

В

778
Л24

А. А. ЛАПАУРИ

КИНОПРОЕКЦИОННАЯ
ОПТИКА

ГОСКИНОИЗДАТ
1950

А. А. ЛАПАУРИ

КИНОПРОЕКЦИОННАЯ
ОПТИКА

ГОСКИНОИЗДАТ
МОСКВА
1950

ПРЕДИСЛОВИЕ

Появление звука в кино принесло с собой новую отрасль техники—радиотехнику—и усложнило оптическое оборудование проекционной установки в конструктивном и в эксплуатационном отношении; появление цвета повысило требования к источнику света и к осветительной системе. В результате оборудование киноаппаратной, сравнительно простое в годы немого кино, превратилось сейчас в сложный агрегат, успешная работа которого требует от киномеханика не только усвоения навыков и приемов обращения с аппаратом, но также и понимания сущности происходящих в нем относительно сложных процессов. Совершенно ясно, что киномеханик, которому доверено обслуживание этой аппаратуры, должен разбираться в общих вопросах кинотехники, один из существенных разделов которой составляет оптика. Расширению круга знаний в этой области и посвящена настоящая книга, излагающая в элементарной форме основы оптики и светотехники применительно к кинопроекции.

•

ПОНЯТИЕ О СВЕТЕ. ЭЛЕМЕНТЫ ЛУЧЕВОЙ ОПТИКИ

Свет представляет собой поток лучистой энергии, воспринимаемый глазом как зрительное ощущение.

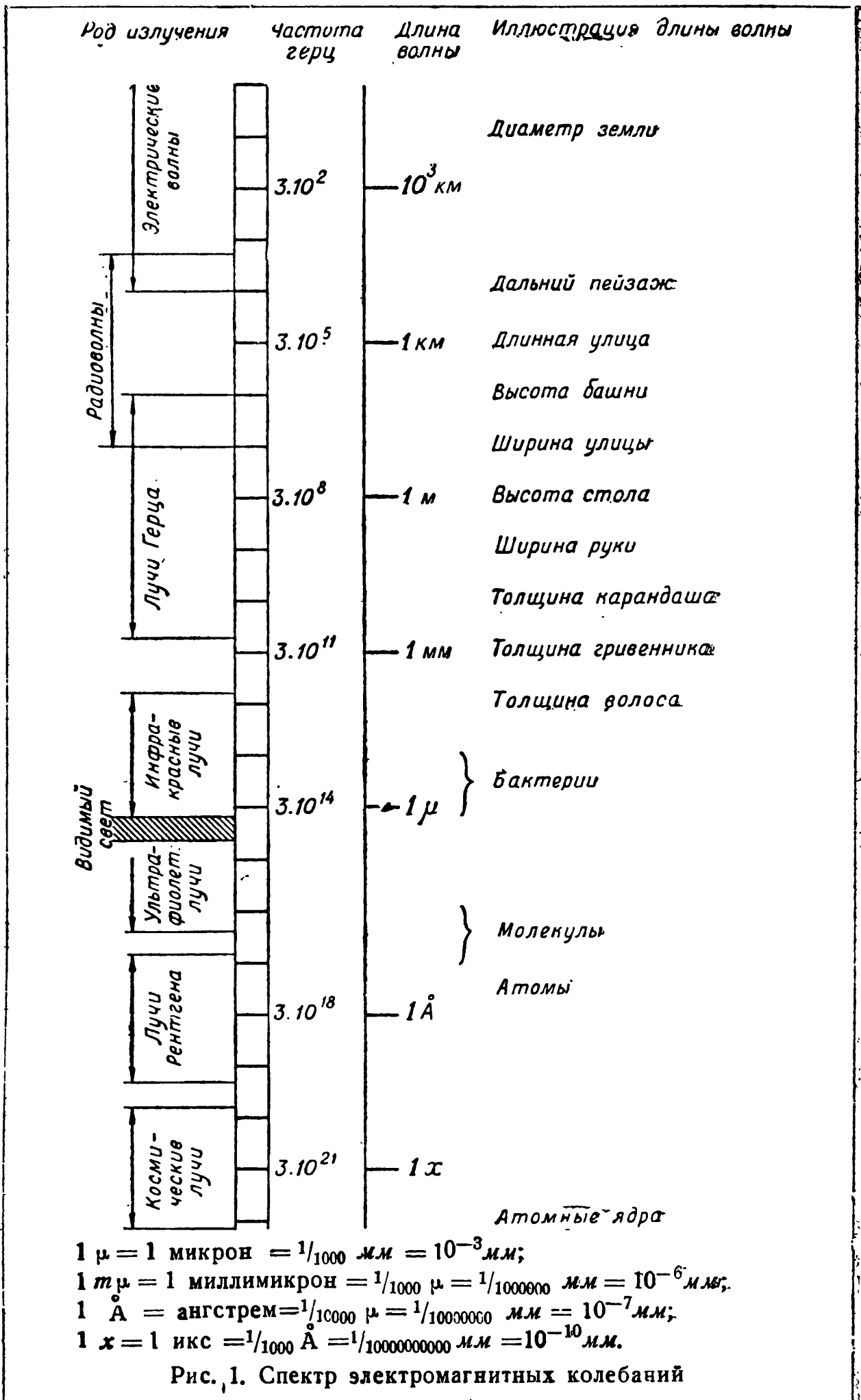
Световая энергия отличается от других видов лучистой энергии только длиной волны. Длина волны определяет собой качество всякого излучения. Лучи, посылаемые радиостанциями, тепловые лучи, видимый глазом свет и невидимые ультрафиолетовые лучи—все они имеют одинаковую природу, распространяются с одинаковой скоростью, подчиняются одним и тем же законам, но различаются между собой длиной волны и производят благодаря этой разнице совершенно различное действие.

Способность действовать на расстоянии присуща всякому источнику лучистой энергии, но в то время, как для приема других видов энергии, например, энергии радиоволн, необходим специальный приемник, световая энергия воспринимается нами непосредственно при помощи органа зрения—глаза. Эта особенность света придает ему исключительное положение среди других видов лучистой энергии, а глазу отводит важнейшее место среди органов чувств.

Наиболее обширные и в большинстве своем вполне достоверные сведения о внешнем мире мы получаем при помощи зрения.

На первых стадиях своего развития человечество довольствовалось только естественным солнечным светом; в дальнейшем человек создал искусственные источники света, что дало ему возможность пользоваться зрением и при отсутствии солнечного света.

На рис. 1 приведен полный спектр лучистой энергии от самых длинных электрических лучей до самых коротких—космических. Видимый свет занимает здесь очень незначительное место—участок волн длиной от 0,4 до 0,76 микрона (μ) или от 4000 до 7600 ангстрем (Å); с точки



зрения физики этот участок ничем не примечателен, однако именно он обеспечивает человеку громадные возможности, обладая видимостью. То, что свет воспринимается глазом непосредственно, придает учению о свете особый характер, заставляя рассматривать его не только как раздел физики, но в значительной мере и как раздел физиологии и психологии.

Различие в длине волны видимого излучения воспринимается глазом как различие в цвете и, таким образом, на маленьком участке волн между 0,4 и 0,76 микрона оказывается расположенным все разнообразное множество

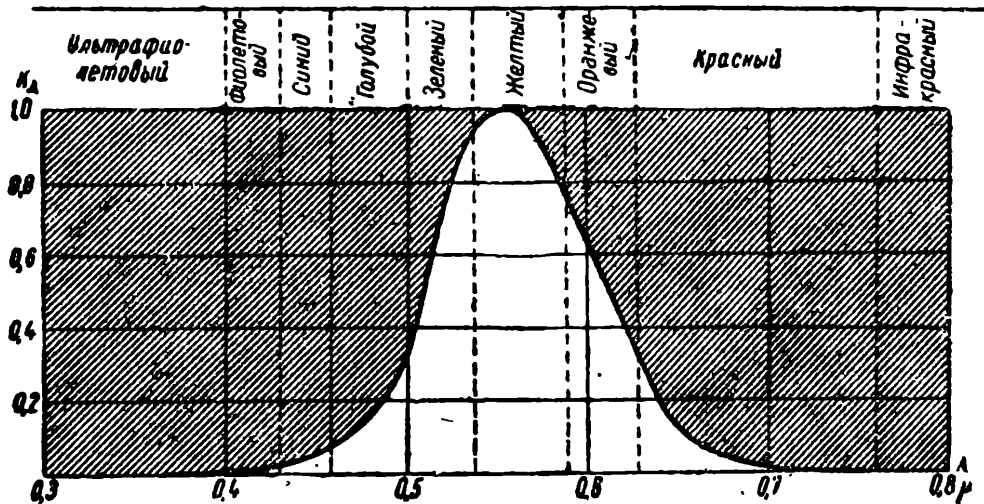


Рис. 2. Кривая видности K_{λ}

цветов, доступное человеческому зрению*. Солнечный свет содержит видимые излучения всех длин волн и, кроме того, лучи, не видимые глазом,—ультрафиолетовые и инфракрасные. Наиболее короткие волны воспринимаются человеком как фиолетовый цвет, наиболее длинные—как красный. Между ними расположены, как это показано на рис. 2, все остальные цвета спектра. Следует указать, что чувствительность глаза не одинакова ко всей области видимого спектра—она имеет максимум в зеленовато-желтой части и быстро спадает к обоим концам спектра.

Световые явления составляли для человека предмет настоящего изучения задолго до того, как была выяснена настоящая природа света и создана электромагнитная, или волновая теория. Значительно раньше были установлены основные свойства света, и знание законов его распространения использовано для построения оптических приборов.

Природа света очень сложна. Изучение ее во всех подробностях составляет обширный курс физической оптики,

* Строго говоря, человек различает еще пурпурный цвет, которого нет в спектре.

где эта природа рассматривается в виде стройной, вполне разработанной и освобожденной за последнее время от внутренних противоречий теории.

Однако огромное большинство практических вопросов прикладной оптики и светотехники решается значительно проще методами лучевой или геометрической оптики. Методы эти чрезвычайно наглядны, а результаты вполне согласуются с наблюдением и полностью удовлетворяют требованиям практики.

В основе лучевой оптики лежит понятие о луче.

Лучом называется направление, в котором распространяется свет.

Экспериментально установлено, что в пустоте и однородной прозрачной среде, например, в воздухе при постоянном давлении, в воде, в стекле и т. д., свет распространяется прямолинейно. Поэтому в однородной среде луч может быть представлен в виде прямой линии, начало которой лежит в источнике света.

Скорость распространения света в пустоте, как и других видов лучистой энергии, составляет 300 000 километров в секунду, не зависит от длины волны и превосходит скорость любого известного на земле движения. Достаточно указать, что при такой скорости свет мог бы обогнуть земной шар по экватору в течение $\frac{1}{7}$ секунды.

Волновая оптика рассматривает свет как поперечные колебания электромагнитного характера.

Всякое колебание характеризуется скоростью распространения c , длиной волны λ (лямбда) или частотой ν (ню) и амплитудой a .

Между скоростью распространения c , длиной волны λ и частотой колебаний ν существует зависимость:

$$c = \lambda \cdot \nu. \quad (1)$$

Иными словами, чем короче длина волны λ , тем больше, или, как принято говорить, тем выше, частота ν .

На рис. 3 схематически показана связь между направлением колебаний и направлением распространения света. Как видно из рисунка, колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения света, ввиду чего и называются поперечными колебаниями. Следует иметь в виду, что в обычном свете колебания происходят не в одной плоскости, как показано на рисунке, а во всех плоскостях, проходящих через прямую $x-x'$, которая соответствует, таким образом, лучу в представлении геометрической оптики*.

* Если колебания происходят не во всех плоскостях,—свет называется поляризованным.

Следующим понятием геометрической оптики является понятие о светящейся точке. Под светящейся точкой понимают источник света, размерами которого можно совершенно пренебречь.

Практически все источники света обладают определенными конечными размерами, но если сравнить эти размеры с теми расстояниями, на которых наблюдается действие лучистой энергии, то без большой погрешности их легко можно принять за точки. Такое допущение тем более уместно, что большинство искусственных источников света, как, например, спираль электрической лампы накаливания,

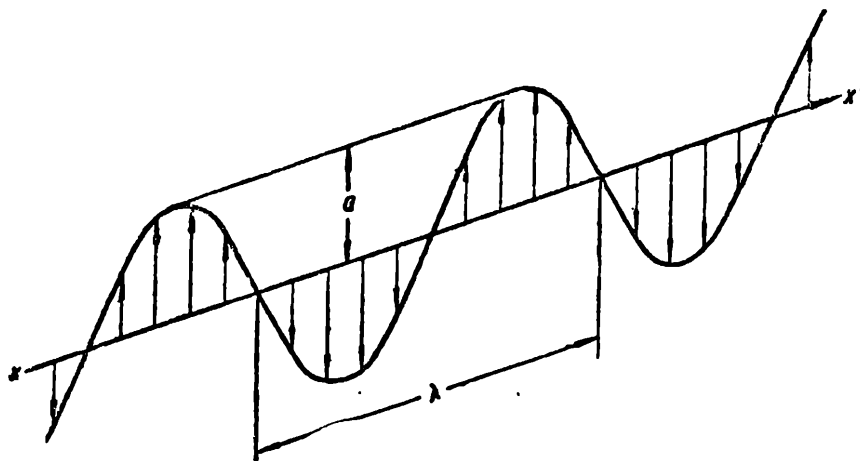


Рис. 3. Направление колебаний и направление распространения света

пламя свечи и т. д., имеют в действительности небольшие размеры, а такие источники, как звезды и солнце, кажутся нам небольшими благодаря огромным расстояниям, отделяющим нас от них. Когда же размерами источника света нельзя пренебречь, рассматривают его как совокупность отдельных светящихся точек, распространяя на эти точки все те заключения, вывод которых облегчается введением самого понятия о светящейся точке.

Легко представить себе светящуюся точку, от которой во все стороны расходится свет в виде бесконечного множества лучей, заполняющих все окружающее пространство. Такой пучок лучей носит название неограниченного пучка. Если на пути неограниченного пучка поставить диафрагму, то-есть преграду из непрозрачного материала с отверстием посередине, то после диафрагмы (рис. 4) свет будет идти уже в виде ограниченного пучка.

Во всех оптических приборах мы имеем дело только с ограниченными пучками, и лучевая оптика рассматривает только такие пучки.

Ограниченный пучок лучей может состоять из совокупности лучей, расходящихся между собой, идущих парал-

тельно друг другу или, наконец, сходящихся, то-есть направленных в одну общую точку (рис. 5).

Забегая несколько вперед, можно сказать, что оптические инструменты являются как бы трансформаторами световых пучков. Они изменяют характер пучков, их направление и сходимость, причем число превращений, пре-

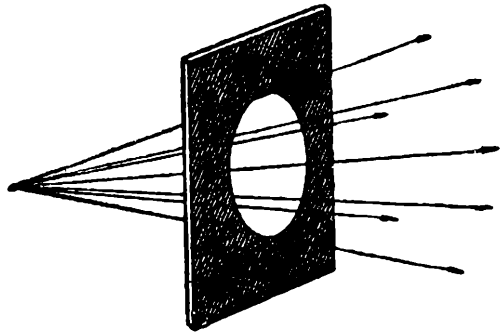


Рис. 4. Ограничение пучка

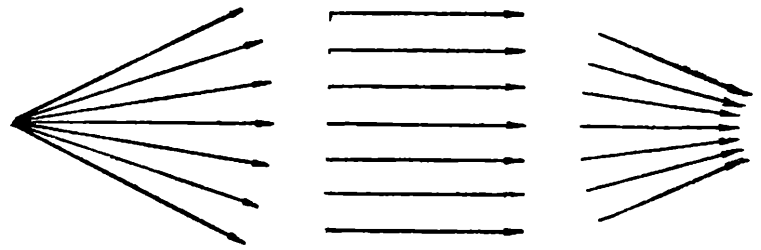


Рис. 5. Различные формы пучка

терпеваемых пучками в оптическом приборе, зависит от степени сложности прибора. Например, всякий объектив превращает падающие на него пучки расходящихся или параллельных лучей в пучки сходящихся лучей, которые в дальнейшем, например в окуляре, превращаются в пучки параллельных или слегка расходящихся лучей.

ЗАКОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

Лучевая оптика заимствует от физической только основные положения. Такими положениями можно считать:

1. Прямолинейное распространение света в однородной среде.

2. Поведение света на границе раздела двух сред, когда эта граница представляет идеально гладкую поверхность.

3. Независимость распространения света.

Все эти положения, хотя и представляют лишь первое приближение к действительной физической картине, прочно установились и хорошо согласуются с опытом, за исключением особых, редко встречающихся в практике случаев, когда во избежание ошибок следует принимать во внимание действительную физическую картину явления.

Прямолинейность распространения света легко иллюстрируется явлением тени. Чтобы защитить глаза от жгучих лучей солнца, достаточно заслонить их рукой, как козырьком, чего не могло бы быть, если бы солнечные лучи огибали препятствия. Сидя в кинозале, мы можем наблюдать, как от проекционного окна к экрану тянутся

пучки прямых лучей. Конечно, сами лучи, проходящие мимо глаз, невидимы, но, благодаря наличию в воздухе частичек пыли, которые, попадая в пучок, вспыхивают отраженным светом, их путь становится видимым.

Когда на пути луча оказывается какое-либо прозрачное тело, например, стекло или вода, то, как показывает опыт, одна часть света входит в стекло, а другая отражается от поверхности раздела, то-есть от той поверхности, которая отделяет пространство, занятое воздухом, от пространства, занятого стеклом. При этом на поверхности раздела прямолинейность луча нарушается. Часть света, подчиняясь законам отражения, возвращается в ту же среду, а другая часть проходит границу раздела и продолжает распространяться так же прямолинейно внутри новой среды, изменив свое направление на границе раздела в соответствии с законами преломления.

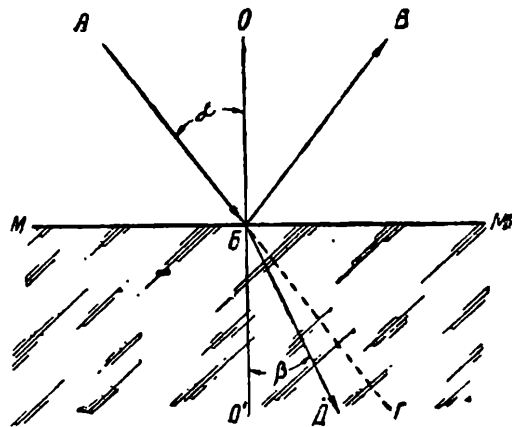


Рис. 6. Поведение луча на поверхности раздела

Если, например, на плоскую, идеально гладкую поверхность раздела MM (рис. 6) падает луч AB , составляя с нормалью OB к поверхности раздела угол ABO , то отраженный луч пойдет в направлении BB' , составляющем с той же нормалью OB угол OBB' , равный углу ABO , причем и падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью.

Этот закон формулируется обычно в виде следующих двух положений:

1. Угол падения равен углу отражения.
2. Луч падающий и луч отраженный лежат в одной плоскости с нормалью в точке падения.

Другая часть света, пройдя поверхность раздела, также изменит свое направление и будет продолжать путь по новому направлению BD , составляющему с продолжением нормали BO' угол преломления $O'BD$, меньший угла падения ABO .

Это отклонение луча от прямой, происходящее на поверхности раздела, называется преломлением света, а сама поверхность — преломляющей поверхностью.

Преломление происходит во всех случаях, когда свет переходит из одной среды в другую, обладающую другими физическими свойствами. Величина отклонения луча от прямой, то-есть степень преломления при прочих равных условиях, зависит от того, насколько отличаются эти две среды между собой.

Законы преломления сложнее, чем законы отражения, и для случая перехода луча из пустоты в прозрачное вещество формулируются следующим образом:

1. Луч падающий и луч преломленный лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности раздела в точке падения луча.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления остается неизменным при любом значении угла падения, то-есть

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n = \text{const.} \quad (2)$$

Это отношение называется абсолютным показателем преломления того вещества, в которое входит луч из пустоты, или даже просто показателем преломления.

Показатель преломления для всех прозрачных тел больше, чем единица, и для подавляющего большинства прозрачных тел меньше двух. Лишь в отдельных случаях показатель преломления превосходит значение „2“. Чем больше показатель преломления n , тем оптически более плотным считается вещество. Для пустоты n равняется единице.

В табл. 1 приведены значения показателя преломления для некоторых прозрачных тел.

Таблица 1
Показатели преломления некоторых
прозрачных тел

Воздух	1,000292
Вода	1,334
Эфир	1,358
Спирт этиловый	1,363
Органическое стекло (плексиглас)	1,49
Бензол	1,503
Стекло крон	1,5163
Канадский бальзам	1,54
Каменная соль	1,54
Стекло тяжелый крон	1,6126
Стекло флинт	1,6164
Сероуглерод	1,629
Стекло тяжелый флинт	1,6475
Монобромнафталин	1,66
Стекло самый тяжелый флинт	1,92
Алмаз	2,42

Если луч переходит из одного прозрачного тела, например, из воды в другое прозрачное тело, например, в стекло, то показатель преломления называется относительным и составляет:

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 —абсолютные показатели преломления для первой и второй среды относительно пустоты.

Так как показатель преломления воздуха мало отличается от единицы, то показатель преломления вещества обычно определяют не относительно пустоты, а относительно воздуха.

В прозрачной среде скорость распространения света в n раз меньше, чем в пустоте. Здесь n —показатель преломления. Кроме того, эта скорость различна для различных длин волн, тогда как в пустоте скорость распространения любого вида лучистой энергии одинакова для любой длины волны. Среда как бы оказывает некоторое сопротивление прохождению света, и это сопротивление тем больше, чем больше оптическая плотность среды и чем выше частота колебания, то-есть чем короче длина волны света.

Таким образом, показатель преломления n прозрачного вещества служит мерой его оптической плотности. Поэтому, определяя показатель преломления, следует указать, к какой длине волны относится данный показатель. Это указание делается припиской к букве n длины волны или другой буквы, условно обозначающей эту длину. Например: n_{589} или n_D означает показатель преломления для длины волны 589 $\text{m}\mu$.

Из формул (2) и (3) следует, что нахождение направления преломленного луча сложно и сопряжено с поисками значения синусов заданных углов и в дальнейшем по значениям синусов отыскивания значения самих углов. Это действительно имеет место при расчетах оптических систем, представляющих довольно кропотливый труд, но существуют очень простые и наглядные графические методы построения преломленных лучей, позволяющие легко определять направление преломления.

Пусть задан луч AB (рис. 7), падающий из воздуха на поверхность стекла MM , показатель преломления которого составляет:

$$n_2 = 1,6.$$

Из точки B , как из центра, описываем в любом масштабе две окружности: одну—радиусом, равным единице (на рисунке взято 10 mm) и другую радиусом 1,6 (следовательно, $10 \times 1,6 = 16 \text{ mm}$). Продолжаем прямую AB до пересечения с малой окружностью в точке V . Через точку V проводим прямую, параллельную нормали OO' , и соединяем точку B с точкой D пересечения этой прямой с большой окружностью. Прямая BD будет точным направлением преломленного луча. Таким же образом может быть решена обратная задача, когда дан угол преломления и требуется на основании показателя преломления определить угол падения или

когда даны оба угла и требуется определить показатель преломления.

Прибегать постоянно к таким точным построениям нет никакой необходимости и обычно ограничиваются проведением линий, показывающих направление лучей от руки, но когда нет уверенности, в каком направлении пойдет луч после преломления, указанный способ применяется как вполне разрешающий все сомнения.

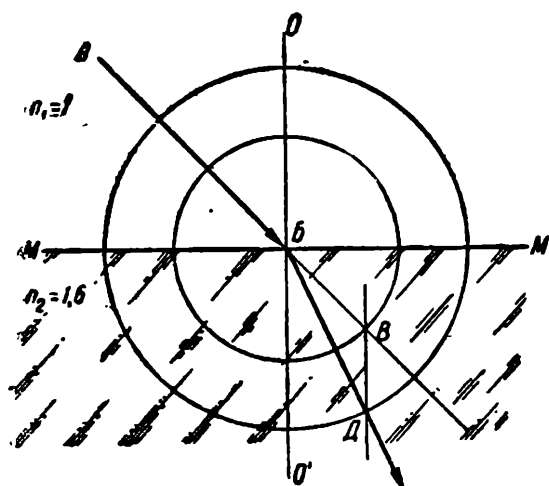


Рис. 7. Построение преломленного луча

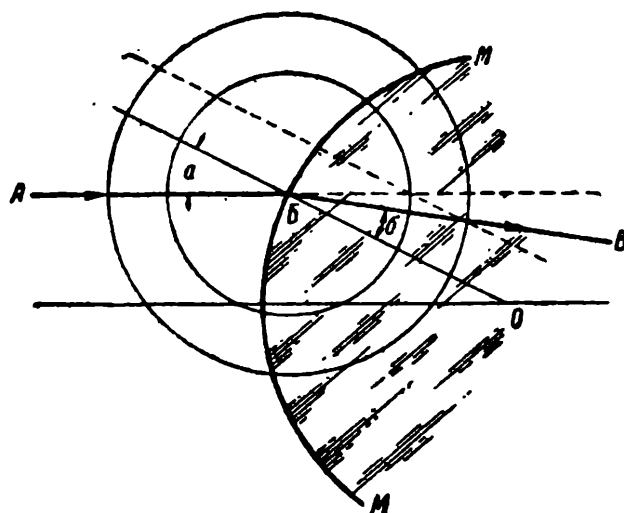


Рис. 8. Преломление на сферической поверхности

Основным моментом построения является проведение нормали к рассматриваемой поверхности раздела в точке падения луча. Когда проведена нормаль и определен угол падения луча, то-есть угол между падающим лучом и нормалью, построение отраженного или преломленного луча уже не представляет никакого труда. В случае не плоской, а, например, шаровой поверхности раздела, которую имеют стекла наших объективов,—нормалью, как известно, будет являться радиус кривизны, проведенный из центра кривизны к точке падения луча. Сама кривая линия может быть заменена касательной к кривой в этой точке, и весь ход рассуждения остается тем же.

На рис. 8 дано построение преломленного луча, когда на шаровую поверхность раздела падает луч AB .

Если луч падает на поверхность раздела по нормали, то-есть перпендикулярно к поверхности раздела, то угол падения будет равен нулю и, следовательно, угол отражения и угол преломления также будут равны нулю, то-есть луч, падающий на поверхность раздела по нормали, не будет испытывать отклонения. Отраженный луч возвратится обратно, совпадая с падающим лучом, а преломленный придет в новую среду без отклонения.

До сих пор мы рассматривали переход луча из пустоты в прозрачное тело. Теперь разберем обратный случай, когда

луч подходит к поверхности раздела со стороны более плотной среды, например из стекла, с показателем преломления $n_1=1,5$, входит в пустоту или в воздух с показателем преломления $n_2=1,0$.

Допустим, на рис. 9 MM — поверхность раздела, и из точки A , находящейся в стекле, выходит пучок лучей AO , AB , AB' и т. д. В этом случае угол преломления будет больше угла падения, то-есть преломленный луч будет удаляться от нормали. Если угол падения будет постепенно

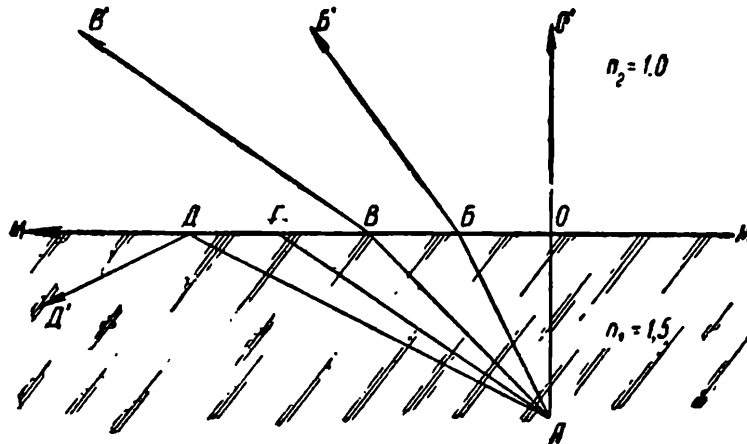


Рис. 9. Полное внутреннее отражение

возрастать, преломленный луч будет все больше приближаться к поверхности раздела, наконец, он будет скользить по этой поверхности, как луч AGM , и при дальнейшем возрастании угла падения луч уже не будет преломляться, а отразится от MM и вернется обратно, подчиняясь законам отражения. Такое отражение называется полным внутренним отражением, а наибольшее значение угла падения, при котором еще происходит преломление, называется предельным, или критическим, углом преломления.

Значение предельного угла легко определить из формулы (3), если предположить, что угол преломления β равен 90° , а показатель преломления воздуха $n_2=1$.

Тогда имеем:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_1};$$

$$\sin \alpha = \frac{\sin \beta}{n_1} = \frac{\sin 90^\circ}{n_1} = \frac{1}{n_1} = \frac{1}{1,5} = 0,667 = \sin 41^\circ 40'.$$

Таким образом, при $n_1=1,5$ все лучи, падающие на поверхность раздела под углом больше, чем $41^\circ 40'$, уже не будут преломляться, а отразятся обратно в стекло. Если взять стекло с большим показателем, например, $n=1,7$, то критический угол будет еще меньше:

$$\sin \alpha = \frac{1}{1,7} = 0,589 = \sin 36^\circ,$$

то-есть в этом стекле будут отражаться все лучи, падающие под углом больше 36° .

Полное внутреннее отражение находит широкое применение в отражательных призмах.

Поведение луча на границе раздела представляет собой основу прикладной оптики — тот фундамент, на котором построены все расчеты оптических приборов. Оптические приборы представляют собой сочетание поверхностей раздела, расположенных по ходу пучка света, а любой расчет оптической системы состоит из последовательного приложения законов отражения и преломления ко всем по ходу света поверхностям раздела, содержащимся в оптическом приборе.

Гораздо меньшую роль играет третий закон — закон независимости распространения света. Согласно этому закону отдельные пучки света, входящие в сложный поток, распространяются независимо друг от друга, то-есть каждый пучок распространяется так, как если бы не было других пучков. Например, два или три пучка света могут пересекаться между собой, не заслоняя и не перебивая друг друга и вообще не производя один на другой какого-либо воздействия, а если два или несколько пучков падают на одну общую поверхность, их действия складываются, так как каждый из них действует независимо от других.

Таким образом, закон независимости распространения света не принимает непосредственно участия в каких-либо расчетах и не фигурирует в формулах. Он только дает основание обращаться с каждым пучком независимо от его положения в общем потоке относительно других пучков.

Чтобы усвоить принцип построения луча при прохождении его через прозрачные тела, рассмотрим два простейших типовых примера.

Пусть пучок параллельных лучей падает на ступенчатую стеклянную пластинку (рис. 10), окруженную воздухом. Выберем из пучка два луча AB и DE и проследим их путь через пластинку.

Луч AB , упавший на плоскость MM под углом α к нормали OB , пойдет внутри стекла под углом β , причем β будет меньше, чем α . Подходя к плоскости NN , луч образует с нормалью, ввиду параллельности MM и NN , угол β' , равный углу β , но в таком случае и угол α' будет равен углу α , так как углы α и β связаны отношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n .$$

Следовательно, пройдя плоскопараллельную пластинку, луч будет продолжать путь параллельно первоначальному

направлению, не отклонившись, а только получив некоторое смещение.

Из рис. 10 видно, что это смещение будет тем больше, чем больше толщина пластинки и показатель преломления n .

При очень малой толщине смещение будет настолько незначительным, что луч света можно считать проходящим без отклонения и без смещения.

Возьмем вместо плоскопараллельной пластинки призму, то-есть кусок стекла, ограниченный двумя непараллельными

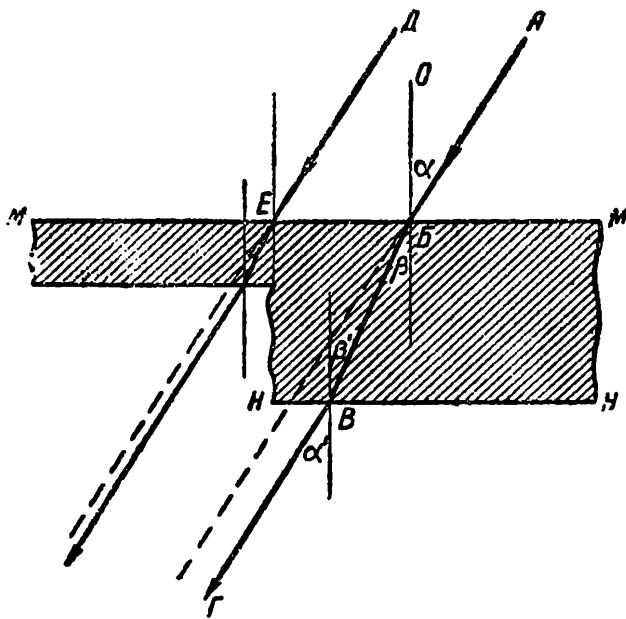


Рис. 10. Смещение луча при прохождении через плоскопараллельную пластинку

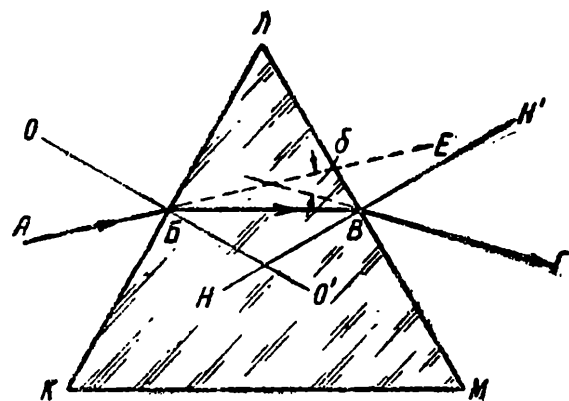


Рис. 11. Отклонение луча призмой

плоскостями KL и LM (рис. 11). Луч света AB , пройдя через грань KL , приблизится к нормали OO' , то-есть отклонится к основанию призмы KM . Выходя из призмы через грань LM , он удалится от нормали NN' , то-есть, как видно из рисунка, еще раз отклонится опять к основанию призмы и пойдет окончательно по линии $B'G$, составляющей с первоначальным направлением AE некоторый угол δ , зависящий от величины угла KLM , называемого преломляющим углом, и от показателя преломления вещества призмы.

Чем больше величина преломляющего угла и чем больше показатель преломления, тем больше отклоняется луч при прохождении через призму. При уменьшении преломляющего угла уменьшается и отклонение, и когда угол между гранями призмы будет равен нулю, то-есть когда призма превратится в плоскопараллельную пластинку, то и отклонение будет равно нулю.

ПЛОСКИЕ И СФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛА

Если перед плоским зеркалом MM (рис. 12) расположена светящаяся точка C , то лучи CA , CB , CV и т. д., идущие из точки C и падающие на зеркало, отразятся от него, образуя углы отражения OAA' , OBB' , OVV' , соответственно равные углам падения CAO , CBO и CVO . Проведем из точки C нормаль CHC' к поверхности MM и продолжим отраженный луч $A'A$ до пересечения с нормалью. В таком случае все лучи будут лежать в одной плоскости—плоскости чертежа. Прямоугольные треугольники CAH и $C'AH$, имея общую сторону HA и равные углы CAH и $C'AH$, равны между собой, так как OAA' равняется CAO по построению, $OAA'=C'AO'$ по положению, и, следовательно, угол $C'AH=CAH$. Отсюда $C'H=CH$ и, следовательно, точка C' расположена позади поверхности зеркала на таком же расстоянии, на каком точка C находится перед зеркалом.

Так как точку A мы брали произвольно, то все рассуждения могут быть отнесены также к любой точке (B , V и т. д.). Следовательно, зрителю, находящемуся перед зеркалом, все отраженные лучи будут казаться выходящими из одной общей точки C' , которая называется мнимым изображением точки C в отличие от действительного изображения, которое имело бы место, если бы пересекались сами лучи, а не их продолжения.

Отсюда следует, что для нахождения изображения точки C в плоском зеркале, достаточно провести нормаль к поверхности зеркала и на продолжении этой нормали отложить расстояние HC' , равное расстоянию CH точки C от зеркала. Найденная точка C' и будет мнимым изображением точки C .

Не останавливаясь пока на разнице между действительным и мнимым изображением, заметим, что всякий расходящийся пучок лучей, принадлежащих одной точке тела, мы воспринимаем как изображение этой точки тела, причем самое тело кажется нам расположенным в том месте, откуда пучок кажется исходящим, независимо от того, пересекаются ли действительно эти лучи или пересекаются их продолжения, то-есть является ли данная точка точкой тела, ее действительным или мнимым изображением.

Если вместо зеркала в пучок лучей, идущих из точки C , поместить другую, не зеркальную поверхность, скажем, лист бумаги (рис. 13), который кажется на глаз совершенно гладким, то для лучей света, имеющих длину волны, измеряемую долями микрона, бумага будет представляться сильно шероховатой, как бы бугристой. Хотя в каждом

отдельном микроскопическом участке лучи и отражаются по правилу равенства углов, но ввиду того, что отдельные бугры не составляют одной плоскости или правильной поверхности, свет будет рассеиваться по всевозможным направлениям, то-есть будет отражаться диффузно. В этом случае глаз увидит уже не изображение точки C , а самую поверхность бумаги, тогда как, наблюдая в чистом зеркале изображение светящейся точки, мы не замечаем самой поверхности зеркала. Следовательно, чтобы предмет стал видимым, каждая точка его должна отра-

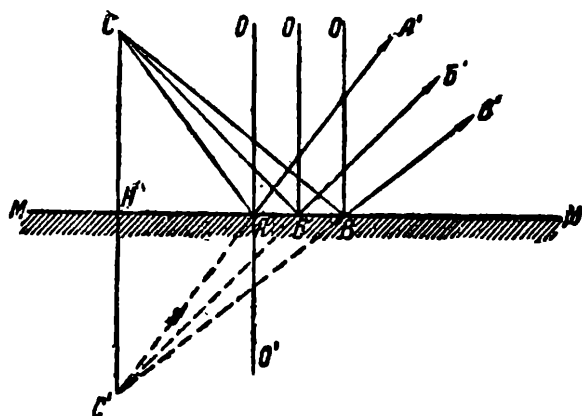


Рис. 12. Отражение в плоском зеркале

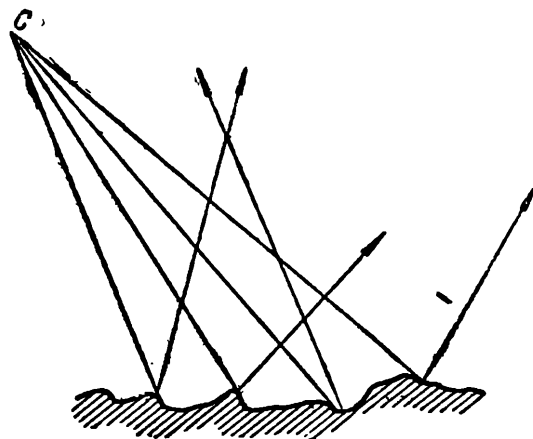


Рис. 13. Отражение от шероховатой поверхности

жать во все стороны лучи, то-есть проявлять те же свойства, какими обладает светящаяся точка.

Таким образом, всякое освещенное тело можно рассматривать как совокупность бесчисленного множества точек, испускающих отраженный свет, подобно тому, как светящаяся точка испускает собственный свет. То же самое мы имеем в случае прохождения света сквозь тело. Поместив между лампой и глазом кусок плоского прозрачного стекла мы свободно различаем лампу со всеми подробностями и не замечаем самого стекла, но если вместо чистого стекла взять стекло матовое, молочное или даже прозрачное, но очень загрязненное, мы хотя и увидим свет, но лампы уже не различаем, зато видим самое стекло. Тут опять мы имеем случай диффузного рассеяния света.

Пусть перед плоским зеркалом (рис. 14) расположена стрелка AB . Чтобы найти ее изображение в зеркале, достаточно найти изображения крайних точек A и B . Проведя нормали из точек A и B и продолжив их за зеркало, откладываем на них отрезки OA' и HB' , соответственно равные AO и BN , и получаем изображение $A'B'$ стрелки AB .

Следует тут же указать, что нормаль можно проводить не только к поверхности зеркала, но и к ее продолжению. Так, рис. 15 показывает, что глаз, помещенный перед

зеркалом MM , будет видеть изображение $A'B'$ стрелки AB , хотя обе нормали, проведенные из концов стрелки AB , выходят за пределы зеркала.

В оптических системах встречаются устройства как с одним плоским зеркалом, так и с двумя и несколькими зеркалами. На рис. 16 показана система из двух зеркал MM и NN , стоящих под углом. Глаз, расположенный перед зеркалом NN , увидит изображение стрелки AB после двух

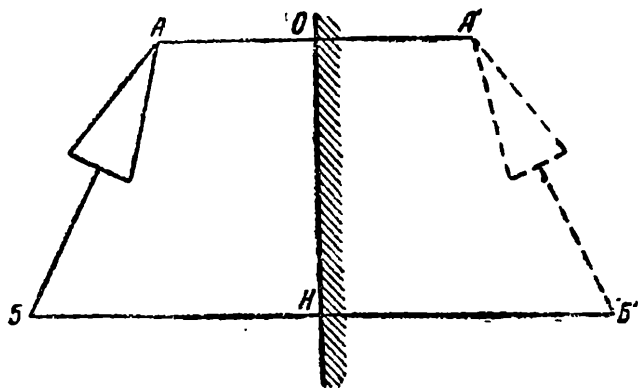


Рис. 14. Построение изображения в плоском зеркале

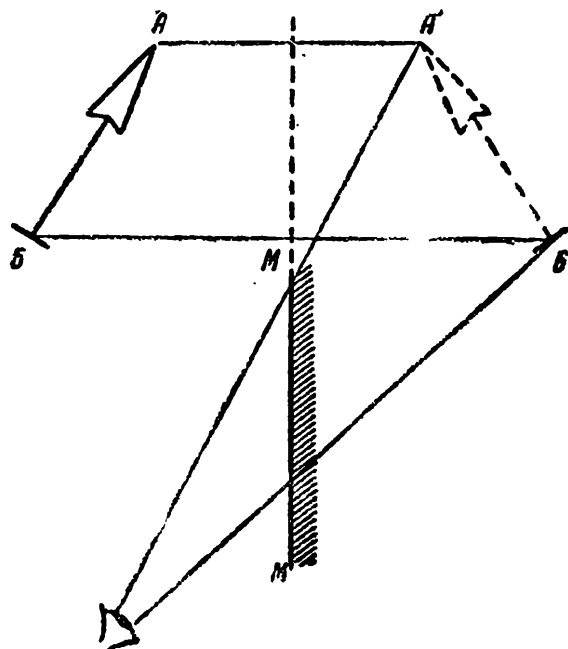


Рис. 15. Видимость изображения в плоском зеркале

отражений в виде стрелки $A''B''$. На рисунке приведена схема построения изображения $A'B'$ в зеркале MM и затем построение в зеркале NN вторичного изображения $A''B''$, для которого мнимое изображение $A'B'$ является предметом. Правила построения здесь те же, что и с одним зеркалом. Чтобы определить пространство, в котором будет видно данное изображение, следует из концов изображения провести прямые через концы плоского зеркала, в котором рассматривается данное изображение.

Если плоское зеркало не закреплено неподвижно, а вращается или качается, поворачиваясь на некоторый угол α , то изображение при этом будет поворачиваться вокруг той же оси на угол, равный 2α (рис. 17).

Перейдем от плоского зеркала к сферическому.

Если отражающей поверхностью служит внешняя сторона сферы, зеркало будет выпуклым, а если внутренняя полость, — зеркало будет вогнутым.

Возьмем выпуклое зеркало MM (рис. 18), перед которым расположена стрелка AB , и проведем из точки A два луча: один AB в произвольном направлении, а другой, AO через центр сферической поверхности. Проведем через точку B нормаль OBP и, построив угол PBG , равный углу

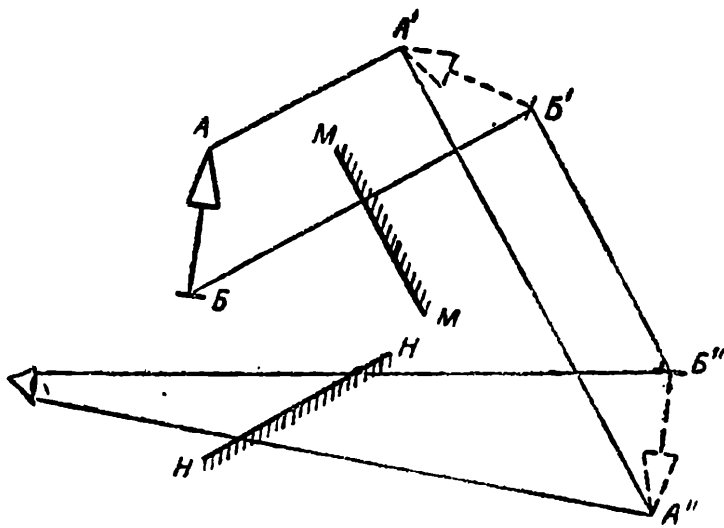


Рис. 16. Изображение в системе плоских зеркал

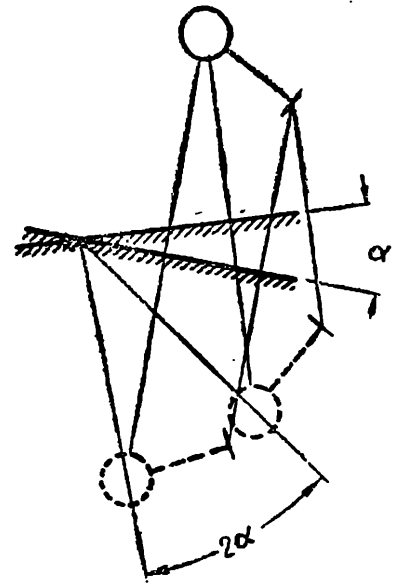


Рис. 17. Изображение в качающемся плоском зеркале

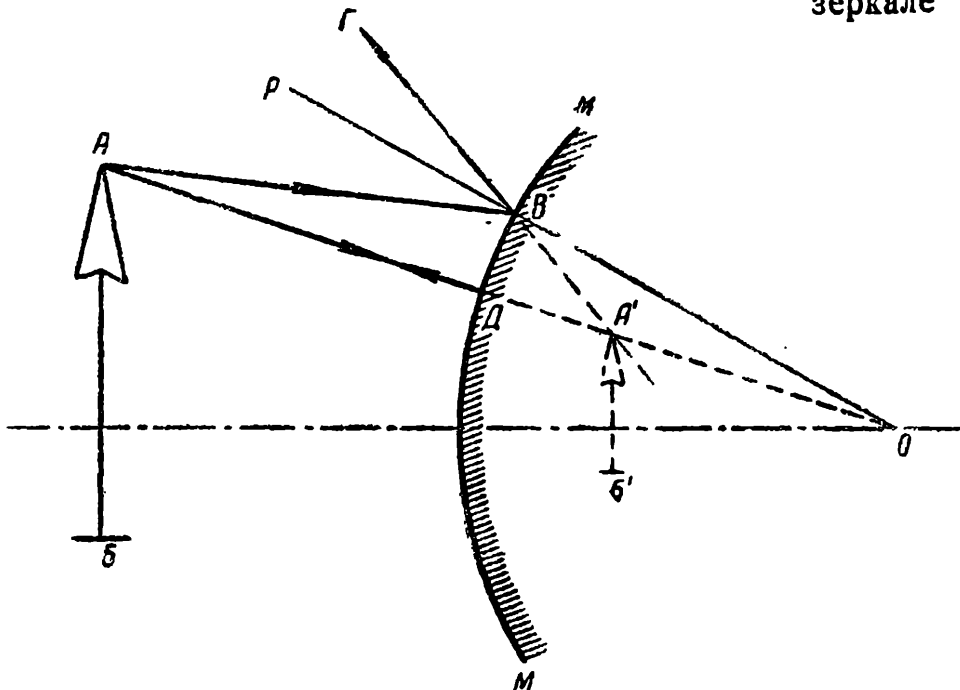


Рис. 18. Изображение в выпуклом зеркале

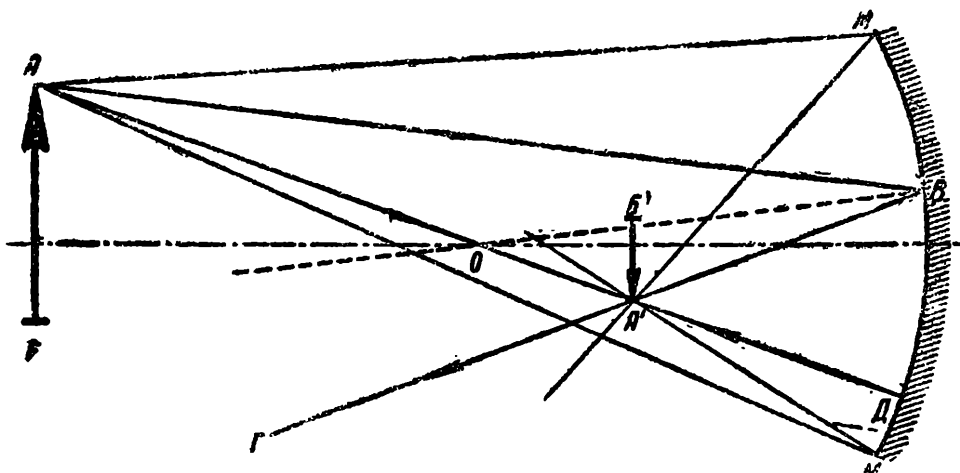


Рис. 19. Уменьшенное изображение в вогнутом зеркале

ABP , получим отраженный луч $BГ$. В точке A' пересечения продолжений лучей $ДА$ и $BГ$ будет находиться изображение точки A .

