величина апертурного угла.
 - 2) Разрешающая способность.
 - 3) Поле зрения.
 - 4) Светосила.
3. Каков результат сферической aberrации?
 - 1) Спектральная окраска контура изображения.
 - 2) Искажение изображения по форме.
 - 3) Различие фокусных расстояний для меридионального и сагиттального пучков.
 - 4) Образование пучка рассеяния.
4. Укажите по чертежу меру продольной сферической aberrации.



5. Укажите по чертежу к вопросу 4 меру поперечной сферической aberrации.
6. Укажите один из способов уменьшения сферической aberrации.
 - 1) Дифрагмирование.
 - 2) Применение монохроматического фильтра.
 - 3) Переход от визуального восприятия изображения к фотографированию.
 - 4) Работа в лучах, параллельных главной оптической оси.
7. В каком пучке лучей проявляется aberrация-кома?
 - 1) Параксиальном.
 - 2) Широком, параллельном главной оптической оси.
 - 3) Наклонном гомоцентрическом.
 - 4) Широком, наклонном к главной оптической оси.
8. Как проявляется aberrация-кома?
 - 1) Создается пучок рассеяния.

- 2) Искажаются поперечные и продольные размеры изображения.
- 3) Создается цветной контур изображения.
- 4) Возникает искривление изображения.
9. От чего зависит степень проявления аберрации-комы?
 - 1) От степени монохроматичности света.
 - 2) От ширины пучка.
 - 3) От угла наклона пучка.
 - 4) От степени отклонения от закона синусов.
10. Как проявляется аберрация «отступление от закона синусов»?
 - 1) Различное линейное увеличение при разных углах падения лучей в оптическую систему.
 - 2) Создание пучка рассеяния.
 - 3) Появление цветного контура изображения.
 - 4) Различие размеров изображения в меридиональной и сагитальной плоскостях.
11. Какое изображение возникает при астигматизме?
 - 1) Резкое в центре, нерезкое по краям.
 - 2) «Окрашенное» по контуру.
 - 3) Резкое, но искаженное по форме.
 - 4) Нерезкое, искаженное.
12. Какие недостатки изображения обусловлены аберрацией «кривизна поля»?
 - 1) Нерезкость изображения по всему полю.
 - 2) Нерезкость изображения по краям поля.
 - 3) Искажение изображения по форме.
 - 4) Изображение «окрашено» по контуру.
13. Какой из аберраций обусловлено искажение изображения сетки, показанное на рисунке?



- 1) Астигматизмом.
- 2) Сферической аберрацией.
- 3) Дисторсией.
- 4) Комой.

14. Какая из перечисленных аберраций искажает форму шкал и сеток?

- 1) Дисторсия.
- 2) Сферическая аберрация.
- 3) Хроматическая аберрация.
- 4) Астигматизм.

15. Какой из аберраций обусловлено искажение изображения равномерной шкалы, приведенное на рисунке?



- 1) Астигматизмом.
- 2) Дисторсией.
- 3) Сферической аберрацией.
- 4) Кривизной поля.

16. Найти продольную хроматическую aberrацию двояковыпуклой линзы $R_1 = R_2 = 8$ см, если показатели преломления красного и фиолетового лучей соответственно равны 1,5 и 1,8.

ГЛАВА VII

ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

1. Характеристики оптических стекол

Оптические детали, применяемые в оптических приборах, изготавливаются из специальных сортов стекла. Свойства оптического стекла зависят от его состава и способов обработки. Оптические стекла должны удовлетворять многим условиям, совокупность которых характеризует качество стекла и возможности его применения для различных оптических деталей, работающих как в обычных условиях, так и в условиях повышенных физико-химических требований. Основные характеристики оптических стекол касаются их дисперсионных свойств. Для этих характеристик выбираются три значения длин световых волн: два уже упоминавшихся — $\lambda_F = 486,1$ нм и $\lambda_C = 656,3$ нм, и третье $\lambda_D = 589,3$ нм (для желтого света) *. Этим длинам волн в оптических стеклах будут соответствовать показатели преломления n_F , n_G , n_D . В качестве самих характеристик эти показатели преломления используются следующим образом: одной из характеристик берут **показатель преломления n_D** , позволяющий определить середину пучка лучей при дисперсии;

$$n_F - n_G \quad (82)$$

— вторая характеристика, называемая **средней дисперсией**

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_G}, \quad (83)$$

является третьей характеристикой и именуется **коэффициентом дисперсии**, или **числом Аббе**. Значение показателя преломления n_D для оптических стекол лежит

* Индексы F , C и D соответствуют обозначениям соответствующих спектральных линий в спектре водорода.

в пределах от 1,45 до 2,0, а коэффициент дисперсии — от 70 до 18.

Оценку дисперсии света производят также по величине угла расхождения лучей за счет дисперсии. Пусть при переходе света из воздуха в какую-либо среду, для которой нужно оценить степень дисперсии, справедливо равенство $n \sin i = n' \sin i'$. Продифференцировав его по переменным n' и i' , получаем $dn' \sin i' + n' \cos i' di' = 0$. Отсюда $di' = -\frac{dn'}{n} \operatorname{tg} i'$. Величина угла di' характеризует степень дисперсии света в данной среде.

Прозрачность стекла — характеристика, определяемая коэффициентом светопоглощения, который представляет собой отношение светового потока белого света, поглощенного слоем стекла в 2 см, к световому потоку, упавшему на этот слой. Коэффициент светопоглощения для оптического стекла имеет значения от 0,015 до 0,004. Это высокая прозрачность, но для большинства оптических стекол прозрачность резко понижается в ультрафиолетовой части спектра.

На прозрачность стекла влияет **пузырность**. При варке стекла в его массе могут находиться пузырьки воздуха, которые остаются и просматриваются в готовом стекле. Если пузырьков мало, они практически не влияют на прозрачность стекла. Большое количество пузырьков в оптическом стекле не допускается. Среднее число пузырьков воздуха диаметром свыше 0,03 мм в одном килограмме оптического стекла лежит в пределах от 10 до 3000. В процессе варки стекло может также становиться оптически неоднородным. Это обуславливает так называемое **двойное лучепреломление**: луч света, входящий в стекло, разлагается на два луча, скорости распространения которых различны. Есть специальные оптические детали, где это свойство используется; для оптических стекол, назначение которых рассматривается, оно допустимо только в ограниченных пределах.

Следующая группа характеристик касается термических свойств стекла, т. е. его отношение к различным тепловым воздействиям. Это, прежде всего, **термическая устойчивость** — она характеризует способность стекла противостоять, не разрушаясь, резким изменениям температуры. Большинство оптических стекол терми-

чески неустойчивы. Они допускают изменение температуры только на 50—90 градусов. Специально изготовленные термически устойчивые стекла допускают изменение температуры на 200—300 градусов.

Теплопроводность определяет скорость прогревания стекла. Вообще у стекла теплопроводность малая по сравнению со многими другими материалами.

В ряде случаев необходимо две оптические детали термически «склеить». Этот процесс называется **спеканием**. **Температура спекания** — еще одна из характеристик оптического стекла.

Совместное действие оптических деталей, соединенных способом спекания или другими способами, требует, чтобы коэффициенты расширения различных сортов стекла мало отличались друг от друга. При изменении температуры в противном случае могут возникать трещины этих деталей. Таким образом, требуется еще одна термическая характеристика оптического стекла — **коэффициент линейного расширения**. Для оптических стекол он в пределах $30 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ — $110 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$.

Характеристики механических свойств стекла: прочность при сжатии, прочность при растяжении, хрупкость, твердость, относительная плотность.

Прочность при сжатии определяется силой нормального давления на образец. Она в пределах 490—1960 Па. **Прочность при растяжении** — от 34 до 83 Па. **Хрупкость** стекла определяет его сопротивление действию удара. Хрупкость всех стекол весьма высока, но специальной термической обработкой ее можно уменьшить в пять-шесть раз по сравнению со стеклом, подвергнутым обычной обработке.

Твердость стекла играет главную роль при его обработке (шлифовке). Для количественной оценки твердости используется величина относительной твердости: отношение объема сошлифованного стекла, твердость которого определяется относительно объема сошлифованного стекла определенной марки (как бы эталонного) при тех же условиях.

Химические свойства стекла характеризуют его устойчивость к воздействию атмосферных условий и различных химических веществ. Химическая устойчивость характеризуется двумя показателями: устойчивостью к влажной атмосфере и устойчивостью к пятнающим агентам.

По этим показателям стекла разделяются на несколько групп в зависимости от степени восприимчивости к соответствующему воздействию.

Все оптические стекла по химическому составу, показателю преломления и коэффициенту дисперсии имеют соответствующую маркировку, отражающую тип стекла. Например, ЛК — легкий крон, ТФ — тяжелый флинт и т. п. Кроме того, каждый тип стекла имеет несколько марок, обозначаемых порядковым номером. Например, БК-10 — баритовый крон марки 10. Зная марку стекла, можно по таблицам определить их характеристики, а можно, наоборот, по заданным необходимым характеристикам, с помощью таблиц определить марку стекла.

2. Некоторые сведения по технологии изготовления оптических стекол

Оптическое стекло варят в керамических горшках, которые выдерживают температуру до 1600°C . Сырьем для стекла является шихта, в состав которой входят стеклообразующие материалы, осветлители, красители и т. п.

В качестве стеклообразующих материалов используется кремнезем SiO_2 , окись калия K_2O , окись натрия Na_2O и др. (это основной стеклообразующий материал), а также окись алюминия Al_2O_3 , которая снижает коэффициент расширения, повышает химическую устойчивость и твердость; окись свинца PbO (повышает показатель преломления и снижает твердость стекла); окись бора B_2O_3 (снижает коэффициент термического расширения стекла и повышает его термическую и химическую устойчивость) и т. п.

Для изготовления оптических стекол применяют особо чистые сырьевые материалы, в которых содержание примесей не превышает сотых и даже тысячных долей процента. Материалы дозируются и перемешиваются в специальных смесительных барабанах.

Горшки для варки стекла помещаются в специальные печи; их нагревают до требуемой температуры и засыпают в них вначале битое стекло соответствующей марки, затем шихту. Все содержимое горшка тщательно перемешивают и варят при температуре $1200\text{--}1500^{\circ}\text{C}$ от 12 до 40 часов, в зависимости от марки стекла. В про-

цессе варки несколько раз берут пробы, по которым определяют различные характеристики будущего стекла.