Точно так же можно построить точку B' , изображающую точку B . В результате $A'B'$ будет изображать стрелку AB .

Как видно из рисунка, изображение будет уменьшенным и прямым. Это изображение—мнимое, так как образовано пересечением не самих лучей, а их продолжений.

Выпуклые зеркала имеют относительно небольшое применение. Чаще применяются, особенно в кинотехнике, вогнутые зеркала.

На рис. 19 стрелка AB находится перед вогнутым зеркалом MM . Проводим из точки A два луча: один AB —произвольный, а другой $АОД$ —через центр O кривизны зеркала. Проведя через точку B нормаль OB и построив угол $ОВГ$, равный углу ABO , получим в точке A' пересечения лучей $BГ$ и $ДА$ действительное изображение точки A . Таким же путем может быть найдено изображение B' точки B . Как видно из рисунка, изображение $A'B'$ —уменьшенное, обратное и действительное.

В отличие от мнимого, действительное изображение можно не только наблюдать глазом, но и воспроизвести на экране. Так, если поместить в плоскости $A'B'$ лист белой бумаги при условии, что стрелка AB обладает достаточной яркостью, например представляет спираль лампы или окно на фоне неба, на бумаге получится ясно видимое изображение $A'B'$.

Проделанные примеры построения изображения показывают, что графическое построение изображения в зеркалах основано на простом использовании закона отражения, то-есть на умении построить отраженный луч, когда дано положение падающего луча.

Нахождение изображения какой-либо точки сводится к нахождению точки пересечения двух лучей, вышедших из одной точки предмета и снова пересекающихся в одной точке после отражения от имеющейся зеркальной поверхности. При этом для облегчения построения берутся не произвольные лучи, а такие лучи, направление которых после отражения заранее известно. Например, луч, падающий по нормали, возвращается по тому же пути в обратном направлении, то-есть отраженный луч совпадает с падающим. В дальнейшем мы увидим, что и в качестве второго луча может быть взят луч, направление отражения которого также заранее известно.

Вернемся к вогнутому зеркалу (см. рис. 19) и представим себе, что каждая точка стрелки AB излучает неограниченный пучок лучей. В таком случае вся поверхность зеркала

ММ будет заполнена этими лучами, и так как любой луч, вышедший из точки A , должен пройти через точку изображения A' , то в точке A' соберутся все лучи, вышедшие из точки A и отраженные от всей поверхности зеркала. Таким образом, вогнутое зеркало превращает падающие на него пучки расходящихся лучей в сходящиеся пучки, то есть собирает расходящиеся пучки. Поэтому вогнутое зеркало часто называют собирательным.

Вогнутое зеркало находит широкое применение в кинотехнике и заслуживает поэтому более детального рассмот-

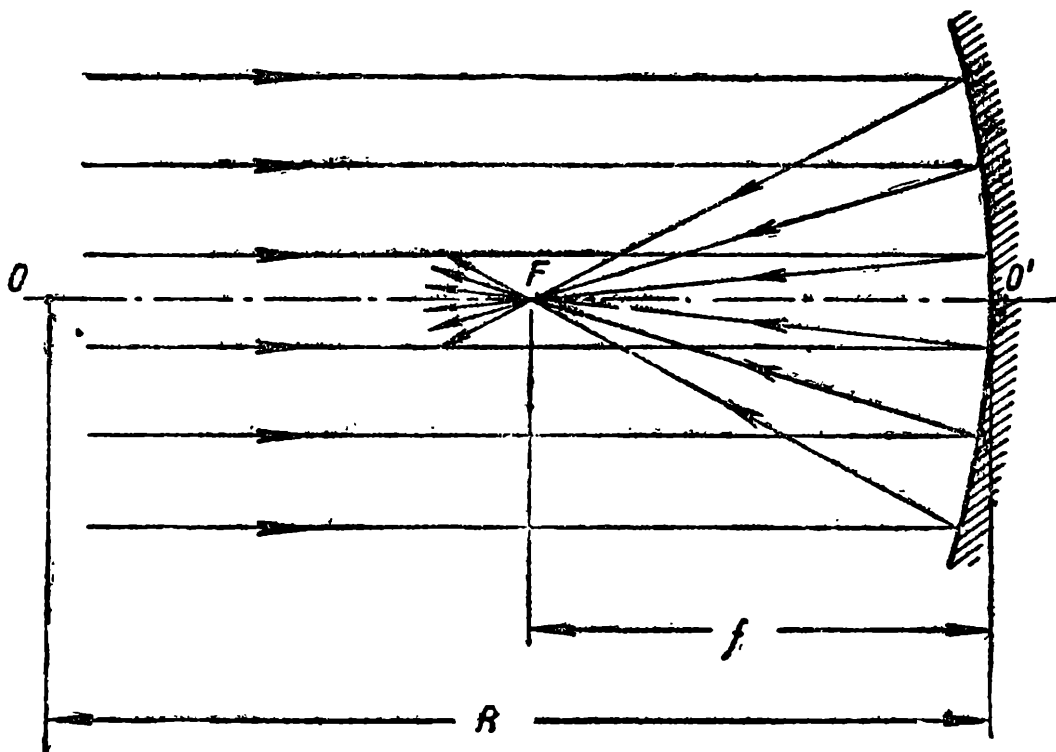


Рис. 20. Положение главного фокуса в вогнутом зеркале

рения. Обычно зеркало имеет круглое очертание. Прямая OO' , проведенная через центр кривизны зеркала (рис. 20) и центр окружности, составляемой краем зеркала, называется главной оптической осью зеркала, или просто осью. Точка пересечения оси с поверхностью зеркала называется вершиной зеркала.

Если на вогнутое зеркало падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после отражения лучи пересекаются в одной общей точке F , лежащей на главной оси и называемой главным фокусом зеркала. Расстояние главного фокуса F от вершины зеркала O' называется главным фокусным расстоянием зеркала и обозначается буквой f .

Элементарный расчет показывает, что главный фокус сферического зеркала, если зеркало имеет небольшой диаметр сравнительно с радиусом кривизны, находится от вер-

шины на расстоянии, равном половине радиуса кривизны, то-есть:

$$f = \frac{R}{2}. \quad (4)$$

Всякий луч, падающий на вогнутое зеркало параллельно главной оптической оси, отразившись от зеркала, пройдет через главный фокус, где пересекаются все лучи, идущие к зеркалу параллельно главной оптической оси. Это обстоя-

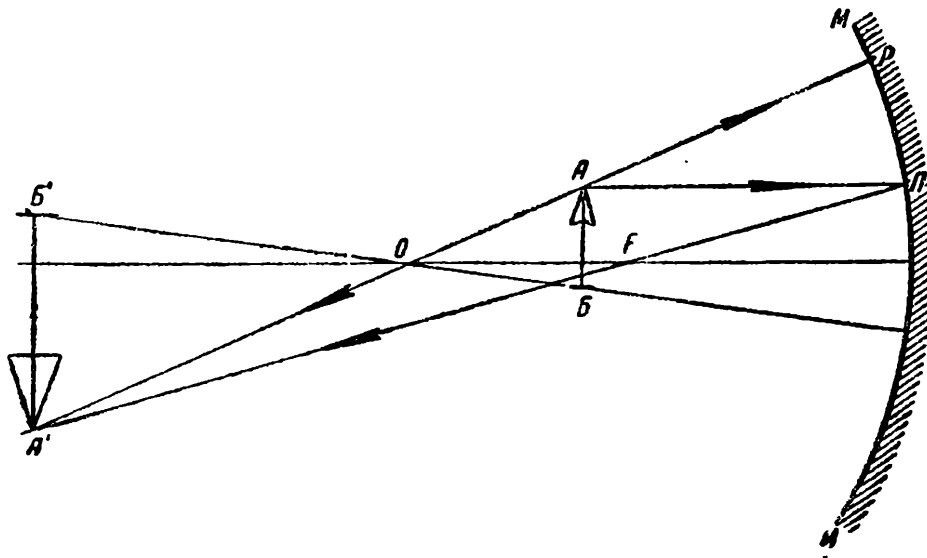


Рис. 21. Увеличенное изображение в вогнутом зеркале

тельство может быть использовано для построения изображения в вогнутом зеркале, когда известно положение центра кривизны и главного фокуса зеркала.

Пусть перед вогнутым зеркалом MM' (рис. 21) между центром O и главным фокусом F расположена стрелка AB . Проведем из точки A два луча: один AP — по нормали, то-есть по радиусу зеркала, а другой AP — параллельно главной оси. Луч AP , отразившись от зеркала, пойдет по PO , а луч AP , отразившись от зеркала, пересечет главную ось в главном фокусе F и при дальнейшем пути пересечется с лучом PO в точке A' , которая и будет действительным изображением точки A . Аналогично может быть построено изображение B' точки B .

Сравнивая рис. 21 и 19, легко установить, что в обоих случаях мы имеем действительное и обращенное (перевернутое „вверх ногами“) изображение предмета, но в то время как на рис. 19 изображение $A'B'$ меньше самого предмета AB , на рис. 21, наоборот, изображение $A'B'$ больше самого предмета AB , то-есть в первом случае зеркало дает уменьшенное, а во втором — увеличенное изображение предмета. Кроме того, на рис. 19 предмет расположен от зеркала на расстоянии большем, чем радиус кривизны, а изображение

расположено между фокусом и центром зеркала, тогда как на рис. 21 предмет расположен между фокусом и центром, а его изображение находится от зеркала дальше, чем центр зеркала. Иными словами, предмет и изображение как бы поменялись своими местами.

Обратимся теперь к рис. 22. Поместим предмет $АВ$, как и прежде, между фокусом и центром зеркала и, построив изображение A в точке A' , будем передвигать точку A сначала к фокусу в точку A_1 , а затем от фокуса в точку A_2 . Луч $АП$, идущий параллельно главной оптической оси,

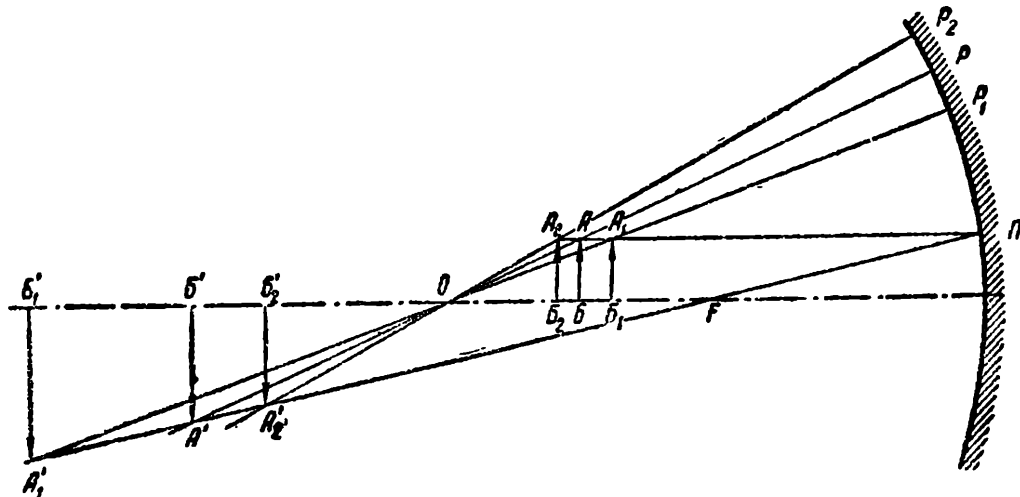


Рис. 22. Влияние положения предмета на размер и положение изображения

при этом не изменит своего направления и, следовательно, не изменится направление и отраженного луча PF , и все изображения точки A , независимо от положения самой точки A на линии $АП$, будут лежать на продолжении линии PF . Проведя лучи A_1P_1 и A_2P_2 и строя отраженные лучи, находим соответственно точки A'_1 и A'_2 изображения точек A_1 и A_2 .

Рис. 22 наглядно показывает, что когда предмет приближается к главному фокусу, изображение его удаляется от зеркала и увеличивается и, наоборот, когда предмет удаляется от фокуса, изображение приближается к зеркалу, но уменьшается. Предмет и изображение как бы связаны между собой, и положение одного определяет положение другого — они, как говорят, сопряжены между собой.

Это сопряжение положения предмета с положением его изображения определяется следующей формулой:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (5)$$

* Для всех величин, входящих в формулу, принято абсолютное значение, то-есть не учитывается их направление, а только длина, так как введение знаков, связанных с направлением, значительно усложняет применение формулы, ничего не меняя в результатах.

Здесь: a — расстояние от предмета до вершины зеркала;
 b — расстояние от изображения до вершины зеркала;
 f — главное фокусное расстояние зеркала;
 R — радиус кривизны зеркала.

Рассмотрим формулу (5).

Значение радиуса зеркала R постоянно, так как в готовом зеркале R не может меняться. Следовательно, не может меняться и f , поскольку оно равно $\frac{R}{2}$. Отсюда следует,

что правая половина равенства (5) постоянна. Постоянна, значит, и левая половина, представляющая собой сумму двух переменных величин: $\frac{1}{a}$ и $\frac{1}{b}$. Следовательно, любое изменение величины a должно вызвать неизбежное изменение величины b , чтобы сумма $\frac{1}{a} + \frac{1}{b}$ оставалась постоянной. Поэтому величины a и b называются сопряженными между собой.

Выше мы наблюдали изменение одной из этих величин по изменениям другой, пользуясь графическим построением.

Графический метод обладает большой наглядностью и должен применяться во всех случаях, когда он легко осуществим, но этот метод обладает одним существенным недостатком, делающим его непригодным в случае очень больших расстояний или бесконечности. При необходимости показать на чертеже большие расстояния или бесконечность чертеж теряет свою наглядность, ибо приходится пользоваться чрезмерно мелким масштабом.

Аналитический способ, то-есть способ расчета при помощи формул, совершенно свободен от этого дефекта и потому особенно успешно может применяться как раз в тех случаях, когда графический способ становится несостоятельным.

Пусть в равенстве (5) a равно бесконечности, то-есть предмет находится очень далеко от зеркала. Подставляя значение a и принимая во внимание, что:

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{\infty} = 0,$$

получаем

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

или

$$b = f.$$

Следовательно, если предмет находится в бесконечности, его изображение расположено в главном фокусе зеркала. Это вполне совпадает с определением главного фокуса.

Рассмотрим еще один случай, когда предмет находится в центре зеркала, то-есть на расстоянии $2f$ от вершины зеркала:

$$a = 2f.$$

Решая уравнение (5) относительно b , получаем:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a} = \frac{a-f}{a \cdot f},$$

откуда

$$b = \frac{a \cdot f}{a-f}. \quad (6)$$

Подставляя вместо a его значение $2f$, получаем:

$$b = \frac{2f \cdot f}{2f-f} = 2f.$$

Значит, в случае, когда предмет находится в центре зеркала, изображение расположено также в центре.

На рис. 23 дано графическое построение такого изображения.

Следует отметить, что в случае расположения предмета в центре зеркала удобнее пользоваться лучом, идущим к зеркалу через главный фокус. Ясно, что, отразившись от зеркала, луч пойдет параллельно главной оси.

Графическое построение показывает, что изображение $A'B'$ предмета AB находится там же, где сам предмет, то-есть изображение действительное, обращенное и по размерам равное предмету.

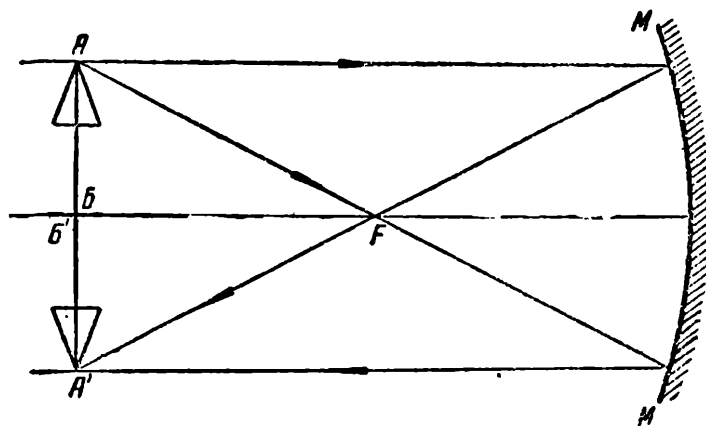


Рис. 23. Образование изображения в центре вогнутого зеркала

Подобное сферическое зеркало находит применение в осветительных системах с лампами накаливания в качестве контротражателя, увеличивающего силу света в данном направлении.

Пусть перед сферическим зеркалом радиусом 250 мм расположен предмет AB на расстоянии 500 мм от зеркала. Найдем положение изображения.

По формуле (4) находим фокусное расстояние зеркала:

$$f = \frac{R}{2} = \frac{250}{2} = 125 \text{ мм.}$$

По формуле (6), принимая во внимание, что $a = 500$, находим расстояние b , на котором расположено изображение $A'B'$ предмета AB :

$$b = \frac{a \cdot f}{a - f} = \frac{500 \cdot 125}{500 - 125} = 166,5 \text{ мм.}$$

Следовательно, изображение расположено на расстоянии 166,5 мм от вершины зеркала.

Придвинем предмет ближе к зеркалу так, чтобы $a = 250$ мм. Тогда

$$b = \frac{a \cdot f}{a - f} = \frac{250 \cdot 125}{250 - 125} = 250 \text{ мм,}$$

то-есть числовой пример дает такой же результат, какой мы получили графически на рис. 23.

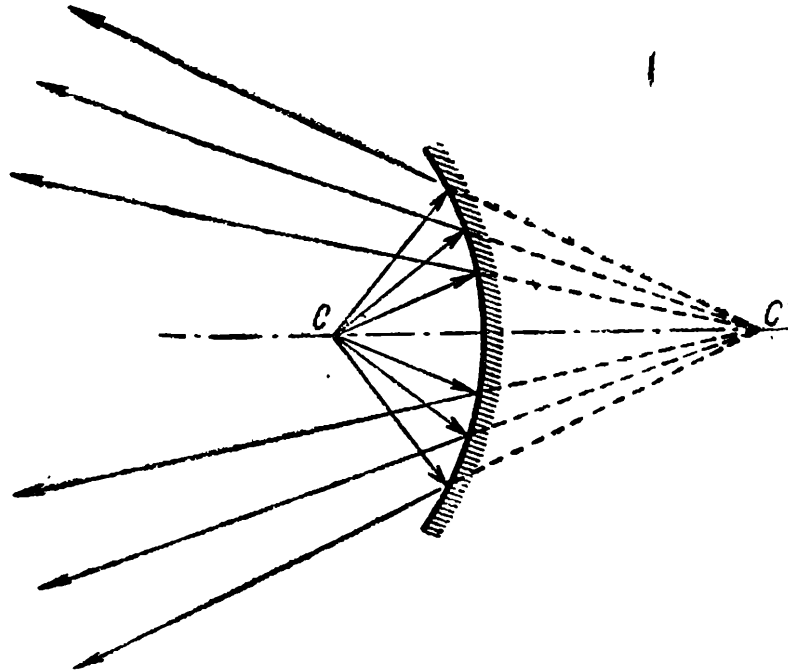


Рис. 24. Мнимое изображение точки в вогнутом зеркале

Если еще больше приблизить предмет к зеркалу так, чтобы расстояние a стало меньше f , например, составило 100 мм, то:

$$b = \frac{a \cdot f}{a - f} = \frac{100 \cdot 125}{100 - 125} = \frac{12500}{-25} = -500 \text{ мм.}$$

Знак минус, который имеет расстояние b , указывает, что изображение находится по другую сторону зеркала и, следовательно, оно мнимое (рис. 24).

Как видно из рисунка, в этом случае из зеркала выходит пучок расходящихся лучей.

СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

Мощность лучистой энергии, как и любого другого вида энергии, может измеряться в единицах мощности, например, в ваттах. Однако для видимого света такое измерение неудобно и лишено практического смысла, так как одна и та же мощность лучистой энергии производит на наш глаз различное зрительное ощущение в зависимости от длины волны. Поэтому практически целесообразнее говорить не о мощности лучистой энергии, а о световом потоке, то-есть о такой мощности лучистой энергии, которая воспринимается глазом и оценивается по световому ощущению.

Известно, что суммарное действие всего видимого спектра вызывает ощущение белого света, тогда как отдельные участки спектра воспринимаются глазом в виде излучения, обладающего определенным цветом, причем ощущение, вызываемое красными и синими лучами при одной и той же мощности излучения, во много раз слабее ощущения желтого и желто-зеленого цвета.

На рис. 2 была приведена кривая видности для нормального глаза при дневном освещении, а в табл. 2 даны коэффициенты относительной видности K_λ для различных длин волн, причем за единицу принята видность лучистой энергии с длиной волны $\lambda = 556$ м μ .

Таблица 2

Относительная видность излучения

Цвет	Длина волны λ в миллимикронах м μ	Коэффициент видности K_λ	Цвет	Длина волны λ в миллимикронах м μ	Коэффициент видности K_λ
Фиолетовый	400	0,0004	Желтый . . .	580	0,870
"	410	0,0012	Оранжевый . .	590	0,757
"	420	0,0040	"	600	0,631
"	430	0,0116	"	610	0,503
Синий	440	0,023	"	620	0,381
"	450	0,038	Красный . . .	630	0,265
Голубой . . .	460	0,060	"	640	0,175
"	470	0,091	"	650	0,107
"	480	0,139	"	660	0,061
"	490	0,208	"	670	0,032
Зеленый . . .	500	0,323	"	680	0,017
"	510	0,503	"	690	0,0082
"	520	0,710	"	700	0,0041
"	530	0,862	"	710	0,0021
Желтый . . .	540	0,954	"	720	0,00105
"	550	0,995	"	730	0,00052
"	556	1,000	"	740	0,00025
"	560	0,995	"	750	0,00012
"	570	0,952	"	760	0,00006

Пользуясь коэффициентом относительной видности, можно определить световой поток суммированием мощности лучистой энергии для каждой длины волны, умноженной на соответственную видность, причем для белого света такая формула будет выглядеть довольно сложно:

$$F = P_1 \cdot K_1 + P_2 \cdot K_2 + P_3 \cdot K_3 + \dots + P_n \cdot K_n.$$

Такое пользование энергетическими единицами неудобно и практически оказалось более целесообразным создать специальные фотометрические единицы и соответственно особые приемы измерения, отличающиеся тем, что в них используются свойства глаза, непосредственно участвующего в измерениях, откуда сама фотометрия и получила название визуальной фотометрии.

Кроме визуальной фотометрии, являющейся по существу субъективной фотометрией, существуют объективные методы световых измерений—объективная фотометрия, пользующаяся вместо глаза фотоэлементом. Наиболее пригодным для этой цели фотоэлементом является селеновый фотоэлемент, кривая чувствительности которого очень близко подходит к кривой чувствительности глаза, то есть к кривой видности.

В кинопроекционной практике получили применение только приборы объективной фотометрии как наиболее портативные и удобные в обращении.

Исходным понятием для установления световых величин является световой поток, а в качестве основной единицы измерения принята единица светового потока—люмен (лм), точное значение которой для СССР определяется по эталонным лампам накаливания, хранимым во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ—бывшая Главная палата мер и весов) в Ленинграде.

Световой поток принято обозначать буквой F .

Чтобы световой поток мог характеризовать источник света, очевидно, нужно отнести его, во-первых, к определенному источнику, то есть установить место, откуда исходит поток, и затем, поскольку свет распространяется в пространстве, надо определить ту часть пространства, в пределах которой световой поток распространяется, то есть указать телесный угол, заключающий в себе рассматриваемый поток.

Телесные углы измеряются стереорадианами или, сокращенно, стерадианами, подобно тому, как плоские углы измеряются радианами. Как известно, единицу плоского угла составляет один радиан, равный такому плоскому

углу, длина дуги которого равна радиусу, то-есть плоский угол получается делением длины дуги на радиус:

$$\rho = \frac{l}{r}.$$

Аналогично этому единицу телесного угла—один стерадиан—составляет такой телесный угол (рис. 25,а) который на шаровой поверхности, описанной из вершины угла, как

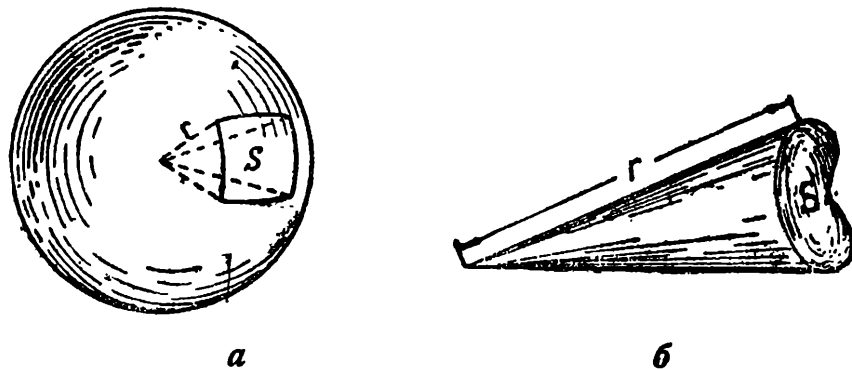


Рис. 25. Телесный угол

из центра, вырезает площадь, равную квадрату радиуса. Следовательно, здесь площадь сферы делится на квадрат радиуса:

$$\omega = \frac{S}{r^2}.$$

Конечно, при этом совершенно безразлично, какую конфигурацию имеет площадь S ,—квadratную, круглую или какую-либо другую (рис. 25,б).

Если телесный угол будет расти, то-есть будет увеличиваться его раствор, то в пределе он может охватить все пространство, окружающее его вершину. Чтобы измерить такой телесный угол, очевидно, полную поверхность шара, надо разделить на квадрат его радиуса. Так как поверхность шара составляет $4\pi r^2$, полный телесный угол будет равен:

$$\omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi = 12,57 \text{ стерадиан}.$$

Уменьшая телесный угол, мы переходим от широкого пучка к более узкому и в пределе от пучка к оси пучка, то-есть к определенному направлению распространения света. Если бы источник света излучал поток равномерно по всем направлениям, такой источник можно было бы характеризовать только одним световым потоком, но так как реальные источники имеют неравномерное распределе-

ние светового потока, бывает необходимым указать его распределение в том или ином направлении.

В качестве такой характеристики может служить сила света источника, то-есть световой поток, распространяющийся в единице телесного угла в данном направлении:

$$I = \frac{F}{\omega}. \quad (7)$$

Сила света измеряется в международных свечах (*св*). Одна международная свеча есть сила света точечного источника в направлении равномерного испускания одного люмена внутри телесного угла в один стерадиан, то-есть сила света, выраженная в свечах, получается от деления светового потока, выраженного в люменах, на телесный угол, выраженный в стерадианах:

$$\text{сила света} = \frac{\text{световой поток}}{\text{телесный угол}}.$$

Несмотря на такую условность в определении силы света, исторически сложилось так, что сила света до сих пор является наиболее распространенной световой величиной, принятой для количественной характеристики источников света.

Так как реальные источники обладают неодинаковой силой в разных направлениях, то для наглядной характеристики источников прибегают к графическому изображению распределения силы света. Если, измерив силу света по всевозможным направлениям, отложить полученные цифры в виде векторов в тех же направлениях, а через концы векторов провести общую поверхность, то полученное тело может полностью характеризовать источник света. Такое тело называется фотометрическим телом и так как оно чаще всего симметрично или представляет собой тело вращения, его изображают не целиком, а только его сечения, проведенные через источник в продольном или поперечном направлении, получая соответственно продольную или поперечную кривую распределения силы света. На рис. 26 приведены кривые распределения силы света кинопроекционной лампы 110 в \times 300 *вт*.

В том случае, когда известен полный световой поток источника, приблизительное значение силы света легко определить, разделив значение потока на полный телесный угол:

$$I_{\text{ср}} = \frac{F}{4\pi} = \frac{F}{12,57}.$$

Это так называемая средняя сферическая сила света.

Сила света в заданном направлении может быть получена из средней сферической силы, если известен коэффициент направленности источника.

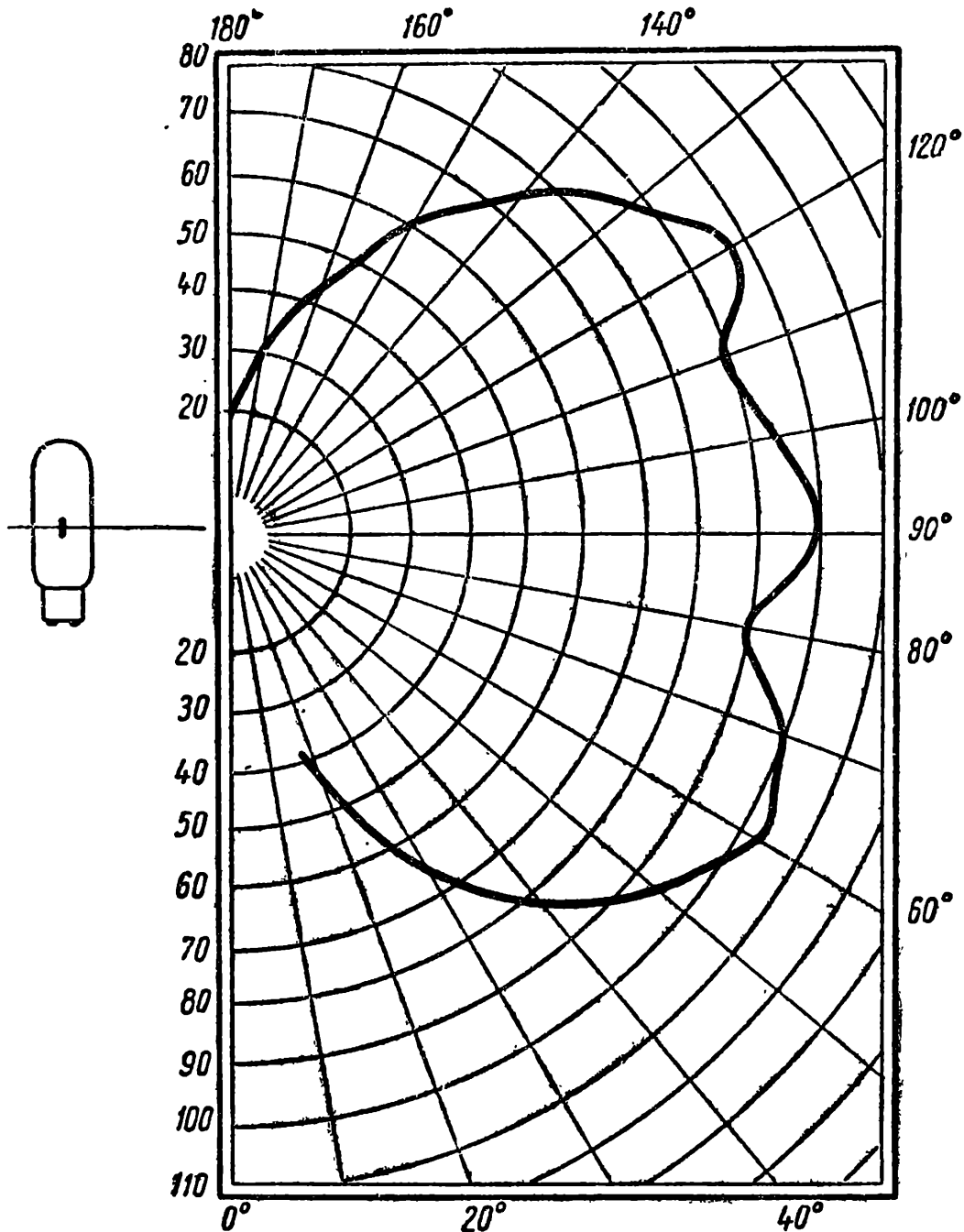


Рис. 26. Кривая распределения силы света лампы накаливания 110×300 в % от осевой силы света

Совершенно понятно, что точно так же по заданной средней сферической силе света можно определить и полный световой поток. Например, лампа в 75 свечей дает полный световой поток:

$$F = I \cdot \omega = I \cdot 4\pi = 75 \cdot 12,57 = 943 \text{ лм.}$$

Когда световой поток падает на какую-нибудь поверхность, он освещает ее, то-есть, распределяясь по этой поверхности, он создает некоторую освещенность. Осве-

щенность E поверхности есть отношение светового потока F , падающего равномерно на поверхность, к ее площади S :

$$E = \frac{F}{S}. \quad (8)$$

Единицей освещенности является люкс ($лк$), равный освещенности, создаваемой световым потоком в один люмен, равномерно распределенным на площади в один квадратный метр ($м^2$). Десять тысяч люкс составляют один фот ($ф$).

Так как $1 м^2$ содержит $10000 см^2$, то освещенность в один фот может быть определена как освещенность, создаваемая световым потоком в один люмен, равномерно распределенным на площади в один квадратный сантиметр. Если в формуле (8) F выразить в люменах, S —в квадратных метрах, то освещенность E получится в люксах:

$$\text{освещенность} = \frac{\text{световой поток}}{\text{площадь}}$$

и

$$\text{люкс} = \frac{\text{люмен}}{\text{квадратный метр}}.$$

Например, чтобы на экране размером $3 \times 4 м = 12 м^2$ получить освещенность $60 лк$, необходим световой поток:

$$F = S \cdot E = 12 \cdot 60 = 720 лм.$$

Чтобы определять освещенность, когда известна сила света, а не световой поток, необходимо иметь прямую зависимость освещенности от силы света. Пусть источник света с силой I , одинаковой во всех направлениях, расположен в центре полого шара, создавая на стенках шара освещенность E . Небольшая произвольная площадь S , взятая на шаровой поверхности, составляет:

$$S = \omega \cdot r^2,$$

где ω —телесный угол;

r —радиус шара.

Тогда

$$E = \frac{F}{S} = \frac{F}{\omega \cdot r^2}.$$

Но так как

$$\frac{F}{\omega} = I,$$

то

$$E = \frac{F}{\omega \cdot r^2} = \frac{I}{r^2}. \quad (9)$$

Это очень важное практически соотношение читается следующим образом: освещенность плоскости, перпендикуляр-

ной направлению света, прямо пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$$\text{освещенность} = \frac{\text{сила света}}{\text{квадрат расстояния}}.$$

При этом сила света берется в международных свечах, расстояние в метрах, а освещенность получается в люксах. Например, лампа в 100 свечей создает на расстоянии 2 м освещенность 25 лк, так как

$$E = \frac{I}{r^2} = \frac{100}{2^2} = 25 \text{ лк.}$$

Поэтому иногда освещенность обозначают не в люксах, а в свечаметрах, как это делается, например, при определении светочувствительности фотоматериалов. Следовательно: 1 свеча-метр = 1 люксу.

В иностранной литературе встречается аналогичное обозначение в футо-свечах (foot candle).

1 фут-свеча = 10,76 люкса.

Если освещаемая площадь S_1 не перпендикулярна направлению оси пучка, а составляет с ним некоторый угол α , то, как видно из рисунка 27, освещенность E_1 будет меньше, так как освещенная площадь S_1 в этом случае будет больше, чем площадь S , перпендикулярная оси, а именно:

$$S_1 = \frac{S}{\cos \alpha},$$

где α — угол между осью пучка и нормалью к плоскости S_1 . Следовательно:

$$E_1 = \frac{F}{S_1} = \frac{F \cdot \cos \alpha}{S} = E \cdot \cos \alpha.$$

Объединяя это выражение с формулой (9), получаем общее выражение освещенности:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha. \quad (10)$$

Освещенность E площади, нормаль к которой составляет с осью пучка угол α от источника света C , находящегося на расстоянии r от площади, прямо пропорциональна силе света источника и косинусу угла α и обратно пропорциональна квадрату расстояния r .

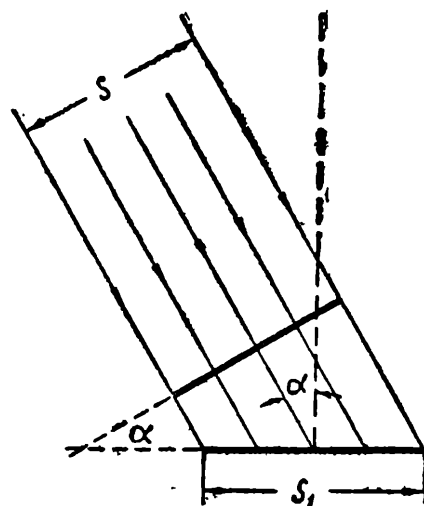


Рис. 27. Освещенность при наклонном падении пучка

Например, если в предыдущем примере освещаемая площадь будет отклоняться от перпендикулярного положения на 45° , то освещенность ее будет составлять:

$$E_1 = 25 \cdot \cos 45^\circ = 25 \cdot 0,7 = 17,5 \text{ лк.}$$

В табл. 3 приведены наиболее часто встречающиеся значения освещенности.

Таблица 3

Часто встречающиеся освещенности

В светлой комнате	100— 1 000	лк
В пасмурный день на открытом месте . .	500— 1 500	"
В яркий солнеч. день на открытом месте .	70 000—100 000	"
На рабочем столе	50— 250	"
При киносъемке	2 000— 10 000	"
Достаточная для чтения	20	"
Достаточная для ориентировки	1	"
От полной луны	0,2	"

Приборы, служащие для измерения силы света, называются фотометрами. Все визуальные фотометры устроены так, что поле, освещаемое сравниваемым источником, лежит рядом, соприкасаясь с полем, освещаемым эталонным источником света, а их освещенности уравниваются между собой тем или иным способом, например, изменением расстояния или угла наклона, исходя из формулы (10). Роль глаза сводится к регистрации равенства полей. Фотометрия, то-есть наука о световых измерениях, играет видную роль в деле развития и улучшения светотехники.

Когда мы наблюдаем несколько светящихся тел, обладающих одинаковой силой света, то в зависимости от того, каковы наблюдаемые размеры светящегося тела, оно будет казаться тем ярче, чем меньше видимая светящаяся площадь. Если же два источника имеют одинаковые видимые размеры, но дают различную силу света, то более ярким будет казаться тот источник, который дает с той же площади большую силу света.

Таким образом, яркость есть отношение силы света источника к светящейся площади, видимой в данном направлении. Яркость измеряется в стильбах (сб) и обозначается буквой B .

Один стильб представляет собой яркость равномерно светящейся поверхности в перпендикулярном к ней направлении, испускающей в том же направлении свет силой в одну свечу с одного квадратного сантиметра. Из определения следует:

$$B = \frac{I}{S} \quad (11)$$

где B —яркость в стильбах;
 I —сила света в свечах;
 S —площадь в квадратных сантиметрах.

$$\text{Яркость} = \frac{\text{сила света}}{\text{светящуюся площадь}}.$$

Кратная единица яркости, в тысячу раз большая стильба, называется килостильбом ($ксб$), а в 1000 раз меньшая стильба, — миллестильбом ($мсб$).

$\frac{1}{10}$ миллестильба составляет один децимиллестильб ($дмсб$) и является по ГОСТу основной единицей яркости:

$$\text{децимиллестильб} = \frac{\text{международная свеча}}{\text{квадратный метр}}.$$

Яркость является наиболее важной световой величиной, так как именно она воспринимается непосредственно глазом и она же служит важнейшей характеристикой источника света в смысле его пригодности для проекционных целей.

Яркость кратера дуговой лампы составляет для бесфитильных углей 12—16 $ксб$. Яркость кратера дуги интенсивного горения достигает 60 и даже 90 $ксб$.

Когда светящееся тело не сплошное, а имеет промежутки, как, например, в лампах накаливания, то в светящуюся площадь включаются и эти промежутки; в таком случае говорят о габаритной яркости источника, так как габаритом называются размеры наружного очертания тела, включая и не занятые спиралью промежутки. Габаритная яркость меньше действительной яркости спирали, так как она получается от деления той же силы света на большую площадь. Габаритная яркость различных киноламп накаливания колеблется от 500 до 3000 $сб$.

ВИДИМОСТЬ ТЕЛ И СВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Яркостью обладают не только источники света, но и любое освещенное тело, если только это тело диффузно рассеивает падающий на него свет. Диффузное рассеяние является непременным условием видимости и заключается в том, что каждая точка тела становится как бы источником света, испускающим лучи во все стороны.

Если тело не обладает диффузным рассеянием, его нельзя видеть, как мы не видим чистого воздуха, хороших витринных стекол или совершенно чистой поверхности зеркала*.

* При ремонтных и строительных работах все зеркала и зеркальные стекла полагается замазывать мелом, чтобы их поверхность была легко различима.

Отношение тела к падающему на него свету называется его световой характеристикой. В зависимости от того, как изменяется световой поток, упавший на тело, различают тела непрозрачные, прозрачные и мутные, блестящие и матовые, светлые и темные, бесцветные и обладающие цветом.

Световая характеристика определяется тем, какая часть падающего света отражается от него, какая проходит через тело, и, наконец, какая поглощается в толще тела или на

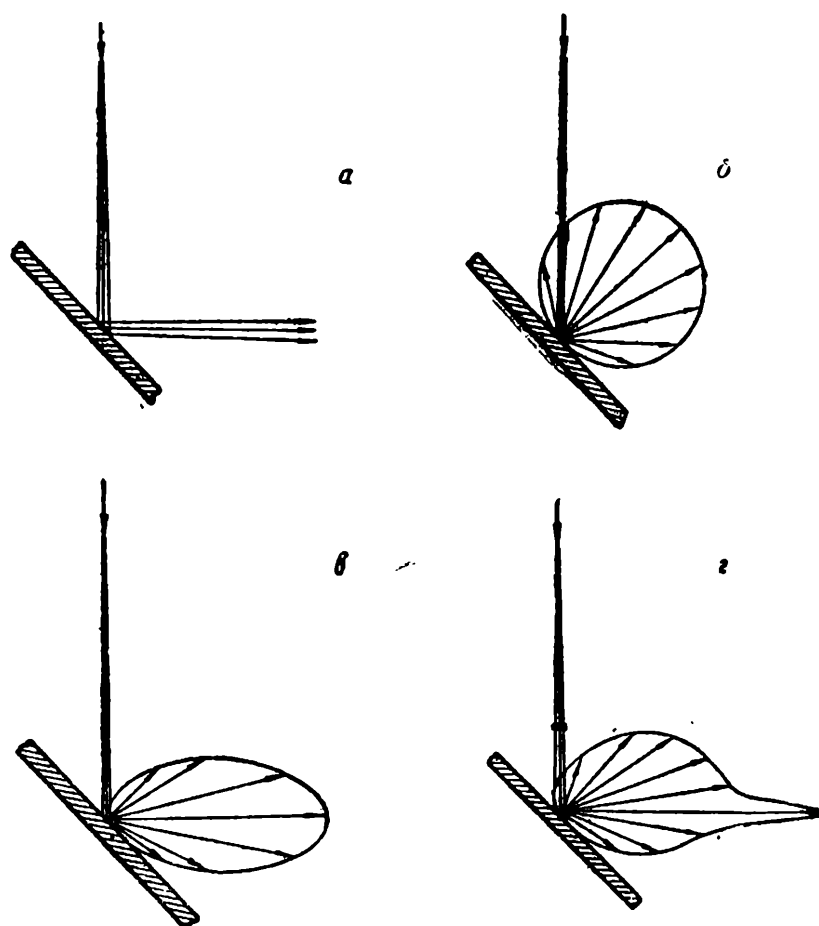


Рис. 28. Схемы отражения

его поверхности. Как при отражении, так и при прохождении через тело пучки света могут сохранять свою направленность, не испытывая диффузного рассеяния, если поверхность раздела идеально гладкая, или, наоборот, подвергаться значительному диффузному рассеянию, когда поверхность раздела обладает шероховатостью, соизмеримой с длиной волны света, или когда внутри однородного прозрачного вещества имеются какие-либо посторонние включения, например, мелкие взвешенные частицы.

В зависимости от характера пространственного распределения отраженного или проходящего света различают случаи строго направленного, полностью рассеянного или, наконец, смешанного отражения и пропускания. Практически чаще всего встречаются одновременное отражение, про-

пускание и поглощение, причем в подавляющем большинстве эти явления сопровождаются заметным диффузным рассеянием.

Количественная оценка каждого из них выражается соответствующим коэффициентом, обозначаемым обычно греческой буквой. Коэффициент отражения обозначается буквой ρ (ро), коэффициент пропускания — буквой τ (тау) и коэффициент поглощения — буквой α (альфа). Кроме того, в первых двух коэффициентах учитывается наличие или отсутствие диффузного рассеяния.

Совершенно очевидно, что $\rho + \tau + \alpha = 1$ и, следовательно, каждый из них в отдельности, как правило, не достигает единицы.

Общим коэффициентом отражения называется отношение величины отраженного светового потока F_p к падающему потоку F_i :

$$\rho = \frac{F_p}{F_i}, \quad (12)$$

где i указывает угол падения, то есть угол, составленный осью падающего пучка с нормалью к поверхности в точке падения пучка.

На рис. 28 приводятся схемы отражения от четырех различных поверхностей: совершенно гладкой зеркальной a , матовой идеально рассеивающей b , гладкой матовой или зернистой поверхности v и полублестящей z .

Схема a — типичное направленное или зеркальное отражение. Направление отраженного пучка в этом случае строго подчиняется закону равенства углов. Так отражает свет совершенно чистая зеркальная поверхность, которая используется в оптических приборах для поворота пучка и в сферических зеркалах.

В табл. 4 приведены значения коэффициента зеркального отражения различных поверхностей, встречаемых в кинотехнике.

Таблица 4

Коэффициент зеркального отражения

М а т е р и а л	Коэффициент отражения
Зеркало тыльного серебрения	0,80—0,85
Зеркало наружного серебрения свежее	0,88—0,95
Зеркало наружного серебрения старое	0,70—0,80
Зеркало наружного алюминирования	0,73—0,82
Хром	0,60—0,70
Никель	0,55—0,65
Алюминий	0,65—0,72
Стекло чистое (одна поверхность)	0,04—0,06

При зеркальном отражении размер изображения не изменяется, но сила света благодаря потерям на отражение несколько уменьшается и становится равной:

$$I_p = I \cdot \rho.$$

Следовательно, яркость зеркального изображения принимает значение:

$$B_p = B \cdot \rho.$$

Так как значение ρ для зеркал близко к единице, яркость зеркального изображения практически равна яркости светящегося тела.

Схема б — идеально матовая поверхность, которая диффузно рассеивает весь падающий на нее световой поток. Здесь направление отраженного пучка совершенно не зависит от угла падения.

Практически получить полное рассеяние очень трудно, особенно когда угол падения пучка велик (близок к 90°) и свет скользит по поверхности; примерно характером полного рассеяния обладает обычный киноэкран для проекции на отражение или стена, покрытая белой клеевой краской.

В табл. 5 приводятся значения коэффициентов диффузного отражения различных материалов.

В этом случае яркость источника, освещающего поверхность по схеме б, не имеет никакого значения и ее нельзя установить по одному только коэффициенту отражения, тогда как при зеркальном отражении яркость источника легко установить путем введения коэффициента отражения.

Таблица 5

Коэффициент диффузного отражения

М а т е р и а л	Коэффициент отражения
Белая клеевая краска	0,73—0,80
Сернокислый барий	0,95—0,97
Углекислый магний	0,96—0,99
Снег	0,78
Белая чертежная бумага	0,70—0,78
Белый песок	0,25
Черное сукно	0,01—0,04
Черный бархат	0,002—0,01

При диффузном отражении, как видно из рис. 28, фотометрическое тело принимает вид шара, касательного к отражающей поверхности в точке падения пучка. В этом

случае отражающая поверхность в любом направлении обладает одинаковой яркостью, равной:

$$B = \rho \cdot \frac{E}{\pi}, \quad (13)$$

где B — выражено в стильбах, а E — в фотах.

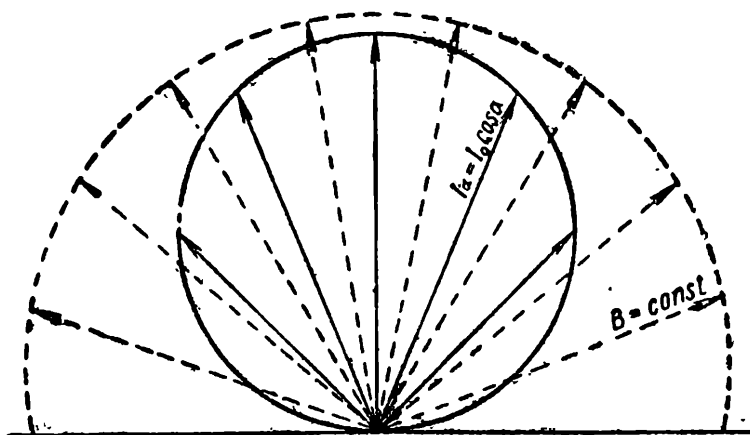


Рис. 29. Кривые яркости и силы света при диффузном отражении

Если яркость в любом направлении одинакова, сила света должна меняться по тому же закону, по которому изменяется видимая площадь, то-есть:

$$I_\alpha = I \cdot \cos \alpha, \quad (14)$$

потому что

$$S_\alpha = S \cdot \cos \alpha,$$

а

$$I_\alpha = B \cdot S_\alpha = B \cdot S \cdot \cos \alpha.$$

Если, разбив угол в 180° на равные части, построить фотометрическое тело, отвечающее формуле (14), получим окружность, касающуюся прямой, изображающей собой сечение диффузно отражающей плоскости.

Кривая яркости в этом случае, как показано на рис. 29 пунктиром, будет иметь вид полуокружности, опирающейся своим диаметром на ту же прямую.

Схема *в* (см. рис. 28)—матовая или зернистая поверхность. Отражение направленно-рассеянное, телесный угол отраженного потока больше падающего, но направление отраженного потока зависит от угла падения пучка. Такой характер отражения дают жемчужные и металлизированные экраны. Первые отражают преимущественно в том направлении, откуда падает пучок. Металлизированные экраны дают несколько меньшее рассеяние, а направление максимума подчиняется закону равенства углов.

Схема *г* (см. рис. 28) повторяет случай *в*, но, кроме широкого рассеянного потока, на этой схеме виден узкий

пучок ясно выраженного направленного отражения, накладывающегося на рассеянный поток. Это — смешанное отражение.

В последних двух схемах общий коэффициент отражения состоит из двух слагающих — коэффициента диффузного отражения и коэффициента зеркального отражения, причем эти слагающие могут изменяться для одной и той же поверхности в зависимости от угла падения пучка.

Для характеристики матовых поверхностей и полупрозрачных тел пользуются еще коэффициентом яркости r , под которым понимается отношение яркости тела в данном направлении α и при данных условиях освещения, к яркости идеально рассеивающей абсолютно белой поверхности при той же освещенности.

Под абсолютно белой поверхностью понимают идеально рассеивающую поверхность с коэффициентом отражения $\rho = 1$ для всех участков видимого спектра. Аналогично формуле (13) можно написать:

$$B_{\alpha} = r_{\alpha} \frac{E}{\pi}. \quad (13a)$$

Коэффициент яркости определяет собой видимость тела и сохраняет смысл, строго говоря, только при отсутствии направленного отражения, так как в противном случае мы будем наблюдать уже не данную поверхность, а отраженное изображение источника света, яркость которого не зависит от освещенности наблюдаемой поверхности.

Однако практически пользуются коэффициентом яркости и для оценки поверхностей, имеющих значительную зеркальную составляющую отражения, и тогда коэффициент яркости принимает значение больше единицы.

Следует отметить, что наблюдаемая глазом или фотографируемая камерой яркость поверхности не зависит от расстояния до объекта наблюдения или съемки. Когда мы приближаемся к предмету, в глаз попадает больший световой поток, идущий от наблюдаемого предмета, так как увеличивается телесный угол, охватываемый зрачком глаза, но при этом ровно во столько же раз растет и размер изображения на сетчатке глаза или на матовом стекле камеры, и, следовательно, освещенность в глазу на площади, занятой изображением рассматриваемого тела, остается одной и той же.

Таким образом, наблюдаемые яркости B определяются освещенностью E поверхности и ее коэффициентом яркости r и не зависят от расстояния до глаза. Сама же освещенность E совершенно не зависит от световой характеристики освещаемой поверхности, то-есть безразлично, падает ли

свет на белую бумагу или на черный бархат, — освещенность остается одной и той же.

Поскольку диффузно рассеивающая поверхность, будучи освещенной, приобретает определенную яркость, ее можно рассматривать как источник света. Например, представим себе белый экран размером $1,5 \times 2$ м, коэффициент яркости которого $r = 0,75$ и освещенность $E = 300$ лк $= 0,03$ фота. Яркость такого экрана будет составлять:

$$B = r \frac{E}{\pi} = 0,75 \frac{0,03}{\pi} = 0,00716 \text{ сб.}$$

Сила света по перпендикулярному к поверхности экрана направлению будет:

$$I = S \cdot B,$$

где S должно быть выражено в квадратных сантиметрах, а B в стильбах. Подставляя наши данные, получим:

$$I = 150 \cdot 200 \cdot 0,00716 = 215 \text{ свечей.}$$

Разумеется, что поверхность, обладающую силой света больше 200 свечей, можно с полным правом назвать источником света, но чтобы не вносить путаницы, тело, светящееся отраженным или проходящим диффузно рассеянным светом, принято называть вторичным источником света в отличие от первичных источников, называемых просто источниками или самосветящимися телами. Формальным признаком различия является то обстоятельство, что для видимости вторичного источника необходимо наличие света, исходящего от другого источника, тогда как самосветящееся тело видимо при любых условиях, то-есть независимо от наличия или отсутствия других источников.

Так как при обычных освещенностях значение яркости в стильбах выражается очень малыми дробями, часто предпочитают обозначать яркость в других величинах — апостильбах (асб).

Яркость в один апостильб или люкс на белом есть такая яркость, которую имеет идеально рассеивающая абсолютно белая поверхность при освещенности в один люкс. Яркость в 1 асб соответствует $3,2 \cdot 10^{-5}$ сб*. Если коэффициент яркости освещенной поверхности составляет r , то яркость поверхности будет:

$$B_e = r \cdot E \text{ асб.} \quad (136)$$

* Это следует из формулы (13), если освещенность выразить не в фотах, а в люксах, то-есть в 10 000 раз меньших единицах, и для коэффициента отражения принять $r = \rho = 1$.

Тогда

$$B_e = \frac{E}{\pi} \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-5} E \text{ сб.}$$

Так, если экран имеет коэффициент яркости 0,7 и освещенность 100 лк, то его яркость будет составлять:

$$V_e = 0,7 \cdot 100 = 70 \text{ асб.}$$

В иностранной литературе иногда встречается обозначение яркости в ламбертах. Один ламберт есть яркость, которую имеет идеально рассеивающая абсолютно белая поверхность, обладающая освещенностью в 1 фот.

Один ламберт составляет $\frac{1}{\pi}$ стильба, или 10 000 асб.

Все сказанное об отражении может быть повторено применительно к пропусканию. При прохождении светового потока через прозрачные и полупрозрачные тела наблюдаются те же четыре схемы, которые мы рассматривали выше, с той разницей, что при пропускании имеет место еще неизбежное отражение от поверхности, обращенной к источнику света. Если учитывать характер этой поверхности, которая может быть блестящей, матовой, грубо шероховатой и т. д., то число комбинаций здесь может быть очень большим и вместе с тем может изменяться доля проходящего света. На рис. 30 приводятся только наиболее характерные случаи.

Общий коэффициент пропускания τ определяется отношением светового потока, прошедшего через тело, к световому потоку, упавшему на тело:

$$\tau = \frac{F_\tau}{F}. \quad (15)$$

На схеме *a* (см. рис. 30) показано, что при направленном пропускании телесный угол пучка не изменяется и поэтому коэффициент пропускания может быть охарактеризован отношением яркости источника, видимого сквозь данное тело, к яркости того же источника, наблюдаемого непосредственно:

$$\tau = \frac{V_\tau}{V}.$$

Происходящие при этом потери на отражение для двух совершенно гладких поверхностей, ограничивающих прозрачное тело, составляют при углах падения до 60° около 10% и сильно возрастают при увеличении угла падения.

На схеме *b* (см. рис. 30) показано совершенно рассеянное пропускание, которое дают обычно молочные стекла. Если молочное стекло дает полное рассеяние проходящего света, то коэффициент яркости равен коэффициенту пропускания и составляет примерно:

$$r = \tau \approx 0,4.$$

На схемах *в* и *г* (см. рис. 30) показаны направленно-рассеянное и смешанное пропускания, которые дают матовые стекла и экраны сквозной проекции. Здесь коэффициент яркости может стать заметно больше 1,0, когда в проходящем свете оказывается направленная составляющая.

Чтобы полнее охарактеризовать пропускание света такими полупрозрачными телами, как например, экран сквоз-

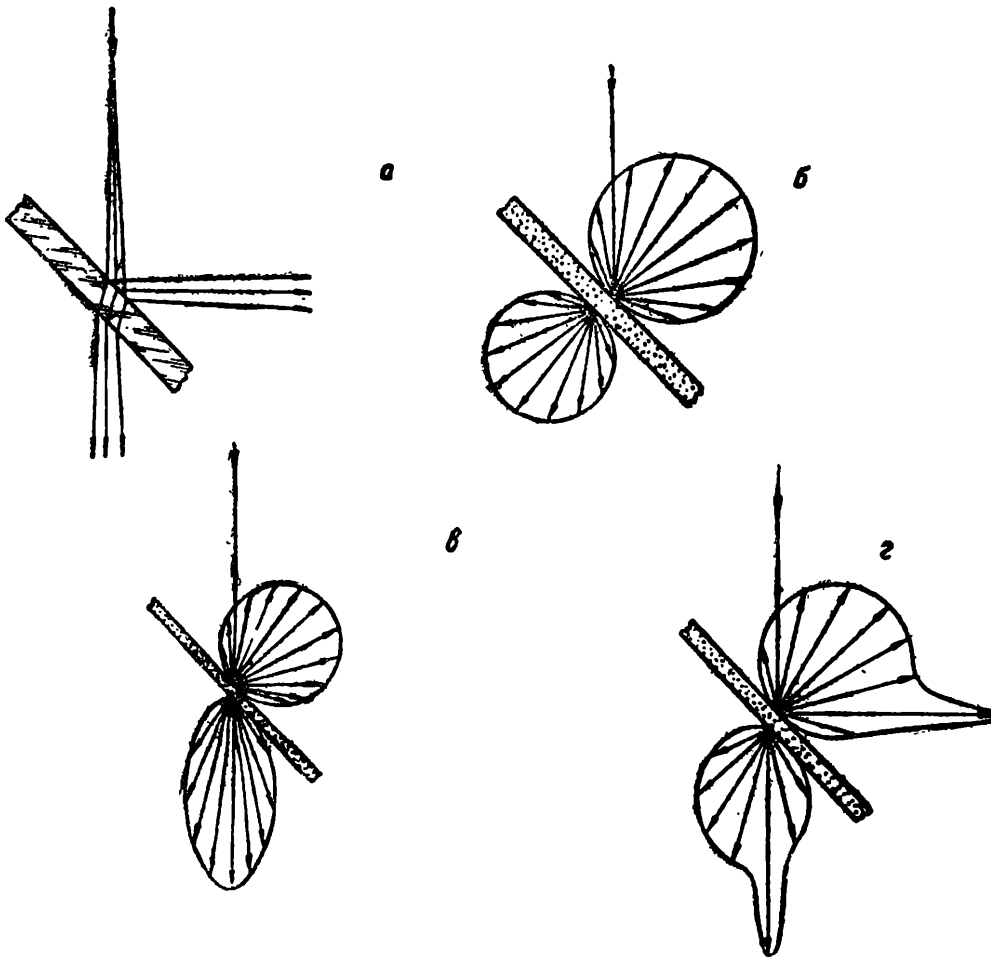


Рис. 30. Схемы пропускания света

ной проекции или матовое стекло, принято указывать величину телесного угла, в котором распределена определенная (0,7) часть проходящего светового потока. На рис. 31 приведены кривые распределения яркости двух экранов для сквозной проекции, изготовленных в НИКФИ.

Из рисунка видно, что экран *I* обладает большим коэффициентом направленного пропускания, вследствие чего его коэффициент яркости далеко превышает 1 и достигает для малых углов значения 4,0, тогда как r_{\max} для экрана *II* имеет значение 1,6, но зато угол рассеяния у экрана *II* достигает $2\alpha = 40^\circ$ вместо 19° у экрана *I*.

Поглощение света характеризуется коэффициентом поглощения α и представляет отношение разности между падаю-

щим на прозрачное тело потоком и суммой отраженного и прошедшего света к падающему потоку:

$$\alpha = \frac{F_{\alpha}}{F} = \frac{F - (F_{\rho} + F_{\tau})}{F}. \quad (16)$$

Ясно, что то же самое может быть выражено следующим образом:

$$\alpha = 1 - (\rho + \tau).$$

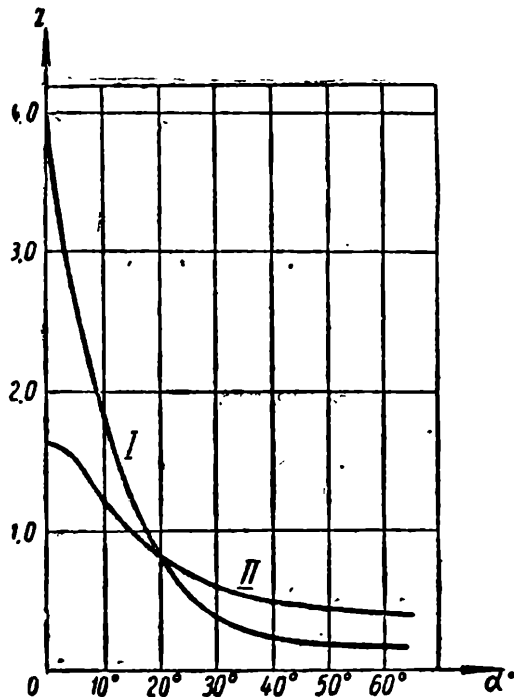


Рис. 31. Световые характеристики экранов сквозной проекции

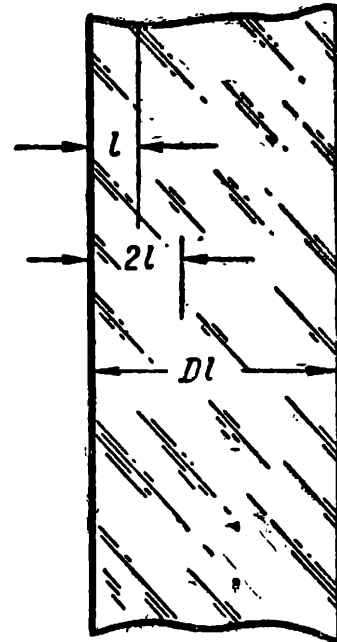


Рис. 32. Толщина и оптическая плотность слоя

В табл. 6 приведены световые характеристики различных материалов.

Таблица 6

Световые характеристики различных материалов

Наименование материала	Толщина в мм	α	ρ	τ
Молочное стекло	5	10—28	30—75	10—65
Молочное стекло	1,5	4—6	40—50	45—55
Матовое стекло	—	3—18	10—15	68—85
Шелк белый	—	5	35	60
Пергамент тонкий	—	10—15	40—50	35—55
Бумага	—	13—20	33—40	42—50
Белая хлопчатобумажная ткань .	—	8	35	57

Поглощение света при прохождении через тела зависит как от природы тела, так и от толщины слоя, проходящего пучком. Для количественной характеристики поглощения в слое пользуются величинами прозрачности, непрозрачности и оптической плотности. Так как характеристика фото-

графической фонограммы дается исключительно в величинах оптической плотности, необходимо здесь познакомиться с этими величинами.

Пусть в среду определенной толщины входит в виде пучка световой поток F_0 , а выходит из нее после поглощения в среде меньший световой поток F_1 . Отношение

$$\frac{F_1}{F_0} = T$$

называется прозрачностью или коэффициентом пропускания данного слоя среды. Очевидно, прозрачность может изменяться от 1, когда среда совсем не поглощает света, до нуля, когда среда полностью поглощает весь падающий на нее свет. Величина, обратная прозрачности, называется непрозрачностью и представляет собой отношение потока, входящего в среду, к потоку, вышедшему из среды, и обозначается буквой O :

$$\frac{F_0}{F_1} = O.$$

Если при некоторой толщине слоя l (рис. 32) прозрачность

$$T_l = \frac{F_l}{F_0} = \frac{1}{10},$$

то для слоя толщиной $2l$ прозрачность будет:

$$T_{2l} = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{10} = \left(\frac{1}{10}\right)^2.$$

Соответственно для слоя толщиной $D \cdot l$ прозрачность будет:

$$T_{Dl} = \left(\frac{1}{10}\right)^D, \quad (17)$$

а непрозрачность составит:

$$O_{Dl} = 10^D.$$

Если сложить два слоя с непрозрачностью $O_1 = 10^{D_1}$ и $O_2 = 10^{D_2}$, то, очевидно, их непрозрачность составит:

$$O = O_1 \cdot O_2 = 10^{D_1} \cdot 10^{D_2} = 10^{D_1 + D_2} = 10_D.$$

Логарифмируя выражение (17), получаем:

$$\lg T = D \lg \frac{1}{10} = D(-\lg 10) = -D \lg 10 = -D.$$

Таким образом, оптическая плотность D может быть определена как десятичный логарифм прозрачности T , взятый с обратным знаком:

$$D = -\lg T \quad (18)$$

или как логарифм непрозрачности.

При сложении слоев их оптические плотности также складываются. Единицей оптической плотности служит такая оптическая плотность, которая обладает прозрачностью $1/10$, то-есть ослабляет проходящий через нее световой поток в 10 раз.

Если оптическая плотность $D=2$, прозрачность такого слоя будет $1/100$, так как:

$$T = \left(\frac{1}{10}\right)^D = \left(\frac{1}{10}\right)^2 = \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100} = 0,01.$$

Если плотность $D=0,5$, прозрачность будет:

$$T = \left(\frac{1}{10}\right)^{0,5} = \frac{1}{10^{0,5}} = \frac{1}{3,17} = 0,317.$$

Приборы, служащие для определения оптической плотности, называются денситометрами. Так же, как другие фотометрические приборы, денситометры бывают визуальные и объективные или фотоэлектрические.

Чтобы освоиться с выведенными формулами, сделаем несколько примеров.

1. Определить яркость равномерно светящегося шара, если полный световой поток его составляет: $F=1000$ лм, а диаметр шара равен 100 мм.

Так как яркость определяется как отношение силы света в данном направлении к видимой площади светящегося тела, то надо сначала найти силу света и разделить его на видимую площадь, выраженную в квадратных сантиметрах.

Сила света равномерно светящегося шара получается путем деления полного светового потока на телесный угол 4π :

$$I = \frac{F}{4\pi} = \frac{1000}{12,57} = 79,5 \text{ свечей}.$$

Яркость составляет:

$$B = \frac{I}{S} = \frac{I \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = \frac{79,5 \cdot 4}{\pi \cdot 10^2} = 1,012 \text{ сб.}$$

2. На каком расстоянии надо расположить точечный источник с силой света $I=900$ свечей, чтобы небольшая плоскость, нормаль к которой составляет с осью пучка угол 60° , имела освещенность 50 лк.

По формуле (10) имеем:

$$E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha.$$

Неизвестным в нашей задаче является расстояние r . Решая уравнение (10) относительно r , получаем:

$$r = \sqrt{\frac{I}{E} \cdot \cos \alpha}.$$

Подставляя наши данные и принимая во внимание, что $\cos 60^\circ = 0,5$, получаем:

$$r = \sqrt{\frac{900}{50} \cdot 0,5} = 3 \text{ м.}$$

3. На расстоянии 2 м от диффузно рассеивающего экрана стоит точечный источник с силой света $I=1000$ свечей. Коэффициент отражения экрана $\rho=0,72$. Определить яркость в центре экрана.

Яркость экрана в децимиллительбах составляет:

$$B = \rho \cdot \frac{E}{\pi},$$

но

$$E = \frac{I}{r^2} = \frac{1000}{2^2} = 250 \text{ лк},$$

откуда

$$B = \rho \cdot \frac{E}{\pi} = 0,72 \cdot \frac{250}{\pi} = 57,3 \text{ дмсб} = \frac{57,3}{10^4} \text{ сб} = 0,00573 \text{ сб.}$$

Определим яркость того же экрана в апостильбах:

$$B_e = \rho \cdot E = 0,72 \cdot 250 = 180 \text{ асб.}$$

Следовательно, 180 асб соответствуют 0,00573 сб
или

$$1 \text{ асб соответствует } 0,000032 \text{ сб.}$$

4. Поставим между источником света и экраном нейтрально серое стекло плотностью $D=0,3$ и определим яркость того же экрана.

Очевидно, яркость B_1 будет равна:

$$B_1 = T \cdot B,$$

где T — прозрачность серого стекла, а

B — яркость экрана при отсутствии серого стекла.

Так как

$$T = 10^{-D} = 10^{-0,3} = 0,5,$$

то

$$B_1 = T \cdot B = 0,5 \cdot 180 \text{ асб} = 90 \text{ асб.}$$

5. Во сколько раз ослабляется свет, проходя через интенсивную фонограмму, плотность которой составляет 0,7.

Если плотность фонограммы составляет 0,7, то ее непрозрачность будет:

$$O = 10^{0,7} \approx 5.$$

Значит, проходя через плотность 0,7, свет ослабляется в 5 раз.

Рассматривая коэффициент отражения, пропускания и поглощения, мы не принимали во внимание спектрального состава света, между тем для цветных поверхностей и сред спектральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения различны для различных участков спектра. Поверхность, одинаково отражающая лучи любой длины волны видимого спектра, называется белой, если $\rho \geq 0,65$, и серой, если $\rho < 0,65$. Аналогично этому среда, пропускающая лучи всех длин волн видимого света, называется в одном

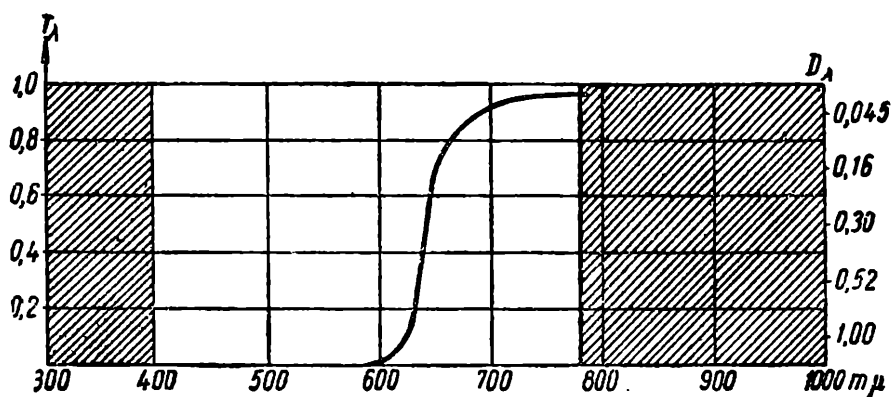


Рис. 33. Кривая пропускания стекла КС-5

случае бесцветной, а в другом — серой. Когда же коэффициент отражения, пропускания или поглощения неодинаков для различных участков спектра, такая поверхность или среда при освещении белым светом кажется окрашенной в тот или иной цвет, так как на поверхности или в толще тела происходит избирательное поглощение. Кирпич, например, кажется красным потому, что поглощает зеленые лучи, и так как в отраженном свете нет зеленого участка спектра, этот свет кажется красным. Красное стекло имеет избирательное поглощение в зеленой части спектра. Поэтому, если при красном свете, например в фотографической лаборатории, рассматривать рисунок, сделанный красным и зеленым карандашами на белой бумаге, то все зеленые линии будут казаться черными, так как зеленая поверхность способна отражать только зеленые лучи, а в падающем свете их не имеется. По этой же причине красные линии будут сливаться с бумагой, потому что белая поверхность отличается от красной способностью отражать зеленые лучи, а при

отсутствии зеленых лучей белая поверхность перестает отличаться от красной.

Для наглядного изображения спектральной характеристики тел служат спектральные кривые поглощения или

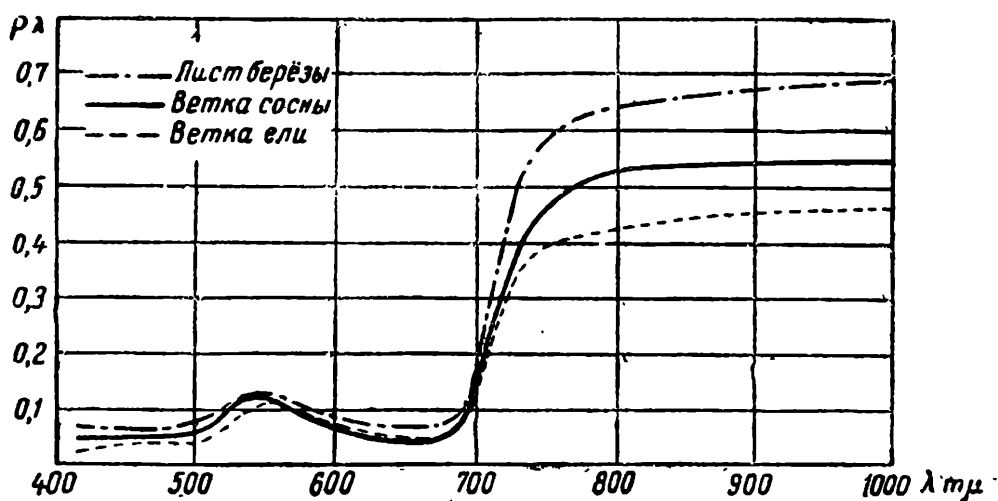


Рис. 34. Спектральные кривые отражения листьев и хвои

пропускания, применяемые главным образом для обозначения светофильтров, и спектральные кривые отражения, служащие для характеристики непрозрачных тел. На рис. 33 приведена кривая пропускания красного стекла КС-5. На горизонтальной оси отложены длины волн, а на вертикальной — пропускание T_λ с левой стороны и оптическая плотность D_λ с правой стороны. На рис. 34 приведены кривые отражения от листы.

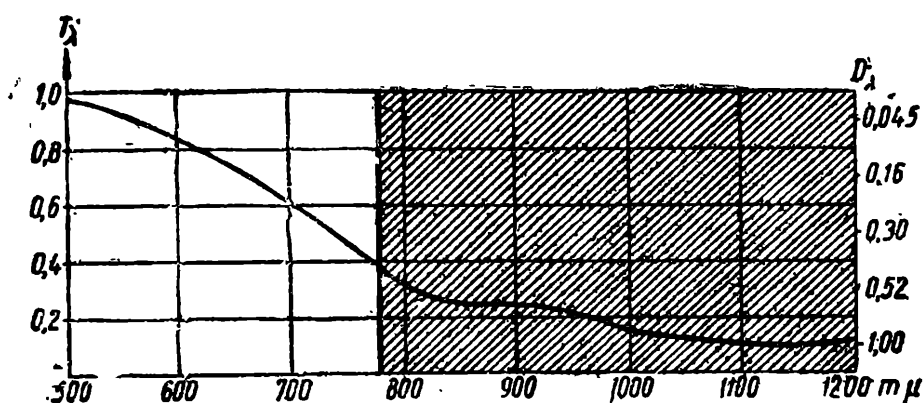


Рис. 35. Кривая пропускания стекла ИК

На рис. 35 приведена кривая пропускания бесцветного стекла ИК, имеющего поглощение в тепловой инфракрасной части, — так называемого теплозащитного фильтра, задерживающего тепловые лучи и свободно пропускающего лучи видимого света. Здесь горизонтальная ось продолжена далеко за видимую часть, чтобы можно было проследить, как далеко простирается поглощение в тепловой части спектра.

Этот пример хорошо иллюстрирует условность выделения света из общего спектра электромагнитных колебаний по его видимости. Поэтому расширение понятия „свет“ для обозначения и невидимой части солнечного спектра не только не вносит путаницы, но, наоборот, приводит к большей стройности понятий, являясь внешним выражением той общности, которая лежит в природе этих излучений. Строго говоря, человек воспринимает непосредственно не только видимое излучение, для которого служит зрение, но также невидимые тепловые лучи, воспринимаемые всем телом человека в виде тепла, и ультрафиолетовые лучи, сильно действующие на кожу и вызывающие загар.

В развитии светотехники и в усовершенствовании источников света играет огромную роль фотометрия, располагающая хорошо разработанными методами световых измерений и арсеналом измерительных приборов как общего назначения, так и специальных, служащих для небольшого круга измерений в специальных условиях.

Как уже указывалось выше, световые измерения могут производиться при помощи глаза—визуальная фотометрия, или при помощи фотоэлементов—объективная фотометрия.

Глаз человека воспринимает непосредственно только яркости, причем глаз не в состоянии оценить величину яркости, но зато с исключительной точностью может установить равенство яркостей двух сравниваемых полей, если эти поля примыкают друг к другу без промежутка.

Это свойство глаза и используется в приборах визуальной фотометрии, которые устроены так, что поле, освещаемое сравниваемым источником, лежит рядом, соприкасаясь с полем, освещаемым эталонным источником света, а их освещенности уравниваются между собой тем или иным способом, например, изменением расстояния или угла наклона, исходя из формулы (10). Роль глаза сводится при этом к регистрации равенства полей.

Таким образом, из всех световых величин в визуальных фотометрах наблюдается всегда только яркость, а на основании связи яркости с другими световыми величинами дается их количественная оценка в единицах силы света, освещенности, яркости и т. д. в зависимости от назначения и градуировки прибора.

Наиболее простым и типичным прибором визуальной фотометрии является линейный фотометр, основанный на использовании закона обратных квадратов, то-есть исходя из формулы (10).

Линейный фотометр (рис. 36) состоит из фотометрической головки, перемещающейся вдоль оптической скамьи, эталонного источника, сила света которого точно известна, подвижной каретки для установки испытуемого источника.

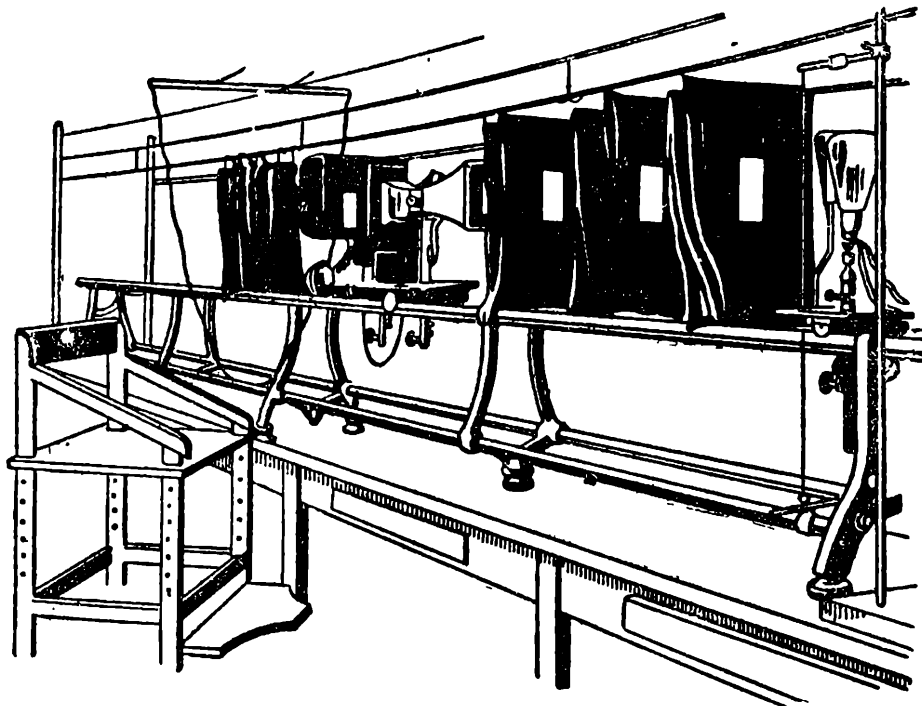


Рис. 36. Общий вид линейного фотометра

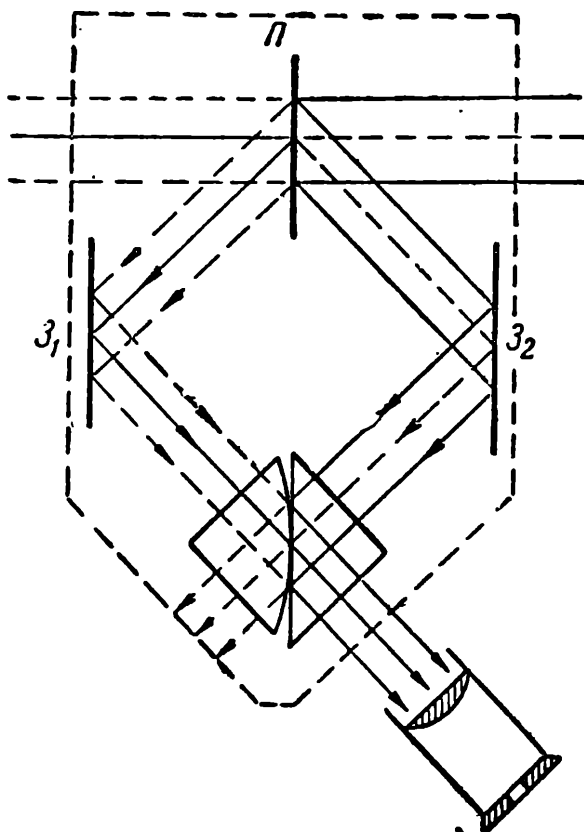


Рис. 37. Фотометрическая головка

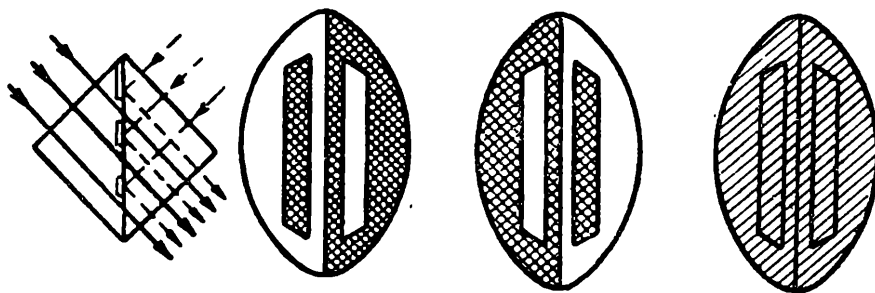


Рис. 38. Светомерный кубик и вид полей сравнения

света и черных защитных экранов, препятствующих попаданию на измеряемые поля отраженного света. Эталонный и сравниваемый источники света помещаются на концах скамьи на определенном расстоянии, а фотометрическую головку передвигают до тех пор, пока оба источника будут давать одинаковую освещенность.

Устройство фотометрической головки показано на рис. 37. Основную часть головки составляет светомерный кубик, состоящий из двух прямоугольных стеклянных призм (рис. 38), касающихся не по всей плоскости, а только отдельными участками. В местах полного контакта свет проходит через кубик насквозь, как через сплошное стекло, тогда как в местах отсутствия контакта происходит полное внутреннее отражение. Таким образом, при наблюдении в окуляр видны два соприкасающихся поля, освещенных сравниваемыми источниками света, и посередине каждого поля расположена площадка в форме трапеции, освещенная противоположным источником. При достижении равенства освещенности все поле становится однородным и на нем нельзя различить никаких фигур. По полученным расстояниям l_1 и l_2 подсчитывают силу света, исходя из равенства:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{l_1^2}{l_2^2}, \text{ или } l_2 = l_1 \frac{l_1^2}{l_2^2}.$$

В большинстве переносных фотометров используется тот же принцип изменения расстояния от источника света до освещаемой пластинки, но они обладают меньшими размерами и удобны для переноски.

Иначе определяется величина светового потока, излучаемого источником света. Расчет показывает, что если источник света с любым светораспределением поместить внутрь шара с белой диффузной окраской внутренней поверхности, то, благодаря повторным отражениям, любое место шара, защищенное от прямых лучей, идущих от источника, имеет одинаковую освещенность, равную:

$$E = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \cdot F = k \cdot F,$$

то-есть между полным световым потоком и освещенностью любого места стенки шара имеется постоянное для данного шара отношение k , легко определяемое экспериментально.

Пользуясь значением k , определяют значение светового потока:

$$F = \frac{E}{k}.$$

Общий вид светомерного шара приводится на рис. 39.

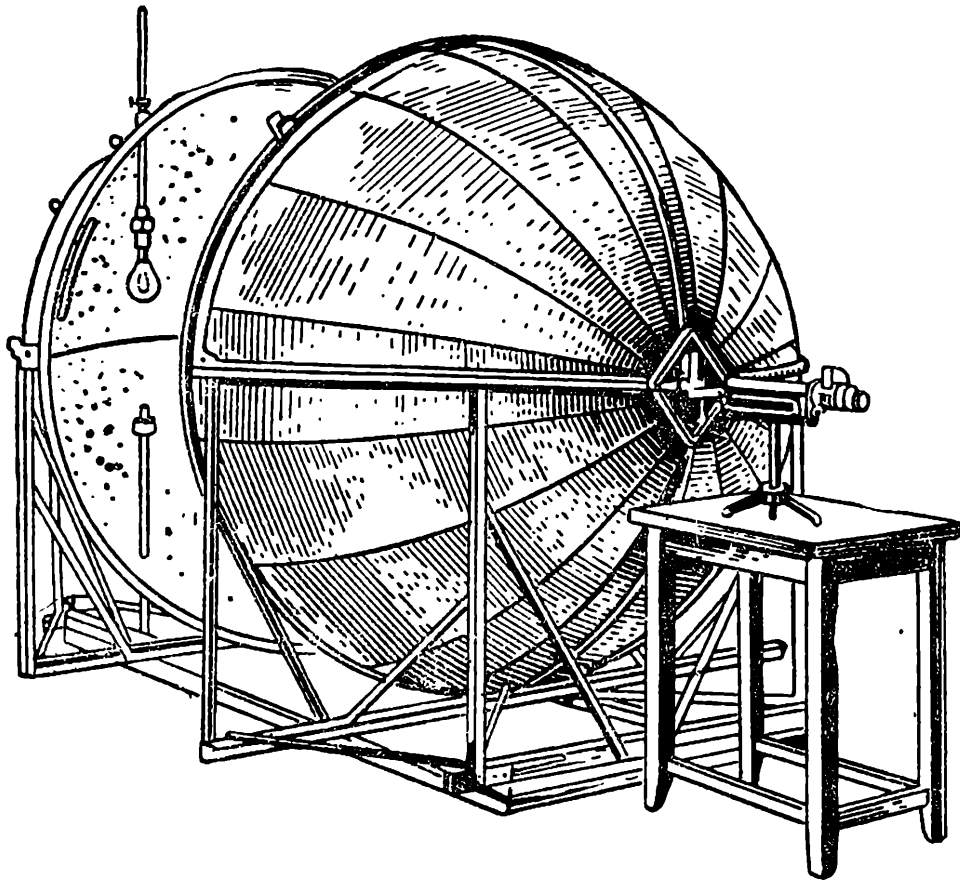


Рис. 39. Светомерный шар

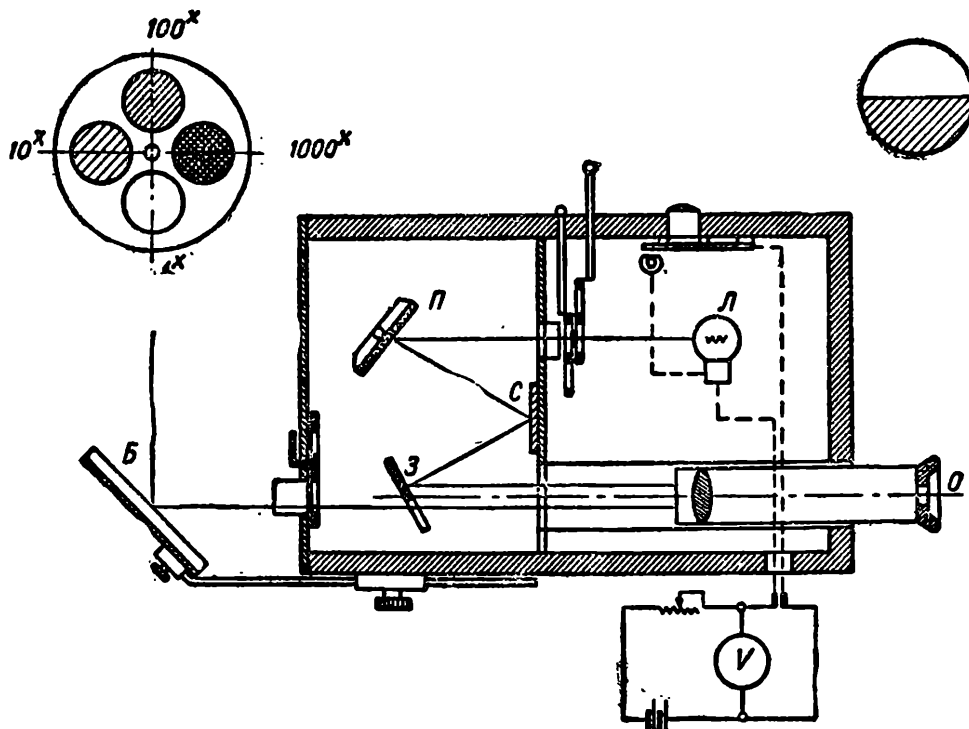


Рис. 40. Люксметр ГОИ

Для измерения освещенности применяются переносные люксметры. На рис. 40 показан люксметр ГОИ (Государственного оптического института), также основанный на применении формулы (10). Эталонная лампа L освещает

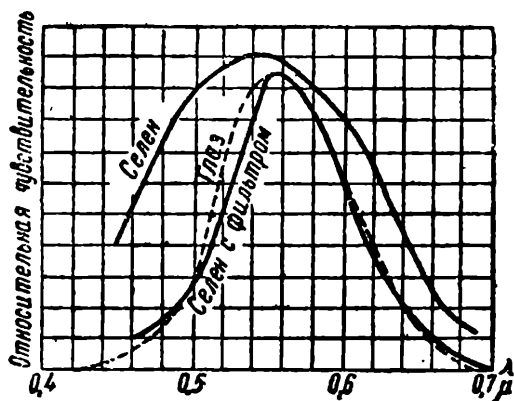


Рис. 41. Кривые чувствительности селенового фотоэлемента

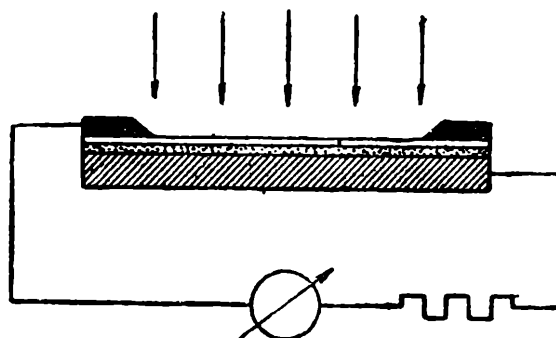


Рис. 42. Селеновый фотоэлемент

пластинку Π , поверхность которой видна в зеркале $З$ при рассматривании в окуляр $О$, благодаря промежуточному отражению в зеркале $С$. Зеркало $З$ имеет участок, обнаженный от амальгамы. Через этот прозрачный участок видна пластинка $Б$, поставленная под углом 45° и освещаемая измеряемым источником. Поддерживая на лампе L определенный электрический режим и обеспечивая таким образом постоянство силы света лампы сравнения, можно вращением пластинки Π уравнивать освещенность пластинок Π и $Б$, видимых в окуляре рядом. Для расширения пределов измерений служит револьверная оправа с набором нейтрально серых светофильтров с коэффициентом прозрачности $1/10$ — $1/100$ и $1/1000$ и с одним пустым окном. Кроме того, для уравнивания дневного света со светом лампы служит светлоголубой фильтр, вводимый в ход пучка, идущего от лампы. Рядом с голубым фильтром расколот еще один нейтральный фильтр с коэффициентом пропускания $1/10$, вводимый в пучок лампы при измерении малых освещенностей.

Если убрать пластинку $Б$ и навести люксметр на экран, то можно определять яркость экрана.

В объективной фотометрии вместо глаза используется светочувствительность фотоэлемента. Надо иметь в виду, что в отличие от глаза, воспринимающего яркости, фотоэлемент реагирует на световой поток, падающий на элемент, а если элемент освещен всегда полностью, то измеряется освещенность.

Объективная фотометрия свободна от недостатков визуальной фотометрии, точность которой в известной мере зависит от индивидуальных качеств и состояния глаза,

однако фотоэлементы обладают целым рядом особенностей, исключающих возможность прямой замены глаза фотоэлементом. Кривая чувствительности фотоэлемента не совпадает с кривой чувствительности глаза и для устранения этой разницы прибегают к поправочному светофильтру, введение которого заметно уменьшает чувствительность фотоэлемента. Кроме того, чувствительность фотоэлемента изменится во времени и сильно зависит от температуры.

Тем не менее фотоэлектрические фотометры, благодаря своей портативности, простоте обращения и прямому отсчету показаний получают все более широкое признание и особенно пригодны для сравнительных испытаний.

Наибольшее применение в фотометрии получили главным образом селеновые фотоэлементы, спектральная чувствительность которых ближе всего к чувствительности человеческого глаза.

На рис. 41 приведены кривые чувствительности селенового фотоэлемента без светофильтра и со светофильтром и кривая видности, которые показывают, что спектральное распределение чувствительности селенового фотоэлемента может быть сделано почти одинаковым с кривой видности.

Селеновый фотоэлемент состоит из железной пластинки (рис. 42), покрытой тонким слоем селена, на который наносится чрезвычайно тонкий прозрачный слой золота. При освещении пластинки между слоем золота и железной пластинкой возникает разность потенциалов и при включе-

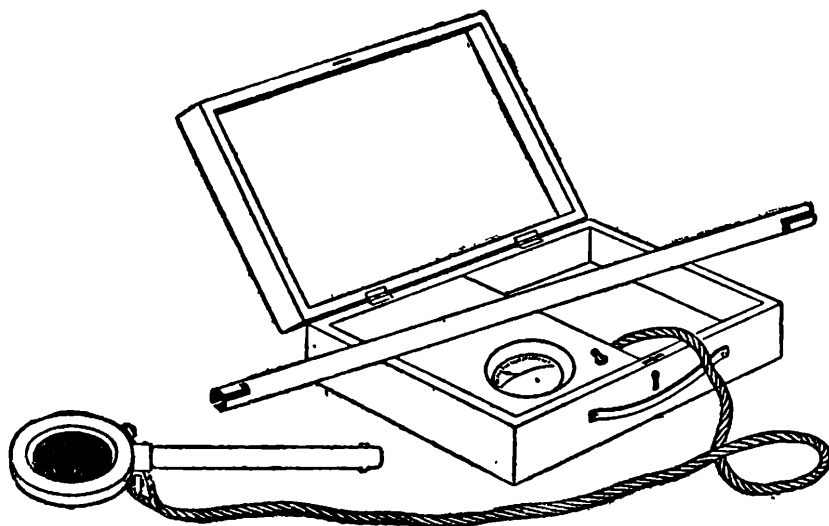


Рис. 43. Общий вид объективного люксметра

нии некоторого сопротивления по нему проходит фототок, пропорциональный падающему на пластинку световому потоку. Если к селеновому фотоэлементу подключить гальванометр и проградуировать его в люксах, полученный люксметр позволит прямо отсчитывать освещенность. Такой люксметр изображен на рис. 43. Прибор

состоит из небольшого ящика, в котором находится гальванометр. Селеновая пластинка в оправе и с ручкой соединена с гальванометром длинным шнуром и может подноситься к месту измерения. Для измерения освещенности экрана взамен короткой ручки фотоэлемент насаживается на длинную ручку, состоящую из нескольких свинчиваемых между собой трубок. Входящие в набор добавочные насадки с определенным коэффициентом пропускания дают возможность измерять большие освещенности.

ЛИНЗЫ

Самой типичной и хорошо всем знакомой формой линзы является двояковыпуклая сферическая линза, или собирательное стекло, то-есть кусок стекла (или другого однородного прозрачного материала), ограниченный двумя сферическими поверхностями.

Прямая, проведенная через центры кривизны обеих поверхностей, ограничивающих линзу (рис. 44), называется

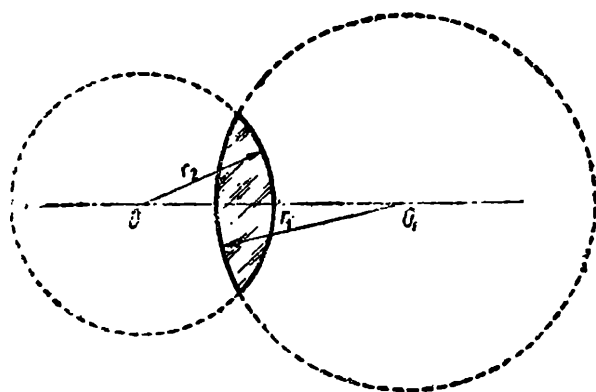


Рис. 44. Образование поверхности линзы

главной оптической осью линзы. Из рисунка видно, что все элементы линзы симметричны относительно главной оптической оси, по отношению к которой линза представляет собой тело вращения.