После готовности стекла его выливают либо в специальные формы, либо на литейный стол; в первом случае после охлаждения получают стеклянные блоки массой от нескольких десятков до нескольких сотен килограммов, во втором — стеклянный лист.

Далее это сырьевое стекло размечают зубилом и раскалывают на прессе по заданным размерам или режут алмазной пилой на пластины необходимой толщины. Полученные куски стекла размягчают нагреванием и с помощью пресс-форм придают ему необходимую форму.

Окончательная обработка стекла состоит в его шлифовке и полировке с последующей проверкой специальными приборами качества выполнения механической и термической обработки.

Контрольные вопросы

1. Как называется характеристика оптического стекла $n_F - n_C$?

1) Средняя дисперсия.

2) Коэффициент дисперсии.

3) Число Аббе.

4) Величина, определяющая середину пучка лучей при дисперсии.

2. Что выражает приведенная формула

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}?$$

1) Коэффициент дисперсии.

2) Оптическую силу линзы.

3) Нулевой инвариант Аббе.

4) Скорость света в среде.

3. В каких пределах изменяется показатель преломления (n_D) оптических стекол?

1) 1,0—1,5.

2) 1,33—1,6.

3) 1,5—1,6.

4) 1,45—2,0.

4. В каких пределах колеблется коэффициент дисперсии оптических стекол?

1) 18—70.

2) 10—30.

3) 50—100.

4) 30—50.

5. Каков верхний допустимый предел коэффициента светопоглощения в оптических стеклах?

1) 0,04.

2) 0,004.

3) 0,015.

4) 0,025.

6. Каково предельное допустимое изменение температуры для обычных оптических стекол?

- 1) 30°.
 - 2) 200°.
 - 3) 90°.
 - 4) 150°.
7. Сколько механических характеристик оптического стекла рассмотрено в этой главе?
- 1) 3.
 - 2) 5.
 - 3) 7.
 - 4) 2.
8. В чем заключается окончательная обработка оптического стекла?
- 1) В придании ему формы.
 - 2) Резке.
 - 3) Анализе его свойств.
 - 4) Шлифовке и полировке.

Г Л А В А VIII

ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

1. Строение глаза

Оптическая система глаза является самой важной оптической системой из всех существующих. Глаз позволяет нам не только воспринимать внешние черты предметов, 90% всей воспринимаемой нами информации проходит через зрительный канал. Многие оптические приборы работают совместно с глазом, и в этих случаях глаз становится частью сложной оптической системы. По принципу действия глаз прост; по своим функциональным свойствам и возможностям — это сложнейшая система.

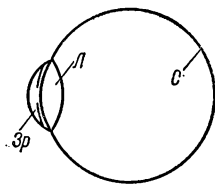


Рис. 74

Глаз представляет собой камеру приблизительно шаровидной формы (рис. 74). В передней его части расположен светопреломляющий элемент — хрусталик (линза) *Л*; дно глаза — световоспринимающая часть — сетчатая оболочка, сетчатка, или ретина, — *С*. Роль диафрагмы выполняет отверстие в радужной оболочке — зрачок *Зр*. Это фактически апертурная диафрагма глаза. Таковы основные элементы глаза как оптической системы.

Однако строение глаза перечисленными элементами не ограничивается (рис. 75). Внешняя поверхность глаза в ее белой части называется белковой оболочкой, или

склерой — *Б*. В передней части склера переходит в твердую прозрачную выпуклую **роговую оболочку**, или **роговицу** *Р*. Передняя поверхность склеры (исключая роговицу) покрыта тонкой **слизистой оболочкой** — **конъюнктивой** *К*, которая переходит на внутреннюю поверхность века.

На границе перехода склеры в роговицу к склере с помощью **круговой связки** *КС* прикреплена тонкая про-

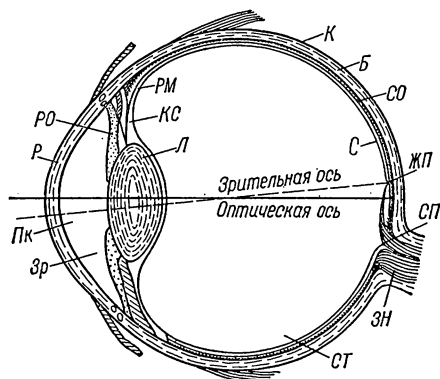


Рис. 75

зрачная сумка, в которой находится хрусталик. В основании круговой связки находится **ресничная мышца** *РМ*, кольцом охватывающая хрусталик.

Под склерой расположена **сосудистая оболочка** *СО*. В передней части глаза она отделяется от склеры и переходит в **радужную оболочку** *РО*. Сетчатая оболочка *С* прилегает к сосудистой оболочке в ее задней части.

Со стороны, противоположной хрусталику, в глаз входит **зрительный нерв** — *ЗН*. В месте соединения с глазом зрительного нерва на сетчатке расположено **слепое пятно** — *СП*, а над слепым пятном расположено **желтое пятно** — *ЖП*.

Строение сетчатки весьма сложно: она состоит из 10 слоев. В ней расположены световоспринимающие элементы — **колбочки** (их около $7 \cdot 10^6$) и **палочки** (около $13 \cdot 10^7$). Первые имеют грушевидную, вторые — цилиндрическую форму.

Весь внутренний объем глаза заполнен прозрачной жидкостью, которая именуется **стекловидным телом** —

СТ. Передняя камера глаза — пространство между роговицей и хрусталиком — также заполнена прозрачной жидкостью несколько иных свойств.

2. Оптическая система глаза

Глаз представляет собой центрированную оптическую систему, оптическая ось которой проходит через геометрические центры роговицы, зрачка и хрусталика. Кроме того, имеется **зрительная ось**, проходящая через центр хрусталика и желтого пятна, она определяет направление рассматривания предмета. Между оптической и зрительной осями угол 5° . Основными преломляющими средами глаза являются роговица и хрусталик. Оптическая сила роговицы приблизительно 43 дп, хрусталика — 18 дп. Кроме того, преломление света происходит и в передней камере, и в стекловидном теле; их оптическая сила вместе составляет около 5 дп.

Очевидно, что даже при нормальном зрении эти и другие характеристики глаза имеют индивидуальные особенности, но если глаз работает совместно с оптическим прибором, для расчета последнего необходимо задаться какими-то определенными параметрами, характеризующими свойство глаза. Принято в этом случае пользоваться некоторой усредненной моделью глаза, которую называют **приведенный глаз**. Таких моделей известно несколько, по характеристикам глаза они мало отличаются друг от друга. Ниже приводятся данные наиболее распространенной модели:

1. Преломляющая система глаза рассматривается как тонкая линза (главные точки совпадают);

2. Оптическая система заменяется одной преломляющей поверхностью;

3. Оптическая сила глаза 58, 48 дп;

4. Длина глаза 22 мм;

5. Радиус кривизны преломляющей поверхности 5,7 мм;

6. Показатель преломления среды 1,33;

7. Переднее фокусное расстояние 17,1 мм;

8. Заднее фокусное расстояние 22,8 мм;

9. Узловые точки не совпадают с главными, но ввиду близости их расположения их объединяют в один оптический центр;

10. Радиус кривизны сетчатки 9,7 мм.

Графически система глаза, рассматривающего бесконечно удаленные предметы, показана на рис. 76,

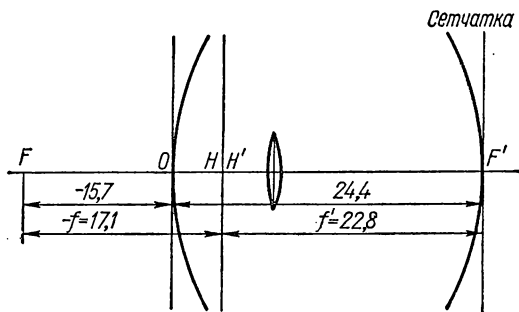


Рис. 76

где точка O соответствует вершине роговицы.

Построение изображения в приведенном глазе производится так, как в одиночной линзе. На рис. 77 показано такое построение для случая, когда предмет расположен на значительном расстоянии от глаза. Как видно,

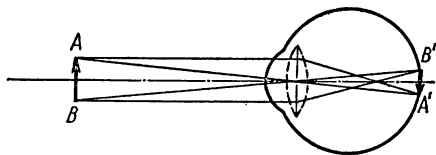


Рис. 77

изображение получилось на сетчатке глаза; оно будет резким и вызовет соответствующее зрительное ощущение. Механизм перехода от изображения на сетчатке к зрительному восприятию еще до конца не изучен, принцип его состоит в том, что окончания зрительного нерва определенным образом реагируют на ту химическую реакцию, которая происходит под действием света в палочках и колбочках.

3. Аккомодация

Аккомодация — свойство глаза приспособливаться к рассматриванию предметов, расположенных на различных расстояниях от глаза. Это свойство обусловлено

тем, что хрусталик может менять свою форму, меняя при этом оптическую силу. Если глаз находится в спокойном состоянии («покой аккомодации»), ресничная мышца расслаблена, хрусталик имеет большой радиус кривизны (он уплощен) и его оптическая сила наименьшая. Этому состоянию соответствует рассматривание сильно удаленных предметов.

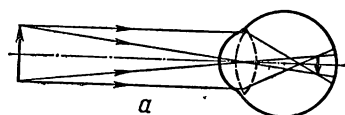
При рассматривании близких предметов ресничная мышца сокращается, хрусталик становится более выпуклым, а следовательно, оптическая сила его увеличивается. Происходит это рефлекторно (без участия сознания). В результате различной степени напряжения ресничной мышцы и изменения оптической силы хрусталика даваемое им изображение оказывается на сетчатке и становится резким.

Пронаблюдать это свойство легко на простом опыте: если в поле зрения глаза поместить предмет близко от глаза и одновременно иметь возможность видеть сильно удаленные предметы, то при рассматривании близкого предмета нерезко воспринимаются предметы удаленные; при рассматривании удаленного предмета нерезко воспринимается близкий. Пределы аккомодации нормального глаза от 14 см (приблизительно) до ∞ . Ближний предел аккомодации называют **ближней точкой ясного зрения**, дальний — **дальней точкой ясного зрения**. **Расстояние наилучшего зрения** для нормального глаза принято считать 25 см.