Опыт показывает, что такая линза обладает способностью собирать свет, то-есть превращать падающие на нее пучки расходящихся лучей в сходящиеся пучки.

Уясним себе механизм собирательного действия линзы. Пусть на линзу L (рис. 45) падает пучок расходящихся лучей, вышедших из точки S , лежащей на главной оптической оси линзы. Рассматривая отдельные небольшие участки поверхности линзы, мы без большой погрешности можем принять их за призмы с постепенно меняющимся углом между гранями. Наибольший преломляющий угол лежит на краю линзы, наименьший, равный нулю, — в середине линзы. Следовательно, лучи, упавшие на край линзы, получают наибольшее отклонение; лучи же, падающие ближе к середине, отклонятся несколько меньше, но и те и другие будут отклонены к середине или к оси линзы, которая в данном случае является как бы общим основанием всех призм, на которые мы мысленно разбили нашу линзу и которые расположены симметрично вокруг оптической

оси. Наконец, луч, прошедший через самую середину линзы, не отклонится вовсе, так как и для первой и для второй поверхности линзы луч, идущий через середину, будет перпендикулярен к поверхности и пройдет без отклонения по направлению главной оси, являющейся в данном случае

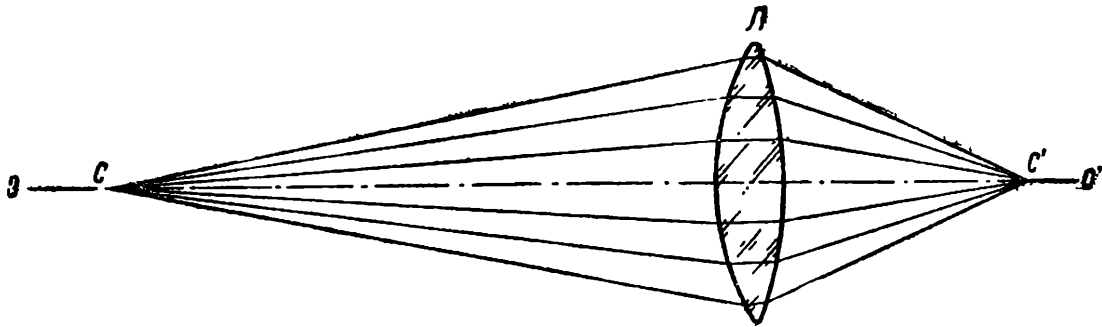


Рис. 45. Точка и ее изображение

общей нормалью для обеих поверхностей, ограничивающих линзу.

В результате все лучи, вышедшие из точки C , снова соберутся в одной точке C' , расположенной также на главной оси и называемой сопряженным фокусом; отсюда и происходит название „собирающая линза“. Поместив в фокусе лист белой бумаги, мы увидим на нем изображение светящейся точки C' .

Таков в общих чертах механизм образования собирающей линзой изображения светящейся точки. Выше мы уже видели, что всякое освещенное тело можно рассматривать как состоящее из множества светящихся точек.

Поэтому, если мы возьмем вместо одной точки какое-нибудь тело, расположенное поперек главной оси линзы, отдельные точки его дадут изображения каждая в отдельности. Опыт показывает, что изображения расположатся также поперек оси и составят вместе изображение тела. Плоскость, в которой расположено изображение, называется фокальной плоскостью.

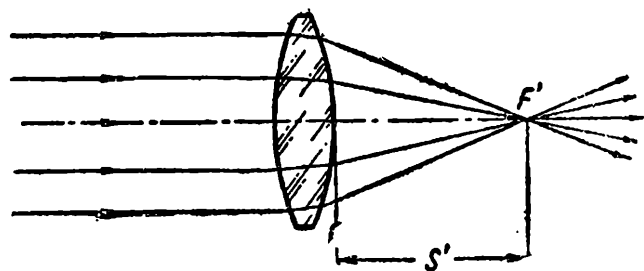


Рис. 46. Главный фокус линзы и вершинное фокусное расстояние или задний отрезок

Если источник света находится очень далеко от линзы, например, источником является солнце, то свет от него падает на линзу в виде пучка параллельных лучей. Если при этом лучи идут параллельно главной оси линзы (рис. 46), то, пройдя через линзу, они соберутся благодаря собирающему действию линзы в одной точке F' , лежащей на главной оси.

Точка F' называется главным фокусом линзы, а расстояние этой точки от вершины линзы называется вершинным фокусным расстоянием линзы. Следует помнить, что характеристику линзы, ее постоянную, составляет не вершинное фокусное расстояние, а главное фокусное расстояние линзы. В отличие от сферического зеркала с одной отражающей поверхностью, где вершинное фокусное расстояние совпадает с главным фокусным расстоянием, во

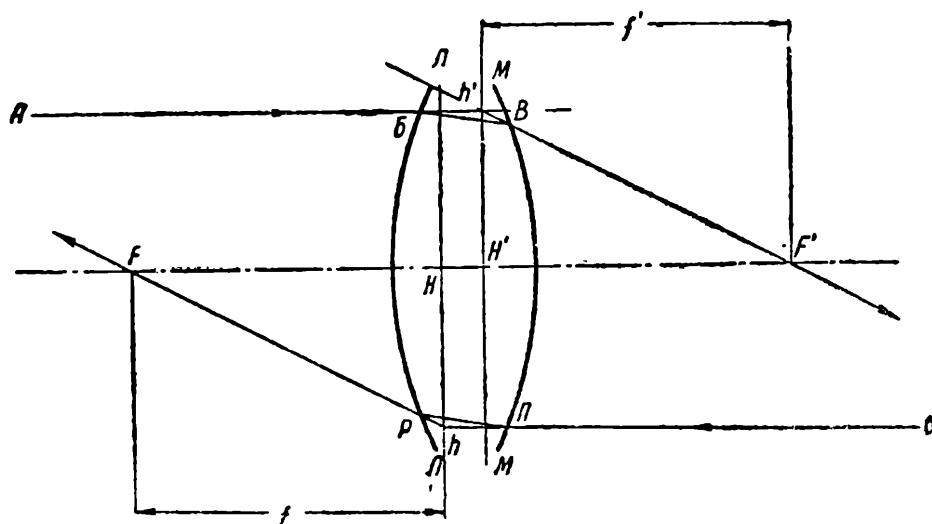


Рис. 47. Главные фокусы и главные плоскости в линзе

всякой реальной линзе и линзовой системе главное фокусное расстояние отличается от вершинного, определяемого нередко побочными обстоятельствами.

Пусть на рис. 47 $ЛЛ$ и $ММ$ представляют собой переднюю и заднюю поверхности двояковыпуклой сферической линзы, находящейся в воздухе, а луч $АВ$, будучи параллельным главной оси, падает на переднюю поверхность линзы в точке $В$; после преломления на первой поверхности луч пойдет по линии $ВВ'$ и после преломления в точке $В'$ пересечет главную ось в главном фокусе F' .

Если продолжить с одной стороны прямую $АВ$, а с другой навстречу ей линию $F'В$, то их пересечение в точке h' будет заменять собою два преломления рассматриваемого луча в точках $В$ и $В'$, то-есть отклонение луча у точки h' будет равноценно или эквивалентно действию на луч обеих преломляющих поверхностей линзы.

Плоскость, проведенная через точку h' перпендикулярно главной оси, называется главной плоскостью линзы и обозначается буквой H . Точка пересечения главной плоскости с главной осью называется главной точкой. От этой главной плоскости H , или главной точки, и отсчитывается главное фокусное расстояние линзы.

Совершенно очевидно, что если бы луч падал на линзу не со стороны $ЛЛ$, а со стороны $ММ$, то главная плос-

кость располагалась бы в другом месте так же, как и главный фокус F . Проведем на том же рис. 47 луч OP , идущий справа налево, и повторим с ним те же построения, которые были сделаны для луча AB , идущего слева направо, затем найдем точку h , принадлежащую главной плоскости H .

Выполненное нами построение доказывает, что в каждой линзе имеется два главных фокуса—передний и задний, расположенные на оси по обе стороны от линзы и соответственно две главные плоскости, от которых отсчитываются переднее и заднее главные фокусные расстояния, совершенно одинаковые по величине.

Главное фокусное расстояние каждой линзы или сложного объектива имеет постоянное значение и составляет основную его характеристику. Главное фокусное расстояние объектива не изменяется ни при каких обстоятельствах, если не изменяются составляющие его линзы и их взаимное расположение. На каждом объективе обозначено его главное фокусное расстояние.

Чтобы придать большую ясность понятиям переднего и заднего фокуса, установлено правило, по которому для всякой оптической системы прямым ходом луча называется ход слева направо, и только относительно этого расположения употребляются понятия передний и задний фокус, передняя и задняя главная плоскость и т. д.* Во всех случаях слева от линзы находится передний фокус, справа—задний. Согласно этому же правилу систему на чертеже располагают так, чтобы ход луча слева направо совпадал с ходом пучка по смыслу назначения прибора. Буквы без дополнительных значков означают точки и расстояния, расположенные слева от линзы, а те же буквы со значком' обозначают те же элементы, расположенные справа от линзы. Пространство влево от линзы называется предметным пространством, а вправо от линзы—пространством изображения.

На рис. 48 показано положение главных плоскостей в линзах различной формы. Положение главных плоскостей зависит от кривизны поверхностей и толщины линзы, а для системы линз—от их расстановки. Как видно из рис. 49, в сложном объективе передняя главная плоскость H может располагаться даже позади задней главной плоскости H' , но переднее и заднее главные фокусные расстояния всегда равны между собой, хотя сами фокусы располагаются по-разному. Вершинные фокусные расстояния назы-

* Здесь, как и прежде, сознательно избегается введение отрицательных отрезков, чтобы не затруднять понимание материала и сохранить элементарный характер изложения.

ваются также соответственно передним и задним отрезками.

Возьмем равновыпуклую линзу (рис. 50), у которой оба радиуса кривизны одинаковы, и проведем через нее произвольную прямую AB так, чтобы она пересекала отрезок оси между поверхностями линзы точно по ее середине в точке C . Если через точки пересечения этой прямой с поверхностями линзы провести радиусы кривизны O_1A и OB , то, во-первых, они будут взаимно параллельны,

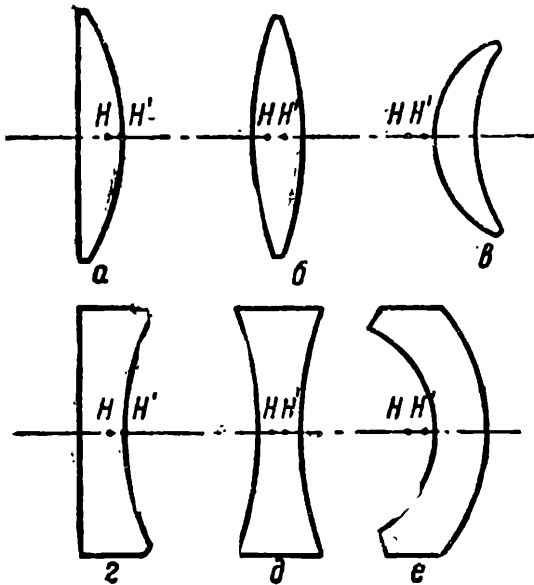


Рис. 48. Положение главных точек в линзах разной формы

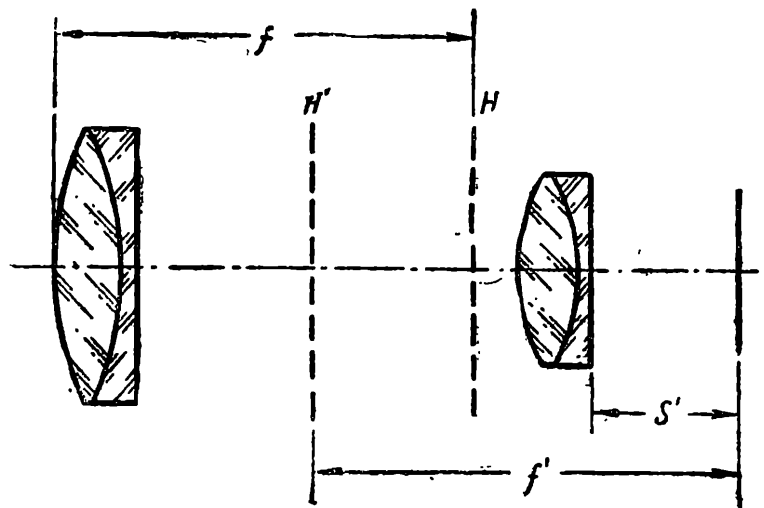


Рис. 49. Необычное положение главных плоскостей в сложном объективе

а, во вторых, оба угла β_1 и β_2 будут равны между собой. Эти углы β_1 и β_2 являются углами падения со стороны стекла для луча BA на поверхность $ЛЛ$ и луча AB на поверхность $ММ$. Построив в точках A и B соответственно два равных угла преломления α_1 и α_2 и продолжив их до пересечения с осью, получим на ней две главные точки H и H' . Вследствие симметричности линзы все углы и точки симметричны относительно точки C , которая называется оптическим центром линзы.

Угол u , составленный лучом $ПА$ с главной осью, равен углу u' , составленному лучом $БР$ с той же осью, и, следовательно, оба луча $ПА$ и $БР$ параллельны между собой.

Иными словами, всякий луч, входящий в линзу и пересекающий главную ось в главной плоскости со стороны предметного пространства под углом u , выходит из линзы, пересекая главную ось в главной плоскости со стороны пространства изображений под углом u' , равным углу u .

Расстояние между главными плоскостями, кроме кривизны поверхностей, зависит от толщины линзы. Если толщина линзы будет уменьшаться, главные плоскости будут сближаться, и при очень тонкой линзе их можно

себе представить слившимися между собой. В этом случае все действие линзы будет сосредоточено в общей главной плоскости и в ней же будет лежать оптический центр C . Как нетрудно понять из рисунка 50, всякий луч, проведенный через оптический центр, будет проходить линзу без какого-либо отклонения или преломления. Чтобы подчеркнуть, что луч, проходящий через оптический центр C , проходит линзу без отклонения, такой луч называют побочной оптической осью линзы.

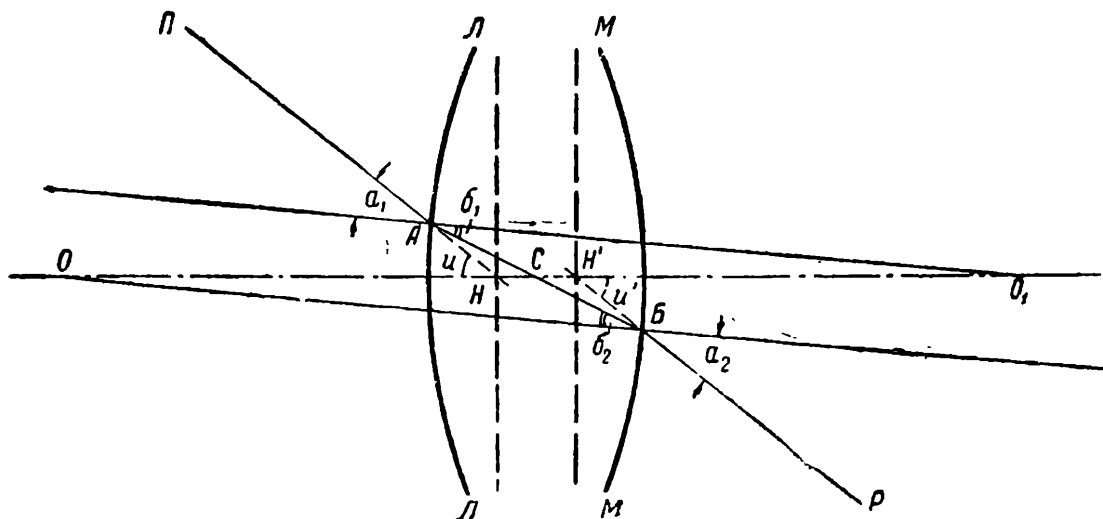


Рис. 50. Оптический центр линзы

Введение главных плоскостей упрощает рассмотрение сложной оптической системы и приводит построение изображения к простым графическим операциям. Графическое построение изображения, образуемого линзой, может быть выполнено, конечно, и путем построения преломленных лучей на каждой поверхности линзы, но в этом случае лучи должны быть построены тщательно и с большой точностью, а такое построение занимает много времени, особенно в случае сложной системы со многими поверхностями.

Построение при помощи главных плоскостей основано на том, что при заданном положении предмета относительно линзы (то-есть относительно главных плоскостей и главных фокусов) из всего множества лучей, заполняющих линзу, выбирают те лучи, направление которых после прохождения через линзу заранее известно. Такими лучами могут быть:

1. Луч, падающий на линзу параллельно главной оси. Он пересекает главную ось в противоположном главном фокусе. Это вытекает непосредственно из определения главного фокуса.

2. Луч, проходящий через главный фокус. Он выходит из линзы параллельно главной оси.

3. Луч, пересекающий главную ось в передней главной плоскости под некоторым углом. Он пересекает главную ось в задней главной плоскости под тем же углом.

При тонкой линзе луч, проходящий через оптический центр, проходит линзу без преломления.

Имея положение главных плоскостей, мы можем не обращать внимания на форму линзы или системы линз и при графическом построении изображения нет необходи-

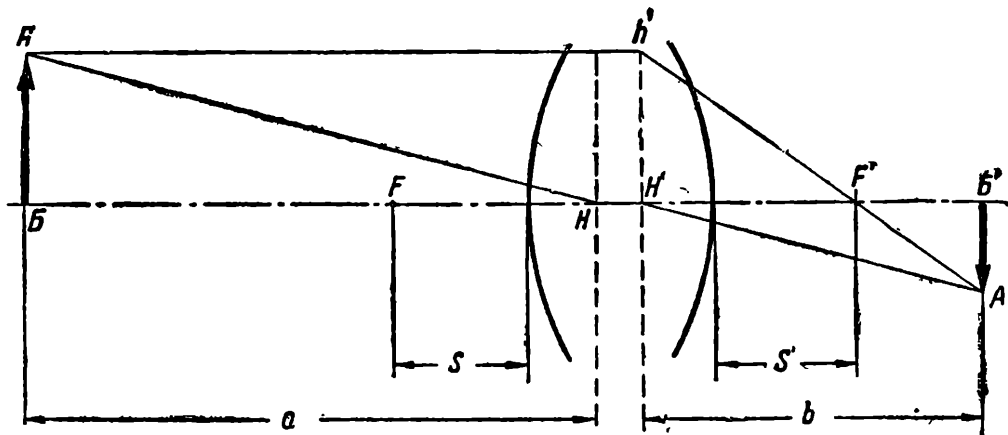


Рис. 51. Построение изображения при помощи главных плоскостей

мости учитывать преломление на каждой поверхности, а достаточно провести луч до соответствующей главной плоскости, и дальше вести его так, как будто в главных плоскостях сосредоточено все собирающее действие линзы или системы линз.

Пусть перед линзой (рис. 51) находится стрелка AB . Из точки A проводим луч Ah' параллельно главной оси. Из линзы луч выйдет по линии $h'F'$ и пересечет ось в заднем главном фокусе F' . Второй луч $АН$ проведем через

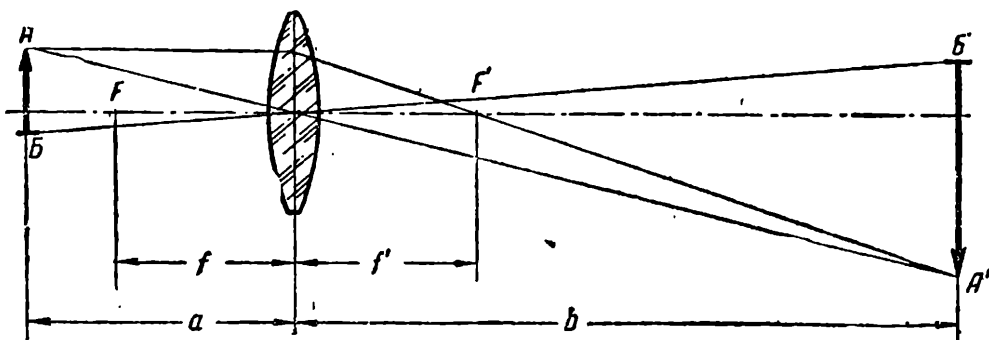


Рис. 52. Увеличенное изображение

переднюю главную точку и продолжим его от задней главной точки H' под тем же углом до пересечения с лучом $h'F'$ в точке A' , которая и будет изображением точки A .

Можно вместо луча $АН$ взять луч, проходящий через передний главный фокус F до плоскости H и идущий далее параллельно главной оси до точки A' .

Полученное изображение — действительное; обратное и уменьшенное.

Если предмет расположить от линзы на расстоянии, равном $2f$, то изображение его расположится также на расстоянии $2f$, и размеры его будут равны размерам предмета, причем изображение и здесь будет действительным и обратным.

Приближая предмет еще ближе к линзе, легко убедиться, что, как показывает рис. 52, изображение делается больше и отодвигается от линзы дальше, оставаясь действительным и обратным.

Наконец, если придвинуть предмет к линзе настолько, чтобы он оказался между фокусом и линзой (рис. 53), то действительного изображения уже не образуется. Из линзы

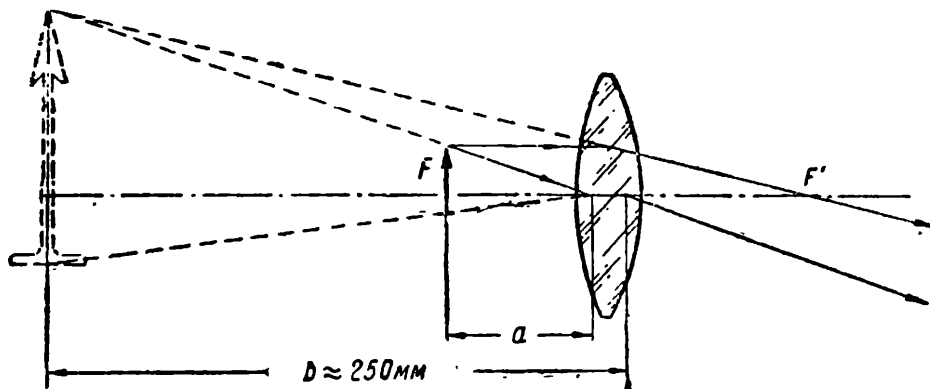


Рис. 53. Мнимое изображение

будет выходить пучок расходящихся лучей, кажущаяся точка пересечения которых лежит на предметной стороне гораздо дальше, чем сам предмет. Смотря на предмет через линзу, мы увидим увеличенное и прямое изображение предмета, то-есть будем иметь случай простой лупы.

Таким образом, предмет и его изображение ведут себя относительно собирающей линзы так же, как вели себя относительно вогнутого зеркала, с той лишь разницей, что там предмет и его действительное изображение располагались по одну сторону от зеркала, а относительно линзы они располагаются с двух противоположных сторон, но и в том и в другом случае они связаны или сопряжены между собой. Так как форма связи одинакова в обоих случаях, одинаково и аналитическое выражение этой связи, то-есть формула

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

которую мы применяли для вогнутого зеркала, остается в силе и для собирающей линзы или собирающей системы линз.

Разумеется, все расстояния, как f , так и a и b , отсчитываются не от поверхностей линзы, а от главных плоско-

стей H и H' . Расстояние a отсчитывается от плоскости H , а расстояния b и f — от плоскости H' .

Рассматривая рис. 51, можно установить, что вследствие подобия треугольников ABH и $A'B'H'$:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a} = \beta,$$

где β называется поперечным или линейным увеличением линзы и показывает, во сколько раз изображение больше или меньше самого предмета.

Так как

$$\frac{1}{a} = \frac{\beta}{b},$$

то, подставляя это значение в формулу (5), получаем:

$$\frac{\beta}{b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}; \quad \frac{\beta + 1}{b} = \frac{1}{f}; \quad f(\beta + 1) = b,$$

или окончательно

$$b = f(1 + \beta). \quad (19)$$

Точно так же можно установить, что:

$$a = f \left(1 + \frac{1}{\beta} \right). \quad (19a)$$

Эти формулы дают возможность учитывать масштабные соотношения между предметом и его изображением, а также определять фокусное расстояние объектива.

Допустим, что требуется определить, какой размер будет иметь на экране изображение кинокадра при объективе с фокусным расстоянием 12 см, если расстояние от объектива до экрана составляет ровно 5 м.

Так как

$$b = f(1 + \beta) = 500 \text{ см},$$

то

$$1 + \beta = \frac{500}{12} = 41,7.$$

Значит: $\beta = 40,7$, а размеры экрана составят:

$$\text{по ширине: } B = 2,09 \cdot 40,7 = 85 \text{ см};$$

$$\text{по высоте: } H = 1,52 \cdot 40,7 = 62 \text{ см}^*.$$

Решим еще одну задачу. Допустим, что для наблюдения за дугой требуется при помощи тонкой линзы отбросить изображение дуги с увеличением $\beta = 5^x$ на стену, отстоящую

* Размеры кадрового окна проекционного аппарата для проекции 35-мм фильма по общесоюзному стандарту составляют 20,9 мм × 15,2 мм.

от дуги на расстоянии $2,35 \text{ м} = 2350 \text{ мм}$. Требуется определить фокусное расстояние линзы.

Расстояние от дуги до изображения складывается из двух отрезков: расстояния a от дуги до линзы и расстояния b от линзы до изображения. Следовательно, общее расстояние составляет:

$$L = a + b = f \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) + f(1 + \beta) = f \left(2 + \beta + \frac{1}{\beta} \right).$$

Решая уравнение относительно f , получаем:

$$f = \frac{L}{2 + \beta + \frac{1}{\beta}} = \frac{2350}{2 + 5 + 0,2} = 327 \text{ мм} \approx 33 \text{ см}.$$

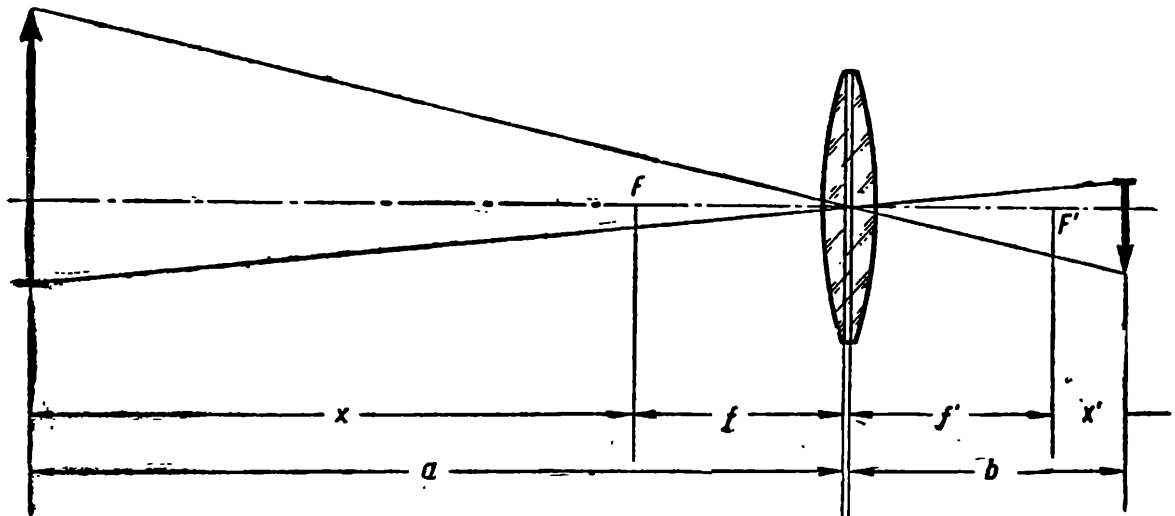


Рис. 54. К выводу формулы (20)

Умения обращаться с формулами (5), (6), (19) и (19а) вполне достаточно для решения всех задач, могущих встретиться в практике эксплуатации проекционной оптики, однако во многих случаях решение может быть значительно упрощено, если отсчет расстояний брать не от главных плоскостей H и H' , а от переднего и заднего главных фокусов F и F' . Такой переход приводит к упрощению структуры формул (5) и (6), устраняя в них действие сложения и вычитания и сводя все к умножению и делению. Если на рис. 54 обозначить через x расстояние от переднего главного фокуса до предмета и через x' расстояние от заднего главного фокуса до изображения, то оказывается, что x и x' связаны между собой и с главным фокусным расстоянием линзы f следующей простой зависимостью:

$$x \cdot x' = f^2. \quad (20)$$

Здесь

$$x = a - f.$$

$$x' = b - f.$$

Легко показать, что эта формула выражает ту же зависимость, которая выражается формулой (5). Подставляя вместо x и x' указанные значения, получаем:

$$(a-f)(b-f) = f^2; \quad a \cdot b - b \cdot f - a \cdot f + f^2 = f^2;$$

$$a \cdot b = b \cdot f + a \cdot f.$$

Деля все члены равенства на $a \cdot b \cdot f$, получаем ту же формулу (5):

$$\frac{a \cdot b}{a \cdot b \cdot f} = \frac{b \cdot f}{a \cdot b \cdot f} + \frac{a \cdot f}{a \cdot b \cdot f}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Точно так же от формул (19) и (20) легко перейти для выражения масштаба к следующим формулам:

$$\beta = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f}; \quad \frac{1}{\beta} = \frac{x}{f} = \frac{f}{x'}. \quad (20a)$$

Решая уравнение (20) относительно x и x' , получаем соответственно чрезвычайно простые выражения:

$$x' = \frac{f^2}{x}; \quad x = \frac{f^2}{x'}.$$

Ввиду того, что в этих формулах отсутствуют действия сложения и вычитания, которые имеются в формулах (5), (6), (19) и (19a), с ними легче обращаться, и подсчет получает большую наглядность. Кроме того, отсчет расстояний от главных фокусов удобнее тем, что главные фокусы расположены в подавляющем большинстве снаружи системы и вполне доступны, тогда как главные плоскости находятся обычно внутри объектива и неудобны в качестве начала отсчета.

Допустим, имеется конденсор с фокусным расстоянием 70 мм и с его помощью необходимо отбросить изображение в масштабе $\beta = 4,2^x$. Требуется определить расстояние x источника света от переднего фокуса конденсора и расстояние x' изображения от заднего фокуса конденсора.

Так как

$$\beta = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f},$$

то

$$x = \frac{f}{\beta} = \frac{70}{4,2} = 16,7 \text{ мм},$$

а

$$x' = f \cdot \beta = 70 \cdot 4,2 = 294 \text{ мм}.$$

Перед положительной линзой с фокусным расстоянием $f=12$ см на расстоянии 8 см от его переднего фокуса находится предмет AB высотой 5 см. Найти положение и размеры изображения.

Задано: $f=12$ см; $x=8$ см.

Находим

$$x' = \frac{f^2}{x} = \frac{144}{8} = 18 \text{ см};$$

$$\beta = \frac{f}{x} = \frac{12}{8} = 1,5;$$

$$A'B' = AB \cdot \beta = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ см.}$$

Следовательно, изображение $A'B'$ предмета AB расположено на расстоянии 18 см от заднего главного фокуса F' и имеет размер 7,5 см.

Если в пучок солнечных лучей поместить двояковогнутую линзу (рис. 55), то, как показывает опыт, такая линза не даст никакого изображения. Если же смотреть сквозь такую линзу, то предметы покажутся уменьшенными. В этом случае мы наблюдаем уменьшенное мнимое изображение. Отсюда название такой линзы — уменьшительное стекло. Выше мы уже видели, что на экран может быть отброшено только действительное изображение, тогда как мнимое изображение можно наблюдать глазом.

Рассматривая сечение двояковогнутой линзы, легко представить себе, что оно составлено из отдельных призматических элементов, расположенных основаниями наружу. Поэтому, если на такую линзу падает пучок параллельных лучей, линза должна отклонять их не к оси,

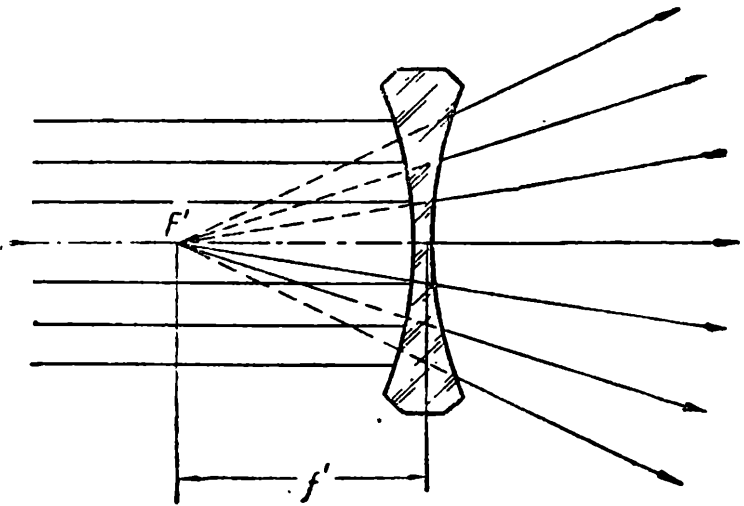


Рис. 55. Фокус отрицательной линзы

как при двояковыпуклой форме, а к краю, то-есть должна превратить падающие на нее лучи в расходящийся пучок. Продолжая лучи расходящегося пучка до их взаимного пересечения, можно представить их выходящими из одной точки F' , которая называется мнимым фокусом линзы.

Мнимый фокус двояковогнутой линзы расположен на той же стороне, с которой падает свет.

Кроме двояковыпуклой и двояковогнутой линз, существуют другие формы линз, однако все разнообразие возмож-

ных форм линз исчерпывается шестью основными формами и за седьмую может быть принята условно плоскопараллельная пластинка, если полагать, что она образована шаровыми поверхностями с бесконечно большим радиусом.

Эти линзы изображены на рис. 56 и носят следующие названия: двояковыпуклая 1, плоско-выпуклая 2, вогнуто-выпуклая 3, плоскопараллельная 4, выпукло-вогнутая 5, плоско-вогнутая 6 и двояковогнутая 7.

Сравнивая их между собой, легко заметить, что у первых трех линз толщина на оси больше, чем толщина края линзы, тогда как у последних трех линз толщина на краю больше

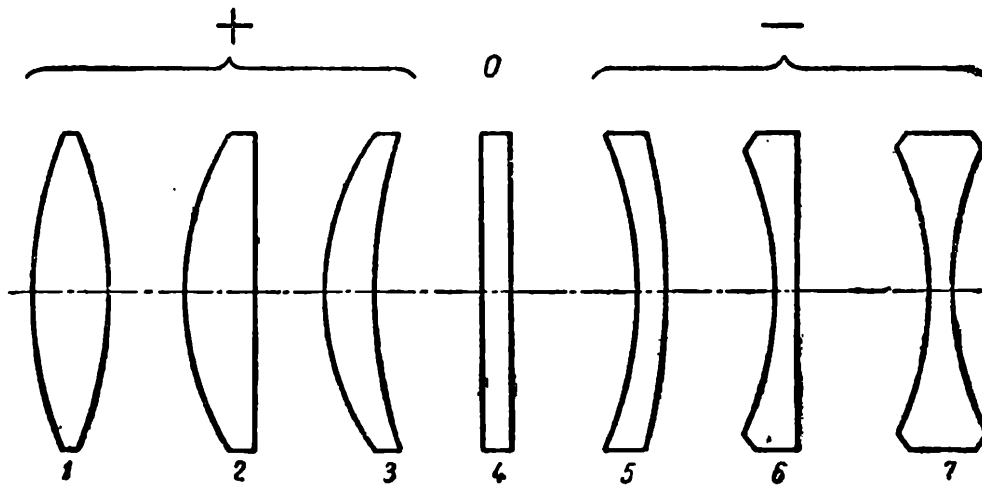


Рис. 56. Формы сферических линз

толщины на оси. Плоскопараллельная линза имеет постоянную толщину от оси до края. Первые три линзы обозначены знаком плюс и называются положительными или собирающими линзами. Превращая пучок расходящихся или параллельных лучей в пучок сходящихся лучей, эти линзы дают обычно действительное изображение предмета. Последние три линзы обозначены знаком минус и называются отрицательными, рассеивающими линзами или уменьшительными стеклами. Рассеивая падающие на них пучки света, отрицательные линзы дают мнимое изображение. Линзы 3 и 5 называются также менисками: 3-я положительным, 5-я отрицательным.

Наконец, плоскопараллельная пластинка, обозначенная цифрой 0, не имеет ни знака, ни числового выражения. Она, как мы знаем, не собирает и не рассеивает падающих на нее лучей.

Из рассмотрения линз можно заключить, что характер действия линзы, то-есть направление отклонения лучей, зависит от того, в каком направлении нарастает толщина линзы: к оси или к краям, а степень отклонения или оптическая сила зависит от того, насколько сильно нарастает толщина.

Когда мы рассматривали призму (см. рис. 11), мы установили, что она отклоняет падающие на нее лучи тем сильнее, чем больше ее преломляющий угол, то-есть чем быстрее растет ее толщина от вершины к основанию. Имея ввиду это соображение и обращаясь к рис. 56, легко заметить, что, хотя обе линзы 1 и 2 увеличиваются в толщине от края к середине, но в первой линзе это увеличение толщины происходит резче, чем во второй. Отсюда заключаем, что и степень отклонения ими лучей должна быть разной. Первая линза, очевидно, будет отклонять лучи сильнее, чем вторая. То же самое можно сказать о линзах 6 и 7.

Это свойство отклонять лучи и называется оптическим действием, а величина его, то-есть степень отклонения луча, называется оптической силой и измеряется величиной, обратной фокусному расстоянию. В очковой оптике принята специальная мера оптической силы — диоптрия. Одна диоптрия составляет оптическую силу такой линзы, фокусное расстояние которой равно одному метру. Если фокусное расстояние линзы равно 2 м, ее сила будет равна $\frac{1}{2}$ диоптрии. Если же фокусное расстояние равно 20 см, то-есть $\frac{1}{5}$ м, ее оптическая сила будет равна 5 диоптрий.

Если фокусное расстояние измерять в сантиметрах, то зависимость оптической силы от фокусного расстояния выразится следующим образом:

$$\varphi = \frac{100}{f} \quad \text{и} \quad f = \frac{100}{\varphi},$$

где φ — оптическая сила линзы в диоптриях (D);

f — фокусное расстояние линзы в сантиметрах.

Чтобы, кроме оптической силы, указать еще характер действия линзы, то-есть указать, собирательная она или рассеивающая, приписывают знак плюс или минус. Так, линза $+4D$ обозначает положительную линзу силой в 4 диоптрии. Ее фокусное расстояние составляет:

$$f = \frac{100}{+4} = +25 \text{ см.}$$

Линза $-3D$ означает отрицательную линзу силой в 3 диоптрии. Ее фокусное расстояние будет:

$$f = \frac{100}{-3} \approx -33 \text{ см.}$$

Если требуется перейти от фокусного расстояния, выраженного в сантиметрах, к оптической силе, выраженной в диоптриях, или наоборот, достаточно сто разделить на заданную величину с его знаком, чтобы получить искомую.

Таким образом, и фокусное расстояние и оптическая сила имеют не только числовое выражение, но и знак, причем если несколько линз соединяются вместе, складываются со своими знаками и их оптические силы, то-есть все сводится к простой арифметике.

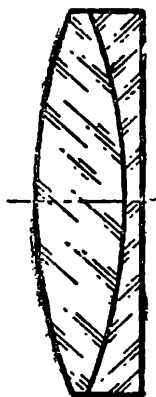


Рис. 57.
Сложение
двух линз

Вернемся к рис. 56 и попробуем сложить линзу 1 с линзой 6, предположив для простоты, что их радиусы кривизны одинаковы. В таком случае одна из выпуклых сторон линзы 1 уложится в вогнутость линзы 6, и мы получим новую линзу (рис. 57), схожую с линзой 2 (рис. 56). Иными словами, сложив сильную положительную линзу со слабой отрицательной, мы получили слабую положительную линзу. Это и понятно, так как мы складывали две величины с разными знаками, то-есть производили не сложение, а вычитание. Если сложить между собой плоскими сторонами две

одинаковые линзы 2, то получится линза, подобная линзе 1, то-есть в этом случае она будет вдвое сильнее, так как здесь складывались две положительные (одинаковые по знаку) величины.

Введение понятия оптической силы вместо фокусного расстояния вносит больше наглядности в вопросы сложения линз, особенно когда они очень тонки и складываются вплотную друг к другу. Однако на практике толщина линз настолько велика, что осуществить совмещение главных плоскостей складываемых линз не удастся и поэтому в формулу для подсчета оптической силы сложной системы по оптическим силам составляющих ее отдельных линз вводится расстояние между линзами. Это расстояние отсчитывается от задней главной плоскости передней линзы до передней главной плоскости задней линзы.

Оптическая сила φ двух линз, расположенных на расстоянии Δ (дельта), выражается следующей зависимостью:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \cdot \varphi_2 \Delta, \quad (21)$$

где φ_1 и φ_2 — оптические силы каждой линзы, а Δ — расстояние между ними, выраженное в метрах.

Обратимся к примерам.

1. Как изменится оптическая сила линзы $\varphi_1 = +5D$, если к ней присоединить другую линзу $\varphi_2 = +2D$ так, что $\Delta = 5 \text{ см} = 0,05 \text{ м}$. По формуле (21) имеем:

$$\varphi = 5 + 2 - 5 \cdot 2 \cdot 0,05 = +6,5.$$

Значит, оптическая сила станет $+6,5$ диоптрий

2. Даны две линзы (рис. 58): плоско-выпуклая $f_1 = +20$ см и плоско-вогнутая $f_2 = -20$ см. Определить фокусное расстояние, если их сложить сначала сферами вместе, а затем раздвинуть на 10 см.

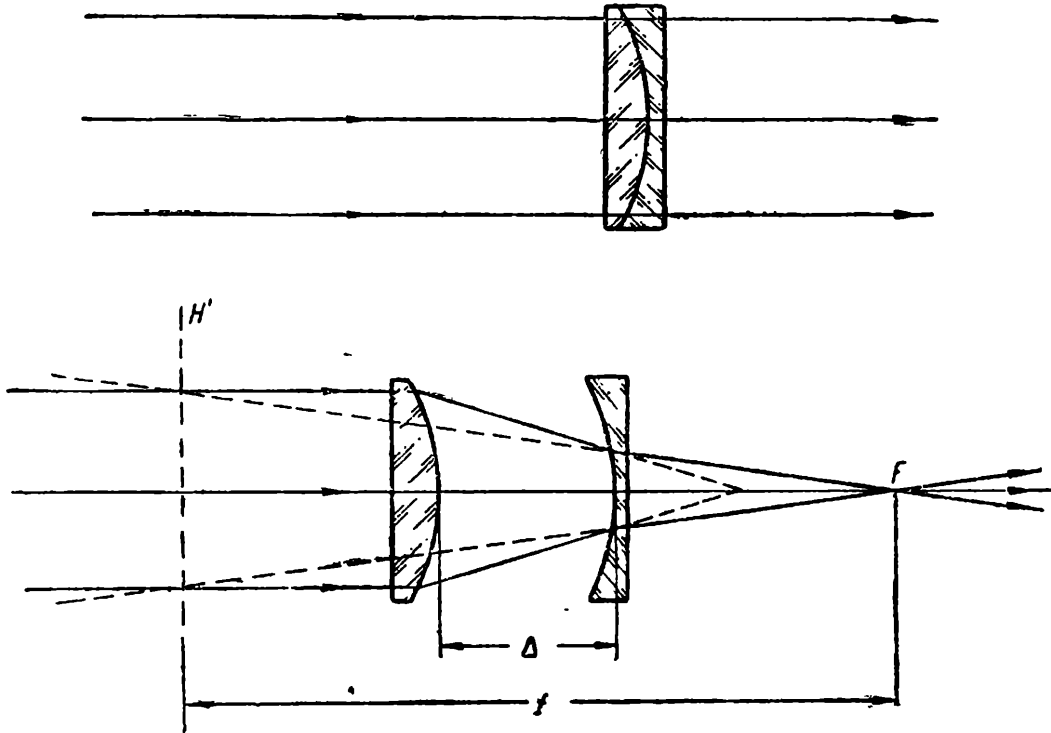


Рис. 58. Сложение двух линз

Перейдем сначала от фокусных расстояний к оптическим силам:

$$\varphi_1 = \frac{100}{f_1} = \frac{100}{20} = 5;$$

$$\varphi_2 = \frac{100}{f_2} = \frac{100}{-20} = -5.$$

Когда линзы сложены вплотную, $\Delta = 0$ и, следовательно

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 5 - 5 = 0.$$

Когда же линзы раздвинуты и Δ составляет 10 см, или 0,1 м, оптическая сила станет:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \cdot \varphi_2 \Delta = 5 - 5 - 5(-5) \cdot 0,1 = +2,5 D,$$

а фокусное расстояние

$$f = \frac{100}{2,5} = 40 \text{ см.}$$

Оказывается, что две противоположные по знаку и одинаковые по силе линзы, будучи сложены вплотную, не

обладают никакой силой и равноценны плоскопараллельной пластинке, как это и показано на рис. 58, но если их раздвинуть на 10 см, то эта же пара линз имеет положительную оптическую силу в 2,5 диоптрии или фокусное расстояние 40 см.

Следовательно, в системе линз фокусное расстояние зависит не только от фокусных расстояний составляющих ее отдельных линз, но и от их расстановки, то-есть от места, занимаемого каждой линзой в системе.

Чтобы не усложнять подсчеты переводом фокусных расстояний в оптические силы, для расчета фокусного расстояния системы линз можно пользоваться формулой, связывающей непосредственно фокусные расстояния составляющих линз. Такая формула имеет вид:

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - \Delta}, \quad (22)$$

где f — общее или эквивалентное фокусное расстояние системы линз;

f_1 — фокусное расстояние первой линзы;

f_2 — фокусное расстояние второй линзы;

Δ — расстояние между линзами, отсчитываемое от задней главной плоскости передней линзы до передней главной плоскости задней линзы, выраженное в тех же мерах длины, в которых выражены f_1 и f_2 .

Попробуем решить по этой формуле только что рассмотренный второй пример:

$$f = \frac{20 \cdot (-20)}{20 - 20 - 10} = \frac{-400}{-10} = +40 \text{ см.}$$

Результат получился, конечно, тот же, но путь более простой, так как здесь заданы были фокусные расстояния, а не оптические силы, для которых может оказаться проще формула (21).

Попробуем уменьшить расстояние в том же примере с 10 до 5 см:

$$f = \frac{20 \cdot (-20)}{20 - 20 - 5} = \frac{-400}{-5} = +80 \text{ см.}$$

Как показывает этот пример, при двух линзах разных знаков их сближение увеличивает фокусное расстояние и, наоборот, при увеличении расстояния между ними фокусное расстояние уменьшается. На этом основано устройство телеобъективов с переменным фокусным расстоянием, в которых передвижением одной линзы достигается изменение фокусного расстояния объектива. В нашем примере

передвижение линзы на 5 см дало изменение фокусного расстояния от 40 до 80 см.

Если же обе линзы одного знака, например, обе положительные, то сближение линз, наоборот, приводит к уменьшению фокусного расстояния. Возьмем две одинаковые линзы $f_1 = f_2 = 30$ см и сложим их так, чтобы $\Delta = 7$ см:

$$f = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 - 7} = 17 \text{ см.}$$

Сдвинув те же линзы до касания, получим:

$$f = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30} = 15 \text{ см.}$$

Раздвинем их так, чтобы $\Delta = 10$ см, и получим:

$$f = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 - 10} = 18 \text{ см.}$$

Раздвинем их еще, полагая $\Delta = 15$ см, и получим

$$f = \frac{30 \cdot 30}{30 + 30 - 15} = 20 \text{ см.}$$

Этот пример показывает, что если две линзы одного знака, то фокусное расстояние такой системы линз гораздо менее чувствительно к изменениям расстояния, чем при двух линзах с разными знаками.

НЕДОСТАТКИ ПРОСТЫХ ЛИНЗ И ПУТИ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

На рис. 59 изображен наиболее употребительный кинопроекторный объектив П-4, состоящий из четырех линз.

Может возникнуть вопрос, почему применяется такое сложное устройство, нельзя ли пользоваться одной простой линзой?

Действительно, простая линза может служить в качестве объектива, но изображение, даваемое такой линзой, будет обладать целым рядом недостатков; устранение этих недостатков связано с постепенным усложнением линзы, превращающейся в результате этих изменений в сложную конструкцию объектива, дающего все же далеко не идеальное изображение.