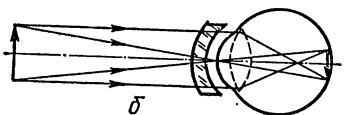
Индивидуальные свойства аккомодации глаза проявляются, так называемой, близорукостью (миопия) и дальнорукостью (гиперметропия). Эти свойства бывают как врожденными, так и возникшими на каком-то этапе жизни человека. Иногда близорукость и дальнорукость считают заболеваниями глаз. Действительно, и то и другое может наступить в результате болезни, но сами эти свойства глаза не являются болезнью, а лишь отклонениями оптической системы глаза от того, что принято считать нормой. Поэтому и близорукость и дальнорукость, как правило, учитываются при проектировании оптических систем.

Проявляется близорукость в том, что при рассматривании удаленных предметов изображение оказывается не на сетчатке, а ближе (рис. 78, а) и, следовательно, воспринимается нерезким.

Ближняя точка при близорукости оказывается ближе 14 см, а дальняя приобретает те или иные конечные значения; расстояние наилучшего зрения становится меньше 25 см. Причиной этого может быть либо удлинённая форма глаза, либо высокая преломляющая способность хрусталика. Исправить близорукость можно при помощи рассеивающих линз (очков) рис. 78, б, а также изменением в расположении элементов оптической системы,

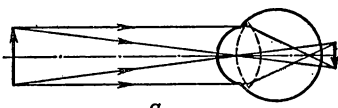


а

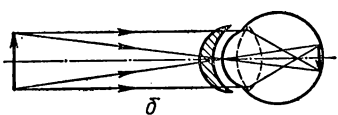


б

Рис. 78



а



б

Рис. 79

работающей совместно с глазом. Например, перемещением окуляра микроскопа относительно объектива.

Дальнозоркость имеет противоположное проявление: изображение близких предметов, вследствие недостаточной преломляющей способности оптической системы глаза или укороченной его формы, оказывается за сетчаткой и воспринимается нерезко.

В этом случае дальняя точка может соответствовать бесконечности, а ближняя удаляется на расстояние больше 14 см; расстояние наилучшего зрения становится больше 25 см.

На рис. 79, а показано получение изображения при дальнозоркости и действие собирающей линзы (очков) для устранения дальнозоркости (рис. 79,б). Исправление дальнозоркости, как и близорукости, возможно изменением расположения элементов оптической системы, работающей совместно с глазом.

4. Адаптация глаза

Важным условием нормальной работы глаза является достаточная освещённость рассматриваемых предметов, но эта освещённость практически меняется

в весьма значительных пределах (см. гл. IV § 2). Глазу приходится приспосабливаться к работе как в условиях ничтожно малой освещенности, так и при огромной освещенности предметов в условиях солнечного света.

Для глаза существуют пределы восприятия световой энергии: **нижний**, или **абсолютный**, и **верхний порог восприятия**. Они различаются приблизительно в 10^{12} раз. Нижний составляет $2 \cdot 10^{-17}$ Дж/с на площадь зрачка глаза; верхний — 10^{-5} Дж/с. В таком широчайшем диапазоне световой энергии глаз приспосабливается к рассматриванию предметов. Эта приспосабливаемость глаза называется **адаптацией**.

Адаптация глаза происходит двояко: за счет изменения диаметра зрачка и за счет биохимических процессов, происходящих в сетчатке.

Основное назначение зрачка глаза как его апертурной диафрагмы — изменять величину светового потока, проникающего в глаз, но, меняясь от 2 до 8 мм в диаметре, зрачок не может регулировать свет, проникающий в глаз в необходимых пределах. В процессе адаптации в регулировании световой энергии, вызывающей зрительные ощущения, зрачок количественно играет второстепенную роль. Главную роль в этом процессе играет переход от действия рецепторов дневного зрения (колбочек) к рецепторам сумеречного зрения (палочкам) и действие особого вещества — темного пигмента в слоях сетчатки.

Если глазу после яркого света приходится рассматривать предметы в условиях плохой освещенности, то в системе глаза происходит процесс, называемый **темновой адаптацией**. При темновой адаптации увеличивается диаметр зрачка глаза (этот процесс протекает за доли секунды), вместо рецепторов дневного зрения — колбочек — вступают в действие палочки, в которых происходит биохимическая реакция освобождения палочек от защитного темного пигмента, повышается светочувствительность самих палочек за счет изменения концентрации зрительного пурпура. Процесс темновой адаптации длится около часа, но практически время, необходимое для нормального зрения в условиях плохой освещенности, составляет 20—30 минут.

Процесс **световой адаптации**, т. е. приспосабливаемости глаза к работе в условиях сильной освещенности,

происходит в обратном порядке и длится лишь несколько минут.

Заметим, что процесс адаптации глаза в области явлений, происходящих в сетчатке, так же как природа явлений, связанных с переходом от изображения на сетчатке глаза к восприятию светового образа, окончательно не изучены. Описанный выше процесс адаптации соответствует современным представлениям об этом процессе, но описание это несколько схематично и не претендует на научную полноту.

Пользуясь приведенной схемой, заметим далее, что темный пигмент, защищающий световоспринимающие элементы сетчатки, играет роль темного светофильтра, который поглощает часть светового потока, дошедшего до сетчатки. Если поток световой энергии, доходящей до зрачка глаза, превосходит верхний порог восприятия (от снега в солнечный день, белого песка и бликов солнца на воде в южных широтах и т. п.), глаз приходится защищать искусственным светофильтром в виде очков с темными стеклами.

5. Спектральная чувствительность глаза

Сказанное в предыдущем параграфе касалось белого света без подразделения его на составные цвета. Как известно, от источника света свет распространяется в более широком диапазоне волн, чем его воспринимает глаз: кроме видимого света источник посылает ультрафиолетовое и инфракрасное излучение. Глаз воспринимает свет, имеющий длины волн больше длин волн ультрафиолетовых лучей и меньше инфракрасных. Это обстоятельство имеет свои объяснения.

При рассмотрении оптических стекол говорилось, что они в большинстве своем практически не пропускают ультрафиолетовые лучи. Оказывается, таким же свойством обладает и хрусталик глаза. Это свойство хрусталика связано с тем, что ультрафиолетовые лучи оказывают сильное химическое и биологическое действие и, попав на сетчатку, могли бы оказать на нее разрушающее действие.

Инфракрасные лучи тоже не попадают на сетчатку, но если бы они попали, то никакого эффекта не вызвали бы потому, что это лучи тепловые и в диапазоне

температур человеческого тела они не отличаются от тех условий, в которых пребывает сам глаз. При более высоких температурах они также не могут вызвать зрительных ощущений в сетчатке по своим волновым свойствам.

В том сравнительно узком диапазоне света, который воспринимает глаз, его чувствительность оказывается различной для разных цветов спектра. Она характеризуется по-разному для дневного и сумеречного зрения

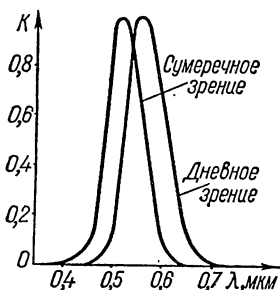


Рис. 80

(рис. 80). Максимум спектральной чувствительности глаза для дневного зрения приходится на 555 нм (правый график); для сумеречного — на 510 нм (зеленый цвет). Смещение максимума спектральной чувствительности глаза при переходе от дневного к сумеречному зрению называется явлением Пуркинье.

Графики, приведенные на рис. 80, показывают, что и диапазон световых волн при дневном и сумеречном восприятии разный: в первом случае он смещается в сторону более длинных волн, во втором — в противоположную сторону.

Используя в оптических приборах цветовые эффекты (например, при демонстрации цветных диапозитивов, кинофильмов), следует иметь в виду, во-первых, различное объективное действие различных цветов на сетчатку глаза, а также то обстоятельство, что разные цвета воспринимаются по-разному психологически: одни цвета возбуждают, другие успокаивают и т. п. Эти действия, однако, скорее субъективны.

6. Контрастная чувствительность глаза, острота зрения, сохранение зрительного впечатления

Восприятие глазом предмета или его изображения зависит прежде всего от угловых размеров и освещенности самого воспринимаемого предмета и изображения, но весьма важную роль в этом процессе играет различие яркости рассматриваемого объекта и фона, на котором он расположен. Различие яркости рассматриваемого объекта и фона характеризует контрастность объекта

по отношению к фону. Если яркость объекта и фона одинакова, то объект сливается с фоном и не воспринимается глазом (это свойство глаза использовано в работе фотометров для определения силы света).

Наименьший контраст, воспринимаемый глазом, называется пороговым. **Пороговый контраст** — это отношение минимальной разности яркостей предмета и фона ΔB к яркости фона B_{Φ} .

Величина, обратная пороговому контрасту $\frac{B_{\Phi}}{\Delta B}$, называется **контрастной чувствительностью** глаза. Она возрастает при увеличении яркости фона, достигая максимума при $B_{\Phi} = 130\text{—}640$ нт. Контрастная чувствительность глаза приблизительно равна 500. При контрастности выше пороговой глаз способен различать две близкие точки предмета раздельно при условии, что их изображение приходится не менее чем на два световоспринимающих элемента сетчатки. Наименьший угол α , под которым видны раздельно две точки, принимается приблизительно равным $60''$. Этот угол называется **разрешающей способностью** глаза, или **разрешающей силой**, а также **остротой зрения**.

Величину угла α находим в результате следующего расчета:

$$\alpha = \frac{d}{f'} , \quad (84)$$

где d — диаметр колбочки, f' — заднее фокусное расстояние глаза, $\alpha = \frac{0,006 \cdot 2,06 \cdot 10^5}{22,8} = 54'' \approx 60''$ ($2,06 \times 10^5$ — коэффициент перевода результата в угловые секунды).

Острота зрения может меняться в зависимости от условий, при которых рассматриваются предметы. Например, при работе с обычными оптическими приборами массового пользования острота зрения принимается равной $120''$, при проектировании высококачественных приборов добиваются ее величины равной $30''$, а при рассматривании изображений на экране острота зрения оказывается равной $2\text{—}3'$.

Острота зрения максимальна при диаметре зрачка $3\text{—}5$ мм, при высокой степени контрастности (черное изображение на белом фоне); она повышается до $10\text{—}15''$ при параллельности линий изображений (предмета);

в зависимости от спектрального состава света разрешающая способность увеличивается и становится максимальной в зоне желтого света. (Разрешающая способность тем больше, чем меньше угол α).

Поле зрения глаза, пространство, воспринимаемое при неподвижном глазе, оказывается равным 125° по вертикали и 150° по горизонтали. Оно несимметрично относительно горизонтали и вертикали: книзу от горизонтали — 70° , кверху — 55° ; к носу — 60° , к виску — 90° . При движении глаза поле зрения значительно расширяется.

Рассмотрим еще одно интересное свойство глаза. Когда созданы все условия для получения зрительного образа и зрительное воздействие от этого образа внезапно прекращено, зрительный образ не исчезает мгновенно, он сохраняется 0,05—0,2 с. Заменить это свойство глаза крайне трудно из-за малой продолжительности сохранения зрительного впечатления, но при показе одинаковых или мало отличающихся объектов через короткие промежутки времени они воспринимаются как слитное изображение одинаковой яркости. Частота показа отдельных изображений, при которой глаз воспринимает их с неизменной яркостью (не воспринимая промежутков, в которых показ отсутствует), называется **критической частотой**. Эта частота бывает разной в условиях различной освещенности и контрастности и колеблется приблизительно в интервале 10—40 Гц.

Эффект сохранения зрительного впечатления используется в кинематографии: изображение в кино, состоящее из отдельных кадров, воспринимается как слитное.

7. Особенности зрения двумя глазами

Известно, что человек может приблизительно, «на глаз», определять расстояние до рассматриваемых предметов. Делать это можно двояко: либо сравнивая расположение рассматриваемого предмета с положением некоторого ориентира, расстояние до которого известно, либо (если такого ориентира нет) определить расстояние до предмета просто посмотрев на предмет. Первое можно сделать, рассматривая предмет обоими глазами или одним глазом; для определения расстояния без ориентира необходимо совместное действие обоих глаз.

При рассматривании предмета обоими глазами зрительные оси глаз располагаются под некоторым углом друг к другу. Этот угол называется **углом конвергенции** (рис. 81). Угол конвергенции может меняться от нуля (при рассматривании далеких предметов) до 32° (максимальный угол конвергенции).

Если оба глаза сосредоточены на рассматривании одного и того же предмета, изображения в обоих глазах

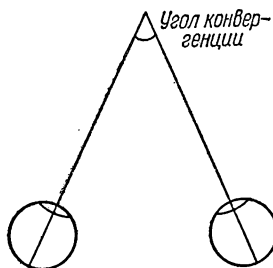


Рис. 81

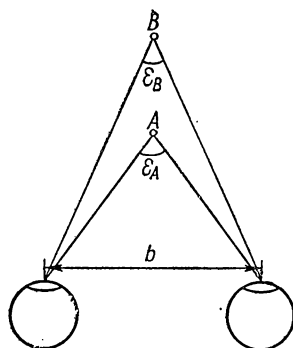


Рис. 82

возникают в соответственных точках сетчатки и тогда изображения воспринимаются как единый зрительный образ. Такое зрение называется **бинокулярным**.

При бинокулярном зрении оба глаза одного индивидуума воспринимают один предмет несколько по-разному, как бы с двух разных сторон. С изменением расстояния до рассматриваемого объекта и, следовательно, угла конвергенции, восприятие предмета каждым глазом меняется. За счет этого возникает **стереоскопический эффект** — объемное восприятие предметов и представление о степени удаленности предметов от наблюдателя.

Расстояние между центрами зрачков глаз одного человека называется **глазным базисом**. У различных взрослых людей глазной базис меняется в пределах от 56 до 74 мм. Средним значением глазного базиса принимается 65 мм. Угол, под которым из данной точки предмета виден глазной базис, называется **параллактическим углом**.

Когда рассматриваются разноудаленные точки, меняется величина параллактического угла ϵ (рис. 82). Разность значений параллактического угла разноудаленных

точек $\Delta\varepsilon = \varepsilon_B - \varepsilon_A$ называется бинокулярным параллаксом, он выражается формулой

$$\Delta\varepsilon = \frac{b\Delta R}{R^2}, \quad (85)$$

где b — глазной базис, R — расстояние до дальней из рассматриваемых точек по направлению линии зрения, ΔR — разность расстояний между рассматриваемыми точками по линии зрения.

Наблюдатель может различать расстояния при минимальном значении $\Delta\varepsilon_{\min} = 10''$, это разрешающая способность стереоскопического зрения.

Максимальное значение R_{\max} , при котором наблюдатель еще может различать расстояния между предметами, называется радиусом стереоскопического зрения и рассчитывается по формуле

$$R_{\max} = \frac{b}{\Delta\varepsilon_{\min}}; \quad (86)$$

$$R_{\max} = \frac{0,065}{4,9 \cdot 10^{-5}} = 1320 \text{ м.}$$

Как видно из формулы (86), R_{\max} зависит от величины глазного базиса. Если создать оптическую систему, которая бы обладала большим базисом и посылала бы изображения в оба глаза, то для глаз, работающих совместно с такой системой, радиус стереоскопического зрения мог быть значительно увеличен. Такой принцип используется в некоторых типах дальнометров.

8. Аберрации глаза и дефекты зрения

Нормальный глаз, зрачок которого напоминает по форме линзу и выполняет ее функции, не обладает аберрациями, столь характерными для линзы.

Сферическая аберрация не проявляется потому, что глаз работает в области, близкой к параксиальной; хроматическая аберрация не ощущается из-за того, что глаз работает наиболее интенсивно в довольно узкой части спектра (см. рис. 80); астигматизма нет, так как глаз всегда ориентируется в направлении рассматриваемых объектов и работает в центральных лучах; кривизна поля компенсируется кривизной сетчатки и аккомодацией и т. п. Однако при отклонении от нормы хрусталик может

давать aberrацию и вызываемый ею дефект зрения. Мы говорим в единственном числе, так как из всех aberrаций для хрусталика чаще всего проявляется астигматизм. Он обусловлен искажением формы хрусталика или поверхности роговицы. Если астигматизм проявляется в одной из взаимно перпендикулярных плоскостей, он называется простым и его легко устранить с помощью очков с цилиндрической линзой (рис. 83).

При сложном астигматизме глаза (нарушение изображения на сетчатке в двух плоскостях) он может быть скомпенсирован линзами сложной формы поверхности.

Что касается близорукости и дальнозоркости, о которых говорилось в § 3, то они также являются дефектами зрения, но не искажающими изображения, поэтому мы расцениваем их лишь как изменение пределов работы глаза по аккомодации, а не как существенный дефект оптической системы глаза: при близорукости и дальнозоркости глаз может полноценно работать в сочетании с оптическими приборами, а при наличии очков нормально работать во всех зрительных ситуациях.

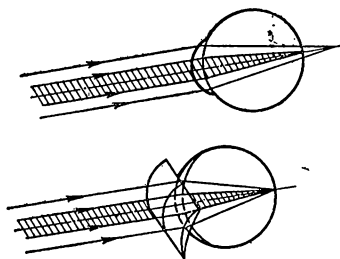


Рис. 83

Контрольные вопросы

1. Какую линию называют зрительной осью глаза?
 - 1) Соединяющую центры зрачка и хрусталика.
 - 2) Соединяющую центр хрусталика и слепое пятно.
 - 3) Проходящую через центр желтого пятна и заднюю узловую точку глаза.
 - 4) Проходящую через передний и задний фокусы хрусталика.
2. Что является диафрагмой глаза?
 - 1) Радужная оболочка.
 - 2) Роговица.
 - 3) Хрусталик.
 - 4) Сосудистая оболочка.
3. Какая часть сетчатки является участком наиболее ясного видения?
 - 1) Место входа зрительного нерва.
 - 2) Центр сетчатки.
 - 3) Край желтого пятна.
 - 4) Центр желтого пятна.

4. В чем сущность явления «аккомодация глаза»?
 - 1) Приспособление глаза к условиям освещенности.
 - 2) Способность глаза различать расстояния до предметов.
 - 3) Изменение оптической силы хрусталика.
 - 4) Переход от ночного к дневному зрению.
5. На каком расстоянии (теоретически) находится дальняя точка ясного зрения нормального глаза?
 - 1) 100 м.
 - 2) 1300 м.
 - 3) ∞ .
 - 4) 250 м.
6. Какова расчетная величина расстояния наилучшего зрения для нормального глаза?
 - 1) 140 м.
 - 2) 0,25 м.
 - 3) 0,5 м.
 - 4) 400 м.
7. Какова расчетная величина разрешающей способности глаза?
 - 1) 60".
 - 2) 120".
 - 3) 140".
 - 4) 30".
8. Что такое острота зрения?
 - 1) Наименьший угол, под которым глаз может отметить раздельное положение двух близко расположенных точек.
 - 2) Разность расстояний, при которых отчетливо воспринимается различие расстояний между предметами.
 - 3) Наименьшая разность параллактических углов.
 - 4) Величина, обратная разрешающей способности.
9. В чем суть адаптации глаза?
 - 1) Приспособление глаза к условиям освещенности.
 - 2) Способность глаза различать расстояния до предметов.
 - 3) Изменение оптической силы хрусталика.
 - 4) Изменение остроты зрения.
10. Что достигается за счет бинокулярного эффекта?
 - 1) Увеличение остроты зрения.
 - 2) Увеличение области аккомодации.
 - 3) Определение расстояния до наблюдаемого объекта.
 - 4) Увеличение расстояния наилучшего зрения.
11. Какова разрешающая способность стереоскопического зрения?
 - 1) 10".
 - 2) 5".
 - 3) 30".
 - 4) 15".
12. Каков радиус стереоскопического зрения в метрах, если глазной базис равен 65 мм, а разрешающая способность стереоскопического зрения 10"?
 - 1) 65 м.
 - 2) 1320 м.
 - 3) 670 м.
 - 4) 1540 м.