Попытка использовать в качестве объектива простую двояковыпуклую линзу дает изображение неудовлетворительного качества. Прежде всего обращает на себя внима-

ние общая нерезкость изображения и цветная кайма, окружающая границы между черным и белым, особенно если линза достаточно большого диаметра. Кроме того, ни при каком положении линзы нельзя получить одинаковой резкости по всему экрану, а прямые линии, расположенные на краю экрана, будут передаваться искривленными.

Все эти недостатки изображения, образуемого простой линзой, обусловлены целым рядом причин, действующих

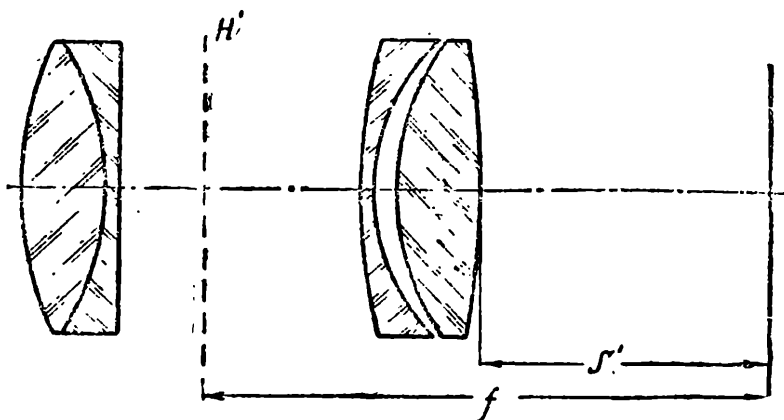


Рис. 59. Конструктивная схема кинопроекторного объектива П-4

в линзе одновременно и совместно, однако для изучения удобнее рассматривать эти причины отдельно так же, как удобно рассматривать отдельно способы устранения этих недостатков, найденные техникой.

Главные недостатки или погрешности простой линзы следующие:

1. Сферическая aberrация или отверстиеная ошибка, зависящая от относительных размеров линзы в сравнении с ее фокусным расстоянием.

2. Хроматическая aberrация, заключающаяся в появлении цветной каймы на границе черно-белых линий.

3. Астигматизм, мешающий получению резкого изображения точек предмета, лежащих не на оси, и приводящий к кривизне изображения, то-есть к расположению изображения плоскости не на плоскости, а на вогнутой поверхности.

4. Кома, образующая вместо изображения точки кометообразную фигуру.

5. Дисторсия, то-есть нарушение масштаба изображения с удаленностью от оси, приводящее к искривлению прямых линий.

Чтобы понять влияние указанных недостатков на качество изображения, необходимо яснее представить самую картину образования изображения.

Для нахождения места изображения при графическом построении нам достаточно было найти пересечение двух

лучей. В действительности на основании законов лучевой оптики образование изображения происходит следующим образом. От каждой точки освещенного предмета (см. рис. 45) во все стороны расходятся лучи; попадая в линзу, расходящийся конус таких лучей благодаря собирающему действию линзы превращается в конус сходящихся лучей, вершина которого представляет собой изображение точки. Так как линза имеет круглую форму, то для каждой точки предмета получается два конуса лучей: вершина расходяще-

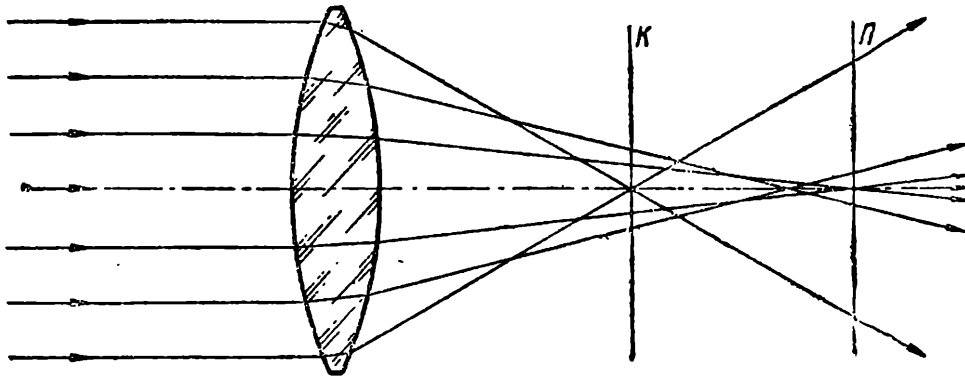


Рис. 60. Сферическая аберрация

гося конуса лежит в точке предмета, вершина сходящегося — в точке изображения, основания обоих конусов лежат на линзе. Это общее основание обоих конусов называется свободным отверстием линзы и представляет собой круг, через который проходит свет.

Лучи, проходящие по оси линзы и вблизи от нее, называются приосевыми или параксиальными, а пересекающие линзу у края, то-есть лежащие ближе к поверхности конуса, называются краевыми лучами. Таким образом, в образовании изображения каждой точки участвует множество лучей, пересекающих линзу на различном расстоянии от оси, или, как принято говорить, на различной высоте, если ось линзы расположена горизонтально и рассматривается только верхняя половина сечения.

Рассматривая положительную сферическую линзу, мы предполагали, что лучи, вышедшие из одной точки, пройдя через нее, пересекутся снова в одной точке, представляющей собой действительное изображение точки предмета. Так оно и происходит на самом деле, но только в первом приближении. При более строгом рассмотрении оказывается, что лучи, падающие на края линзы, отклоняются несколько сильнее, и благодаря этому краевые лучи пересекаются от линзы ближе, чем приосевые (рис. 60).

Ясно, что если лучи пересекаются не в одной точке, изображение точки будет нерезким. Как видно из рис. 60, если мы примем за изображение точку K , где пересекаются краевые лучи, и поставим здесь экран, то параксиальные

лучи образуют в этом месте некоторый кружок, называемый кружком рассеяния. То же самое будет в точке Π , где пересекаются параксиальные лучи; здесь точка Π изображения будет окружена ореолом расходящегося кружка крайних лучей.

Это несовпадение фокуса параксиальных и крайних лучей, приводящее к нерезкости изображения, называется сферической аберрацией* или отверстной ошибкой.

Для количественной характеристики сферической аберрации пользуются графическим изображением аберрации

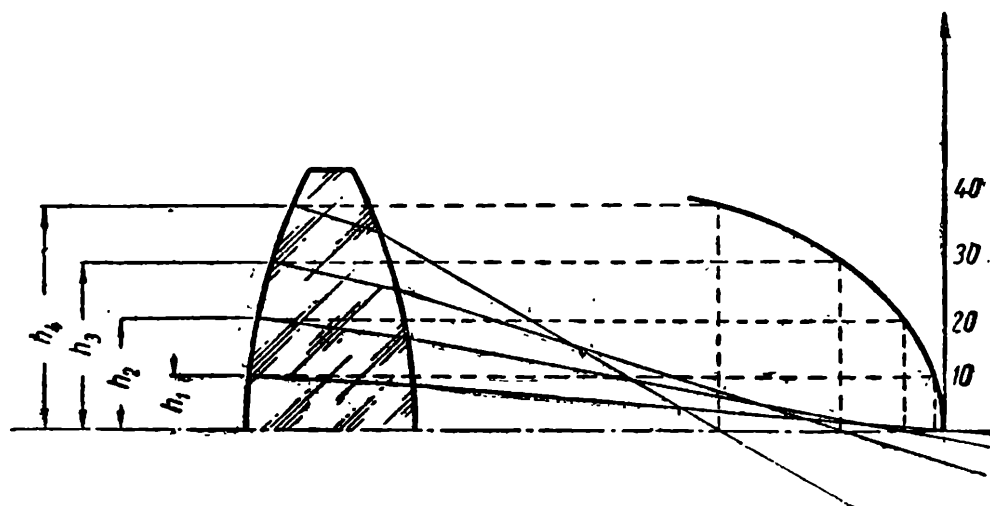


Рис. 61. Кривая сферической аберрации

в виде кривой; на вертикальной оси откладывается высота входящего луча, а на горизонтальной — расстояние, на котором этот луч пересекает главную ось по выходе из линзы (рис. 61).

Если бы удалось устранить действие крайних лучей, оставшийся пучок более однородных лучей давал бы меньший кружок рассеяния и соответственно увеличилась бы резкость изображения. Действительно, если линзу диафрагмировать, то-есть уменьшить путем установки диафрагмы ее свободное отверстие, то, как показывает опыт, резкость изображения заметно возрастает, но такой путь, несмотря на свою простоту и эффективность, не может применяться в широких пределах, так как при этом сильно сокращается световой поток, участвующий в образовании изображения. Поэтому для устранения сферической аберрации применяются другие средства**, из которых первое—

* Слово „аберрация“ происходит от латинского слова „abergo, aberravi, aberratum“, что означает „отклоняться“, „заблуждаться“.

** Сферическая аберрация может быть устранена применением асферических, то-есть несферических, например, эллиптических или параболических поверхностей, но изготовление этих поверхностей до настоящего времени настолько сложнее изготовления сферических, что не может получить широкого практического применения.

выбор наивыгоднейшей формы линзы или увеличение числа линз для получения меньшей кривизны, а второе — присоединение второй линзы, обладающей сферической aberrацией противоположного знака.

Величина сферической aberrации при прочих равных условиях зависит от углов, под которыми луч входит и выходит из линзы, и aberrация принимает наименьшее значение, когда эти углы достигают минимума. Например, если взять плоско-выпуклую линзу и обратить ее выпуклой

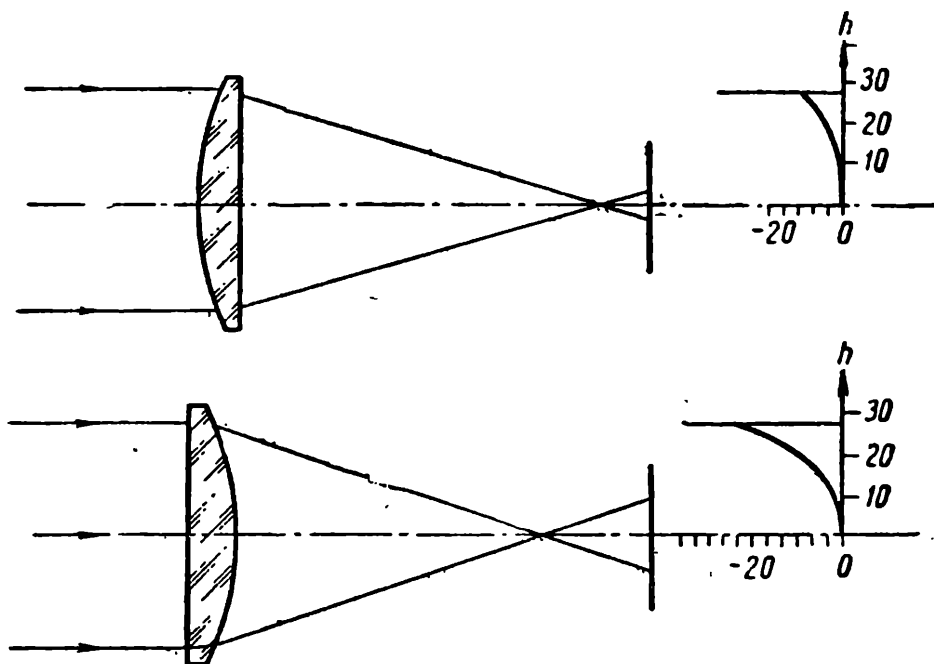


Рис. 62. Зависимость сферической aberrации от положения линзы

стороной к отдаленному предмету (рис. 62), то сферическая aberrация будет гораздо меньше, чем если эту же линзу повернуть плоскостью к предмету, а выпуклой стороной к изображению. Двухлинзовые конденсоры состоят обычно из двух плоско-выпуклых линз, обращенных выпуклостями друг к другу. Это делается потому, что конденсор дает изображение источника света примерно на таком же расстоянии, на каком находится источник от конденсора, причем между линзами лучи идут параллельным пучком, то-есть как бы в бесконечность. Если же сложить линзы конденсора плоскими сторонами или взять одну двояково-выпуклую линзу такой же силы, то резкость изображения источника света сильно ухудшится, вокруг основного изображения появится сияние, и ширина пучка в самом узком месте станет намного больше.

Сущность расчета линзовой системы с минимальным значением сферической aberrации заключается в том, что, выбирая форму и расположение преломляющих поверхностей, распределяют равномерно общее отклонение каж-

лого луча между всеми преломляющими поверхностями. Это и будет невыгодная форма.

Второй путь борьбы со сферической aberrацией сводится собственно к тому же, но здесь одновременно решается еще одна задача—устранение так называемой хроматической aberrации, которая является причиной цветной каймы и также мешает получению резких изображений. Природа хроматической aberrации значительно сложнее, и чтобы

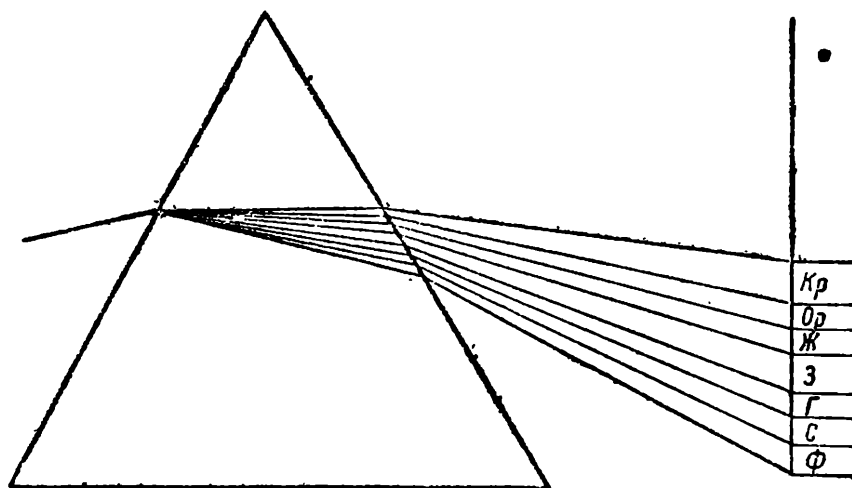


Рис. 63. Разложение белого света призмой

разобраться в ней, следует вернуться к уже рассмотренному нами ранее понятию показателя преломления и коснуться природы белого света.

Так как показатель преломления зависит от длины волны света, то при одном и том же угле падения угол преломления будет разным в зависимости от длины волны, то-есть угол преломления будет меняться от цвета к цвету. Следовательно, если к поверхности раздела подходит луч белого света, в котором содержатся лучи всех цветов, то при преломлении они разойдутся между собой, так как для каждого цвета будет свой угол преломления.

Рассматривая отклоняющее действие призмы, мы полагаем, что в призму входит луч какого-либо одного цвета (монокроматический). Когда же в призму входит луч белого цвета, то после первой же грани он распадается на лучи отдельных спектральных цветов (рис. 63), составляющих неодинаковые углы преломления. Наименьшее отклонение испытывают красные лучи, наибольшее — фиолетовые. Достигнув следующей грани, лучи отклоняются еще раз, и опять фиолетовые отклоняются сильнее красных. В результате лучи, шедшие до призмы в качестве одного составного белого света, распадаются по выходе из нее на ряд цветных полос, составляющих вместе спектр белого света.

Это разложение белого света при преломлении называется дисперсией света. Чем больше дисперсия, тем силь-

нее расходятся между собой крайние цвета спектра, так как тем больше между ними разница в показателях преломления.

Дисперсия света и является причиной хроматической aberrации простой линзы.

Если на линзу (рис. 64) падает луч белого света, то из линзы он выйдет уже в виде ряда спектральных лучей, пересекающих ось на различном расстоянии от линзы и образующих вместо одного фокуса белых лучей целый ряд

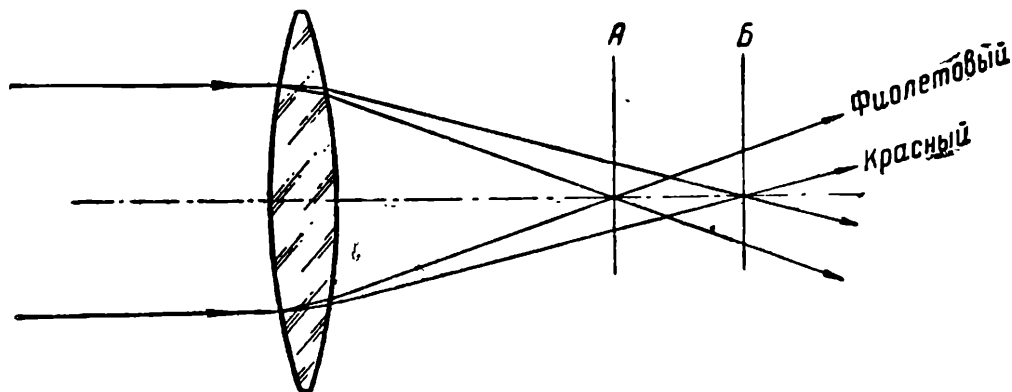


Рис. 64. Хроматическая aberrация линзы

цветных фокусов. Ближе всех к линзе пересекутся лучи фиолетовые, дальше всех — красные. Помещая экран в плоскости А пересечения фиолетовых лучей, мы получим фиолетовую точку, окруженную цветной каймой с красной наружной кромкой, а помещая экран в точке В — красную точку, окруженную также цветной каймой, но с обратным расположением цветов и с фиолетовым внешним краем. Передвигая экран, можно найти такое положение, при котором изображение белой точки будет наиболее ярким, но это все же будет не белая точка, да и, кроме того, она будет окружена цветной каймой, то-есть будет иметь место хроматическая aberrация.

На первый взгляд кажется, что устранить хроматическую aberrацию невозможно, так как при всяком переходе луча из воздуха в прозрачную среду и обратно будет происходить дисперсия света, однако теоретически установлено и практически проверено, что хроматическая aberrация устраняется почти полностью применением вместо одной линзы двух линз разного знака, изготовленных из двух неодинаковых сортов стекла.

Все сорта оптического стекла, из которых изготавливаются линзы, делятся на две большие группы: кроны и флинты.

Кронами называются такие стекла, которые имеют небольшой показатель преломления для среднего участка спектра и небольшую дисперсию.

Флинты имеют несколько больший средний показатель преломления, а дисперсия их значительно больше, чем у кронов.

Если изготовить две одинаковые по величине призмы 1 и 2 из крона и флинта (рис. 65), то первая даст незна-

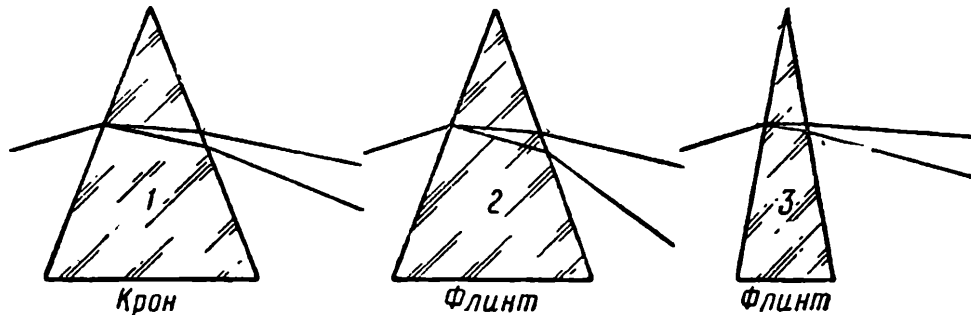


Рис. 65. Отклонение и дисперсия в разных призмах

чительное отклонение и небольшую дисперсию, тогда как вторая даст отклонение немногим большее, чем первая, но очень большую дисперсию.

Так как угол отклонения и дисперсия, кроме показателя преломления, зависят еще от величины преломляющего угла, в данном случае от угла при вершине, то, уменьшая этот угол, очевидно, можно изготовить из стекла флинт такую призму 3, чтобы дисперсия ее была равна дисперсии кроновой призмы 1.

Для этого призма должна быть, очевидно, с очень малым преломляющим углом и, следовательно, среднее отклонение ее будет значительно меньшим, чем отклонение в призме 1.

Если теперь сложить призму 1 с призмой 3 так, чтобы их преломляющие углы были противоположно направлены, в полученной системе призм (рис. 66) разложение лучей будет полностью устранено, а общее отклонение сохранится, хотя и уменьшится по величине, так как отклонение кроновой призмы будет превышать обратное отклонение флинтовой призмы, то-есть полученная сложная призма будет отклонять белый луч, не разлагая его на цвета спектра. Такая призма называется ахроматической призмой.

Перенося все эти выводы с призмы на линзу, мы получим ахроматическую линзу (рис. 67), которая дает изображение белой точки также в виде белой точки.

Положительная ахроматическая линза состоит из двух линз; сильной положительной, изготовленной из стекла крона, и слабой отрицательной, изготовленной из стекла флинта.

Так как для исправления хроматической аберрации нужно только подобрать оптические силы отдельных линз применительно к дисперсии стекол, независимо от кривиз-

ны каждой поверхности в отдельности, выбор радиусов кривизны при этом остается свободным и производится исходя из требований уменьшения сферической аберрации. Поэтому такое исправление называется иногда сферохрома-

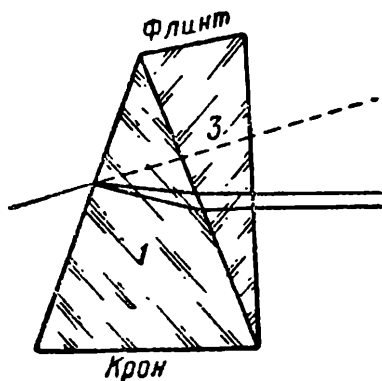


Рис. 66. Ахроматическая призма

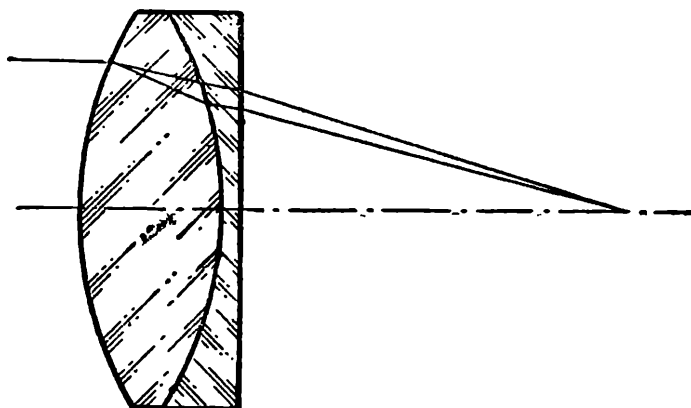


Рис. 67. Ахроматическая линза

тической коррекцией, а степень исправления характеризуется кривой, изображающей сферическую аберрацию для основных цветов спектра (рис. 68).

Чаще всего линзы ахромата склеиваются между собой, для чего склеиваемым поверхностям обеих линз придается одинаковая кривизна; однако при очень больших размерах линз или когда они подвергаются при эксплуатации большим температурным колебаниям, рекомендуется не склеивать линзы, а оставлять между ними тонкий воздушный слой. Теперь понятно, почему в объективе П-4 стоят не простые, а сложные линзы и каждая составлена из положительной и отрицательной линз.

Еще сложнее природа астигматизма — третьего недостатка простой линзы.

Сферическая линза симметрична относительно главной оптической оси и если изображаемая точка лежит на этой оси, то и пучок, участвующий в образовании изображения точки, разумеется, симметричен относительно главной оси.

В этом случае, если провести через пучок лучей две взаимно перпендикулярные плоскости M и C , проходящие через главную ось, то все лучи, лежащие как в той, так и в другой плоскости, встречают поверхность линзы в совершенно одинаковых условиях, а плоскости M и C

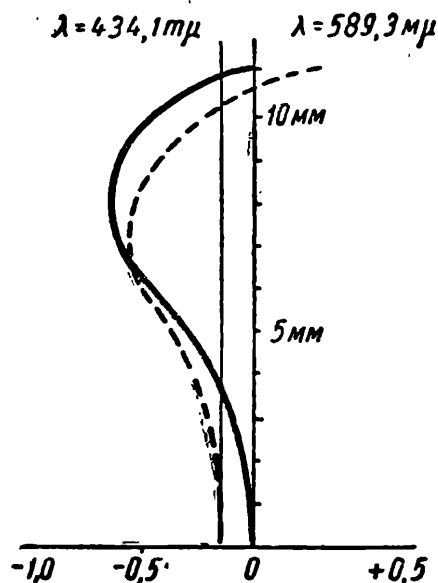


Рис. 68. Кривая сферохроматической аберрации объектива

пересекают поверхность линзы по дугам равной кривизны: mm и cc (рис. 69).

Совсем иначе обстоит дело в случае, когда изображаемая точка лежит не на оси, а расположена далеко в сто-

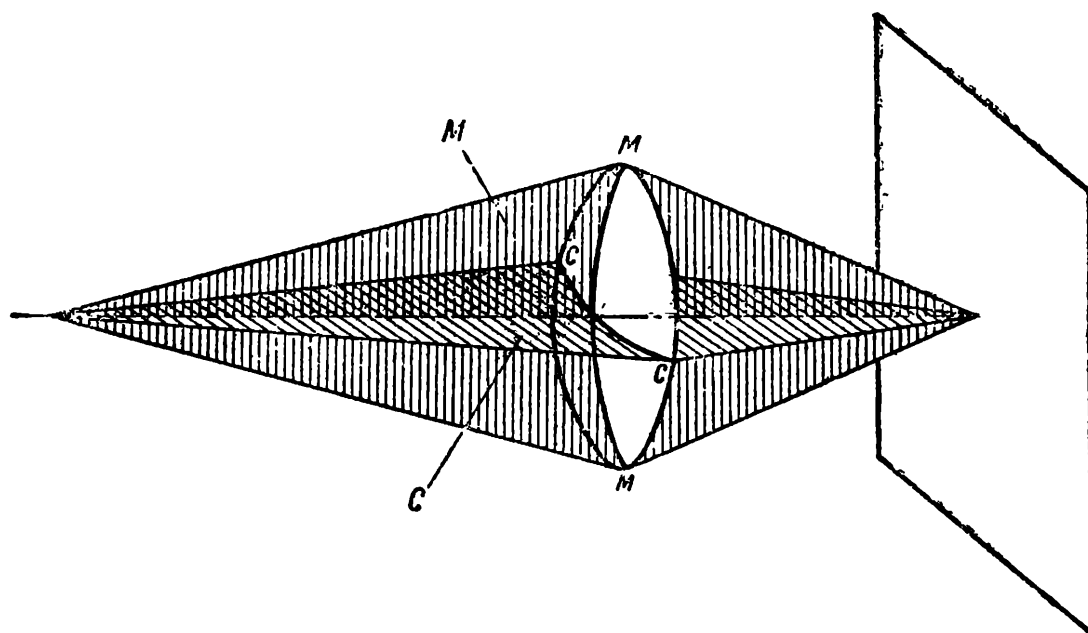


Рис. 69. Пучок, изображающий точку на оси

роне и на линзу падает наклонный пучок. Ось наклонного пучка в этом случае образует некоторый угол с главной осью линзы, а сам пучок при встрече с поверхностью

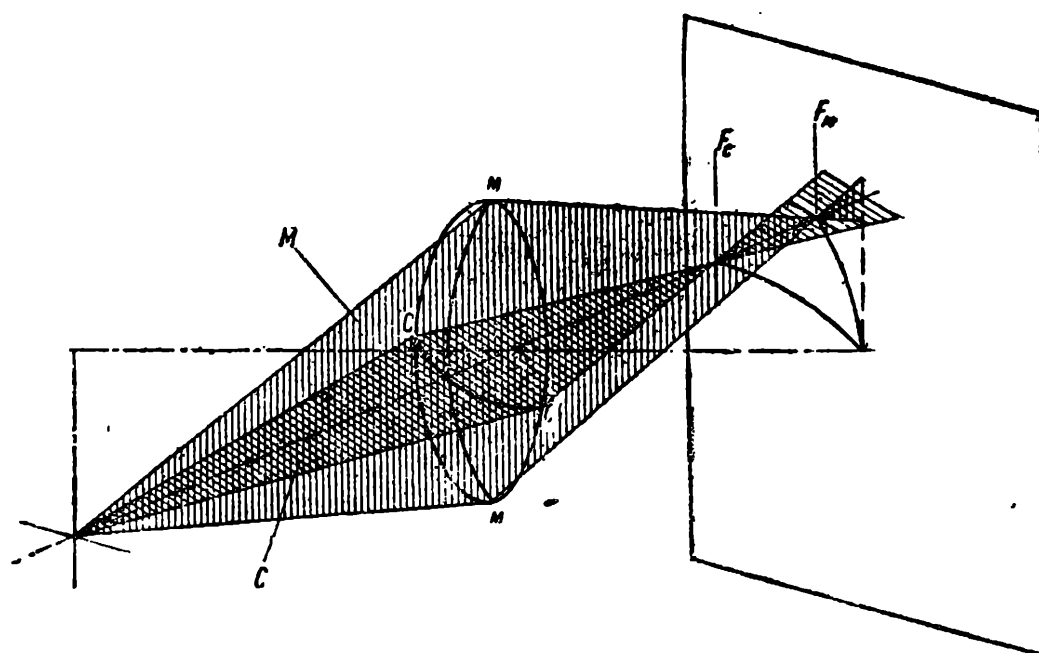


Рис. 70. Астигматический пучок и кривые астигматизма

линзы будет пересекать эту поверхность по дугам разной кривизны. То же самое произойдет при выходе пучка из линзы, так как пучок и там образует большой угол с главной осью.

Если в наклонном пучке (рис. 70) провести, как и прежде, две взаимно перпендикулярные плоскости M и C ,

то через главную ось будет проходить только одна плоскость mm , а если рассматривать две дуги mm и cc , которые образуются при пересечении этих плоскостей с поверхностью линзы, то оказывается, что кривизна дуги mm осталась той же, что была для точки на оси, а кривизна дуги cc больше, то-есть радиус дуги cc меньше.

Хорошей иллюстрацией того, как одна шаровая поверхность может иметь в разных сечениях различную кривизну, представляет собой географическая сетка на глобусе (рис. 71). В то время, как все меридианы, то-есть линии пересечения земной поверхности с плоскостью, проходящей через ось земли, имеют одинаковую величину, параллели, то-есть круги, проходящие поперек земной оси, уменьшаются по мере приближения к полюсам. Следовательно, меридианы имеют постоянную кривизну, а кривизна параллелей возрастает с приближением к полюсам, хотя и те и другие лежат в одной общей поверхности. Возвращаясь к линзе (см. рис. 70), мы можем установить, что фокусное расстояние линзы по дуге cc будет короче фокусного расстояния той же линзы для плоского пучка, пересекающего поверхность линзы по дуге mm . Пучки, проходящие через меридиональные плоскости, называются меридиональными, тогда как пучки, проходящие через плоскости, перпендикулярные к ним, называются сагиттальными.

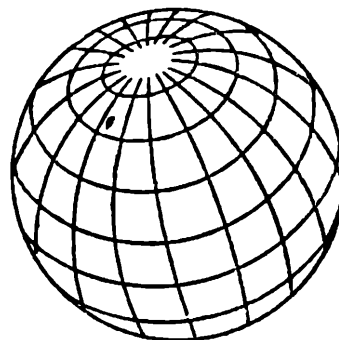


Рис. 71. Географическая сетка

Практически астигматизм выражается в том, что при хорошей резкости в середине поля к краям поля резкость быстро убывает, причем предметы, имеющие форму пересекающихся линий (крест, сетка), расположенные на краю, дают для каждой линии отдельное изображение, так что при резкой наводке на вертикальные линии горизонтальные линии будут нерезки, и наоборот.

Мерой астигматизма будет расстояние между местом резкого изображения, даваемого меридиональными пучками, и местом резкого изображения, образуемого сагиттальными пучками. Это расстояние называется астигматической разностью и изображается в виде графика астигматизма.

Астигматизм вносится каждой преломляющей поверхностью в отдельности и величина его изменяется после каждой поверхности. Поэтому определенным расположением и формой поверхностей можно значительно уменьшить астигматизм.

Но если даже расстояние между фокусом меридиональных лучей F_m и фокусом сагиттальных лучей F_c значительно

сократить, остается еще астигматическая кривизна поля, соответствующая положению некоторой поверхности, лежащей между показанными на рис. 70 кривыми F_m и F_c .

Объективы, в которых астигматизм сокращен до таких пределов, что резкость остается почти одинаковой до краев поля, называются анастигматами.

Слово астигматизм происходит от греческих слов а—отрицание и стигма—точка, то-есть означает отсутствие точки или бесточие. Слово анастигмат содержит еще одно отрицание—ан и, следовательно, указывает на отсутствие бесточия, то есть означает точечность изображения.

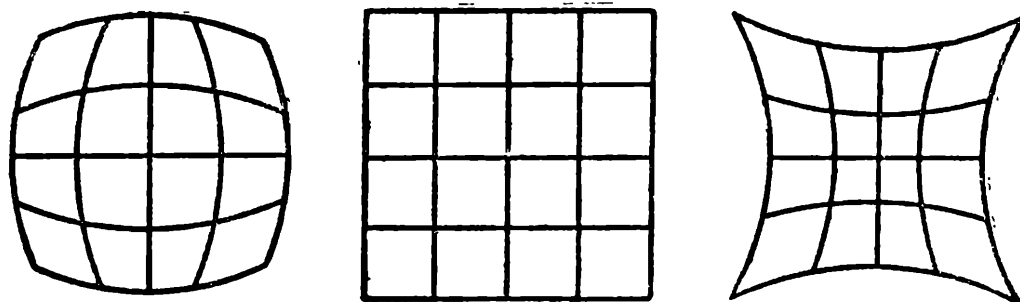


Рис. 72. Дисторсия изображения

Однако устранение сферической аберрации и астигматизма еще не обеспечивает возможности получения хорошего изображения точек, расположенных вне оси. Чтобы изображение точек, лежащих вне оси, сохранило вид точек, необходимо еще соблюдение условия синусов:

$$l \sin \alpha = l' \sin \alpha',$$

то-есть необходимо, чтобы для лучей любого наклона, входящих в объектив на любой высоте, сохранялось постоянное значение произведения расстояния точки от оси на величину синуса угла, образуемого лучом с осью как в пространстве предметов, так и в пространстве изображения.

Невыполнение этого условия приводит к аберрации кома. Кома—типичная асимметричная погрешность и выражается в появлении с одной стороны изображения точки кометообразного хвоста.

Для характеристики состояния коррекции объектива в отношении выполнения условия синусов вместе с графиком сферической аберрации обычно приводится кривая выполнения условия синусов.

Дисторсией называется недостаток, выражающийся в том, что прямоугольная сетка изображается с искривленными на краях линиями, наподобие бочки или подушки. Причиной дисторсии является сферическая аберрация, а величина

и направление искажения прямых линий зависят от положения диафрагмы: если диафрагма стоит перед линзой, то искажение имеет вид бочки, если диафрагма расположена после линзы, искажение принимает подушкообразный характер (рис. 72).

Дисторсия отсутствует в симметричных системах, составленных из двух одинаковых элементов, расположенных симметрично относительно диафрагмы, находящейся между ними (рис. 73).

Если при этом расстояние от предмета до объектива равно расстоянию от объектива до изображения, дисторсия отсутствует совершенно, но даже при несоблюдении последнего условия дисторсия при такой конструкции объектива ничтожно мала.

В графиках аберрации дисторсия указывается в процентах изменения масштаба изображения для различных углов поля.

Следует указать, что дисторсия легко замечается глазом и, следовательно, портит изображение только при наличии в изображаемом предмете прямых линий, взаимно параллельных или перпендикулярных, например, чертежей, рисунков и архитектурных снимков или самой кадровой рамки. В изображениях обычных сцен, не содержащих строго прямых линий, дисторсия незаметна.

Кривые аберрации, выражая состояние коррекции оптической системы, дают общее представление о качестве изображения, образуемого данной системой, например, данным объективом, однако практический интерес представляет для эксплуатации другая характеристика, так называемая разрешающая способность объектива.

Разрешающей способностью объектива называется способность отдельно изображать мелкие подробности изображаемого предмета; она измеряется числом черных линий, разделенных светлыми промежутками такой же ширины, отдельно передаваемых на длине 1 мм. Чем выше состояние коррекции, тем больше линий разрешает объектив, однако между кривыми аберраций и разрешающей способностью объектива простой зависимости не существует.

Разрешающая способность не только фотографических, но и проекционных объективов относится всегда к главной фокальной плоскости, а не к плоскости проекционного экрана, и выражается числом линий на миллиметр. Разрешающая способность светосильных объективов составляет

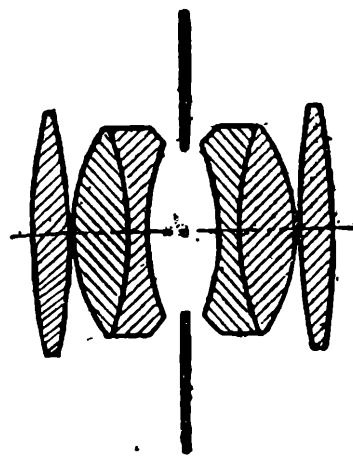


Рис. 73. Симметричный объектив

в центре поля около 40—50 линий на 1 мм и уменьшается к краям поля.

На рис. 74 приведены конструктивная схема объектива 16-ЗП и графики аббераций.

Анализ недостатков простой линзы показывает, что сложная конструкция существующих в настоящее время типов объективов возникла в результате эволюции объек-

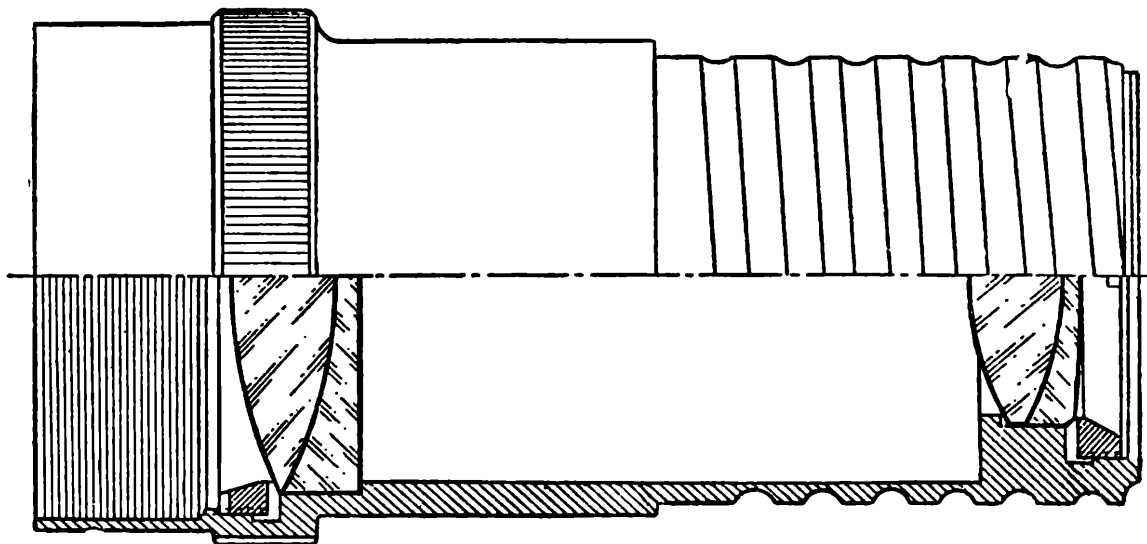


Рис. 74. Конструктивная схема и кривые абберации объектива 16 ЗП

тива от простой линзы со свойственными ей недостатками до современного хорошо коррегированного объектива, практически свободного почти от всех недостатков.

Кинопроекция благодаря большим расстояниям, существующим в силу естественного расположения проектора и экрана на противоположных концах зрительного зала, находится в наиболее благоприятных условиях в смысле углового размера поля изображения и вполне может довольствоваться объективами сравнительно простых конструкций, так как самым трудным, требующим усложнения конструкции в разработке всякого объектива, является именно сочетание высокой светосилы с широким полем изображения.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА

В кинопроекции применяются в настоящее время исключительно электрические источники света — в основном дуговые лампы и лампы накаливания.

Электрические источники света по природе излучения могут быть подразделены на три группы:

1) лампы накаливания, относящиеся к температурным

излучателям, то-есть таким, в которых светится раскаленное до высокой температуры тело накала;

2) газосветные лампы, основанные на использовании электролюминесценции, то-есть свечения электрического разряда в газах и парах металлов;

3) дуговые лампы, в которых используются оба вида излучения, то-есть одновременно с температурным излучением происходит свечение электрического разряда в парах металла.

Законы излучения света раскаленными телами хорошо изучены и проверены многолетним опытом разработки и эксплуатации температурных источников света.

Основные положения, которым подчиняются температурные излучатели, сводятся к следующему. Видимое излучение начинается только после достижения телом определенной, довольно высокой температуры; при этом в излучении преобладают длинноволновые тепловые лучи и относительно мало видимых лучей. Чем выше температура, тем ярче становится светящаяся поверхность, то-есть растет сила света источника. С дальнейшим повышением температуры увеличение яркости происходит значительно быстрее, а состав излучения все более приближается к белому, то-есть меняется в сторону большего содержания синих лучей, а при еще большем повышении температуры начинают преобладать сине-фиолетовые и ультрафиолетовые, невидимые лучи. Белый свет такого состава, как солнечный, получается при температуре около 5500°K^* , однако большинство известных на земле тел плавится или испаряется значительно раньше достижения такой температуры, и это обстоятельство составляет основное препятствие к созданию рациональных источников света типа температурного излучателя.

Законы температурного излучения имеют наиболее простой вид для идеального так называемого абсолютно черного тела, полностью поглощающего лучи всех длин волн. В качестве модели, демонстрирующей свойства абсолютно черного тела, может служить небольшое отверстие, сделанное в замкнутой равномерно нагреваемой полости, изготовленной из угля.

Так как коэффициент отражения угля очень мал, то всякий луч, вошедший внутрь полости, испытывая многократное отражение, полностью поглотится, то-есть коэффициент поглощения α будет равен единице. Нагревая тело до вы-

* Температура в $^{\circ}\text{K}$ — это абсолютная температура, которая отсчитывается не от точки таяния льда -0°C , а от минус 273°C . Иными словами, число, выражающее абсолютную температуру в $^{\circ}\text{K}$, на 273 больше числа, выражающего ту же температуру в $^{\circ}\text{C}$.

сокой температуры, можно экспериментальным путем проверить зависимость излучательной способности черного тела от температуры.

В табл. 7 приведена яркость абсолютно черного тела при различных температурах.

Таблица 7

Яркость и температура абсолютно черного тела

Абсолютная температура (в °К)	Яркость в стильбах	
	вычисленная	экспериментально найденная
1200	0,014	—
1400	0,242	—
1600	2,08	—
1800	11,3	11,2
2000	44,4	44,0
2200	137	136,4
2400	350	350
2600	780	775
2800	1550	—
3000	2830	—
4000	23330	—
5000	84000	—
6000	198000	—
8000	582000	—

Опыт подтверждает, что в световую энергию переходит только небольшая часть той энергии, которая подводится к источнику света, например, в виде электрической энергии. Этот так называемый световой коэффициент полезного действия источника света составляет обычно всего около 3% и, как показывают теоретические исследования, даже для идеального излучателя при самой невыгодной температуре 6500°К не может превзойти значения 14,5%. На рис. 75 приведена кривая распределения энергии в спектре излучения вольфрама при $T = 3500^{\circ}\text{К}$. Несмотря на то, что это наивысший по достижимой температуре световой к.п.д. для вольфрама, из рисунка видно, что световая отдача, изображенная в виде светлой площади, ничтожно мала в сравнении с общим излучением.

Реальные источники света только до известной степени приближаются к абсолютно черному телу, которое остается выражением предельной возможности поглощения и общего излучения.

Для характеристики излучательной способности реальных излучателей, не представляющих собой абсолютно черного тела, для которого выведены законы температур-

ного излучения, имеет существенное значение вопрос выражения температуры. Температура излучателя может быть:

- 1) действительной или истинной;
- 2) яркостной, то-есть такой, при которой черное тело имеет ту же яркость, что и данный излучатель;

3) цветовой, то-есть такой температурой, при которой черное тело дает излучение той же цветности, какой обладает излучение данного излучателя.

Если тело имеет одинаковое поглощение для всех длин волн, но коэффициент поглощения не равен единице, его называют серым телом. Для серых тел действительная температура равна цветовой, но больше яркостной. Если же тело не серое, а имеет избирательное поглощение, то все три температуры разные. В табл. 8 приведены значения действительной, яркостной и цветовой температур для вольфрама, служащего в настоящее время почти единственным материалом, идущим на изготовление тела накала электрических ламп накаливания.

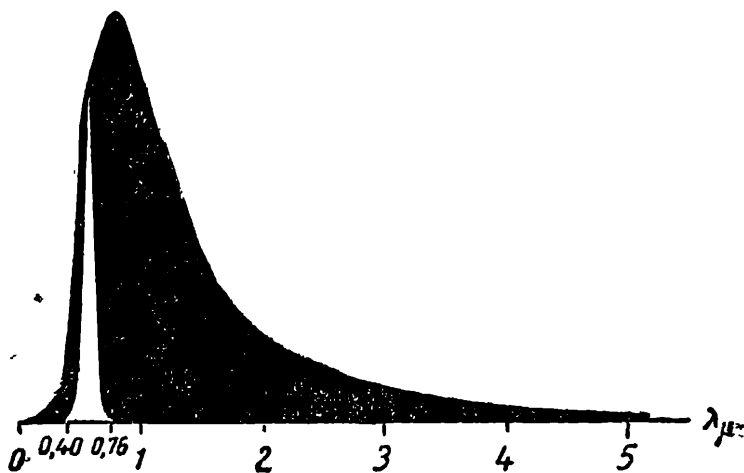


Рис. 75. Относительное распределение энергии в спектре излучения вольфрама при $T=3500^{\circ}\text{K}$

Таблица 8

Действительная, яркостная и цветовая температура вольфрама (в $^{\circ}\text{K}$)

Действительная	Яркостная	Цветовая
1400	1325	1414
1600	1500	1619
1800	1700	1825
2000	1880	2038
2200	2050	2242
2400	2100	2452
2600	2360	2663
2800	2530	2878
3000	2680	3094

Интересно отметить, что вольфрам обладает избирательным излучением в видимой части спектра, благодаря чему его световой коэффициент полезного действия при некото-

рой температуре больше светового коэффициента полезного действия абсолютно черного тела.

Преимущество вольфрама перед другими телами заключается в основном в малой его испаряемости при высокой температуре, благодаря чему температура его может быть сильно повышена.

В табл. 9 приводятся абсолютные температуры и световой коэффициент полезного действия существующих и идеальных температурных излучателей.

Таблица 9

Световой к.п.д. и абсолютная температура источников света

Наименование излучателя	Температура (в °К)	Световой к.п.д. (в %)
Стеариновая свеча	1750	0,017
Керосиновая лампа	1850	0,04
Газокалильная лампа	2000	0,18
Лампа с угольной нитью	2135	0,52
Лампа с вольфрамовой нитью пустотная	2430	1,6
Лампа вольфрамовая газополная	2800	3,2
Лампа вольфрамовая низковольтная	3100	3,9
" " " "	3300	4,4
" " " "	3350	4,95
Вольфрам при температуре плавления	3663	8,1
Солнце в зените	5400	13,8
Абсолютно черное тело	6500	14,5

Из табл. 9 видно, что все существующие искусственные источники света по температуре и по световому коэффициенту полезного действия уступают солнцу, к излучению которого больше всего приспособлен человеческий глаз.

Так как все твердые тела при температурном излучении дают сплошной спектр, далеко простирающийся в обе стороны от видимой части, основная энергия излучения приходится на невидимую инфракрасную и отчасти на ультрафиолетовую область. Поэтому максимальный световой к.п.д. для твердых излучателей всегда будет оставаться низким. При электролюминесценции источники света излучают отдельные спектральные линии, в том числе и линии, лежащие в видимой части спектра и обладающие большим коэффициентом видности. Действие люминесцентных источников основано на свойстве газов и паров светиться под влиянием электрического разряда. Спектр такого свечения состоит из отдельных линий, характерных для данного газа. Подбирая люминесцирующие вещества и условия излучения,

можно сильно повысить к.п.д. источника, сосредоточив значительную долю излучения в видимой части спектра. Большой к.п.д. может быть получен также путем применения так называемых люминофоров, дающих видимое излучение под влиянием невидимых ультрафиолетовых лучей, то-есть превращающих невидимую для глаза энергию коротковолнового излучения в видимую энергию.

Так как газосветные лампы, за исключением ртутной лампы сверхвысокого давления шарового типа и капиллярной ртутной лампы, пока еще не находят применения в практике кинопроекции, перейдем к рассмотрению основных источников: ламп накаливания и дуговых угольных ламп.