ГЛАВА IX

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ПРИБОРАХ И АППАРАТАХ

1. Общие сведения

Вся информация, изложенная в предыдущих главах, имеет единственное назначение: помочь читателю разобраться в работе оптических приборов и аппаратов, ис-

пользуемых для конкретных практических целей. Однако оптических приборов и аппаратов в настоящее время такое огромное количество, что для описания их конструкций, имеющих только одно назначение (фотографирование, проектирование изображений, измерение расстояний и т. п.) потребуется отдельная книга. Мы рассмотрим лишь примеры применения оптических систем в приборах и аппаратах.

Материал этой главы не претендует на описание оптических устройств даже выборочно, но рассмотрев отдельные примеры практического применения оптических систем, читатель легко сможет ориентироваться в конструкции конкретного прибора или аппарата, которыми ему придется пользоваться практически.

2. Лупа, микроскоп, телескоп

Общеизвестно, что собирающая линза или определенная система линз позволяют видеть предметы увеличенными. Лупа, микроскоп и телескоп — оптические приборы, в которых используются эти свойства линз.

Лупой называется положительная линза или система линз, предназначенная для визуального рассмотрения предмета, расположенного в передней фокальной плоскости этой линзы или системы линз.

Микроскоп и зрительная труба (телескоп) — обычно двухкаскадные системы (состоящие из объектива и окуляра). Рассматривая с помощью микроскопа мелкие предметы, их располагают непосредственно вблизи переднего фокуса объектива, а при помощи зрительной трубы рассматриваются крупные, но удаленные предметы, которые находятся на расстоянии, значительно превышающем двойное фокусное расстояние объектива прибора (условно в бесконечности).

Эффект увеличения в названных приборах достигается принципиально по-разному. Рассмотрим, как это происходит в каждом приборе.

Как уже говорилось, разрешающая способность глаза — $1'$. Следовательно, если две точки предмета находятся по отношению к глазу под меньшим углом зрения, они сливаются в одну и раздельно их увидеть нельзя. Чтобы увеличить угол зрения, под которым рассматриваются эти точки предмета, предмет надо приблизить

к глазу. Но если линейное расстояние между точками столь мало, что для увеличения угла зрения между ними на величину больше $1'$ их необходимо приблизить к глазу на расстояние менее 14 см (ближняя точка ясного зрения для нормального глаза), то рассмотреть их раздельно невооруженным глазом все же не удастся.

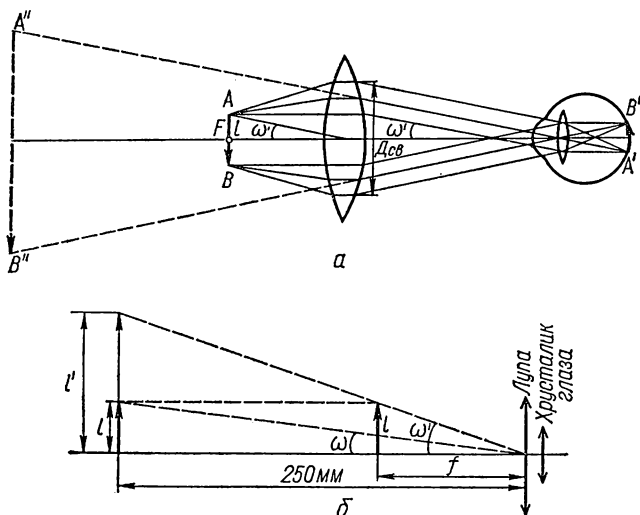


Рис. 84

Лупа, не меняя угла зрения, под которым рассматривается предмет, «отодвигает» изображение предмета, расположенного ближе ближней точки ясного зрения глаза, на расстояние наилучшего зрения (рис. 84), позволяя, тем самым, глазу видеть раздельно две точки предмета под тем достаточно большим углом (более $1'$), который обеспечен приближением предмета к глазу.

Из сказанного следует, что при близорукости, когда ближняя точка менее 14 см, глаз при рассматривании мелких предметов не нуждается в применении лупы чаще, чем нормальный глаз. И действительно, при близорукости люди не пользуются лупой во многих случаях, когда для нормального глаза лупа необходима.

Ход лучей в оптической системе микроскопа показан на рис. 85.

Объектив микроскопа обеспечивает получение дейст-

вительного обратного увеличенного изображения в передней фокальной плоскости окуляра, а окуляр работает совместно с глазом по тому же принципу, что и лупа.

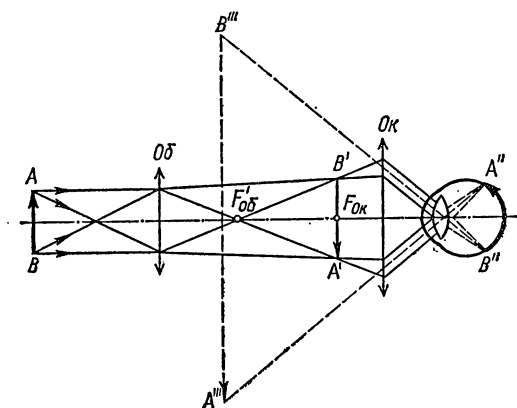


Рис. 85

Для оптических систем зрительных труб (телескопических систем) характерно, что объектив этих систем дает уменьшенное действительное обратное изображение пред-

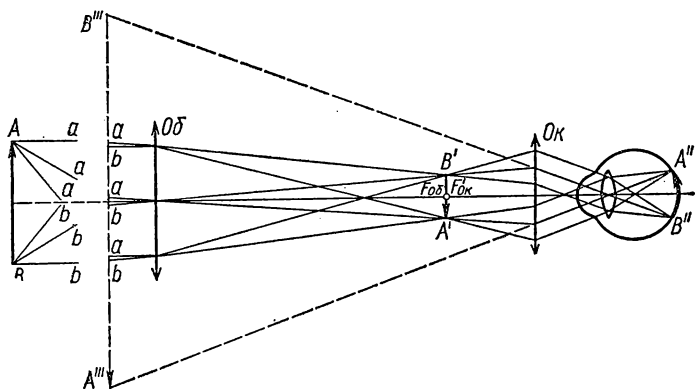


Рис. 86

мета, которое рассматривается с помощью окуляра, действующего также по принципу лупы (рис. 86).

Для определения свойств оптических приборов используются следующие характеристики: видимое

увеличение, поле зрения, светосила, разрешающая способность, глубина резкости и другие.

Заметим, что перечисленные характеристики применительно к разным видам оптических приборов имеют различное значение и неодинаково выражаются. Так, характеризуя свойства лупы, обычно пользуются только первыми двумя характеристиками, считая три последних несущественными.

Из рис. 84,а видно, что в пространство изображений лупы лучи выходят параллельным пучком. От такого пучка лучей изображения получить нельзя, но глаз может воспринимать изображение в параллельных лучах, более того, такое восприятие изображения наиболее благоприятно для глаза — он работает без напряжения ресничных мышц.

Как уже говорилось, лупа не увеличивает угла зрения, под которым рассматривается предмет, но если предмет из того положения (той плоскости), в котором он располагается при рассматривании с помощью лупы, переместить в плоскость наилучшего зрения, где глаз видит изображение (рис. 84, б), то предмет по отношению к глазу будет виден под углом ω , а его изображение — под углом ω' . Отношение тангенсов угла, под которым видно изображение при помощи лупы ω' , и угла, под которым был бы виден предмет в плоскости изображения ω , является одной из двух основных характеристик лупы — видимым увеличением $\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega}$.

Поскольку плоскость, в которой расположено изображение, находится на расстоянии 250 мм от глаза, то $\operatorname{tg} \omega = \frac{l}{250}$, $\operatorname{tg} \omega'$ обратно пропорционален f' , а значит, видимое увеличение лупы

$$\Gamma = \frac{250}{f'} . \quad (87)$$

Поле зрения лупы ($2l$) — вторая ее основная характеристика.

Если $D_{\text{св}}$ — световой диаметр лупы (рис. 84,а), а ω' — наибольший допустимый угол в пространстве изображений, то поле зрения лупы

$$2l = D_{\text{св}} - D_{\text{гл}}, \quad (88)$$

где $D_{\text{гл}}$ — диаметр зрачка глаза.

Используя в конструкциях луп две и более линзы, достигают усиления кратности увеличения и уменьшения aberrаций. Так, если однолинзовая лупа позволяет получать кратность увеличения до $7\times$ со значительными проявлениями aberrаций, то многолинзовые лупы дают кратность увеличения до $40\times$ и в зависимости от числа и формы линз бывают апланатическими и астигматическими.

Основными оптическими характеристиками микроскопа являются: видимое увеличение, поле зрения и числовая апертура.

Поскольку микроскоп — двухкасная оптическая система, **видимое увеличение микроскопа** определяется произведением линейного увеличения предмета объективом и видимого увеличения окуляра:

$$\Gamma = \beta_{об} \Gamma_{ок}. \quad (89)$$

Видимое увеличение окуляра, действующего как лупа, на основании формулы (87) можно представить как $\Gamma_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}}$; а при подстановке этого выражения в формулу (89) получим видимое увеличение микроскопа:

$$\Gamma = \frac{250}{f'_{ок}} \cdot \beta_{об}. \quad (90)$$

Поле зрения микроскопа определяется диаметром круга в пространстве предметов, изображение которого совпадает с полевой диафрагмой прибора $2l'$, располагаемой в передней фокальной плоскости окуляра. Отношение $\frac{2l'}{2l} = \beta$ есть не что иное, как линейное увеличение объектива для максимального по линейным размерам отрезка l , видимого в микроскоп. Следовательно, поле зрения микроскопа

$$2l = \frac{2l'}{\beta}, \quad (91)$$

а поскольку из формулы (90) $f'_{ок} = \frac{250\beta}{\Gamma}$, то величина поля зрения микроскопа

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} \omega'}{\Gamma}. \quad (92)$$

Понятие «числовая апертура», являющееся третьей основной характеристикой микроскопа, рассмотрено в главе V. У объективов микроскопов апертурной диафрагмой является оправа одной из последних линз или диафрагма, расположенная вблизи заднего фокуса. Следовательно, выходным зрачком объектива будет либо

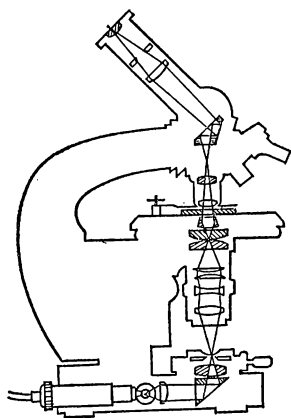


Рис. 87

изображение оправы линз, полученное в результате действия последующих линз объектива, либо оправа последней линзы, либо сама диафрагма. Соответствующие расчеты показывают, что диаметр выходного зрачка микроскопа

$$D_{\text{вых.зр}} = \frac{500A}{\Gamma}, \quad (93)$$

где A — числовая апертура объектива. Следовательно, диаметр выходного зрачка микроскопа прямо пропорционален числовой апертуре и обратно пропорционален видимому увеличению микроскопа.

Светосилой оптического прибора называется отношение освещенности изображения, создаваемого системой, к яркости изображаемого предмета. Диаметр выходного зрачка обуславливает величину светосилы микроскопа.

Разрешающая способность микроскопа определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda}{2A}, \quad (94)$$

где λ — длина волны монохроматического света, в котором наблюдается предмет; A — числовая апертура микроскопа. Формула (94) объясняется с точки зрения физической оптики, поэтому, не обосновывая ее, заметим, что разрешающая способность микроскопа тем выше, чем больше его числовая апертура.

В зависимости от конкретных целей и условий работы микроскопы имеют различные конструктивные особенности. На рис. 87, в качестве примера, показана оптическая система биологического микроскопа.

При рассматривании с помощью зрительной трубы объектив всегда дает уменьшенное изображение. Таким образом, линейное увеличение $\beta = \frac{l'}{l}$ применительно к объективу зрительной трубы фактически будет уменьшением изображения по сравнению с предметом.

Как видим из рис. 38, $\beta = -\frac{x'}{f'}$. Следовательно, для того чтобы степень уменьшения линейных размеров изображения, получаемого с помощью объектива зрительной трубы, была меньшей, объектив должен обладать большим фокусным расстоянием. Это первое важнейшее свойство телескопической системы.

В связи с тем что лучи в телескопическую систему обычно идут от предметов, расположенных значительно дальше двойного фокусного расстояния — в бесконечности, попадают они в систему параллельными пучками и объектив дает изображение в задней фокальной плоскости. Окуляр телескопической системы работает, как и в микроскопе, по принципу лупы, а следовательно, передняя фокальная плоскость окуляра должна совпадать с задней фокальной плоскостью объектива. Это второе важнейшее условие работы телескопической системы в обычных случаях (рассматривание весьма удаленных предметов).

Главными оптическими характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение, поле зрения и светосила. Существенной характеристикой для зрительной трубы есть также разрешающая способность.

Видимое увеличение телескопической системы может быть определено как отношение тангенсов апертурных углов на выходе и на входе системы, что также равно отношению соответствующих фокусных расстояний:

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}}. \quad (95)$$

Однако принято называть **видимым увеличением телескопической системы** отношение диаметра входного

зрачка к диаметру выходного зрачка

$$\Gamma = \frac{D_{\text{зр.вх}}}{D_{\text{зр.вых}}} . \quad (96)$$

А поскольку выходной зрачок телескопической системы является наименьшим изображением апертурной диафрагмы и, следовательно, он непосредственно определяет величину светового потока, прошедшего через систему, то **светосилой телескопической системы** считают квадрат диаметра выходного зрачка $D_{\text{зр.вых}}^2$.

Выше было показано, что разрешающая способность глаза принимается равной $60''$. Учитывая погрешности, которые могут возникать в процессе работы глаза совместно с трубой, при расчете разрешающей способности зрительной трубы увеличивают эту величину вдвое (разрешающая способность в два раза меньше). Кроме того, установлено, что разрешающая способность трубы обратно пропорциональна диаметру входного зрачка $D_{\text{зр.вх}}$. Таким образом, **разрешающая способность зрительной трубы**

$$\alpha = \frac{120}{D_{\text{зр.вх}}} . \quad (97)$$

Полем зрения телескопической системы принимается поле зрения окуляра $2\omega'$.

Кроме рассмотренной оптической системы зрительных труб, именуемой системой Кеплера, используются системы Галилея. Упрощенные схемы зрительных труб Кеплера и Галилея показаны на рис. 88 (соответственно

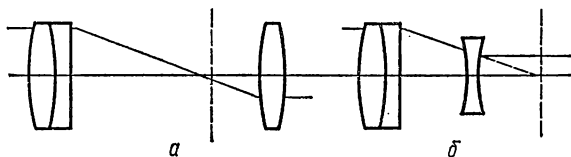


Рис. 88

а и б). Из рисунка видно, что система Галилея выигрывает в длине, но она находит ограниченное применение из-за малого поля зрения.

Имеются также системы зрительных труб типа рефлектор, т. е. телескопические системы с отражательным объективом.

Наиболее совершенная из них система Максутова (рис. 89). В этой системе лучи от предмета попадают на отражающее сферическое зеркало 1, предварительно пройдя через рассеивающую линзу 2, от зеркала 3 в фокальную плоскость и окуляр 4.

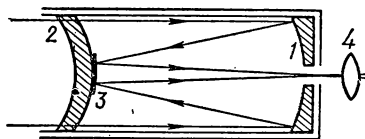


Рис. 89

Зрительные трубы находят широкое применение в геодезии, астрономии, оптические телескопические системы применяются в различных биноклях, по этому принципу строятся оптические системы некоторых фотографических объективов.

3. Фотоаппараты

Принципиальная схема фотоаппарата чрезвычайно проста: это объектив (собирающая линза), светонепроницаемая камера и светочувствительный материал или матовое стекло, на котором рассматривается изображение,

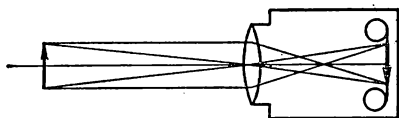


Рис. 90

даваемое объективом перед фотографированием (рис. 90).

Главное требование к качественному фотоаппарату — это высокое качество его

объектива. Фотографические объективы в зависимости от условий фотографирования имеют весьма разнообразные оптические конструкции, и их оптические свойства определяются многими характеристиками. Рассмотрим некоторые из них.

Относительное отверстие объектива — его первая характеристика, определяющая масштаб изображения.

Относительное отверстие объектива (отношение диаметра входного зрачка к фокусному расстоянию) характеризует светосилу объектива.

Величина поля зрения определяет формат изображения.

Разрешающая способность — основная характеристика качества изображения.

Не останавливаясь на рассмотрении всех характеристик объектива, обратим внимание еще на одну: глубину резкости.

Если расстояние между объективом и матовым стеклом выбрано так, что какая-то плоскость предмета оказалась на нем резко изображенной, то эта плоскость называется **плоскостью наводки**.

Однако удовлетворительно резким будет изображение и ближе к этой плоскости, и дальше от нее.

Ближняя плоскость предмета, точки изображения которой будут резкими, называется **передним планом**; дальняя плоскость, удовлетворяющая тому же условию, — **задним планом**.

Расстояние в пространстве изображений между изображением переднего и заднего плана называется **глубиной резкости**.

Глубина резкости фотографического объектива зависит от его фокусного расстояния и диаметра входного зрачка. Если требуется фотографирование предметов с большой глубиной резкости, то выбирают объектив с малым фокусным расстоянием и специальной регулируемой диафрагмой уменьшают отверстие входного зрачка объектива.

Если объектив удовлетворяет необходимым требованиям, обеспечивающим желаемое качество изображения, то для качественной работы фотоаппарата и удобства фотографирования необходимо дополнительное оптическое устройство, позволяющее легко получать резкое изображение фотографируемых предметов на светочувствительном материале. С этой целью фотоаппараты снабжаются одной из двух систем: зеркальным видоискателем или оптическим (незеркальным) видоискателем — дальномером.

На рис. 91 приводятся две схемы фотоаппаратов с зеркальными видоискателями. На рис. 91, *а* — зеркало в рабочем состоянии: оно передает изображение от объектива на матовое стекло и позволяет видеть объект съемки. Посредством вдвигания и выдвигания объектива добиваются резкости изображения. На рис. 91, *б* зеркало убрано (поднято); изображение получается на светочувствительном материале — пленке (можно фотографировать). На рис. 91, *в* показана схема фотоаппарата другого вида с зеркальным видоискателем. В этой фотокаме-

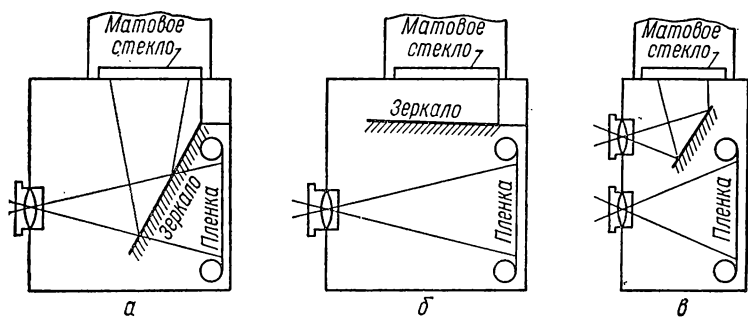


Рис. 91

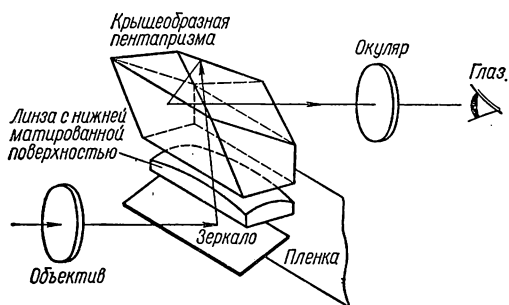


Рис. 92

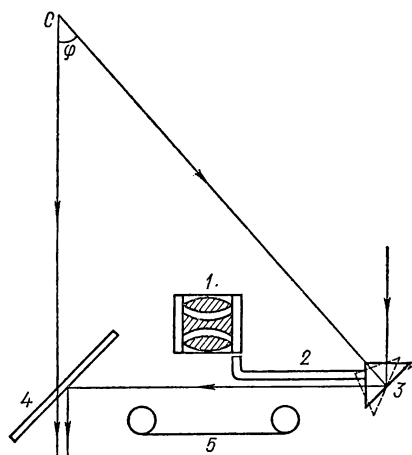


Рис. 93

ре два объектива: один, дающий изображение на зеркало, второй — на пленку. Таким образом, можно одновременно видеть и фотографировать предмет.