Лампы накаливания. В лампах накаливания светящимся телом является вольфрамовая проволока, накаляющаяся проходящим по ней током. Благодаря высокой температуре плавления вольфрама (около 3660°) температуру тела накала удается поднять до $3000—3300^\circ$ К, но все же она остается много ниже наивыгоднейшей температуры. Чтобы воспрепятствовать интенсивному распылению вольфрама, колбу лампы наполняют инертным, не вступающим в соединение с телом накала газом, откуда эти лампы и получили свое название—газональных.

Существенную характеристику кинопроекторных ламп накаливания составляют следующие данные:

1. Напряжение и электрическая мощность, при которой лампа работает. Обозначаются обычно в виде произведения напряжения, выраженного в вольтах, на мощность лампы, выраженную в ваттах, например: 12×50 , 110×300 и т. д.

2. Выраженный в люменах полезный световой поток, даваемый лампой, и его пространственное распределение.

3. Световая отдача.

4. Габариты и конструктивные особенности тела накала, определяющие тип лампы.

5. Габаритная яркость.

6. Конструктивные размеры лампы, положение лампы при горении и тип цоколя.

7. Средний срок службы.

Кроме того, иногда указывается качество стекла колбы, например: колба тугоплавкого стекла или колба из стекла прозрачного для ультрафиолетовой части спектра.

Световой отдачей лампы называется отношение светового потока, излучаемого лампой, к потребляемой электрической мощности:

$$\text{световая отдача} = \frac{F_{\text{лм}}}{P_{\text{вт}}},$$

то-есть количество люмен, получаемых от лампы на один ватт расходуемой мощности.

Световая отдача кинопроекторных ламп накаливания колеблется в пределах от 20 до 30 *лм/вт* и только в маломощных лампах имеет меньшее значение. Световая отдача обыкновенных осветительных ламп составляет 10—18 *лм/вт* и достигает 20 *лм/вт* только для самых мощных ламп. Таким образом, кинопроекторные лампы отличаются от обычных осветительных ламп исключительно повышенной световой отдачей. Световая отдача определяет собой

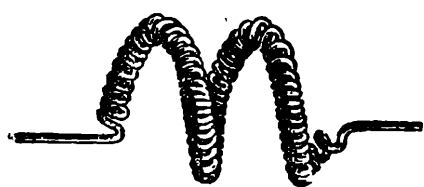


Рис. 76. Биспиральное тело накала

срок службы лампы, или продолжительность горения. Кроме световой отдачи, на срок службы влияет конструкция тела накала, объем колбы и положение при горении.

По конструкции тела накала различают лампы: спиральные, биспиральные, биплан и с плоским телом.

Спиральные и биспиральные лампы могут иметь одну, две или несколько секций, лежащих в одной плоскости,— лампы моноплан, или два ряда секций, расположенных в двух плоскостях,— лампы биплан.

Тело накала биспиральной лампы представляет собой относительно длинную спираль, свитую вторично в спираль большего диаметра (рис. 76), чем достигается большая компактность тела накала и уменьшение габарита.

Биспиральную конструкцию имеет тело накала лампы К7 12×30, служащей для звуковоспроизведения в аппаратах типа СКП-26 и СКП-27.

Лампы биплан состоят из двух рядов секций, расположенных в двух плоскостях в шахматном порядке (рис. 77) таким образом, что против просветов между спиралями первого ряда приходятся спирали второго заднего ряда, чем достигается лучшее заполнение габарита и увеличение габаритной яркости почти вдвое по сравнению с лампой моноплан, в которой эти просветы остаются незаполненными и заполняются искусственно при помощи контротражателя, как мы это увидим в дальнейшем.

В 1944 г. Московский электроламповый завод совместно с Научно-исследовательским кино-фотоинститутом разработал новый тип кинопроекторной лампы накаливания оригинальной конструкции с плоской спиралью. Эта лампа существенно отличается от других проекционных ламп накаливания высокой габаритной яркостью и более тонкой структурой тела накала, позволяющей рассматривать его как приближение к сплошной светящейся плоскости (рис. 78).

Габаритная яркость и размеры тела накала являются наиболее важной характеристикой кинопроекторной лампы

и зависят как от световой отдачи, так и от конструкции тела накала. Чем плотнее тело накала, то-есть чем меньше в нем промежутков, тем больше его габаритная яркость. Габаритная яркость низковольтных ламп большой мощности доходит до 3000 *сб.*

Сроком службы, или продолжительностью горения, называется выраженное в часах время от начала горения

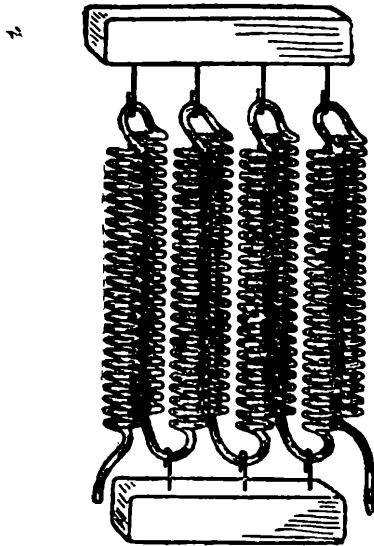


Рис. 77. Тело накала лампы биплан

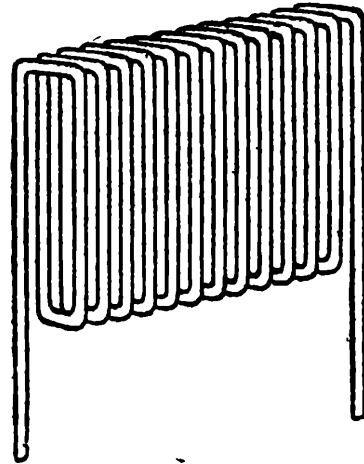


Рис. 78. Плоское тело накала

лампы до тех пор, пока ее световой поток уменьшится на 20% по сравнению с его начальным значением или до перегорания лампы, если оно произойдет раньше. Уменьшение светового потока происходит вследствие оседания на стенках колбы вольфрамовой пыли, образующей темный налет, который увеличивает поглощение света и тепла. Колба с таким налетом легко перегревается и, размягчаясь, вспучивается.

Срок службы лампы может сократиться, если лампа горит в положении, не предусмотренном ее конструкцией. Во избежание этого рабочее положение лампы указывается в каталогах и на цоколе каждой лампы. Маломощные низковольтные лампы могут гореть в любом положении.

Разумеется, чем больше световая отдача, тем короче срок службы лампы. Самым большим сроком службы обладают лампы с небольшой световой отдачей.

На рис. 79 приводятся кривые зависимости световой отдачи от режима лампы накаливания.

Для ориентировочных расчетов в пределах нескольких процентов можно принять, что изменение напряжения на лампе на $\pm 1\%$ от установленного номинального значения вызывает соответственно изменение:

мощности лампы $\pm 1,5\%$,	светового потока $\pm 3,5\%$,
световой отдачи $\pm 1,8\%$,	срока службы $\pm 13\%$.

Так как невозможно изготовить большое количество совершенно одинаковых ламп, приходится говорить о среднем сроке службы лампы, а не об истинном сроке, который может отличаться от среднего тем больше, чем меньше взятое числ ламп.

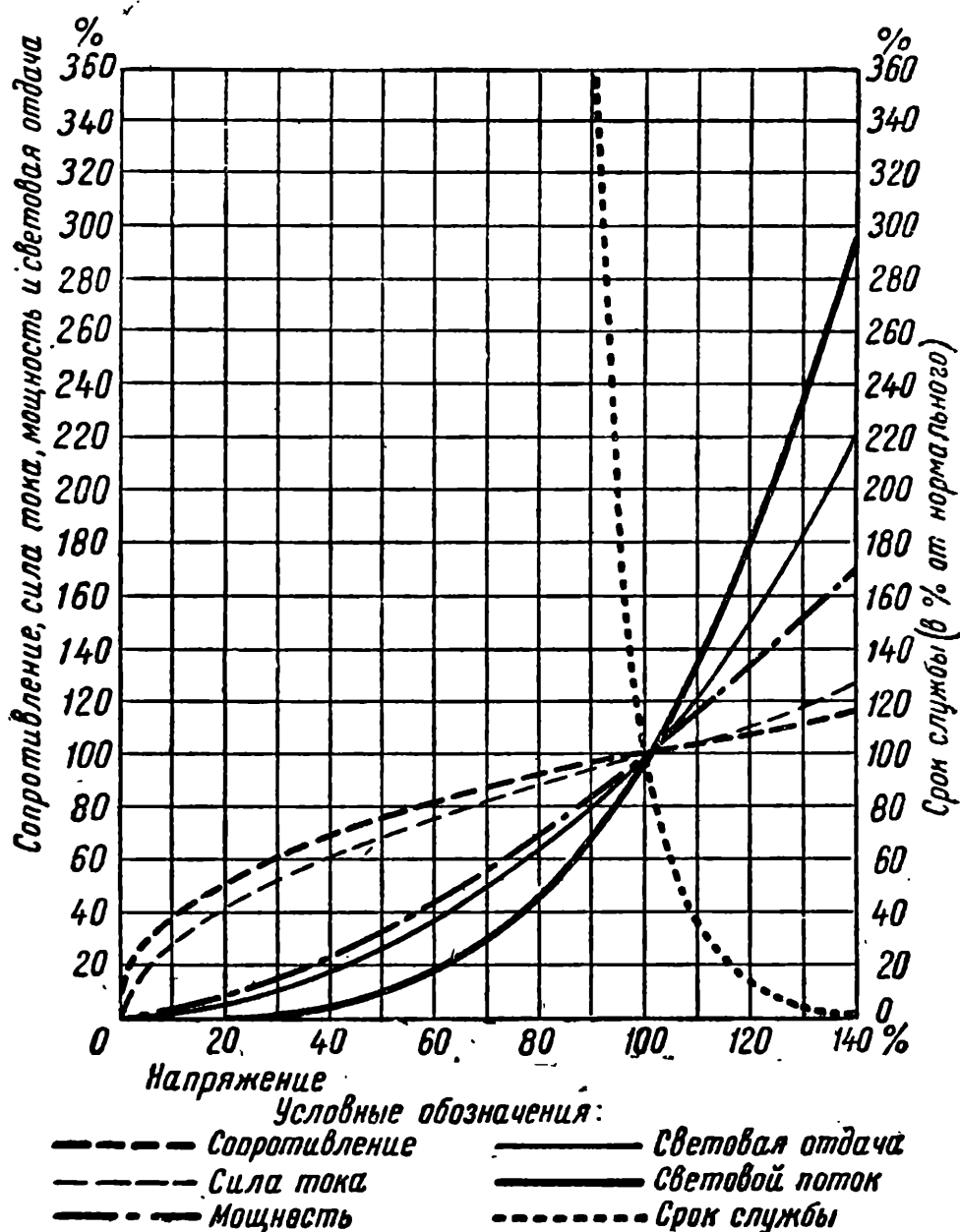


Рис. 79. Кривые зависимости излучения от электрического режима

В табл. 10 и на рис. 80—86 приводятся основные параметры кинопроекторных ламп накаливания, выпускаемых Министерством промышленности средств связи СССР.

Основное преимущество ламп накаливания — простота обслуживания, отсутствие открытого пламени и отсутствие продуктов сгорания. Большим преимуществом является также независимость от рода тока, так как лампа может питаться как переменным, так и постоянным током. С другой стороны, пользование низковольтными лампами накаливания становится затруднительным при наличии постоянного тока ввиду невозможности понизить напряжения при-

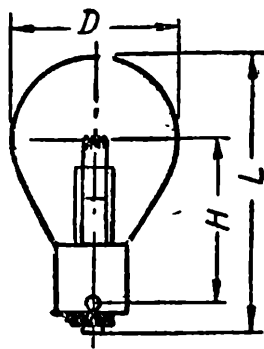


Рис. 80.
Лампа К1—4×3

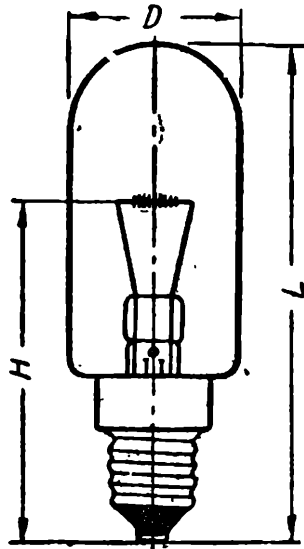


Рис. 81.
Лампа К3—5×35
и К7—12×30

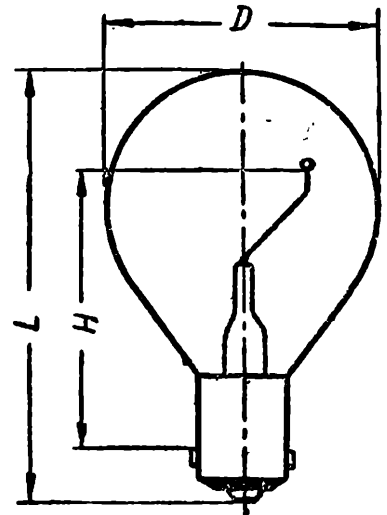


Рис. 82.
Лампа К8—12×30
и К9—12×50

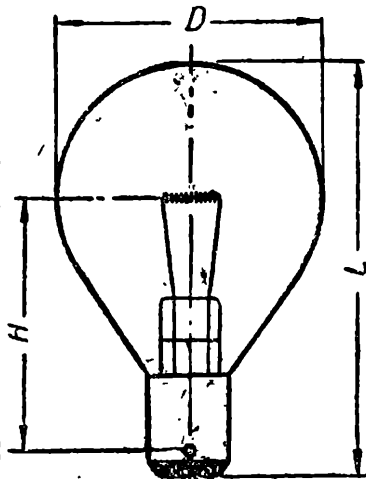


Рис. 83.
Лампа К10—12×50

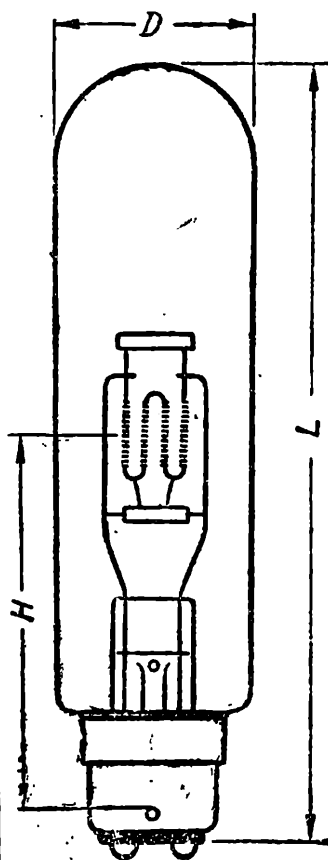


Рис. 84.
Лампа К12—110×300
и К18—127×300

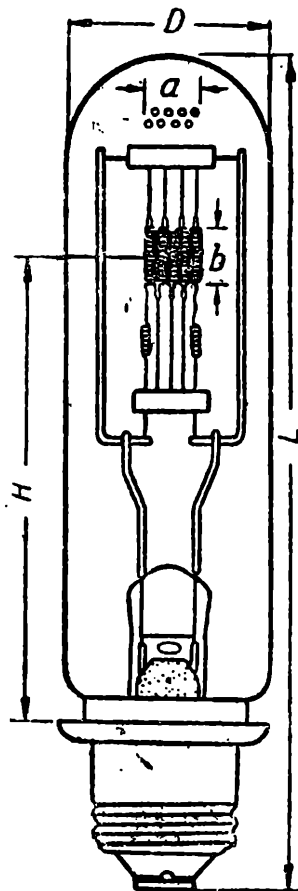
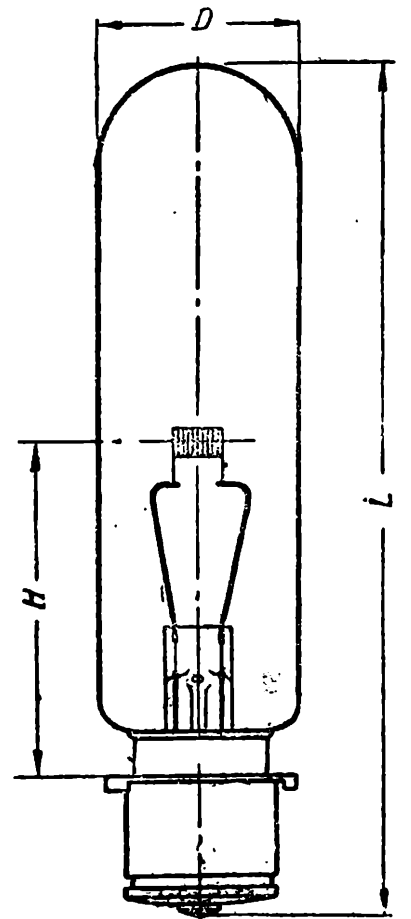


Рис. 85.
Лампа К14—110×500
и К15—110×750



Вид на цоколь снизу

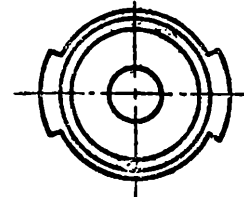


Рис. 86.
Лампа К22—30×400

Основные параметры кинопроекторных ламп

Тип ламп	Напряжение	Мощность	Световой поток	Световая отдача	Диаметр колбы наибольший	Полная длина лампы наибольшая	Высота светового центра лампы	Тип цоколя	Наименьшая средняя продолжит. горения	Габаритная яркость (приблиз.)	Наибольшая длина тела накала	Наибольшая высота тела накала	Рисунок
шифр	в	вт	лм	лм/вт	мм	мм	мм	шифр	часы	сб	мм	мм	№
K1	4	3	24	8,0	26	51	31±2	1С-15	100	200	3	0,18	80
K3	5	35	77	2,2	31	91	60±3	Е-14	500	30	9	2,5	81
K7	12	30	528	17,6	25	86	60±3	Е-14	50	1 000	4	1,5	81
K8	12	30	528	17,6	43	70	41±2	2С-15	50	600	7	0,8	82
K9	12	50	1 000	20,0	51	77	45±2	2С-15	50	800	7,2	0,95	82
K10	12	50	1 000	20,0	51	77	45±2	2С-15	50	800	7,2	0,95	83
K12	110	300	6 450	21,5	37	145	70±3	2С-22	50	1 000	8	8,5	84
K18	127	300	6 450	21,5	37	145	70±3	2С-22	50	900	8	8,5	84
K14	110	500	11 000	22,0	37	155	81,5±0,5	Ф-42	30	1 600	10	10	85
K15	110	750	17 250	23,0	37	155	81,5±0,5	Ф-42	30	1 800	11	11	85
K22	30	400	11 600	29,0	37	155	60±0,5	Ф-34	20	2 700	9	6,5	86

помощи трансформатора, а включение омического сопротивления приводит к большому расходу энергии, тогда как именно низковольтные лампы дают наибольшую габаритную яркость.

Однако даже при наибольшей достижимой габаритной яркости лампы накаливания все же сильно уступают дуговым лампам и поэтому область полезного применения ламп накаливания для проекционных целей не выходит за пределы кинопередвижек и маломощных стационарных установок для учебно-технических целей и клубного обслуживания.

Дуговые лампы. Для театральной проекции применяются дуговые лампы преимущественно с углями интенсивного горения, так называемые ДИГ, то есть дуги интенсивного горения.

В дуговых лампах используется явление электрического дугового разряда, заключающееся в том, что электрический ток проходит через промежуток между концами двух электродов, заполненный потоком горячих газов, образуемых от испарения электродов. Если дуга питается постоянным током, на положительном электроде образуется углубление, сильно раскаленное вследствие удара потока электронов, летящих с большой скоростью от отрицательного электрода к положительному. Это раскаленное углубление — кратер дуги — и является собственно источником света, так как оно излучает около 85% всего светового потока дуги. Обладая громадной и почти равномерной яркостью, кратер дуги представляет собой источник света, чрезвычайно благо-

приятный для проекционных целей вообще и для кино-проекционных в особенности.

При питании дуги переменным током кратера не образуется, температура и яркость электродов не достигают таких высоких значений и, кроме того, излучение идет от обоих электродов, меняя свое направление с каждым полупериодом. Это обстоятельство сильно понижает коэффициент использования света. Кроме того, вследствие взаимодействия с обтюратором, ввиду близости частоты обтюрации с частотой питающего дугу переменного тока, образуются биения, заметные на глаз. Следовательно, рациональное использование дуговой лампы возможно только при постоянном токе.

Наиболее пригодным материалом для изготовления электродов дуговой лампы является углерод в виде сажи, графита или ретортного кокса. Ценным качеством угля как теплового излучателя является то, что уголь может быть нагрет до очень высокой температуры, причем он не плавится, а сразу переходит в парообразное состояние. Кроме того, структура угля позволяет ввести в него те или иные примеси и, наконец, уголь является наиболее доступным и сравнительно дешевым материалом.

Угли для дуговой лампы постоянного тока делятся на положительные и отрицательные, отличающиеся между собой как по размерам—диаметру и длине, так часто и по составу и конструкции угля. Большой диаметр и, следовательно, большая площадь сечения положительного угля вызваны большим расходом его в процессе горения. Кроме того, диаметр положительного угля берется больше диаметра отрицательного, чтобы меньше экранировать кратер дуги.

Если угольные электроды не содержат никаких специально введенных примесей, они называются простыми углями. Уголь, имеющий одинаковую структуру по всей площади сечения, называется бесфитильным.

Для того чтобы облегчить образование кратера, уголь снабжают фитилем, то-есть осевую его часть изготовляют из более мягкого материала; туда же обычно вводят и примеси.

На рис. 87 приведена кривая спектрального распределения энергии кратера простой угольной дуги. Как видно из рисунка, простая угольная дуга дает излучение, богатое

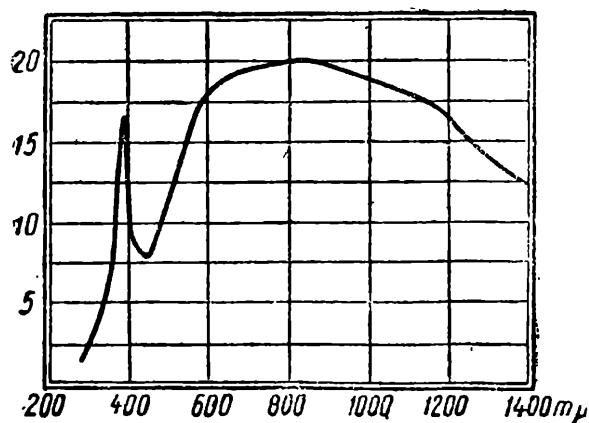


Рис. 87. Спектральное распределение энергии кратера простой угольной дуги

инфракрасными и отчасти ультрафиолетовыми лучами, то-есть является в основном температурным излучателем.

Чтобы сделать свет дуги белее, то-есть повысить в нем за счет свечения газов содержание синих лучей, в уголь вводят соли щелочно-земельных металлов, вследствие чего получается интенсивное свечение газового промежутка дуги и образуется пламя, изменяющее спектральный состав излучения. Такие угли так же, как и сама дуга, называются

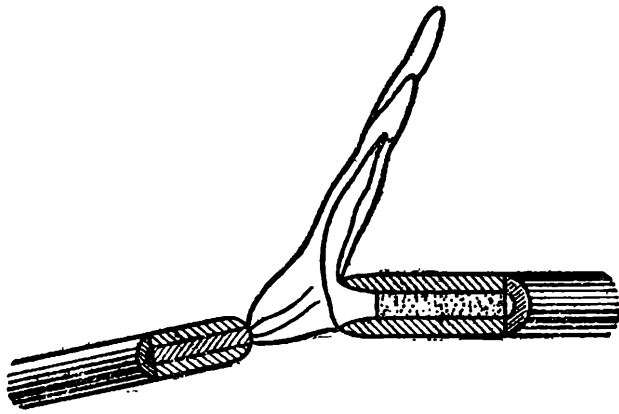


Рис. 88. Дуга интенсивного горения

пламенными. Спектральный состав излучения пламенной дуги отличается от состава излучения простой дуги большим излучением в видимой части спектра, однако яркость самого пламени небольшая.

В дугах интенсивного горения (рис. 88) к температурному свечению прибавляется еще более яркое свечение паров щелочно-земельных металлов, пропитывающих фитиль и испаря-

ющихся при горении дуги. Положительный уголь дуги интенсивного горения состоит из сравнительно тонкой оболочки и относительно толстого фитиля, содержащего фтористый церий. Такая конструкция угля содействует образованию глубокого кратера, внутри которого удерживается облачко светящегося газа, обладающее огромной, достигающей до 90 ксб яркостью. Дуга интенсивного горения дает белый свет, богатый содержанием синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучей. Световая отдача дуги интенсивного горения—свыше 35 лм/вт при отличном спектральном составе, делающем его незаменимым источником для проекции цветных картин.

Чтобы получить эффект высокой интенсивности и тем достигнуть большей яркости, необходимо повысить плотность тока, доводя его до 1,5—2а на 1 мм² сечения угля. Однако при такой нагрузке трудно удержать разряд на месте и добиться устойчивого горения. Кроме того, такая дуга требует соблюдения более точного взаимного расположения углей, а так как при большой нагрузке угли сгорают особенно быстро, то для соблюдения этих условий дуги высокой интенсивности выполняются обычно автоматическими, то-есть угли по мере сгорания сближаются автоматически, и, кроме того, в мощных лампах положительный уголь, для того чтобы обеспечить равномерное сгорание и целостность краев положительного угля, удерживающих

внутри себя раскаленное облачко светящихся газов, вращается при горении. Все это значительно усложняет механизм дуговой лампы, но окупается получением большой яркости.

В эксплуатации дуга обладает рядом недостатков, в первую очередь к ним относятся наличие открытого пламени и связанная с ним пожарная опасность; затем недостатками являются сложность обслуживания, шум при горении и необходимость питать дугу постоянным током, а также особенно ощутимая при кинопроекции ограниченность длины положительного угля.

Ввиду того, что положительный уголь при зеркальном конденсоре располагается всегда вдоль оси проекции, второй конец угля близко подходит к кадровому окну, и чтобы не экранировать его, приходится отодвинуть зеркало и увеличить его диаметр и габариты всего фонаря. Так как при больших размерах фонаря облегчаются условия его вентиляции и охлаждения, то такое увеличение не встречает возражений, и фонарь занимает обычно большую часть всей проекционной установки.

Основное оборудование для театральной кинопроекции в СССР составляют стационарные кинопроекторы СКП-26 и КПТ-1. В первом применяется дуговая лампа постоянного тока с пламенными углями: положительным Экстра-эффект—диаметром 10—12 мм и отрицательным Экстра—диаметром 7—10 мм. Положительный уголь расположен горизонтально, отрицательный — наклонно, под углом 105° к положительному. Кратер дуги имеет яркость около 16—18 ксб при хорошей равномерности. Цветовая температура кратера—около 4260°K .

В табл. 11 приведены основные данные дуговой лампы СКП-26.

Таблица 11

Основные данные дуговой лампы СКП-26

Режим		Диаметр угля (мм)		Скорость сгорания (мм/час)	
Напряжение (в)	Сила тока (а)	+	—	+	—
50	45	10	7—8	110—140	90—80
52	50	10—11	7—8	135	100
54	60	12	8—10	120	80—70

Ввиду отсутствия автоматической подачи углей лампа требует постоянного наблюдения и регулировки длины дугового промежутка.

В проекторе КПТ-1 применяется автоматическая дуговая лампа с невращающимися углями интенсивного горения: положительным—диаметром 8 мм и отрицательным—диаметром 7 мм. Положительный уголь имеет фитиль с большим содержанием фтористого церия. Нормальный ток 60 а при напряжении около 40 в. Яркость кратера составляет при этом 53—54 ксб в центре, но сильно убывает к краям.

Эта лампа обеспечивает получение совершенно белого света, соответствующего цветовой температуре около 5400°К, благодаря чему она особенно пригодна для проекции цветных фильмов.

ОБЪЕКТИВ

Кинематография появилась позже фотографии, располагавшей к этому времени уже достаточно развитой технической базой, обеспечивавшей возможность получения и регистрации изображения. Ко времени возникновения кинотехники имелся уже значительный опыт конструирования и изготовления фотообъективов, которые на первых порах и стали применяться в кинотехнике без каких-либо изменений; только в дальнейшем фотообъективы были критически пересмотрены и специализированы применительно к требованиям быстро развивавшейся кинотехники. Некоторая общность технических средств, разумеется, не утрачена и по настоящее время, поэтому иногда трудно провести резкую границу между областью фотографии и собственно кинематографией.

Так как среди всех видов кинооборудования в количественном выражении первое место занимают проекционные приборы, на них больше всего и сказалась специализация, вызванная особенностями проекционной техники, значительно отличающейся от съемочной. Тем не менее дифференциация коснулась главным образом внешних элементов—формы оправы, диафрагмы и т. д., в значительно меньшей степени—конструктивной схемы оптики и совсем не коснулась приемов коррегирования.

Таким положением и оправдывается установившаяся традиция излагать учение об объективе, исходя из характеристики фотографического объектива, являющегося наиболее общей формой проекционного объектива в широком смысле этого слова. Однако ввиду ограниченного объема книги в дальнейшем излагается материал, относящийся только к проекционным объективам.

Роль объектива в кинопроекционной системе ближе всего к роли сильного объектива в микроскопе, но в первом случае гораздо больше размер поля, а фокусное

расстояние соответствует среднему фокусному расстоянию фотографического объектива.

Кинопроекторный объектив представляет собой положительную оптическую систему, предназначенную для получения действительного изображения, причем сравнительно с фотографическим объективом он работает в обратном ходе. Как и любой объектив, кинопроекторный объектив характеризуется фокусным расстоянием, относительным отверстием и величиной изображения или угловым полем

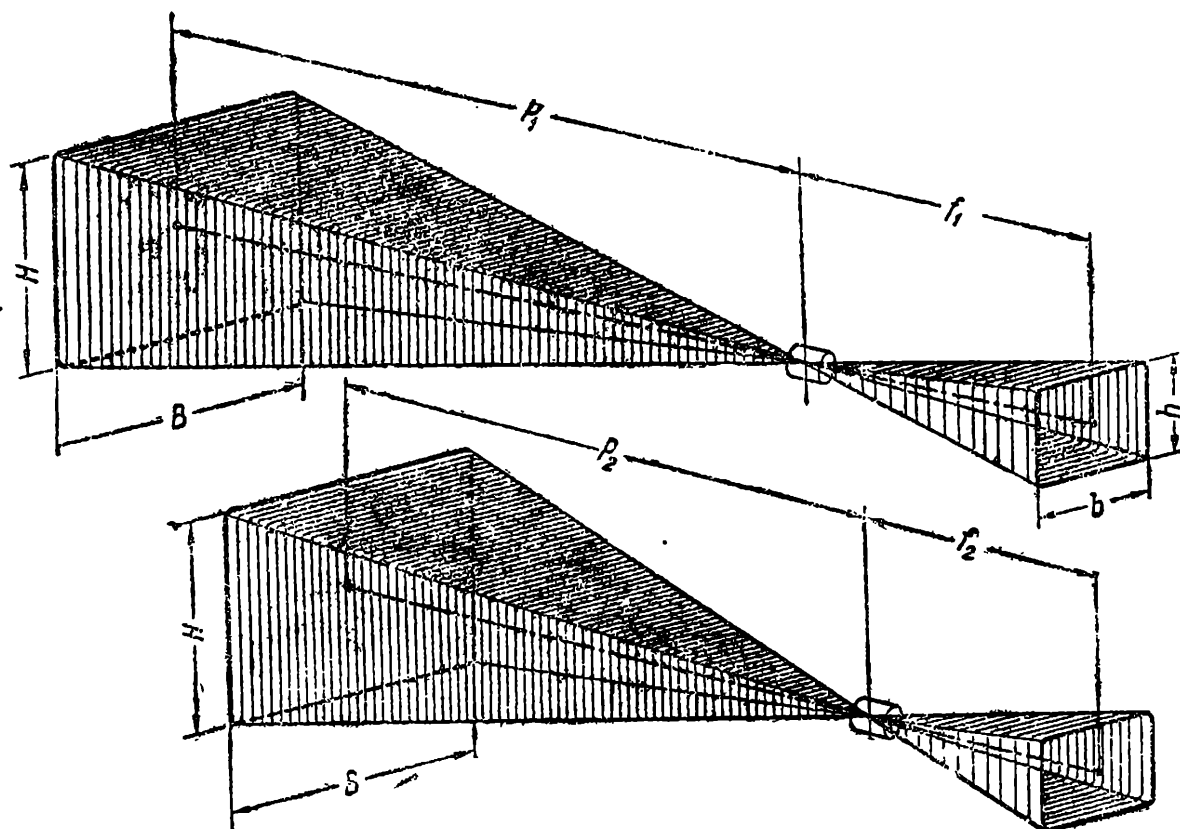


Рис. 89. Основные зависимости в кинопроекции

изображения. Первые две характеристики гравированы на оправе объектива вместе с заводским номером и названием марки в качестве основных параметров, характеризующих эксплуатационные качества. Фокусное расстояние выражается в сантиметрах или реже в миллиметрах, а относительное отверстие обозначается в виде дроби $1:K$, где значение K колеблется в пределах от 3 до 1, редко выходя за эти пределы. Наиболее часто встречаются значения относительного отверстия $1:2$ — $1:1,65$. Угловое поле 2ω не принято обозначать на объективе и предполагается, что оно превосходит то поле, которое необходимо по смыслу назначения объектива.

Фокусное расстояние и относительное отверстие объектива определяют также конструктивные размеры линз и размеры оправы. По соображениям эксплуатационных удобств оправам кинопроекторных объективов придается

гладкая цилиндрическая или ступенчато-цилиндрическая форма. Посадочные диаметры оправ нормализованы и составляют ряд: 32,5; 42,5; 52,5; 62,5; 82,5 и 104 мм для объективов, предназначенных для проекции 35-мм фильмов, и 25,4; 34 и 38 мм — для объективов, рассчитанных на проекцию 16-мм фильмов.

Фокусное расстояние объектива определяет собой масштаб изображения, которое он может образовать при данном проекционном расстоянии, или самые размеры экрана, поскольку проекционное окно имеет стандартные размеры: $20,9 \times 15,2$ мм. Рис. 89 наглядно поясняет значение фокусного расстояния проекционного объектива. Кадр шириной b

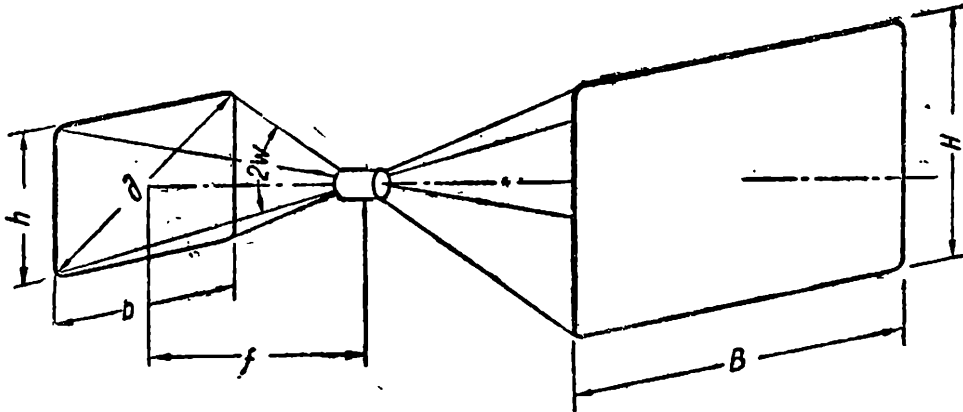


Рис. 89 Угол изображения объектива

и высотой h изображается объективом с фокусным расстоянием f_1 на экране шириной B и высотой H , расположенном на расстоянии P_1 .

Чтобы изобразить тот же кадр в том же размере на экране, расположенном на меньшем расстоянии P_2 , необходимо, очевидно, более короткофокусный объектив с фокусным расстоянием f_2 . Здесь буквой f должно обозначаться не фокусное расстояние объектива, а сопряженное фокусное расстояние $a = f(1 + \frac{1}{\beta})$, но так как увеличение β при

кинопроекции составляет обычно 150—250, то без большой погрешности можно считать $a = f$. Следовательно, чем больше фокусное расстояние объектива при заданном проекционном расстоянии, тем меньше размер экрана, и чем меньше фокусное расстояние, тем больше размер экрана. При заданном объективе размеры экрана тем больше, чем больше проекционное расстояние.

Из рис. 89 видно:

$$\frac{B}{b} = \frac{H}{h} = \frac{P}{f} = \beta, \quad (23)$$

где B — ширина экрана,
 b — ширина кадра = 2,09 см,

H — высота экрана,
 h — высота кадра = 1,52 см,
 P — проекционное расстояние,
 f — фокусное расстояние объектива,
 β — линейное увеличение.

Отсюда

$$\left. \begin{aligned}
 B_m &= b \frac{P}{f} = 2,09 \frac{P_m}{f_{cm}}, \\
 f_{cm} &= b \frac{P}{B} = 2,09 \frac{P_m}{B_m}, \\
 P_m &= \frac{f_{cm} \cdot \beta}{100}, \\
 B_m &= b \cdot \beta = \frac{2,09\beta}{100}.
 \end{aligned} \right\} (24)$$

Эти формулы позволяют рассчитать любую неизвестную величину по заданным известным. Для расчета можно пользоваться также графиками или таблицами.

В прямой связи с фокусным расстоянием стоит угол поля изображения или угол изображения объектива, то-есть тот угол, который получается, если из главной точки объектива провести прямые к границам поля изображения или применительно к кинопроекторному объективу к границам кадра. Так как кадр имеет два неравных измерения — ширину и высоту, то соответственно этому различают угол изображения по ширине кадра и по высоте. Однако с точки зрения качества изображения следует учесть, что наиболее отдаленные от оси точки поля лежат на концах диагонали кадра. Поэтому в характеристике объектива указывается угол по диагонали (рис. 90). Между диагональю d , фокусным расстоянием f и углом изображения 2ω существует зависимость:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{d}{2f}.$$

Следовательно, чем больше фокусное расстояние, тем меньше угол изображения, и наоборот: максимальным углом обладают наиболее короткофокусные объективы, называемые благодаря этому широкоугольными в отличие от противоположной группы объективов, называемых длиннофокусными.

В табл. 12 приводятся данные об углах изображения для разных объективов.

Угол изображения в зависимости от фокусного расстояния

Фокусное расстояние (в см)	Угол изображения кадра по:			
	ширине	высоте	диагонали 2ω	радиусу поля ω
4	29°20'	21°30'	35°30'	17°45'
5	23°34'	17°16'	29°04'	14°32'
6	19°44'	14°24'	24°	12°
7	16°56'	12°24'	20°44'	10°22'
8	14°52'	10°54'	18°10'	9°05'
9	13°12'	9°42'	16°10'	8°05'
10	11°56'	8°43'	14°36'	7°18'
11	10°54'	7°54'	13°10'	6°35'
12	10°	7°10'	12°10'	6°05'
13	9°14'	6°40'	11°20'	5°40'
14	8°33'	6°14'	10°30'	5°15'

Чем больше угол изображения, тем ближе к экрану может быть поставлен проектор.

Следует иметь в виду, что угол изображения проекционного объектива в противоположность съёмочному объективу совершенно не влияет на перспективу изображения, так как тут рисуется одноплоскостный предмет на одноплоскостной поверхности экрана. Поэтому выбор угла определяется условиями наличия места, то-есть возможностью размещения аппаратуры и шириной экрана. Во всех случаях, где это возможно, предпочтительнее пользоваться объективом с длинным фокусным расстоянием, а не широкоугольником. При одинаковой конструктивной схеме объектива широкоугольный даёт изображение менее однородное по качеству, чем длиннофокусный объектив такой же конструкции. Поэтому объективы с очень широким углом должны иметь более сложную конструкцию. На рис. 91 показана конструкция широкоугольного объектива КД, предназначенного специально для автокинопередвижки, где экран не мог быть далеко отнесен от проектора.

Наиболее распространённым фокусным расстоянием для стационарных установок являются 12 см. Так как аппаратная располагается обычно в конце зрительного зала, то фокусное расстояние объектива определяет собой отношение ширины экрана B к длине зала P . Для фокусного расстояния 12 см это отношение составляет:

$$\frac{B}{P} = \frac{b}{f} = \frac{20,9}{120} = 1 : 5,75$$

Значит, ширина экрана почти в 6 раз меньше длины зала

В кинопередвижках фокусное расстояние берется обычно 9 см, так как аппарат располагается в самом помещении, служащем зрительным залом, и при длинном фокусном расстоянии объектива экран получился бы очень ограниченных размеров.

Сравнительно большое фокусное расстояние и небольшой угол изображения определяют конструктивную схему современного кинопроекторного объектива, выполняемого,

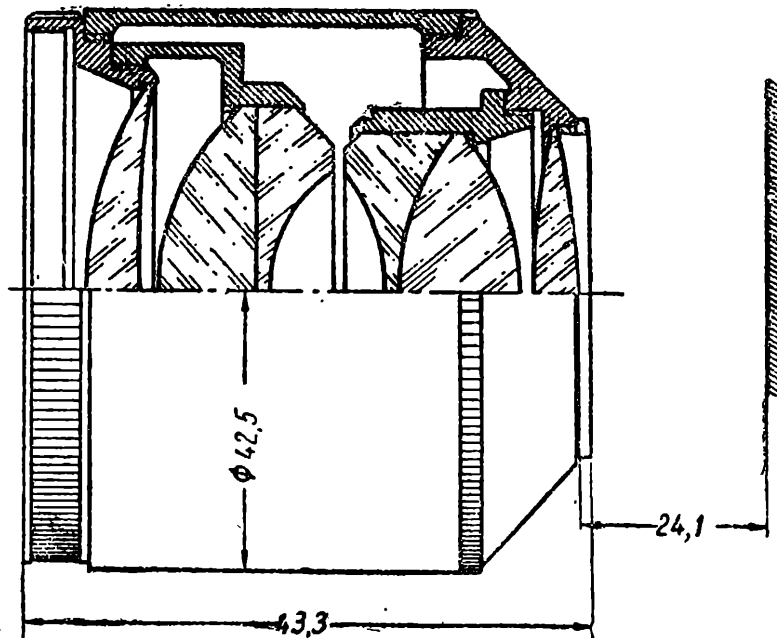


Рис. 91. Кинопроекторный объектив
1:1,3; $F = 4$ см

как правило, по типу объектива Петцваль, рассчитанного и осуществленного впервые в 1840 году, то-есть более ста лет назад, и замечательного тем, что исторически это был первый объектив, полученный не путем экспериментального подбора линз, а методом математического расчета. Несмотря на то, что это был, в сущности, первый опыт расчета объектива на самой заре развития опто-техники и с тех пор имеются огромные достижения в этой области, объектив до сих пор не потерял своего значения и продолжает изготавливаться с самыми незначительными отклонениями от исходного типа. Это объясняется как отличными свойствами самого типа объектива, так и в особенности тем, что в кинопроекторных объективах требуется только небольшое поле изображения. Как видно из рис. 91, для получения более широкого поля применяются объективы более сложной конструкции типа анастигмата.

На рис. 59 (стр. 76) приведена схема объектива П-4, являющегося также объективом типа Петцваль. В табл. 13 даны характеристики оправ, а также величина заднего отрезка.

Данные объектива П-4 с относительным отверстием 1:2

Фокусное расстояние (см)	Наружный диаметр оправы (мм)	Задний отрезок S' (мм)
9	62,5	45
10	62,5	49
11	62,5	56
12	82,5	61
13	82,5	66
14	82,5	71
15	104	76
16,5	104	81
18	104	91

Задним отрезком объектива, или его вершинным фокусным расстоянием, называется расстояние от последней по счету поверхности линзы до главного фокуса. Величина заднего отрезка всегда меньше фокусного расстояния и зависит от положения главных плоскостей в объективе. Знать величину заднего отрезка необходимо для того, чтобы решить вопрос, может ли применяться объектив в данном проекторе по условиям открывания дверцы фильмового канала, удобства зарядки и т. д.

Иногда бывает необходимо увеличить задний отрезок, чтобы поместить, допустим, призму для поворота оптической оси при сквозной проекции или по каким-либо другим соображениям, и тогда прибегают к специальным объективам с удлиненным задним отрезком. В таких объективах путем добавления отрицательного компонента удается задний отрезок сделать даже больше фокусного расстояния.

В объективах типа Петцваль задний отрезок сравнительно мал и составляет от 55 до 25% фокусного расстояния, тогда как в фотографических объективах анастигматического типа задний отрезок составляет около 85—60% фокусного расстояния.

В целях уменьшения потерь на отражение выпускаются такие же объективы со склеенным задним компонентом, рассчитанные на применение в кинопередвижках и узкоплёночниках, где по условиям освещения нагрев линз значительно меньше и отсутствует опасность размягчения и помутнения канадского бальзама, которым обычно склеиваются линзы. На рис. 74 (стр. 88) дана схема конструкции и кривые аберрации объектива 16-ЗП.

Для проекции диапозитивов и для эпископической проекции применяются почти исключительно объективы анастигматы типа триплет, состоящие из трех отдельно

стоящих простых несклеенных или одной склеенной и двух несклеенных линз (рис. 92). В отличие от объектива Петцваль эти объективы обладают сравнительно большим полем и равномерной резкостью по всему полю, однако они гораздо более чувствительны к ошибкам сборки и юстировки и поэтому обходятся значительно дороже в производстве. Общая резкость этих объективов обычно ниже резкости в центре поля объектива Петцваль.

Относительным отверстием объектива называется отношение диаметра действующего отверстия объектива к его фокусному расстоянию. Относительное отверстие характе-

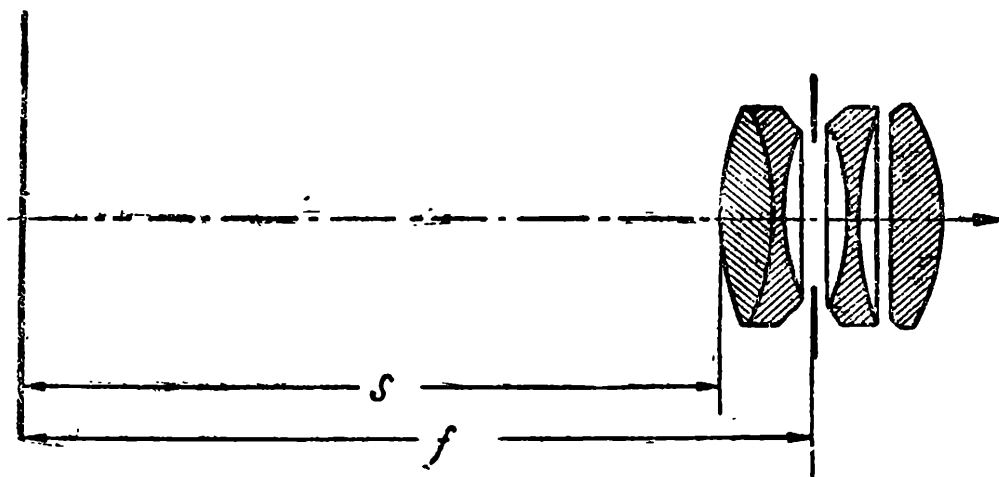


Рис. 92. Объектив анастигмат в положении проекции

ризует светосилу объектива, то-есть его способность давать яркое изображение. Чем больше светосила объектива, тем ярче изображение, образованное им на рассеяно отражающей поверхности, или, вернее, тем больше освещенность изображения.

Поставим перед объективом на большом расстоянии r от него какой-нибудь яркий предмет, например, лампу, площадь которой в направлении оси объектива составляет S . Следовательно, сила света в том же направлении будет: $I = B \cdot S$, где B — яркость лампы. На полученном изображении площадь лампы будет S' , а ее яркость B' . Световой поток, попадающий в объектив с диаметром отверстия d , составляет:

$$F = B \cdot S \cdot \omega = B \cdot S \frac{\pi d^2}{4r^2}.$$

Этот поток, распределяясь на площади S' , создает изображение. Световой поток, выходящий из объектива и составляющий изображение, будет равен:

$$F' = B' \cdot S' \cdot \frac{\pi d^2}{4f^2}.$$

Если считать, что в объективе отсутствуют потери света, эти потоки будут равны между собой, то-есть:

$$F = B \cdot S \frac{\pi d^2}{4r^2} = B' \cdot S' \frac{\pi d^2}{4f^2} = F' .$$

Освещенность каждой точки изображения S' , когда объектив изображает весьма удаленный предмет, будет составлять:

$$E' = \frac{F'}{S'} = \frac{B' \cdot S' \cdot \pi \cdot d^2}{4f^2 \cdot S'} = B' \cdot \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2$$

или, учитывая коэффициент пропускания τ , получаем:

$$E' = \tau \cdot \frac{\pi}{4} \cdot B \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^2 . \quad (25)$$

Обозначая значение $\tau \frac{\pi}{4}$ общим коэффициентом η , получаем:

$$E' = \eta \cdot B \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^2 . \quad (25a)$$

Стоящее внутри скобок выражение $\frac{d}{f}$ есть относительное отверстие объектива и служит для характеристики его светосилы, то-есть способности давать на экране яркое изображение. Формула (25a) читается так: освещенность изображения, образуемого объективом, прямо пропорциональна яркости предмета и квадрату относительного отверстия объектива.