В наиболее совершенных фотоаппаратах с зеркальными видоискателями используются пентапризмы (рис. 92). Благодаря применению пентапризмы предмет лучше просматривается и удобнее получать его резкое изображение перед фотографированием: предмет просматривается не в горизонтальной плоскости, что в большинстве случаев неестественно, а в вертикальной.

В фотоаппаратах с оптическим незеркальным видоискателем наводка на резкость и фиксирование объекта съемки производится при помощи оптического видоискателя-дальномера, схема которого приведена на рис. 93. Для наводки на резкость объектив 1 перемещается относительно пленки 5 вперед и назад; рычаг 2, находящийся в контакте с объективом, меняет положение призмы 3 в зависимости от расстояния, на котором находится фотографируемый объект С. В итоге меняется величина угла φ между лучами, идущими на призму и на полупрозрачное зеркало 4. Если эти лучи идут из одной точки фотографируемого объекта, то в поле зрения глаза оба изображения от призмы и от зеркала воспринимаются как одно, в противном случае наблюдается двойное изображение. Система рассчитана так, что резкое изображение объекта на пленке получается тогда, когда нет двоения изображения в поле зрения видоискателя-дальномера.

4. Аппараты для проекции изображений на экран

Такие аппараты мы условно подразделим на две группы: аппараты для демонстрации на экране неподвижных изображений (диа- и эпипроекторы) и аппараты для демонстрации изображений с эффектом движения (киноаппараты).

Диаскоп — аппарат, относящийся к первой группе. Его оптическая схема (рис. 94) состоит из объектива 1, источника света 2, собирающего зеркала 3, в качестве рефлектора к источнику света, конденсора 4 и кадрового окна 5, куда вставляется при демонстрации прозрачное изображение (фотография на прозрачной основе — диапозитив).

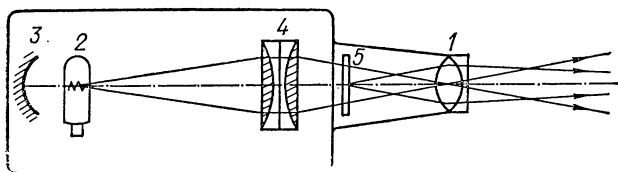


Рис. 94

Источник света совместно с собирающим зеркалом посылает на конденсор расходящийся пучок лучей. Конденсор (чаще всего две плоско-выпуклые линзы) дает изображение источника света в плоскости входного

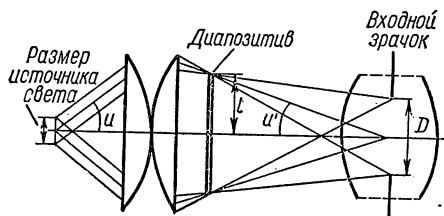


Рис. 95

зрачка объектива (рис. 95). Объектив, близкий по своим свойствам к фотографическому, дает на экране увеличенное действительное обратное изображение прозрачного диапозитива.

Основными характеристиками оптических систем проекционных приборов являются: масштаб изображения (линейное увеличение), его освещенность, размер проецируемого изображения или экрана. Эти характеристики определяются: проекционным расстоянием — расстоянием от проекционного объектива до экрана, фокусным расстоянием проекционного объектива, его относительным отверстием, яркостью источника света. Последние три параметра являются свойствами конструкции проектора; проекционное расстояние выбирается в соответствии с конкретными условиями работы проектора и желаемым размером изображения. Обычно это делается эмпирически, но если возникает необходимость расчета проекционного расстояния, его можно выполнить по формуле

$$s' \approx f' (1 - \beta), \quad (98)$$

где f' — фокусное расстояние объектива, β — линейное увеличение диапозитива при проекции его на экран.

Действие эпипроектора имеет много сходного с диапроектором (рис. 96), но изображение получается в

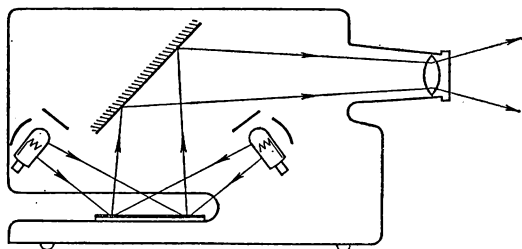


Рис. 96

непрозрачного предмета и, следовательно, необходимым элементом эпископической системы является плоское зеркало, передающее изображение проецируемого предмета в объектив.

Основные характеристики эпископической системы те же, что и диаскопической, но для получения одинаковой освещенности изображения на экране с диаскопической проекцией, при эпископической проекции необходима более мощная осветительная система.

Особенность работы кинопроекционных систем состоит в том, что при достаточно частой смене проецируемых (по принципу диапроекции) кадров (обычно 24 кадра в секунду) создается, в силу сохранения зрительного впечатления глаза, восприятие слитности изображений отдельных кадров. Если на каждом последующем кадре демонстрируемый объект несколько меняет свое положение, создается впечатление движущегося объекта *.

Схема работы и оптическая система кинопроекторного аппарата показаны на рис. 97. На рисунке две бобины (катушки) 1 и 7; с первой кинолента сматывается, на вторую наматывается. Осуществляют движение пленки зубчатые барабаны 2, 5, 6, приводимые во вращение электромотором (лентопротяжная система). Лента протягивается через фильмовый канал 3; против кадрового окна 4 лентопротяжный механизм на короткое время кадр останавливает. Оптическая система: источник све-

* Киносъемочные аппараты работают аналогично, но их оптические системы по конструкции и действию сходны с системами фотоаппаратов.

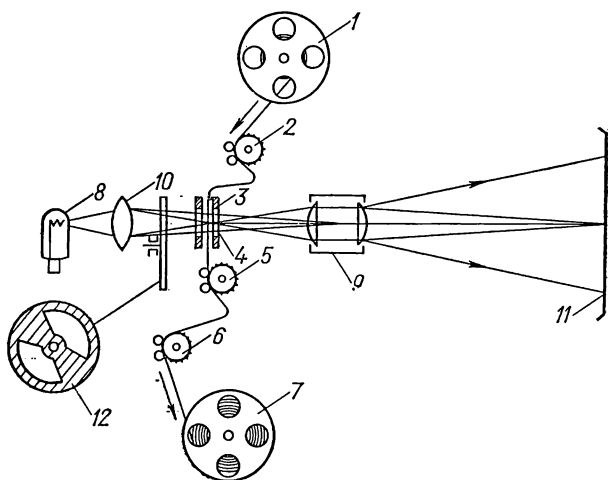


Рис. 9/

та 8, конденсор 10 и объектив 9 — создает проекцию кинокадров на экране 11. В момент смены кадров кадровое окно перекрывается вращающимся обтюратом 12. В некоторых системах кинопроекторов, работающих со звуковым сопровождением, оптические системы применяются также для считывания звука.

5. Оптические системы в приборах разнообразного назначения

В предыдущих параграфах данной главы рассмотрены оптические системы наиболее распространенных оптических приборов и аппаратов. Однако, как уже говорилось, область применения оптических систем весьма широка. Для того чтобы у читателя сложилось впечатление о широком диапазоне применения оптических систем, рассмотрим три примера их применения в самых разнообразных сферах человеческой деятельности.

Пример первый. Для определения малых отклонений размеров проверяемой детали от образцов методом сравнения используются **оптиметры**. Принцип действия оптиметра основан на передаче изображения от качающегося зеркала, жестко связанного с измерительным стержнем, находящимся в контакте с поверхностью контролируемого объекта, последующим элементам оп-

тической системы и на экран со шкалой, по которой и отмечаются отклонения.

Оптическая схема оптиметра изображена на рис. 98. Сетка 3 расположена в фокусе объектива 4 и освещается лампой 1 через осветительную систему 2. Параллельный пучок лучей, идущий от объектива, попадает на неподвижное зеркало 5 и, отразившись от него, попадает на

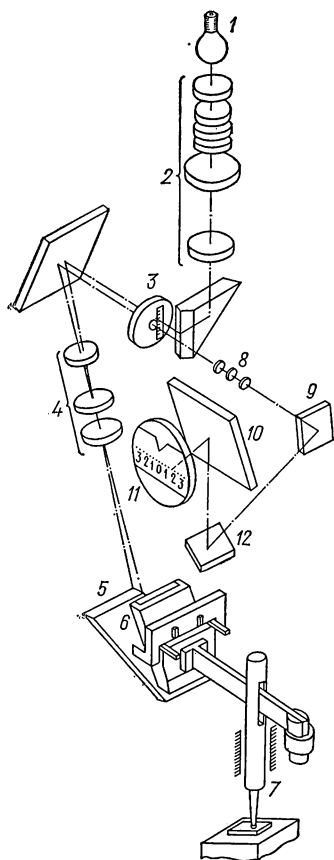


Рис. 98

подвижное зеркало 6, закрепленное с измерительным стержнем 7. Пучок лучей, отраженный от зеркала 6, идет в обратном направлении и строит изображение шкалы в плоскости сетки на свободной части поля, где находится индекс. Изображение шкалы и индекса при помощи объектива 8 и зеркал 9, 12, 10 проецируется на экран 11, с которого снимаются отсчеты. Перемещение изображения шкалы на экране пропорционально перемещению измерительного стержня по высоте.

Применяются вертикальные и горизонтальные оптиметры, предназначенные для измерения наружных и внутренних размеров деталей.

Пример второй. Для осмотра стенок некоторых недоступных прямому наблюдению полостей организма (эндоскопия) используются различные оптические приборы. Прибор, предназначенный для осматривания стенок желудка, называется **гастроскопом**. Оптическая схема одного из типов гастроскопов показана на рис. 99.

Он состоит из головки А (часть, вводимая в желудок), гибкого световода Б (жгут из тончайших стеклянных ни-

тей, по которому передается изображение) и рукоятки *В*, с помощью которой ведется управление работой системы и визуальное наблюдение. В головке расположены входная призма *1*, объектив *2*, к которому примыкает начальная часть гибкого световода *3*, и лампочка *4* для освещения наблюдаемого поля. Кроме того, в головке находится лампа-вспышка *5*, фотокамера *6* с объективом *7* и кассета *8* для снимков на микроплёнке.