Относительное отверстие обозначается всегда в виде дроби с числителем, равным единице, так как это облегчает сравнение относительных отверстий различных объективов, но ввиду того, что в подавляющем большинстве случаев фокусное расстояние объектива больше его диаметра, делят большую величину на меньшую, т. е. указывают:

$$\frac{d}{f} = 1 : \frac{f}{d} = 1 : k ,$$

где $k = \frac{f}{d}$ для большинства объективов больше единицы, хотя встречаются (сверхсветосильные) объективы, у которых k меньше единицы, например 1:0,8.

Формула (25a) получает окончательно следующий вид:

$$E' = \eta \cdot B \frac{1}{K^2} . \quad (25b)$$

Таким образом, квадрат относительного отверстия есть мера светосилы объектива. Чтобы определить отношение

светосил двух объективов, необходимо сравнивать не относительные отверстия, а их квадраты. Например: объектив 1 : 1,5 светосильнее объектива 1 : 3 не в два раза, как это может показаться из сравнения относительных отверстий, а в

$$\frac{E'_1}{E'_2} = \frac{1}{K_1^2} : \frac{1}{K_2^2} = \frac{1}{1,5^2} : \frac{1}{3^2} = \frac{3^2}{1,5^2} = \frac{9}{2,25} = 4,$$

то-есть в четыре раза.

Следует заметить, что в обиходе термин „яркость“ употребляется нередко как синоним освещенности. Это происходит потому, что наблюдаемые на экране яркости прямо пропорциональны освещенности и такая нечеткость терминологии при неизменных световых характеристиках экрана не приводит к путанице. Поэтому, определяя светосилу, обычно говорят о яркости изображения, а не об освещенности его, подразумевая, что изображение рассматривается на вещественном экране, обладающем определенными световыми характеристиками, как это имеет место, например, в фотографии, где термин светосила в основном и применяется.

Светосила зрительных приборов, где изображение наблюдается без экрана, определяется по другим признакам, исходя из несколько иных предпосылок, связанных отчасти с анатомическим строением глаза, совместно с которым и принято рассматривать эти приборы.

Не вдаваясь в подробности, определим, какова яркость изображения, когда оно рассматривается без экрана, т. е. когда глаз помещен непосредственно в пучок лучей, расходящихся после пересечения в точке изображения.

Возвратимся к установленному на стр. 110 выражению:

$$F = B \cdot S \frac{\pi \cdot d^2}{4r^2} = B' \cdot S' \frac{\pi \cdot d^2}{4f^2} = F'.$$

Ввиду того, что линейные размеры светящегося тела и его изображения относятся как их расстояния от объектива, их площади должны быть пропорциональны квадратам этих расстояний, т. е. можно написать:

$$\frac{S}{S'} = \frac{r^2}{f^2},$$

или

$$\frac{S}{r^2} = \frac{S'}{f^2}$$

и тогда

$$B \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{S}{r^2} = B' \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{S'}{f^2}.$$

Сокращая в обеих частях равенства равные сомножители, получаем:

$$V = V'.$$

Таким образом, яркость изображения, даваемого объективом, равна яркости самого предмета, если не считать потерь в объективе, или яркость изображения равна яркости предмета, умноженной на коэффициент пропускания объектива:

$$V' = \tau \cdot V,$$

если принять, что коэффициент пропускания объектива составляет τ .

Этот вывод может вызвать недоумение, так как, проходя через объектив, лучи претерпевают отклонение, и изменяется телесный угол, внутри которого распространяется поток. Однако в этом нетрудно убедиться, если рассмотреть какой-нибудь яркий предмет непосредственно, а затем его изображение, полученное объективом, но не на матовом стекле, а прямо в воздухе, располагая глаз в пучке лучей, расходящихся после пересечения. Точно так же, смотря в бинокль, мы не замечаем никакого уменьшения яркости по сравнению с ощущением при рассмотрении тех же предметов без бинокля.

Обратимся к рис. 93, где AB — предмет, а $A'B'$ — его изображение. Здесь изображение $A'B'$ меньше предмета, но зато телесный угол ω' , в пределах которого видно изображение точки B , во столько же раз больше телесного угла ω , охватываемого объективом, и, следовательно, произ-

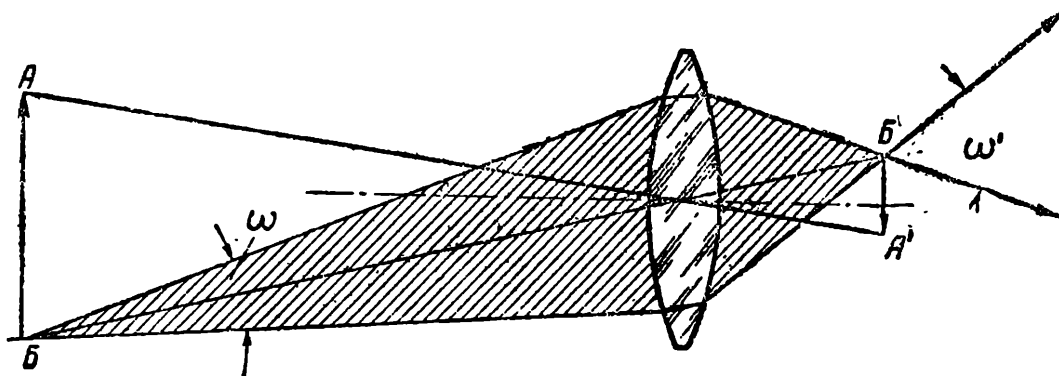


Рис. 93. Масштаб изображения и апертура

ведение $I \cdot \omega$ или $V \cdot S \cdot \omega$ остается постоянным, если не учитывать потерь в объективе.

Следует твердо усвоить, что яркость светового пучка нельзя повысить никакими средствами и что никаким устройством нельзя получить изображение более яркое, чем сам изображаемый предмет или источник света, его просвечивающий.

Если на проекционном объективе указано только фокусное расстояние, и объектив не имеет диафрагмы, то для

определения относительного отверстия достаточно измерить диаметр свободного отверстия передней линзы и разделить на полученное число фокусное расстояние объектива, выраженное в тех же единицах длины — сантиметрах или миллиметрах, чтобы получить знаменатель K относительного отверстия $1:K$. Чтобы сделать более ясным понятие об относительном отверстии, остановимся на вопросе о диафрагме. Диафрагмы устанавливаются в оптических системах и служат для двух целей:

1) для ограничения диаметра пучков, проходящих через объектив и принимающих участие в образовании изображения; 2) для ограничения поля зрения (поля изображения).

Первые диафрагмы называются апертурными, а вторые — полевыми. Апертурная диафрагма и является той диафрагмой, которая определяет относительное отверстие и светосилу объектива. Чтобы уяснить действие апертурной диафрагмы, обратимся к рис. 94.

Здесь изображены две одинаковые линзы и два совершенно одинаковых по диаметру отверстия диафрагмы. Разница только в том, что в одном случае диафрагма стоит перед линзой, а в другом — позади линзы. В обоих случаях свет падает параллельным пучком и собирается в главном фокусе, но ширина пучка и телесный угол при вершине получаются неодинаковыми. Там, где диафрагма стоит позади собирающей линзы, света проходит больше. Поэтому принято различать истинное отверстие диафрагмы и действующее отверстие. Истинным отверстием D называется фактическое отверстие диафрагмы, и эта величина ни от чего не изменяется. Действующее же отверстие d зависит еще от положения диафрагмы относительно оптических элементов и соответствует такому отверстию, которое должна была бы иметь диафрагма, если бы она стояла перед линзой, чтобы пропустить тот же световой поток, который она пропускает, находясь позади линзы или системы линз. Из рисунка видно, что в случае расположения диафрагмы перед линзой, диаметр действующего отверстия линзы совпадает с диаметром самой диафрагмы, тогда как при расположении диафрагмы позади линзы диаметр действующего отверстия больше диаметра диафрагмы.

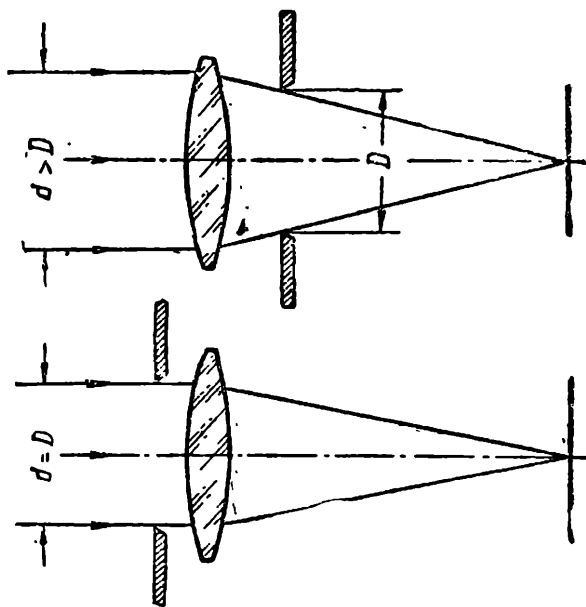


Рис. 94. Влияние положения диафрагмы на величину действующего отверстия

Само собой разумеется, что при расчете относительного отверстия объектива принимается величина действующего отверстия.

Полевая диафрагма устанавливается в тех случаях, когда необходимо строго ограничить величину поля. В объективах полевой диафрагмы нет, но она имеется как в съемочной камере, так и в проекционной системе. В последней ее роль играют кадровая рамка и бархатное обрамление экрана. В читающей системе полевой диафрагмой является механическая щель, изображение которой рисуется на фонограмме в виде оптического штриха.

Чтобы получить действующее отверстие со стороны кадра, необходимо построить изображение оправы передней линзы, образуемое задней линзой объектива, и рассмотреть его из центра кадра. Полученный световой кружок называется зрачком объектива, причем безразлично, будет ли это действительным или мнимым изображением действующей диафрагмы. Разумеется, этот кружок не должен срезаться никакой другой диафрагмой, так как только действующая диафрагма, будучи наименьшей, должна определять диаметр проходящих через объектив пучков света.

На самом деле это условие выполняется только для центра поля изображения, а для точек, расположенных дальше от центра, зрачок имеет форму сплюснутого круга. Соответственно этому освещенность на краю поля уменьшается. Обычно такое уменьшение освещенности происходит по 4-й степени косинуса угла поля, то-есть

$$E'_w = E'_0 \cos^4 w.$$

Из табл. 12 следует, что угол поля изображения $2w$ наиболее ходовых проекционных объективов достигает незначительной величины и поэтому такое падение освещенности практически нельзя заметить. Так, для объектива $f=9$ см освещенность в углу кадра на конце диагонали составляет:

$$E'_w = E'_0 \cos^4 8^\circ 05' = E'_0 0,99^4 = 0,96 E'_0,$$

то-есть по сравнению с освещенностью центра уменьшается только на 4%. При большем фокусном расстоянии объектива падение освещенности будет еще менее заметно.

Широкоугольные объективы находятся в менее благоприятных условиях, так как значение угла $2w$ там больше и соответственно увеличивается падение освещенности на краю. Так объектив $f=4$ см дает:

$$E'_w = E'_0 \cos^4 17^\circ 45' = E'_0 0,9524^4 = 0,823 E'_0,$$

то-есть уменьшение составляет уже почти 18%.

Если по ходу пучка имеются какие-либо ограничения, срезающие часть пучков, идущих от крайних точек, освещенность соответствующих точек изображения уменьшается или, как принято говорить, изображение виньетируется. Разумеется, виньетирование не должно иметь места в пределах используемого поля изображения.

Кинопроекторные объективы не имеют отдельной диафрагмы и действующее их отверстие ограничивается правой передней обращенной к экрану линзы. В прошлом все объективы не только имели диафрагму, но даже предусматривалась ее регулировка (изменение диаметра отверстия). Выше мы видели, что сферическая абберация уменьшается с уменьшением отверстия диафрагмы, что дает возможность улучшить качество изображения, уменьшая это отверстие.

Такая регулируемая или, как ее называют иначе, ирисовая диафрагма является обязательной принадлежностью съемочных объективов, хотя там основное назначение ее сводится к регулировке глубины изображения.

Необходимо подчеркнуть принципиальную разницу в вопросе об использовании светосилы между съемочным и проекционным объективом. В то время как съемочный объектив работает всегда с заполнением действующего отверстия, то-есть с той светосилой, которая определяется установленной диафрагмой, светосила проекционного объектива определяется не номинальным ее значением, а находится в зависимости от степени заполнения действующего отверстия изображением источника света. Если источник света мал, например точечная лампочка, то поверхность объектива, не занятая изображением спирали лампы, может быть прикрыта черной бумагой или закрашена черной краской; и яркость на экране от этого не убавится. Следовательно, мы можем установить, что в проекционном объективе относительное отверстие будет определять то предельное значение светосилы, которое может быть использовано в том случае, когда размер светящегося тела полностью заполняет отверстие объектива.

Относительное отверстие употребляется для характеристики фотографических и проекционных объективов. Для объектива микроскопа, осветительных систем и в ряде других случаев пользуются другой величиной — апертурой, служащей также для количественной характеристики светосилы или освещенности изображения, но выражаемой несколько иначе. Апертурой, или числовой апертурой микробиообъектива, называется произведение синуса угла u , составляемого осью объектива и крайним лучом, входящим в объектив (рис. 95), на показатель преломления n той среды, в которой этот угол расположен:

$$A = n \cdot \sin u. \quad (26)$$

В отличие от фотокинообъективов, работающих на воздухе, в микроскопии предмет нередко помещается не в воздухе, а в какой-либо жидкости с большим показателем преломления. Это дает возможность лучше использовать свет и повысить разрешающую способность микроскопа.

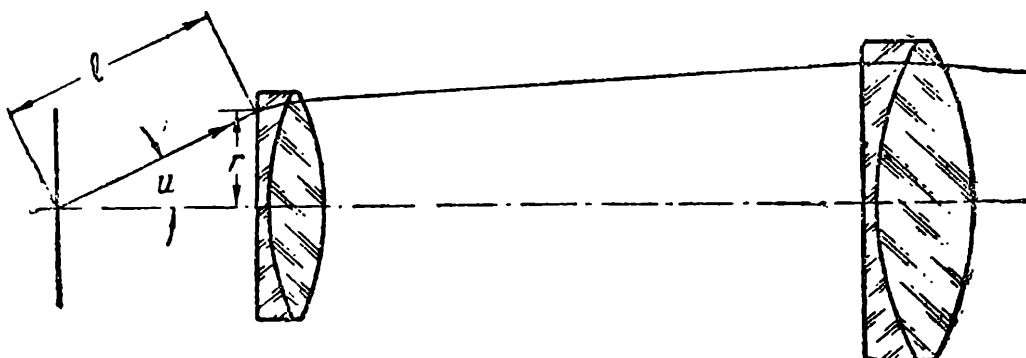


Рис. 95. Апертурный угол микрообъектива

Когда же предмет расположен в воздухе и $n = 1$, апертура выражается синусом половины угла входа или половины углового отверстия:

$$A = \sin u. \quad (26a)$$

Между апертурой A и телесным углом ω существует следующая связь:

$$\omega = \pi \cdot A^2 = \pi \left(\frac{r}{l} \right)^2. \quad (27)$$

Из этого следует, что светосила объектива пропорциональна квадрату его числовой апертуры и, таким образом, относительное отверстие и числовая апертура представляют собой различные способы выражения светосилы. Применительно к апертурному обозначению телесный угол принято называть пространственной апертурой. В табл. 14 приводятся сравнительные значения числовой и пространственной апертуры.

Таблица 14

Числовая апертура и телесный угол

Числовая апертура	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,65
Телесный угол, или пространственная апертура	0,03	0,06	0,13	0,20	0,28	0,50	0,78	1,13	1,32

Иногда бывает удобно выражать значение светового потока F при помощи числовой апертуры. Так как световой поток равен произведению силы света на телесный угол:

$$F = I \cdot \omega,$$

а сила света равна произведению яркости на светящуюся площадь:

$$I = B \cdot S,$$

то

$$F = B \cdot S \cdot \omega = B \cdot S \cdot \pi A^2. \quad (28)$$

Точно так же для освещенности E можно пользоваться выражением:

$$E = \frac{F}{S} = \pi \cdot B \cdot A^2. \quad (29)$$

Разбирая вопрос об апертуре микрообъектива, мы касались только апертуры со стороны расположения предмета, то-есть со стороны пространства предметов. Так как каждому положению предмета соответствует определенное положение его изображения и эти положения сопряжены между собой, то можно говорить как об апертуре со стороны предмета, или входной апертуре, так и об апертуре со стороны изображения, или выходной апертуре. В общем случае эти апертуры будут равны только для изображения в масштабе 1:1. При уменьшении изображения, как, например, в съёмочных объективах, или в объективах читающей системы, выходная апертура будет больше входной, а при увеличении изображения, наоборот, выходная будет меньше входной.

С этой точки зрения объектив может рассматриваться как трансформатор световых пучков, который воспринимает световые потоки, идущие с большей площади, но под небольшими углами, и превращает их в другие потоки, имеющие большие телесные углы, но исходящие от соответственно меньшей площади. Теоретически для идеальной системы световой поток, выходящий из системы, равен световому потоку, входящему в систему, но практически эти превращения, разумеется, всегда сопровождаются неизбежными и часто значительными потерями, которые происходят как от несовершенства оптической системы, то-есть от ее аберраций, так и в виде естественных потерь от отражения при преломлении и от поглощения в стекле, имеющих место даже при вполне совершенном выполнении всех элементов системы.

Благодаря успехам стекловарения прозрачность в видимой части спектра для наиболее ходовых сортов оптического стекла, идущего на изготовление объективов, достигает значения 0,98—0,99 на 1 см длины пути. Основные потери в объективе происходят главным образом от отражений на поверхностях раздела. Коэффициент отражения от хорошо полированной поверхности стекла зависит от показателя преломления и составляет для различных сортов от 4 до 6% и выше при средних углах падения. Следовательно, для одной линзы, имеющей две свободные, граничащие с воздухом поверхности, потеря на отражение может быть принята кругло в 10%, и таким образом прошедшая через линзу часть света составляет 0,9 падающего. Если объектив состоит из нескольких линз, потеря будет расти с числом линз, но так, что потеря на следующей линзе будет исчисляться от оставшегося за вычетом первой потери светового потока. Следовательно, через одну линзу пройдет света 0,9; через вторую 0,9 от 0,9, то-есть $0,9 \cdot 0,9 = 0,81$; через третью $0,9 \cdot 0,81 = 0,729$ и т. д. Через n линз пройдет $0,9^n$, то-есть количество прошедшего света будет уменьшаться, но никогда не дойдет до нуля. Коэффициент, учитывающий потери на отражение, будет иметь вид: $T_o = 0,9^n$, где n — число линз.

Потери на поглощение в стекле учитываются путем введения коэффициента $T_n = 0,98^m$, где m — выраженная в сантиметрах суммарная толщина всех линз, входящих в систему.

Таким образом, общая прозрачность системы составит:

$$T = 0,9^n \cdot 0,98^m. \quad (30)$$

В табл. 15 даны значения прозрачности объективов с различным числом линз, причем здесь учтены только потери на отражение без учета потерь на поглощение, а склеенные линзы приравнены к простым, так как потери на склейке ничтожно малы и могут не учитываться.

Таблица 15

Прозрачность объектива в зависимости от числа линз

Число линз	Прозрачность	Потери
1	0,9	0,1
2	0,81	0,19
3	0,729	0,271
4	0,656	0,344
5	0,59	0,41
6	0,53	0,47

В настоящее время найден метод уменьшения потерь на отражение путем понижения коэффициента преломления тончайшего слоя стекла на поверхности линзы. Это так называемое просветление поверхностей линз сильно уменьшает потери на отражение, однако сплошному и обязательному просветлению всей оптики мешает непрочность слоя, легко повреждаемого при малейшей неосторожности.

Преимущество просветленного объектива не ограничивается уменьшением потерь на отражение и заключается еще в том, что просветленный объектив, будучи свободным от внутренних отражений, дает более чистое изображение с незасвеченными тенями. Это имеет значение особенно в тех случаях, когда объектив служит для съемки или для получения уменьшенного изображения.

С освоением просветления должна измениться и оценка объектива в смысле сложности его конструкции и числа отдельных граничащих с воздухом поверхностей. Тем не менее даже при просветлении всех поверхностей, выбирая объектив для проекционных целей, предпочтение следует отдать простой конструкции, содержащей меньшее число линз.

В связи с просветлением стоит и определение светосилы объектива.

Относительное отверстие $\frac{d}{f}$, определяемое чисто геометрическим путем, имеет смысл и может служить для характеристики светосилы только в том случае, когда сравниваемые объективы примерно равноценны по сложности конструкции и, следовательно, обладают одинаковым коэффициентом пропускания, как это имеет место в подавляющем большинстве проекционных объективов. С промышленным освоением просветления, значительно уменьшающего потери на отражение, пропускание объективов может сильно варьировать в зависимости от наличия или отсутствия просветления или от числа просветленных поверхностей.

Чтобы устранить эту неопределенность, маркировку съемочных объективов по относительному отверстию стали производить в настоящее время не по геометрическим соотношениям, а чисто фотометрически — путем измерения фактического светового потока при помощи объективного фотометра, установленного в фокальной плоскости объектива.

Такая же система, очевидно, будет целесообразна и для проекционных объективов.

Об особенностях просветленной оптики дополнительно сказано в главе, посвященной эксплуатации оптики.

ПРОЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА КАК ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ

Под проекцией понимается получение на сравнительно большом экране увеличенного изображения плоского предмета, чаще всего рисунка или фотографии. Если предмет непрозрачный, проекция называется эпископической, или проекцией в отраженном свете; когда же предмет прозрачный, например рисунок или фотография, выполненные на стекле, пленке или другом прозрачном материале, проекция называется диаскопической, или проекцией в проходящем

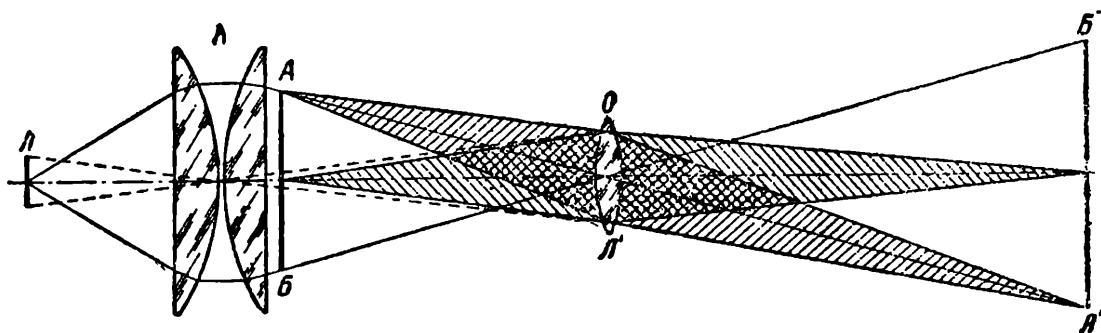


Рис. 96. Общая схема проекционной системы

свете, а сам прозрачный рисунок называется диапозитивом. Для кинокартины вместо названия „диапозитив“ принято название „кадр“.

Чтобы уяснить работу проекционной системы в целом и роль отдельных входящих в нее элементов, обратимся к рис. 96.

Здесь представлена общая схема диаскопического проекционного устройства, состоящего из источника света L , конденсора K (называемого иногда конденсатором) и проекционного объектива O . AB представляет собой проектируемый предмет — диапозитив или кадр, выполненный на прозрачном материале. $A'B'$ — изображение кадра на экране, обычно сильно увеличенное. Свет от источника света L падает на конденсор K , собирается последним и отбрасывается в отверстие объектива, образуя там изображение L' лампы L . Подлежащий проекции кадр AB помещается вблизи конденсора K в переднем сопряженном фокусе объектива O , в заднем сопряженном фокусе которого расположен экран, на который проектируется увеличенное изображение кадра.

Роль объектива O в схеме, представленной на рис. 96, ничем не отличается от обычной роли, выполняемой объективом в любой оптической системе, а именно, объектив образует действительное, увеличенное и перевернутое изображение предмета AB . Но чтобы объектив мог образовать изображение, необходимо, как было показано выше,

чтобы каждая точка предмета посылала в объектив пучок лучей в виде конуса, заполняющего отверстие объектива. Это условие легко выполняется, когда предмет непрозрачный и дает рассеянное отражение, иначе говоря, обладает достаточным коэффициентом яркости, или когда предмет самосветящийся. В рассматриваемом случае это условие отсутствует, так как мы имеем дело с прозрачной в целом картиной, прозрачность которой различна на различных участках, но диффузная составляющая ничтожно мала. Ясно, что в этом случае необходимо прибегнуть к какому-то средству, которое даст возможность осуществить такой ход лучей, при котором в любой точке кадра будет находиться конус проходящих лучей, заполняющих отверстие объектива. Эту задачу и решает конденсор вместе с источником света, то-есть осветительная система. Для этого достаточно, чтобы конденсор давал изображение L' лампы L таких размеров и так расположенное, чтобы это изображение уместилось в отверстии объектива, что равносильно помещению самой лампы внутрь объектива, откуда она могла бы равномерно освещать экран.

Посмотрим, что произойдет с проекционной системой, показанной на рис. 96, если из схемы изъять конденсор, как это сделано на рис. 97. Кадр AB , будучи расположен в достаточном удалении от лампы L , освещается практически равномерно, но так как не все лучи, прошедшие через него, проходят и через объектив, соответствующие участки кадра будут обладать на экране ничтожной яркостью, тогда как центральная часть кадра будет рисоваться достаточно ярко, то-есть изображение на экране не будет

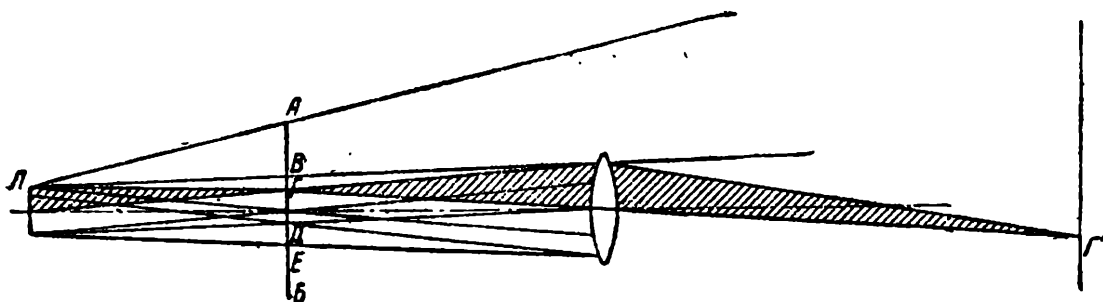


Рис. 97. Проекционная система с изъятим конденсором

обладать равномерной яркостью по всему полю и, таким образом, проекция будет неудовлетворительной. Из рисунка легко установить, что только участок BE кадра AB просвечивается прямыми пучками, попадающими в объектив. При этом точки, лежащие между B и $Г$, с одной стороны, и $Д$ и $Е$, с другой, уже не заполняют отверстия объектива и будут обладать на экране меньшей яркостью, чем точки, лежащие в пределах $ГД$ и обслуживаемые

лучами полностью. Остальные пучки, прошедшие через точки, лежащие вне участка BE , проходят мимо объектива и не достигают экрана. В образовании изображения этих точек принимают участие только лучи, диффузно рассеянные самим кадром. Величина участка BE зависит от размеров источника света и от диаметра объектива. Все сказанное выше подтверждает, что для удовлетворительной проекции недостаточно только равномерно осветить кадр, но необходимо еще обеспечить для всех лучей, прошедших через кадр, возможность пройти через объектив и достичь экрана.

Обращаясь к рис. 96, мы видим, что поставленную задачу успешно решает конденсор. В самом деле, если лампа изображается конденсором в зрачке объектива, заполняя его, то любая точка конденсора будет посылать в объектив конус лучей, образующих изображение L' и, следовательно, заполняющих отверстие объектива. Изображение на экране получится равномерно ярким, так как все точки кадра изображаются полным отверстием объектива.

Схема показывает, что параметры и положение всех элементов проекционной системы—объектива, конденсора, кадра и источника света—связаны между собой целым рядом соотношений, одновременное выполнение которых необходимо для получения удовлетворительной проекции.

Расстояние кадра от объектива задается фокусным расстоянием объектива и линейным увеличением изображения кадра на экране, так как плоскость кадра сопряжена с плоскостью экрана при помощи проекционного объектива.

Положение источника света относительно конденсора связано с положением объектива относительно того же конденсора, так как в отверстии объектива должно рисоваться изображение источника света, то-есть в переднем сопряженном фокусе конденсора находится источник света, а в заднем сопряженном фокусе—отверстие объектива. Вместе с тем размер источника света связан с размером отверстия объектива и с увеличением, которое способен дать конденсор, изображая источник света.

Кроме того, диаметр конденсора должен быть достаточным для того, чтобы кадр не только полностью вписывался в круг отверстия конденсора, но чтобы самая отдаленная от оси точка кадра обслуживалась полным конусом лучей, заполняющих отверстие объектива.

Когда задано положение объектива относительно кадра и задан размер отверстия объектива, в нашем распоряжении остается выбор фокусного расстояния конденсора и размеров источника света.

При одной и той же величине отверстия объектива источник света может быть тем меньше, чем короче фо-

кусное расстояние конденсора, и, следовательно, чем сильнее увеличение изображения источника, рисуемое конденсором, как это показано на рис. 98,а. Так как размеры светящегося тела зависят от мощности лампы, выгоднее брать более короткофокусный конденсор и соответственно меньший источник света, потому что при этом увеличивается телесный угол ω или угол охвата $2u$, то-есть тем большая доля светового потока, излучаемого источником света, используется конденсором.

Углом охвата называется плоский угол, получающийся в сечении телесного угла, проходящем через ось. При увеличении угла охвата увеличивается относительное отверстие конденсора и возрастают aberrации. Чтобы сохранить

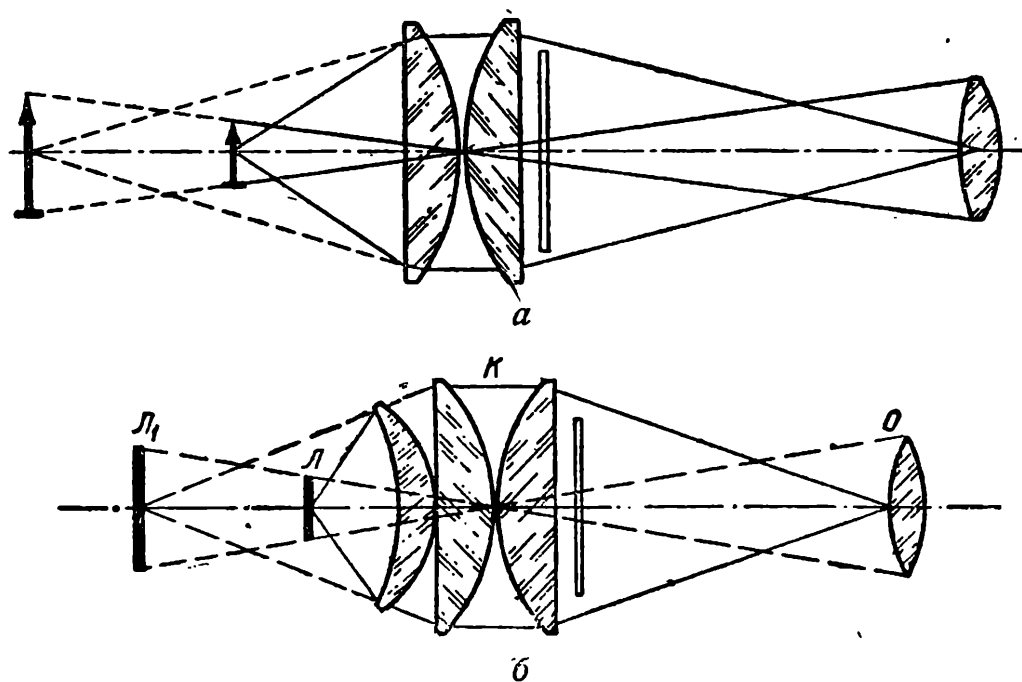


Рис. 98. Увеличение конденсора и размер источника света

качество изображения источника света, необходимо усложнить конструкцию конденсора, удерживая в определенных границах сферическую aberrацию. Таким образом, каждому углу охвата отвечает конденсор определенной сложности. Так, если для угла $2u \leq 40^\circ$ достаточно однолинзового конденсора, угол охвата $2u \leq 60^\circ$ требует уже двухлинзовой конструкции и, наконец, при еще больших углах требуется более сложный трехлинзовый конденсор; однако и он не может дать угол охвата больший чем 90° .

В конденсорах обычно хорошо исправляется сферическая aberrация для небольшого поля вблизи оси. Так как сферическая aberrация зависит от положения сопряженных фокальных плоскостей, то уже в однолинзовом конденсоре в зависимости от увеличения меняется форма линзы.

Двухлинзовые конденсоры должны иметь еще более сложную форму, зависящую от увеличения, но из техно-

логических соображений линзам обычно придают легковыполнимую плоско-выпуклую форму.

При трехлинзовой конструкции присоединяют со стороны источника света еще одну линзу типа положительного мениска (рис. 98, б).

Дальнейшее усложнение конденсора приводит к значительным потерям на отражение от поверхностей линз и на поглощение в толще стекла. В целях уменьшения этих потерь иногда прибегают к использованию в качестве конденсора ступенчатых линз (рис. 99), которые отличаются незначительной толщиной при очень большом значении угла охвата. Однако ступенчатые линзы обладают одним существенным дефектом, связанным с технологией их изготовления, — они не могут обеспечить равномерную освещенность вблизи конденсора ввиду того, что коническая форма переходных граней, необходимая для извлечения линзы из прессующей формы, вызывает появление темных колец.

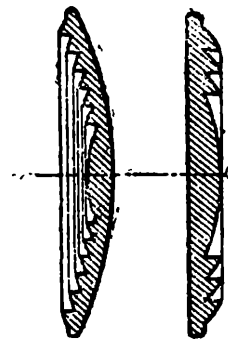


Рис. 99.
Ступенчатые
линзы

Следует подчеркнуть, что конденсорная система из гладких (не ступенчатых) линз обеспечивает равномерное освещение по всему полю и является единственно возможной осветительной системой для проекции диапозитивов значительной площади. Форма источника света при этом не имеет почти никакого значения и не сказывается на равномерности освещения изображения, если источник света изображается в отверстии объектива и объектив хорошо скорректирован.

Когда же проецируемый диапозитив имеет относительно небольшие размеры, как, например, кинокадр, а источник света обладает равномерной или почти равномерной яркостью по всей площади, как, например, кратер дуги, то может быть осуществлена другая схема проекции, при которой источник света проецируется конденсором в плоскость кадра, а изображение кадра вместе с совмещенным с ним изображением источника света проецируется объективом на экран. В этом случае распределение освещенности вблизи самого конденсора не имеет значения, и для такой проекции могут применяться как ступенчатые линзы, так и вогнутые зеркала, обладающие при весьма простой конструкции огромными углами охвата до $2\alpha = 135^\circ$ (рис. 100).

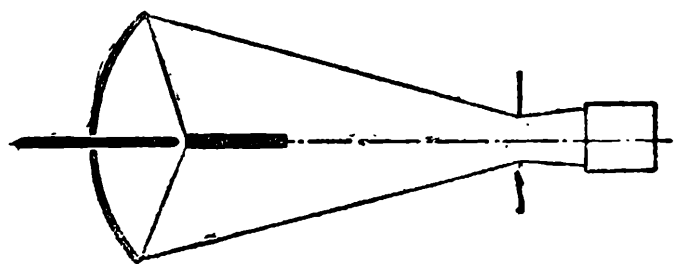


Рис. 100. Зеркальная осветительная система

Зеркальные конденсоры получили самое широкое признание и в качестве осветительной системы для дуговых ламп совершенно вытеснили линзовые конденсорные системы. Обладая большим углом охвата и небольшими потерями на отражение, зеркальные осветители обеспечивают получение значительно большего увеличения изображения источника света, чем линзовые. Кроме того, они практически свободны от хроматической аберрации, свойственной линзовым конденсорам.

Само собой понятно, что в подобной схеме элементы системы также должны быть взаимно подчинены друг другу. Так, например, чтобы был освещен весь кадр, необходимо, чтобы изображение кратера в кадровом окне перекрывало размеры кадра. Следовательно, диаметр положительного угла с учетом обсоа должен быть выбран, исходя из размеров кадрового окна и увеличения зеркала.

Диаметр зеркала должен быть выбран таким, чтобы через любую точку кадра, включая самые крайние, проходил пучок лучей, полностью покрывающий отверстие объектива, то-есть чтобы выходная апертура зеркала была не меньше входной апертуры объектива.

Процент используемого светового потока зависит не только от угла охвата конденсора, но и в значительной мере от формы светящегося тела и кривой светораспределения. В табл. 16 приводятся значения процента использования света в зависимости от формы светящегося тела и угла охвата осветительной системы.

Таблица 16

Коэффициент использования источника света

Половина угла охвата α°	Светящаяся точка или небольшой шарик	Светящаяся полусфера	Светящаяся плоскость	Светящийся цилиндр вдоль оптической оси	Светящийся цилиндр поперек оптической оси
	Коэффициент использования (в %)				
30	6,7	12,9	25,0	2,9	7,9
60	25,0	43,7	75,0	19,6	27,9
90	50,0	75,0	100,0	50,0	50,0

Из табл. 16 следует, что самым выгодным источником был бы такой, который, обладая плоской формой, мог бы светить только в одном направлении. Однако таких источников не существует и такого высокого коэффициента использования света не удастся получить. В качестве попытки заставить источник излучать свет в одну сторону, можно рассматривать контротражатель с лампой накали-

вания. Контротражателем называется сферическое зеркало, устанавливаемое позади проекционной лампы накаливания со стороны, противоположной конденсору, на расстоянии, равном радиусу сферы зеркала. Изображение в этом случае образуется в той же плоскости, в которой расположено тело накала, а для наилучшего использования света изображение спиралей располагают в промежутках между самими спиралями (рис. 101). Таким приемом значительно увеличивается сила света почти без изменения габаритов светящегося тела, то-есть возрастает габаритная яркость источника.

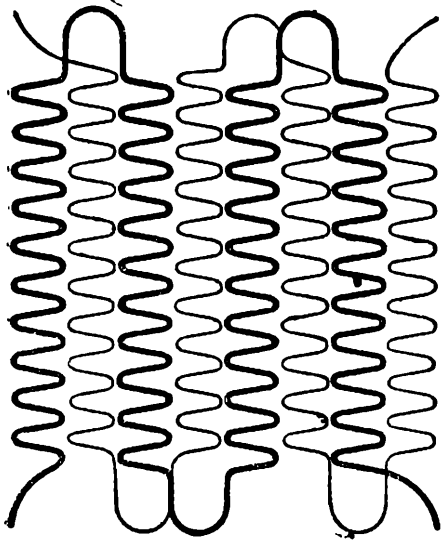


Рис. 101. Источник света и его изображение, образуемое контротражателем

Если изображение источника света меньше действующего отверстия объектива, последний работает только частью своей светосилы, и яркость на экране оказывается небольшой. Увеличивая размеры источника света при той же осветительной системе или заменяя осветительную систему более короткофокусной, можно увеличивать яркость изображения на экране до тех пор, пока все свободное отверстие объектива не будет заполнено изображением светящегося тела. Как только будет достигнуто подобное заполнение, дальнейшее увеличение источника света или его изображения становится бессмысленным, так как объектив не может принять большего количества света. Практически некоторый прирост освещенности может еще получиться только за счет того, что при большем увеличении на покрытие зрачка будет приходиться центральная, наиболее яркая часть светящегося тела.

Заполненное изображением источника света отверстие объектива представляет собой вторичный источник, освещающий экран. Сила света такого источника может быть определена как произведение площади действующего отверстия объектива на яркость источника света с учетом пропускания всей осветительно-проекционной системы, то-есть

$$I' = B' \cdot S = \tau \cdot B \cdot S,$$

где I' — сила света в свечах;

τ — коэффициент пропускания системы, учитывающий потери во всех элементах конденсора и объектива;

B — габаритная яркость светящегося тела источника;

S — площадь действующего отверстия объектива, выраженная в квадратных сантиметрах.

Если на расстоянии r от объектива поместить экран, то освещенность на нем будет составлять:

$$E' = \frac{I'}{r^2} = \tau \cdot \frac{B \cdot S}{r^2}. \quad (31)$$

Например, если габаритная яркость источника $B = 1200$ *сб*, действующее отверстие объектива составляет площадь $S = 20$ *см*², проекционное расстояние $r = 15$ *м*, а общее пропускание системы $\tau = 0,5$, то освещенность будет равна:

$$E' = 0,5 \frac{1200 \cdot 20}{15^2} = 53 \text{ лк.}$$

Так как расстояние r может быть выражено через фокусное расстояние f и увеличение объектива β

$$r = f \cdot \beta,$$

то освещенность окончательно может быть выражена так:

$$E' = \tau \cdot \frac{B \cdot S}{f^2 \cdot \beta^2} = \tau \cdot \frac{B \cdot \pi d^2}{4f^2 \cdot \beta^2} = \tau \cdot \frac{B\pi}{4\beta^2} \left(\frac{d}{f}\right)^2. \quad (32)$$

Чтобы получить световой поток, нужно силу света помножить на телесный угол ω , внутри которого распространяется поток. Телесный угол может быть выражен отношением площади кадра к квадрату фокусного расстояния. Таким образом, световой поток кинопроектора составляет:

$$F = I' \cdot \omega = I' \frac{1,52 \cdot 2,09}{f^2} = I' \cdot \frac{3,18 \text{ см}^2}{f \text{ см}^2},$$

так как

$$I' = B' \cdot S = B' \frac{\pi d^2}{4},$$

где d — диаметр действующего отверстия объектива, то:

$$F = B' \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{3,18}{f^2} = B' \frac{\pi}{4} \left(\frac{d^2}{f^2}\right) \cdot 3,18 = 2,5 B' \left(\frac{d}{f}\right)^2.$$

Обозначая относительное отверстие $\frac{d}{f}$ через $\frac{1}{k}$ и вводя коэффициент пропускания τ , получаем:

$$F = 2,5 \tau \cdot B \left(\frac{1}{k}\right)^2. \quad (33)$$

Из приведенной формулы видно, что при заданной площади кадра предельное значение светового потока кинопроектора определяется в основном двумя факторами: яркостью источника света и относительным отверстием объектива. Следует заметить, что фактическое значение полезного светового потока получается всегда меньше и составляет обычно около 0,5—0,6 расчетного значения. Это происходит оттого, что освещенность в точке изображения уменьшается из-за наличия aberrаций, которые никогда не устраняются полностью, а также из-за неточностей установки.

Относительное отверстие современных объективов доведено до такого значения, что дальнейшее его увеличение затрудняет эксплуатацию объектива, так как невозможно сохранить одинаковую резкость по всему экрану из-за неизбежных прогибов пленки в кадровом окне. С другой стороны, чтобы заполнить зрачок объектива при большом значении относительного отверстия, недостаточно только остановиться на большом увеличении осветительной системы — приходится принимать и большие размеры источника света, соответственно увеличивая его мощность. Так как площадь кинокадра меньше площади отверстия объектива, становится более выгодной схема проекции, при которой источник света проецируется в кадровое окно. Выше указывалось, что принципиально возможны две различные схемы проекционной системы, обеспечивающие равномерную яркость экрана: первая, при которой источник света проецируется осветительной системой в зрачок объектива, и вторая, при которой изображение источника света проецируется в кадровое окно и затем вторично уже проецируется на экран вместе с кадром. Первая схема в чистом виде применяется для проекций относительно больших диапозитивов, когда диапозитив располагается вблизи конденсора, так как эта схема обеспечивает хорошую и равномерную освещенность всего поля при любом размере и любой структуре светящегося тела. Вторая схема может быть осуществлена только при наличии источника света со сплошным светящимся телом, обладающим более или менее равномерной яркостью, и, кроме того, при относительно небольших размерах кадра. На рис. 102 показаны обе схемы применительно к кинопроекции. Из рисунка следует, что при малых размерах кадра во второй схеме свет используется лучше, чем в первой. Так как лампы накаливания обладают ясно выраженной структурой, а кратер дуги в процессе сгорания все время меняет свою форму и на нем образуются местные дефекты, нарушающие однородность, практически вторая схема в чистом виде при кинопроекции никогда не применяется. И в случае

дуговой лампы и при лампах накаливания изображение источника света проецируется осветительной системой вблизи кадра, между кадром и зрачком объектива и тем ближе к кадровому окну, чем равномернее или мельче структура светящегося тела. Поэтому, сравнивая источники света различной конструкции, предпочтение следует отдать тем из них, светящееся тело которых ближе к сплошному светящемуся телу. В этом заключается преимущество про-

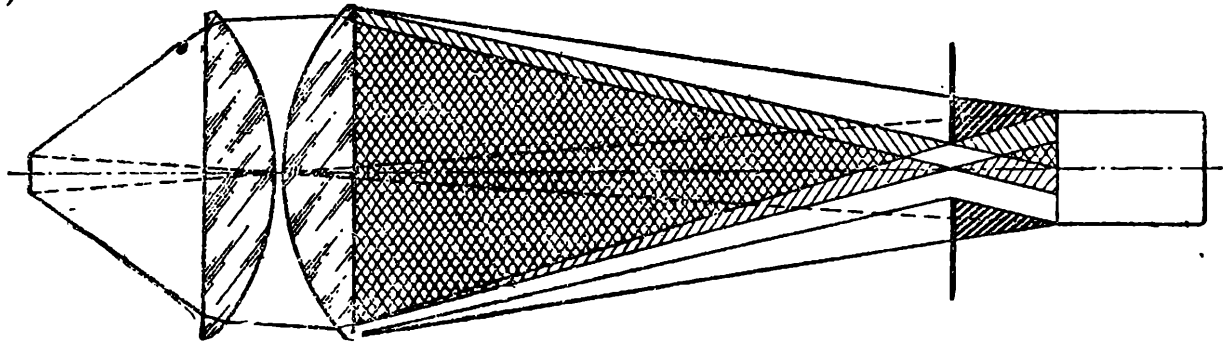


Рис. 102а. Источник проецируется в зрачок объектива

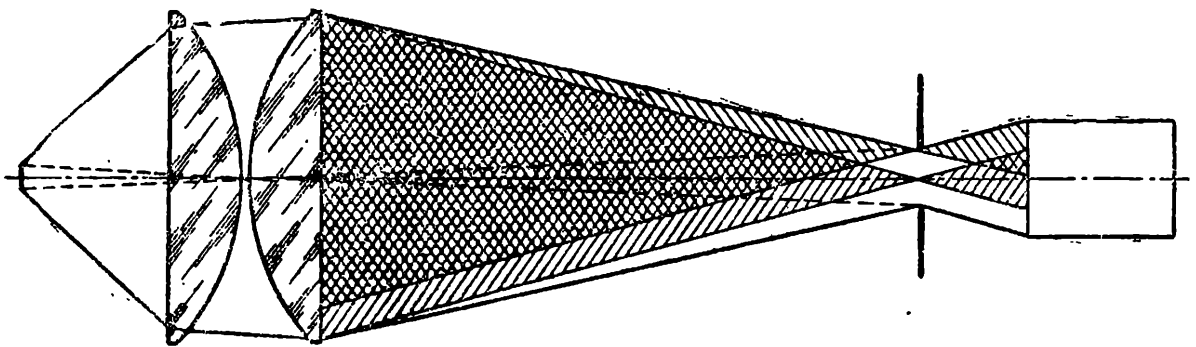


Рис. 102б. Источник проецируется в кадровое окно

екционной лампы К-22, разработанной НИКФИ совместно с ламповым заводом. Благодаря более тонкой по сравнению с другими проекционными лампами структуре ее изображение может проецироваться ближе к кадровому окну, а вследствие низкого напряжения величина тока достигает большого значения, что позволяет применить более толстую вольфрамовую проволоку и накаливать ее до более высокой температуры, то-есть поднять ее габаритную яркость.

Кроме зеркальных и линзовых осветительных систем, находят применение смешанные зеркально-линзовые системы, к которым принадлежит и осветительная система наиболее распространенных в СССР стационарных кинопроекторов КЗС-22 и СКП-26 (рис. 103).