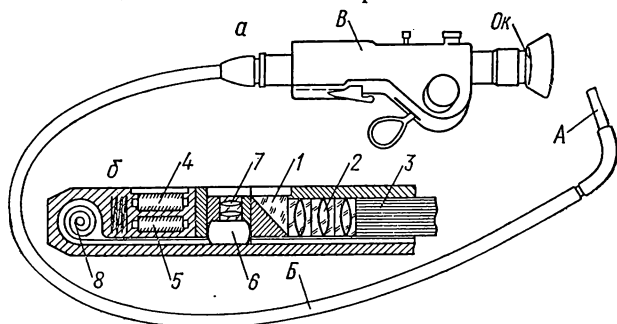


Рис. 99

Пример третий: Оптический локатор. Он позволяет с высокой точностью (до нескольких десятков сантиметров) производить картографирование земной поверхности, поверхности Луны, определять расстоя-

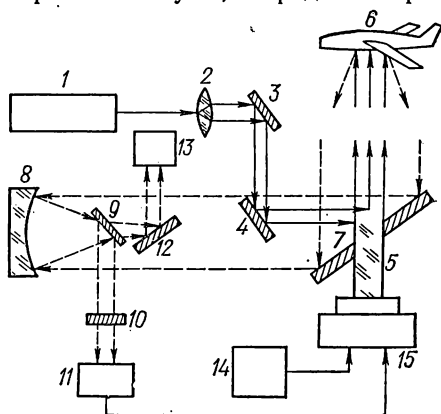


Рис. 100

ние до облаков, самолетов, космических, надводных и подводных объектов и т. п.

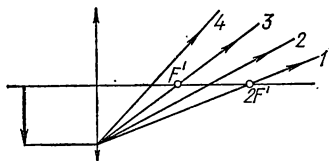
На рис. 100 показана схема оптического локатора, предназначенного для наблюдения за авиационными и

космическими объектами. Световой луч от мощного источника (лазера) 1 с помощью линзы 2 и зеркал 3, 4 направляется на передающую оптическую систему 5, а от нее — на объект. Отраженный луч попадает на приемную оптическую систему 7 и на параболическое зеркало 8, с которого через систему зеркал 9 и 12 — одновременно на устройство для определения угловых координат объекта (диссектор) 11 (через оптический фильтр 10) и дальномерное устройство 13. Электрические сигналы от диссектора передаются в следящую систему 15, управляющую положением передающей и приемной оптическими системами локатора. Блок 14 позволяет осуществлять ручное управление системой.

Контрольные вопросы

1. Какая из перечисленных характеристик считается одной из основных характеристик лупы?
 - 1) Разрешающая способность.
 - 2) Видимое увеличение.
 - 3) Фокусное расстояние.
 - 4) Числовая апертура.
2. Где помещают предмет при рассматривании его в лупу?
 - 1) Ближе переднего фокуса.
 - 2) За передним фокусом.
 - 3) В точке, соответствующей двойному фокусному расстоянию.
 - 4) В передней фокальной плоскости.
3. Чему равно видимое увеличение, даваемое лупой с фокусным расстоянием 2 см для нормального глаза?
 - 1) 12,5.
 - 2) 1,25.
 - 3) 5,0.
 - 4) 2,5.
4. Каково поле зрения лупы, имеющей световой диаметр 30 мм, если глаз, расположенный в задней фокальной плоскости этой лупы, имеет диаметр зрачка 2 мм?
 - 1) 15.
 - 2) 32.
 - 3) 28.
 - 4) 60.
5. Какое изображение дает объектив микроскопа?
 - 1) Увеличенное, действительное, обратное.
 - 2) Увеличенное, мнимое, прямое.
 - 3) Уменьшенное, действительное, обратное.
 - 4) Уменьшенное, мнимое, прямое.
6. Как размещают по отношению к объективу предмет при рассматривании его в микроскоп?
 - 1) В фокальной плоскости объектива.
 - 2) Непосредственно за фокусом объектива.
 - 3) За двойным фокусным расстоянием.
 - 4) На двойном фокусном расстоянии.
7. Как по отношению к окуляру микроскопа размещается изображение, получаемое с помощью объектива?

- 1) Ближе фокуса.
- 2) В передней фокальной плоскости.
- 3) Дальше переднего фокуса.
- 4) На двойном фокусном расстоянии.
8. На рисунке показаны предполагаемые направления хода луча в окуляре микроскопа. Укажите правильное направление.



9. Увеличение микроскопа $\Gamma = 20\times$. Фокусное расстояние окуляра 5 см. Найти увеличение объектива.

10. Главное фокусное расстояние объектива микроскопа $f_{об} = 3$ мм, окуляра $f_{ок} = 5$ см. Предмет находится на расстоянии 3,1 мм от объектива. Найти увеличение микроскопа для нормального глаза.

- 1) 310.
- 2) 360.
- 3) 180.
- 4) 150.

11. Что достигается применением в телескопической системе длиннофокусных объективов?

- 1) Увеличивается разрешающая способность.
- 2) Уменьшается линейное увеличение.
- 3) Увеличивается линейное увеличение.
- 4) Уменьшается абберация.

12. Как по отношению к окуляру располагается изображение, даваемое объективом телескопической системы при рассмотрении удаленных предметов?

- 1) В фокальной плоскости окуляра.
- 2) Ближе фокуса окуляра.
- 3) Непосредственно за фокусом окуляра.
- 4) На двойном фокусном расстоянии от окуляра.

13. Какое предельное видимое увеличение может дать зрительная труба с разрешающей способностью $2''$. (Результат разделить на 30).

14. Найти фокусное расстояние объектива зрительной трубы, если ее видимое увеличение $25\times$, а длина трубы при рассмотрении удаленных предметов 31,2 см. (Результат разделить на 10).

15. Каково видимое увеличение зрительной трубы, у которой $f_{об} = 0,4$ м и $f_{ок} = 0,02$ м? (Результат разделить на 10).

16. Оптическая сила объектива телескопа 0,5. Увеличение окуляра десятикратное. Какое увеличение дает телескоп? (Результат разделить на 20).

КОДЫ ОТВЕТОВ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Номера вопро- сов	Коды ответов по главам книги								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	3	3	3	2	2	3	1	3	2
2	3	1	3	1	1	2	1	1	4
3	1	2	4	2	4	4	4	4	1
4	2	2	1	1	1	2	1	3	3
5	4	2	3	3	2	3	3	3	1
6	2	2	4	1	3	1	3	2	2
7	3	3	3	1	1	4	2	1	2
8	4	2	2	2		2	4	1	3
9		2		3		3		1	4
10		4		1		1		3	3
11		3		4		4		1	2
12		1		2		2		2	1
13		1		3		3			4
14		1				1			3
15		1				2			2
16		3				3			4
17		4							
18		4							
19		1							
20		2							
21		3							
22		3							
23		3							
24		2							

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Законы и явления, лежащие в основе геометрической оптики	5
1. Основные законы геометрической оптики	5
2. Явление полного отражения	9
<i>Контрольные вопросы</i>	11
Глава II. Оптические детали	12
1. Общие понятия	12
2. Правила знаков	14
3. Плоские зеркала	16
4. Система двух плоских зеркал	19
5. Плоскопараллельная пластина	20
6. Призмы	21
7. Сферическая поверхность	26
8. Линзы	30
<i>Контрольные вопросы</i>	40
Глава III. Идеальная оптическая система из нескольких компонентов	44
1. Общие сведения	44
2. Система нескольких тонких линз	45
3. Виды оптических систем	49
<i>Контрольные вопросы</i>	52
Глава IV. Элементы фотометрии	53
1. Основные фотометрические величины	53
2. Фотометрия (световые измерения)	57
<i>Контрольные вопросы</i>	61
Глава V. Диафрагмы оптических систем	63
1. Роль диафрагм и их виды	63
2. Апертурная диафрагма. Зрачки	64
3. Полевая диафрагма. Люки	66
4. Совместное действие апертурной и полевой диафрагм. Виньетирование	67
<i>Контрольные вопросы</i>	69

Глава VI. Аберрации	70
1. Общие сведения об аберрациях	70
2. Сферическая аберрация	70
3. Кома	75
4. Отступление от закона синусов	76
5. Астигматизм	78
6. Кривизна поля	80
7. Дисторсия	81
8. Хроматизм положения	83
9. Хроматизм увеличения	84
<i>Контрольные вопросы</i>	85
Глава VII. Оптические стекла	87
1. Характеристики оптических стекол	87
2. Некоторые сведения по технологии изготовления оптических стекол	90
<i>Контрольные вопросы</i>	91
Глава VIII. Глаз как оптическая система	92
1. Строение глаза	92
2. Оптическая система глаза	94
3. Аккомодация	95
4. Адаптация глаза	97
5. Спектральная чувствительность глаза	99
6. Контрастная чувствительность глаза, острота зрения, сохранение зрительного впечатления	100
7. Особенности зрения двумя глазами	102
8. Аберрации глаза и дефекты зрения	104
<i>Контрольные вопросы</i>	105
Глава IX. Оптические системы в приборах и аппаратах	106
1. Общие сведения	106
2. Лупа, микроскоп, телескоп	107
3. Фотоаппараты	115
4. Аппараты для проекции изображений на экран	118
5. Оптические системы в приборах разнообразного назначения	121
<i>Контрольные вопросы</i>	124
Коды ответов на контрольные вопросы	126

Библиотечка физико-математической школы

Физика

Александр Евгеньевич Денисов

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
ОПТИКА

Редактор *Л. И. Ващенко*

Литредактор *М. Х. Коцюбинская*

Художественный редактор *Е. В. Чурий*

Технический редактор *Т. И. Трофимова*

Корректор *И. П. Берус*

Информ. бланк № 4813

Сдано в набор 26.12.79. Подп. в печ. 29.04.80. БФ 06578. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага книж. жур. Лит. гарн. Вис. печать. 6,72 усл.-печ. л. 6,02 уч.-изд. л. Тираж 6000 экз. Изд. № 4632. Зак. 112. Цена 20 к.

Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 252054, Киев-54, ул. Гоголевская, 7

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производственного объединения «Полиграфкинг» Госкомиздага УССР, г. Киев, Довженко, 3, в Харьковской городской типографии № 16, Харьков-3, Университетская, 16. Зак. 1025.

20 к.