Сравнивая зеркальную осветительную систему с линзовым конденсором, мы обошли молчанием то обстоятельство, что в линзовом конденсоре наряду с поглощением видимых лучей происходит еще более значительное поглощение

тепловых лучей, тогда как зеркальные системы дают относительно больший нагрев кадрового окна. В зеркально-линзовой системе этот недостаток частично компенсируется за счет поглощения тепловых лучей в толще линзы. В таких системах источник света помещается в главном фокусе зеркала, а изображение источника—в главном фокусе линзы. Между зеркалом и линзой осуществляется так называемый параллельный ход лучей. При такой схеме увеличение изображения источника света, даваемое системой, получается как отношение фокусного расстояния линзы к фокусному расстоянию зеркала и равно приблизительно $\beta = 4,5$, в то время как для зеркальных систем увеличение составляет обычно 6—8 и даже больше, но при этом сильно возрастает диаметр зеркала, что необходимо для того, чтобы обеспечить выходную апертуру зеркала, равную входной апертуре объектива, так как значительная длина положительного угла не позволяет приблизить зеркало к кадровому окну.

Касаясь вопроса о конструктивной форме зеркала, укажем, что простые сферические зеркала в качестве осветителей совершенно не употребляются ввиду того, что они обладают значительной сферической аберрацией и вполне пригодны только в качестве контротражателей.

Ввиду того, что относительное отверстие зеркала очень велико, сферическая аберрация, или отверстная ошибка, достигает больших значений и вместо изображения точки получается широкое пятно. Пучок сходящихся лучей имеет при этом своеобразную форму, называемую каустикой (рис. 104).

В качестве осветительной системы используются обычно асферические (несферические) зеркала или сферические с неконцентрическими поверхностями—так называемые манже-новские зеркала (рис. 105), отличающиеся тем, что передняя непосеребренная поверхность их имеет меньший радиус, а тыльная серебренная—большой радиус кривизны, то-есть в итоге получается как бы сферическое зеркало с наложенной на него отрицательной линзой. Зеркала такой формы обладают меньшей отверстной ошибкой, но имеют утолщенные края и заметную хроматическую аберрацию. Однако так как технология изготовления такого зеркала значительно проще, чем технология изготовления эллиптического зеркала, такие зеркала находят все еще широкое применение.

Из асферических зеркал для работы совместно с линзой наиболее пригодным следует считать параболическое зеркало, а для работы в качестве чисто зеркального конденсора наилучший результат дают эллиптические зеркала, имеющие форму эллипсоида вращения.

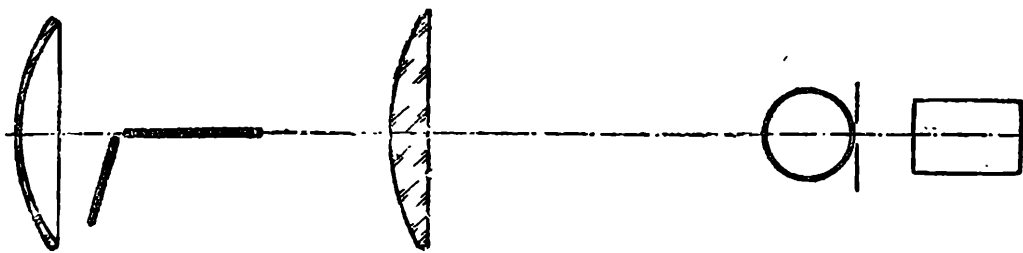


Рис. 103. Схема проекционной системы СКП-26

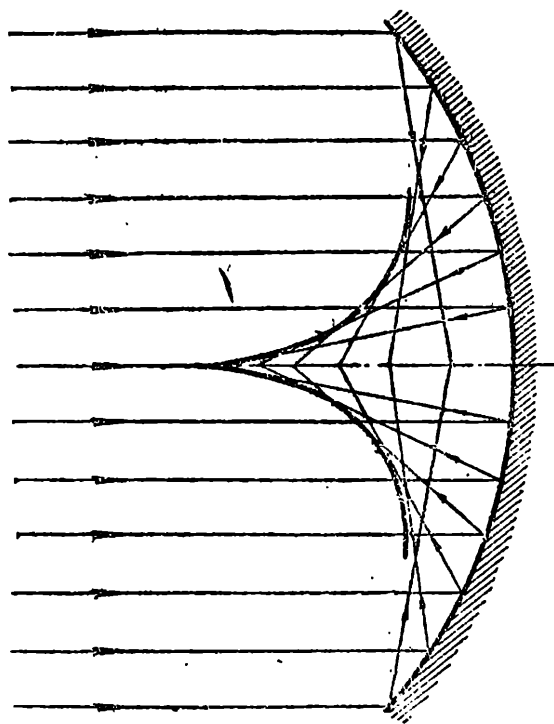


Рис. 104. каустика, образованная сферической aberrацией вогнутого зеркала

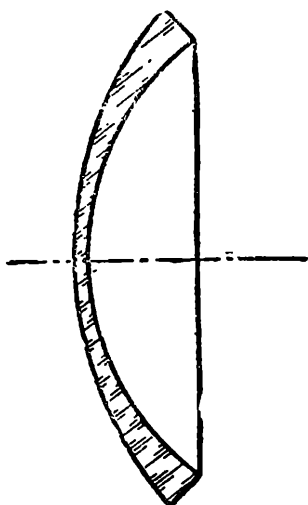


Рис. 105. Зеркало манжен

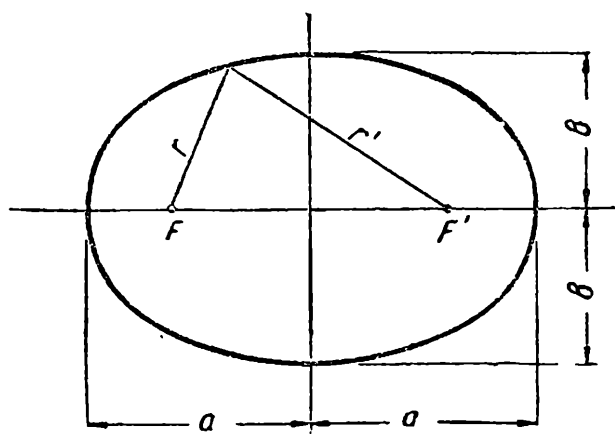


Рис. 106. Эллипс

Эллиптической поверхностью, или эллипсоидом, называется поверхность, полученная от вращения эллипса вокруг одной из его осей подобно тому, как сфера получается вращением окружности круга вокруг диаметра. Эллипс — это замкнутая плоская кривая, отличающаяся от окружности вытянутой формой и имеющая две оси симметрии aa и bb (рис. 106). Если окружность можно характеризовать тем, что все ее точки отстоят от центра на одинаковые расстояния, равном радиусу окружности, то эллипс характеризуется тем, что сумма расстояний r и r' каждой точки эллипса от двух сопряженных между собой

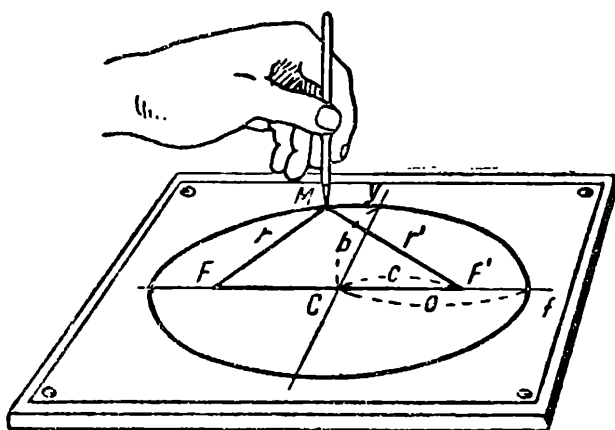


Рис. 107. Построение эллипса при помощи нитки

точек F и F' , расположенных на большой оси и называемых фокусами эллипса, остается постоянной. На этом основано построение эллипса при помощи нитки и двух булавок (рис. 107). Так как длина петли остается постоянной, карандаш, натягивающий нить, все время проходит через такие точки M , сумма расстояний которых $MF + MF'$ от точек F и F' остается все время постоянной. Самое

основное свойство эллипсоида, делающее его особенно пригодным для осветительных целей, заключается в том, что всякий луч, падающий на эллипсоид из одного фокуса, отражается от него так, что обязательно проходит через второй фокус. Благодаря этому, если в одном фокусе F эллипсоида поместить светящуюся точку, то все лучи, испускаемые такой точкой, соберутся после отражения в другом фокусе F' , образуя там изображение светящейся точки, причем в отличие от сферы, которая обладает значительной сферической аберрацией и дает вместо точки каустику, эллиптический отражатель для этих двух точек не обладает никакой аберрацией, то-есть представляет собой, как принято говорить, безаберрационную систему. Обычно эллиптическое зеркало представляет не весь эллипсоид и даже не половину его, а только небольшую часть, по внешнему виду похожую на простое сферическое зеркало.

Вполне безаберрационным эллипсоид является только относительно этих двух точек F и F' ; для других точек, расположенных дальше от фокусов, эллипсоид дает аберрации.

Эллиптические зеркала имеют примерно равномерную толщину, в то время как у зеркал типа манжен толщина на краях значительно больше толщины зеркала у вершины.

Однако изготовление асферических поверхностей значительно сложнее обработки сферических и не может вестись на тех же станках, на которых обрабатывается сферическая оптика. Кроме того, на одном шпинделе можно обрабатывать одновременно не больше одного изделия, тогда как сферические детали могут обрабатываться группами по несколько штук в зависимости от отношения кривизны поверхности к диаметру детали.

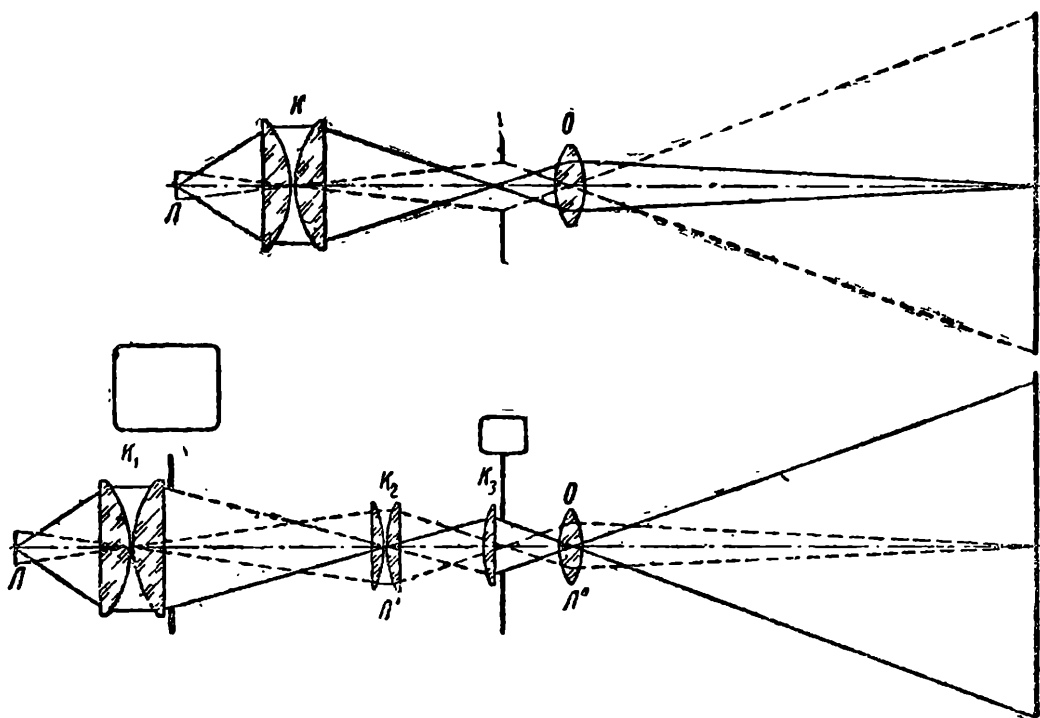


Рис. 108. Простая и релейная схемы осветительной системы

В целях упрощения технологии иногда вместо эллиптического зеркала изготовляют зеркало сферо-эллиптическое, приближающееся по качеству к эллиптическому.

Значительный интерес представляют осветительные системы с промежуточным изображением источника света или так называемые релейные осветительные системы, перенесенные в кинопроекцию из микрофотографической техники.

Выше было показано, что наиболее выгодной в смысле использования света осветительной системой является система проекции источника света в кадровое окно с последующей проекцией его вместе с кадром на экран, но так как такая система требует источника света с совершенно равномерной светящейся поверхностью, то когда к равномерной освещенности предъявляются очень строгие требования и вместе с тем кадр имеет незначительные размеры, как, например, в микропроекции, становится целесообразной другая система, характерная тем, что в кадровое окно проецируется уменьшенное изображение равномерно светящегося выходного отверстия конденсора при помощи доба-

вочного промежуточного устройства в осветительной системе, как это показано на рис. 108, где для наглядности изображены рядом две системы—обычная и релейная.

Дополнительная система состоит из двух положительных элементов K_2 и K_3 . Конденсор K_1 отбрасывает увеличенное изображение источника света L не в зрачок объектива, а в добавочную систему K_2 , которая в свою очередь изображает в уменьшенном виде выходное отверстие конденсора K_1 в кадровое окно. Коллективная, или так называемая прикадровая линза K_3 , которая может и отсутствовать в схеме, изображает промежуточное изображение L' источника света в виде вторичного изображения L'' в зрачке объектива или вблизи него. Изменяя ход пучков, направленных к краям кадра, прикадровая линза обеспечивает совершенно равномерную освещенность всего кадра до самых краев. Схема с промежуточным изображением, удлиняя осветительную систему, дает возможность расположить источник света в достаточном удалении от кадрового окна и устранить излишний нагрев его. Кроме того, если поместить в выходном отверстии конденсора K_1 диафрагму или кашетку с вырезом, точно соответствующим в данном масштабе кадровой рамке проектора, то, подходя к кадровой рамке, пучок света будет иметь уже точное сечение отверстия рамки и не будет освещать самой рамки, обеспечивая в то же время полную освещенность всех точек кадра без виньетирования, тогда как в нерелейных системах установка каких-либо керамических защитных рамок перед кадровым окном приводит к неизбежному виньетированию краев кадра, так как при больших апертурных углах пучок формируется в изображение только в сопряженной фокальной плоскости, и уменьшение ширины пучка в любом промежуточном сечении неизбежно приводит к виньетированию.

Разумеется, релейная схема благодаря своей сложности приводит к увеличению потерь в самой системе, но она позволяет лучше использовать всю площадь светящегося тела, несмотря на его неоднородность, и заметно уменьшает влияние изменения положения кратера в процессе горения.

Релейная схема является наиболее благоприятной для узкоплочной проекции, но применяется иногда и при проекции 35-мм фильмов.

Остроумной конструктивной модификацией релейной осветительной системы является так называемый ячейковый, или сотовый, конденсор, предложенный для проекции цветных фильмов, где особенно важна полная равномерность освещенности всего кадра как по величине, так и по спектральному составу.

Ввиду того, что кратер дуги интенсивного горения обладает большой неравномерностью не только по яркости, но

и по цвету излучения, обычная схема процирования кратера дуги в кадровое окно может привести при проекции цветных фильмов к заметной разнице в освещенности центра и краев кадра и к искажению цветопередачи.

Сотовый конденсор является промежуточным элементом релейной осветительной системы и служит для работы совместно с зеркальной лампой (рис. 109) с дугой интенсивного горения или с ртутной дугой сверхвысокого давления в качестве источника света.

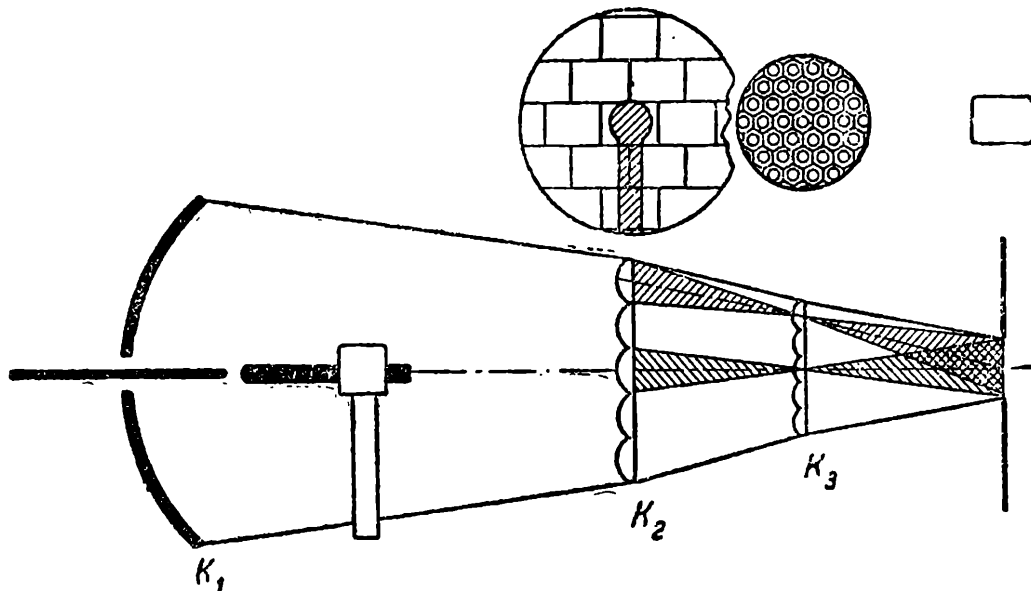


Рис. 109. Схема действия сотового конденсора

Как видно из рис. 109, сотовый конденсор состоит из двух промежуточных элементов K_2 и K_3 , выполненных в виде линзовых растров. Каждый растр содержит значительное количество собранных на общей основе плоско-выпуклых линз, тесно примыкающих друг к другу. Линзы K_2 имеют прямоугольную форму, подобную кадру, и заполняют всю площадь сечения пучка, идущего к кадровому окну от большого эллиптического зеркала K_1 . Каждая прямоугольная линза отбрасывает уменьшенное изображение дуги на следующую шестиугольную линзу, входящую в растр K_3 . Линзы системы K_3 изображают, в свою очередь, прямоугольные линзы K_2 в кадровом окне проектора. Расстояния между осями шестиугольных линз так подобраны, что все изображения прямоугольных линз точно совмещаются между собой в плоскости кадра, образуя там одно общее кадровое окно, освещенное совершенно равномерно независимо от распределения яркости в кратере дуги и в пучке, идущем от зеркальной лампы.

Прямоугольное очертание линз K_2 играет роль кашетки, срезающей излишнюю освещаемую площадь, и уменьшает нагрев кадрового окна.

Ввиду того, что прямоугольные элементы сравнительно малы и в одном растре их содержится более 100 штук, освещенность достигает здесь исключительной равномерности.

Заслуживает внимания и другой прием борьбы с неравномерной яркостью источника света при использовании его в кинопроекционной системе. Прием состоит в том, что путем введения в осветительную систему цилиндрического элемента изображают источник света в одном сечении в зрачке объектива, а в другом сечении, в котором источник обладает более равномерной яркостью, изображают его в плоскости кадрового окна. Таким образом, избегается передача грубой структуры светящегося тела.

Построенный по этому принципу на Одесском заводе Кинап в 1940 г. опытный 35-мм проектор давал исключительно большой полезный световой поток при хорошей равномерности.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗВУКА

Для записи звука на киноплёнке наиболее целесообразным способом является фотографический способ, то-есть тот же, которым получается фотографическое изображение.

И запись и воспроизведение фотографической фонограммы производятся оптическим методом. Процесс записи состоит в преобразовании электрических колебаний, создаваемых микрофоном под действием звука, в колебания световые, которые и записываются на плёнке, движущейся с постоянной скоростью мимо пишущего штриха. Если при этом изменяется яркость штриха при постоянном его размере, получается запись переменной плотности, или интенсивная запись, а если меняется его длина, получается запись переменной ширины, или трансверсальная запись. С полученного после обработки негатива фонограммы печатается на фильмокопии рядом с изображением позитив фонограммы, который и служит для звуковоспроизведения.

Скорость движения плёнки как в записывающем, так и в воспроизводящем аппарате строго постоянна и составляет 24 кадра, или 456 мм, в секунду. Чтобы при этой скорости можно было записать на плёнку высокие частоты, необходим пишущий штрих, ширина которого была бы не больше $\frac{1}{4}$ длины записываемой волны. Если принять в качестве верхнего предела записываемых частот частоту

10 000 *гц* (герц), то длина волны такой записи будет составлять:

$$\lambda = \frac{C}{\nu} = \frac{456}{10\,000} = 0,0456 \text{ мм} = 45,6 \text{ мк}.$$

Следовательно, ширина штриха должна быть $45,6:4 = 11,4 \text{ мк}$. Именно такую ширину (10—12 μ) имеет оптический штрих в звукозаписывающих аппаратах.

Необходимо отметить, что эффективная, то-есть фактически действующая, ширина пишущего штриха всегда больше из-за рассеяния света в эмульсии, как в мутной среде, и если не принять специальных мер, ширина штриха достигает значения 30 μ и больше. Чтобы не дать штриху сильно расширяться, запись ведется не белым, а ультрафиолетовым светом, а в эмульсию вводят краситель, препятствующий рассеянию света.

Практика показала, что такой штрих лучше всего осуществлять в виде уменьшенного изображения вещественной диафрагмы с таким же соотношением размеров — так называемой механической щели.

Считывание фонограммы заключается в том, что при прохождении фонограммы мимо оптического штриха постоянный световой поток штриха модулируется фонограммой как диафрагмой переменной ширины или переменной плотности. Эта световая модуляция превращается в дальнейшем при помощи фотоэлемента в электрическую модуляцию, которая затем усиливается и, поступая в громкоговоритель, воспроизводит в нем записанный на пленке звук. На рис. 110 приведены размеры и положение стандартной фонограммы на 35-мм фильме.

Хотя в записи звука и допускаются различные методы, все они должны, разумеется, быть рассчитаны на один общий способ воспроизведения.

Ширина записи определяется длиной пишущего штриха и составляет для фонограммы переменной ширины 1,8 мм, а для фонограммы переменной плотности 2,54 мм. Так как ширина печатаемой полосы составляет также 2,54 мм, то фонограмма переменной плотности занимает всю ширину, отведенную под звуковую дорожку. Фонограмма переменной ширины занимает только середину дорожки, и остающиеся с двух сторон узкие полосы зачерняются при печати, чтобы понизить шум, создаваемый зерном эмульсии и неизбежными дефектами — царапинами, точками и т. д., особенно сильно сказывающимися на прозрачных участках. Специальное шумопонижающее устройство в записывающем аппарате дает возможность сократить площадь прозрачной части позитива до минимума, в пределах которого происходит модуляция.

Длина читающего штриха берется как среднее между длиной пишущего штриха для фонограммы переменной плотности и длиной пишущего штриха для фонограммы переменной ширины, а именно $2,15^{+0,05}$. Благодаря этому при считывании фонограммы переменной ширины штрих будет перекрывать всю модулированную часть даже при наличии

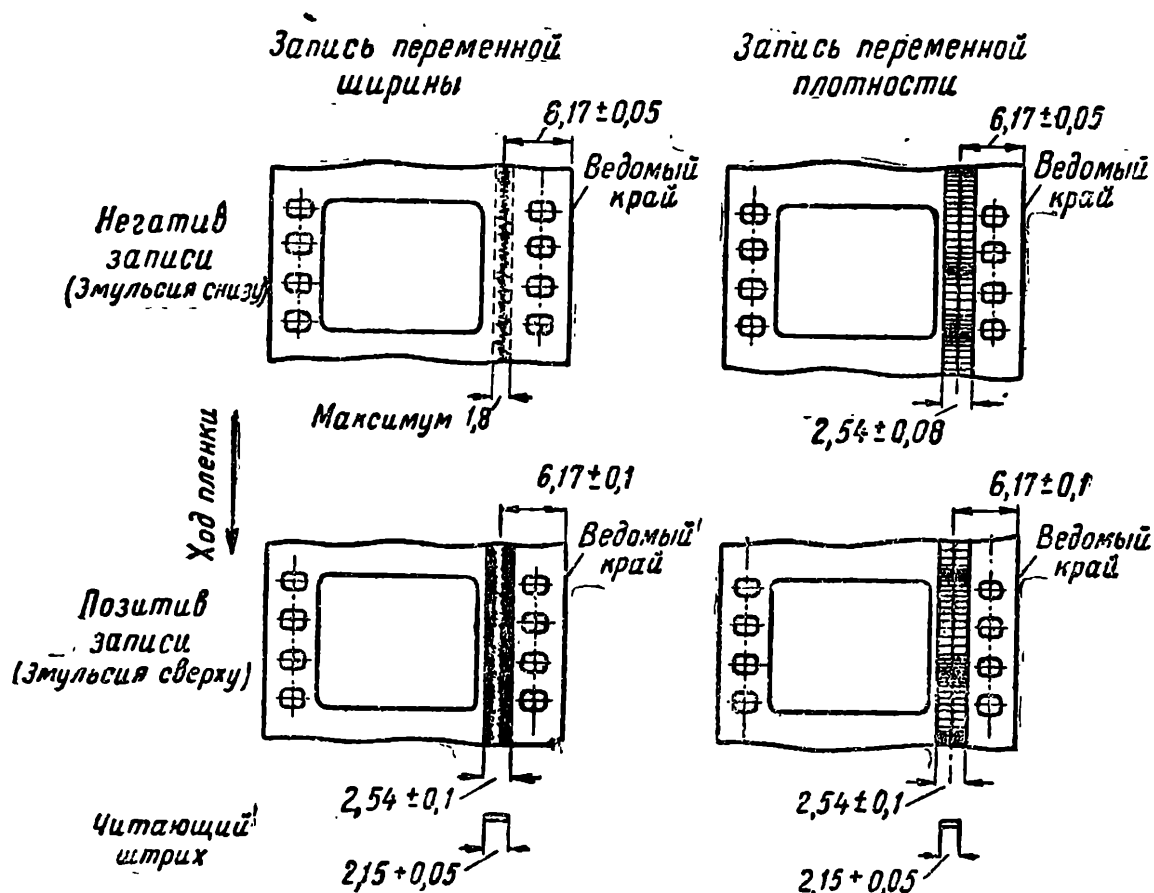


Рис. 110. Размеры и расположение фонограммы на 35-мм фильме

некоторого бокового смещения фонограммы, происходящего при печати или при прохождении по звуковоспроизводящему треку. В то же время эта длина штриха меньше ширины фонограммы переменной плотности и не может выйти за ее пределы при наличии таких же боковых смещений.

Читающий штрих имеет ширину $S = 20\mu$. Если ширина S штриха будет больше, то возникают линейные искажения за счет уменьшения отдачи тех частот, для которых не будет выполнено условие:

$$S \leq \frac{\lambda}{4}.$$

На рис. 111 приведена кривая зависимости коэффициента модуляции m от ширины штриха S для различных частот. Этот коэффициент модуляции, или коэффициент передачи m , определяет собой отношение амплитуды светового потока

при данной конечной ширине штриха S к амплитуде при бесконечно узком штрихе, то-есть величина m показывает ослабление звука данной частоты в зависимости от того, какую долю длины волны λ составляет ширина штриха S . Из кривой рис. 111 видно, что при выполнении условия $S = \frac{\lambda}{4}$ коэф-

фициент модуляции составляет 90%. Если исходить из расчета, что самая высокая частота, которая воспроизводится с амплитудой 0,9, составляет 6000 *гц*, то читающий штрих должен иметь ширину:

$$S = \frac{\lambda}{4} = \frac{456}{6000 \cdot 4} = 0,019 \text{ мм.}$$

При ширине штриха, равной $\frac{\lambda}{2}$, m будет равно 0,61, а при

$S = \frac{3}{4}\lambda$ — амплитуда уменьша-

ется до 0,3. Наконец, амплитуда достигает нулевого значения, когда $S = \lambda$, то-есть при данной ширине штриха уже не будет воспроизводиться та частота, для которой длина волны равна ширине штриха.

Таким образом, задачей оптической системы звуковоспроизводящего узла является образование на фонограмме микроскопического читающего штриха длиной 2,15 и шириной 0,02 мм, обладающего максимальной возможной яркостью для того, чтобы через такой штрих, несмотря на его ничтожную площадь, проходил максимально возможный световой поток.

Из большого количества возможных способов решения этой задачи наибольшее применение получили практически два способа:

1. Образование микроштриха как уменьшенного изображения механической щели при помощи обычной сферической оптики по схеме проекционной системы.

2. Получение микроштриха при помощи цилиндрической оптической системы, которая образует микроштрих как изображение тела накала лампы в одном сечении, а в другом сечении изображает диафрагму по проекционной схеме.

Ввиду принципиальных различий между этими способами разберем каждый из них в отдельности.

1. Проекционная схема с микрообъективом. На рис. 112 дана схема оптической системы проекционного типа с микро-

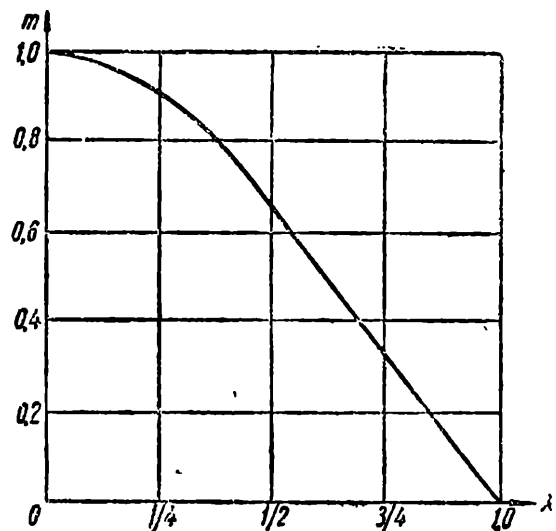


Рис. 111. Кривая коэффициента модуляции в зависимости от ширины штриха

объективом. Такая система применяется в стационарных аппаратах типа СКП-26, СКП-27 и КЗС-22. Эта схема с небольшими и не принципиальными изменениями используется также в передвижных аппаратах К-25 и его производных К-30 и К-101.

Свет от биспиральной лампы накаливания К-7 $12\text{в} \times 30\text{вт}$ * собирается двухлинзовым конденсором К и от-

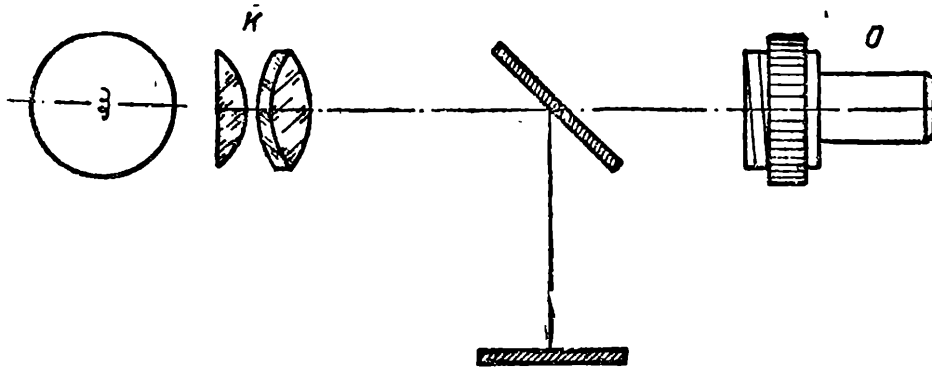


Рис. 112. Схема звуковой оптики проектора СКП-26

брасывается в зрачок микрообъектива О, образуя там увеличенное изображение тела накала. Механическая щель находится в самом конденсоре внутри второй линзы и осуществлена в виде царапины шириной 0,1 мм, аккуратно прорезанной в слое серебра, покрывающем вогнутую поверхность отрицательной линзы, которая склеена по этой поверхности с другой выпуклой линзой. Такое выполнение механической щели исключает возможность ее засорения, что было почти недостижимым в прежних конструкциях, где ничем не защищенная механическая щель быстро засорялась и вызывала искажение звука.

Микрообъектив работает здесь в обратном ходе и дает на фильме уменьшенное в 5,4 раза изображение щели.

Для облегчения правильной установки лампы в системе предусмотрено приспособление, состоящее из плоскопараллельной стеклянной пластинки, поставленной под углом 45° к оси тубуса, и небольшого экранчика в виде матового стекла. Так как расстояние от плоскопараллельной пластинки до зрачка объектива, с одной стороны, и до матового стекла, с другой, — одинаковы, то, фокусируя спираль по матовому стеклу, можно быть уверенным, что одновременно она будет фокусироваться в зрачок микрообъектива и тем обеспечит равномерную освещенность штриха. Таким образом, эта схема представляет собой обычную проекционную систему с той разницей, что объектив здесь дает не увеличенное, а уменьшенное изображение, а роль кадра

* Вместо лампы К-7 $12\text{в} \times 30\text{вт}$ разрабатывается другая лампа $10\text{в} \times 50\text{вт}$ с простой спиралью, которая заменит в дальнейшем лампу К-7.

выполняет механическая щель. Следовательно, для получения равномерной и наибольшей освещенности штриха здесь должны применяться те же средства, которые применяются при регулировке обычной проекционной системы.

Следует отметить, что микрообъективы в отличие от проекционных объективов принято характеризовать увеличением и апертурой вместо фокусного расстояния и относительного отверстия. Так, например, микрообъектив, используемый в рассматриваемой звуковоспроизводящей системе, имеет такое обозначение: $10 \times 0,25$. Это значит, что его увеличение равно 10, а апертура — 0,25. Определение апертуры было дано в главе об объективе; сейчас установим, что для того, чтобы от увеличения перейти к привычной для нас характеристике — фокусному расстоянию — необходимо разделить 160 мм на увеличение*. Полученное число и будет выражать в миллиметрах фокусное расстояние микрообъектива. Если увеличение объектива составляет 20, то фокусное расстояние его будет $160 : 20 = 8$ мм. В нашем случае объектив будет иметь фокусное расстояние $160 : 10 = 16$ мм. Точнее он имеет 15,8 мм.

Микрообъектив $10 \times 0,25$ состоит из двух склеенных попарно ахроматических линз, смонтированных в стандартную оправу, принятую для объективов микроскопа.

Определим приблизительное значение светового потока, падающего на фонограмму, а также освещенность штриха. Габаритная яркость лампы К-7 составляет около $B = 1000$ сб, апертура объектива, если не считаться с тем, что в данной схеме он работает не при номинальном увеличении, может быть принята номинальная: $A = 0,25$. Площадь штриха составляет: $2,15 \times 0,02 = 0,043$ мм² = 0,00043 см². Подставляя данные в формулы (28) и (29) и полагая, что пропускание всей системы составляет $\tau = 0,5$, получаем:

$$F' = \tau \cdot B \cdot S \cdot \pi A^2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 0,00043 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 = 0,042 \text{ лм.}$$

Освещенность штриха при этом будет:

$$E' = \tau \cdot B \cdot \pi A^2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 = 98 \text{ фот} = 980\,000 \text{ лк.}$$

Фактическая освещенность штриха и световой поток, как показывают измерения, получаются меньше из-за неучтенных потерь. Тем не менее здесь поражает сочетание громадной освещенности и ничтожного светового потока. Этот поток, прежде чем попасть на фотоэлемент, должен пройти через фонограмму и еще через линзу фотоэlemen-

* 160 мм представляют собой длину трубки микроскопа. Это расстояние сохраняется постоянным для всех объективов и равно расчетному расстоянию, на котором любой объектив дает резкое изображение при номинальном увеличении, обозначенном на его оправе.

та, назначение которой заключается в том, чтобы вывести пучок за гладкий барабан, на котором производится просвечивание. Так как пучок после пленки расходится, то, чтобы он не срезался противоположным краем гладкого барабана, посредине барабана установлена сильная собирающая линза, которая сводит расходящийся пучок в сходящийся и таким путем направляет его мимо края барабана на фотоэлемент.

Кроме ширины штриха для правильного воспроизведения звука, существенно важно положение штриха, который должен быть установлен строго перпендикулярно направлению движения фонограммы, причем допустимые отклонения ничтожно малы.

Действие наклона штриха сказывается различно для фонограммы переменной плотности и фонограммы переменной ширины. При воспроизведении фонограммы переменной ширины наклон штриха вызывает как линейные, так и нелинейные искажения тем большие, чем больше угол наклона штриха. Предельным отклонением штриха от перпендикулярного положения следует считать ± 10 минут.

При воспроизведении фонограммы переменной плотности наклон штриха приводит к линейным искажениям за счет уменьшения амплитуды высоких частот. Предельное допустимое отклонение штриха при воспроизведении фонограммы переменной плотности может быть в 2—3 раза больше, чем для фонограммы переменной ширины, но так как для воспроизведения могут поступать как те, так и другие фонограммы, общий допуск на наклон штриха следует считать не более 10—15 минут.

В регулировке звуковой оптики следует различать пять самостоятельных операций:

1) получение резко очерченного штриха. Это достигается тщательной фокусировкой микрообъектива;

2) точная ориентация штриха поперек оси фонограммы. Это достигается вращением вокруг оптической оси оправы, содержащей конденсор с механической щелью;

3) равномерное освещение штриха по всей длине. Это достигается регулировкой лампы;

4) симметричное расположение штриха относительно оси фонограммы. Устанавливается перемещением всего тубуса относительно лентопротяжного тракта;

5) сосредоточение на фотоэлементе всего пучка света, прошедшего фонограмму. Достигается регулировкой линзы фотоэлемента.

Чаще всего приходится производить регулировку лампы. Регулировка производится обычно после каждой смены лампы и заключается в такой ее установке, чтобы изображение лампы резко рисовалось на матовом стекле кон-

трольного экранчика, а середина тела накала располагалась в центре экранчика. Для проверки равномерности освещения вдоль штриха в контрольном фильме предусмотрен специальный тест, состоящий из фонограммы, разделенной на несколько узких полосок, сдвинутых одна относительно другой и проходящих последовательно через отдельные участки штриха от одного конца к другому.

Предварительную регулировку микрообъектива при сборке аппарата, например, после ремонта, можно проводить визуально, но окончательная фокусировка должна производиться по контрольному фильму.

2. Цилиндрическая система. Цилиндрическая оптика для получения читающего штриха отличается чрезвычайной компактностью, требует лампы меньшей мощности и стоит дешево в производстве; поэтому она применяется в передвижных и главным образом узкоплечных проекторах. Ввиду некоторой специфичности этой системы рассмотрим ее подробнее на конкретном примере проектора 16-ЗП.

По внешнему виду цилиндрическая система представляет собой небольшую цилиндрическую оправу, переходящую на конце в усеченный конус, узкий конец которого обращен к фильму. Оправа имеет шпонку, служащую для ориентировки ее при установке в аппарат.

Сама оптическая система состоит из трех простых несклеенных плоско-выпуклых цилиндрических линз. Линзы имеют прямоугольную форму и сидят в одной общей оправе, внутренний просвет которой имеет такую же прямоугольную форму.

Так как цилиндрические линзы принципиально отличаются от обычных хорошо известных сферических линз, следует несколько остановиться на их особенностях.

Основное отличие цилиндрической линзы состоит в том, что вместо одной оптической оси она имеет неограниченное число оптических осей, составляющих вместе общую плоскость, в которой лежит и геометрическая ось цилиндра, образующего поверхность линзы. Поэтому при описании цилиндрической линзы понятие оптической оси теряет обычный смысл и для правильного представления о линзе указывают положение ее геометрической оси, то-есть оси цилиндра, образующего кривую часть поверхности линзы. Однако можно говорить об оптической оси системы цилиндрических линз, если в систему входят хотя бы две линзы, оси которых лежат в разных плоскостях и, в частности, взаимно перпендикулярны. Оптической осью такой системы будет служить прямая, по которой пересекаются главные сечения обеих линз.

На рис. 113,а представлен общий вид плоско-выпуклой цилиндрической линзы и та же линза изображена в двух

сечениях. Для сравнения на рис. 113,б изображена также в общем виде и в двух сечениях плоско-выпуклая сферическая линза.

Уже самый вид линзы показывает, что если в одном сечении цилиндрическая линза совершенно подобна сферической, то в другом сечении она ничем не отличается от плоскопараллельной пластинки. Иными словами, в противоположность сферической линзе, обладающей одинаковым действием во всех сечениях, проходящих через оптическую

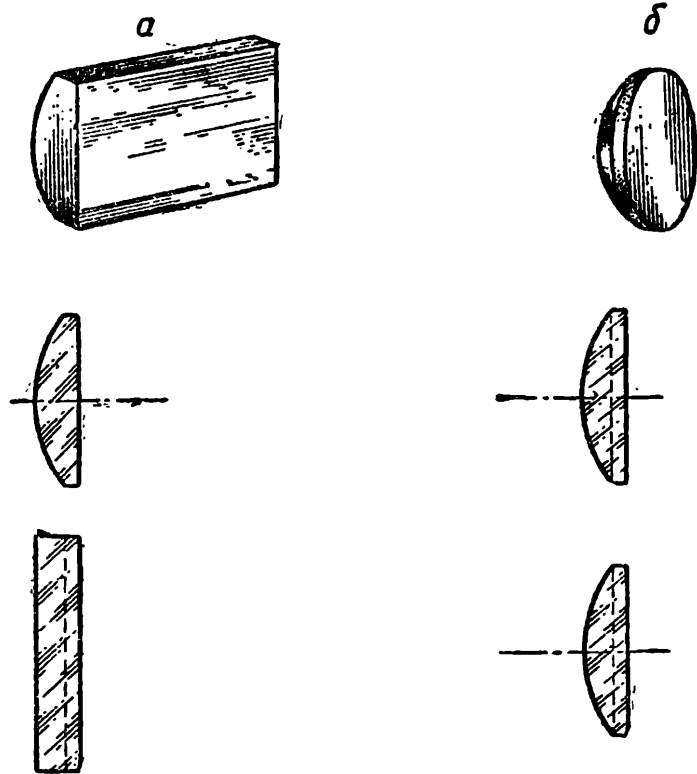


Рис. 113. Общий вид и главные сечения плоско-выпуклой линзы: а—цилиндрической; б—сферической

ось, цилиндрическая линза совершенно не действует в плоскости, содержащей геометрическую ось цилиндра, а максимальное действие ее сказывается в плоскости, перпендикулярной оси.

Если перед цилиндрической линзой расположен какой-либо предмет, допустим, спираль лампы, то линза будет рисовать спираль только по одному измерению ее—по длине (рис. 114) или до диаметру спирали (рис. 115) в зависимости от того, как расположена спираль относительно оси линзы. На рис. 114 ясно очерчена форма и

структура спирали с соблюдением масштаба в сечении, перпендикулярном оси цилиндра; в другом сечении изображение заканчивается неопределенно, уменьшаясь постепенно по яркости.

В перпендикулярном сечении (рис. 115) спираль очерчена резко по диаметру, но не имеет резких границ по длине и не содержит изображения витков спирали.

Теперь вернемся к анализируемой нами системе*.

Первые две линзы расположены в оправе так, что их оси перпендикулярны оптическому штриху, а ось третьей линзы, ближайшей к фильму, расположена горизонтально, параллельно штриху (рис. 116). Каждая линза снабжена диафрагмой с прямоугольным отверстием.

* В схеме свет идет справа налево, как это имеет место в проекторе 16-ЗП.

Если через нашу схему (см. рис. 116) провести вертикальное сечение, то в этом сечении (рис. 117,а) первые две линзы будут представлять собой плоскопараллельные пластинки и активно действовать будет только одна третья

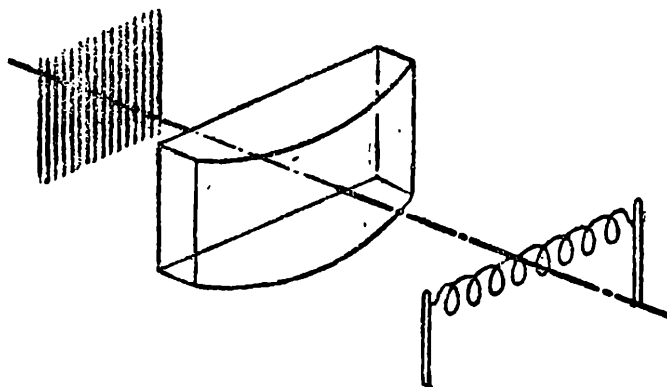


Рис. 114. Образование изображения цилиндрической линзой

линза, которая даст изображение спирали лампы по ее диаметру в сильно уменьшенном виде, то-есть даст тонкий и длинный штрих, толщина которого будет зависеть от диаметра спирали и фокусного расстояния третьей линзы.

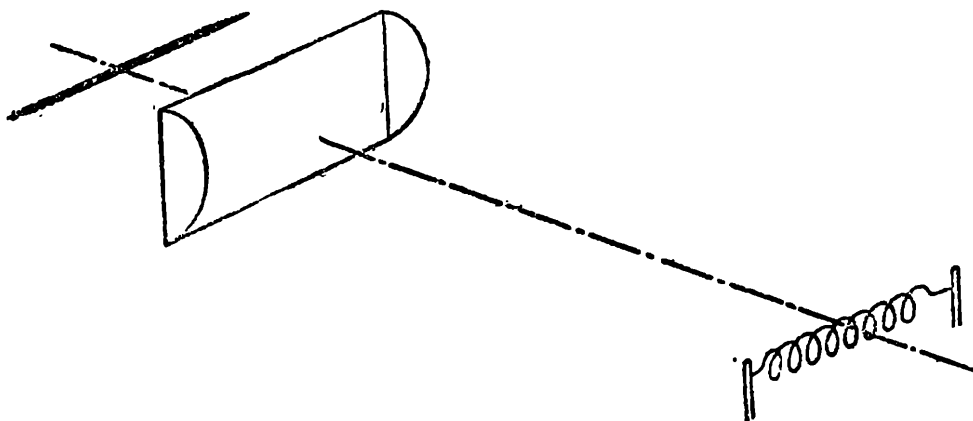


Рис. 115. Образование изображения цилиндрической линзой

При этом светосила третьей линзы будет определяться высотой отверстия диафрагмы третьей линзы и фокусным расстоянием последней.

Полученный таким образом штрих не имел бы резкого ограничения по длине, если бы не было диафрагмы первой линзы и первых двух линз.

Рассматривая нашу схему в горизонтальном сечении (рис 117,б), легко заметить, что первые две линзы образуют обычную проекционную систему, в которой первая линза играет роль конденсора, рисующего изображение спирали засвечивающей лампы в зрачке второй линзы, а вторая линза работает как проекционный объектив и рисует на фонограмме горизонтальное сечение входной диафрагмы, изображение которой и ограничивает оптический штрих по

длине. При правильном расчете и установке оптики оба эти изображения лежат в одной плоскости и образуют вместе оптический штрих, резко очерченный как по толщине, так и по длине. Таким образом, если в обычной

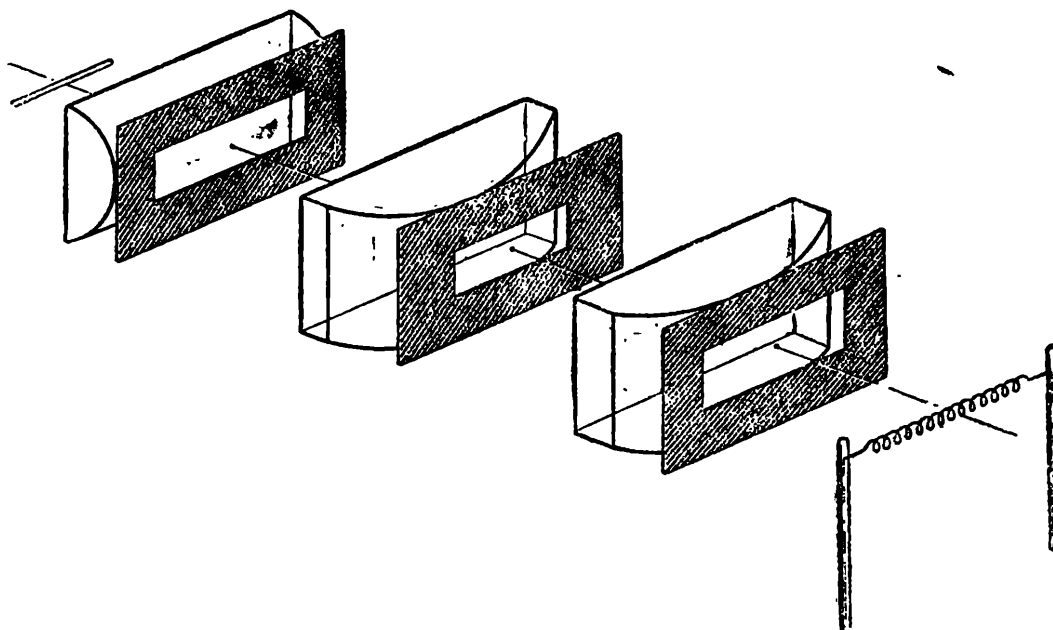


Рис. 116. Цилиндрическая читающая система

щелевой системе оба измерения оптического штриха — и длина и толщина его — представляют собой изображение соответствующих измерений механической щели, то в цилиндрической системе механическая щель в виде входной

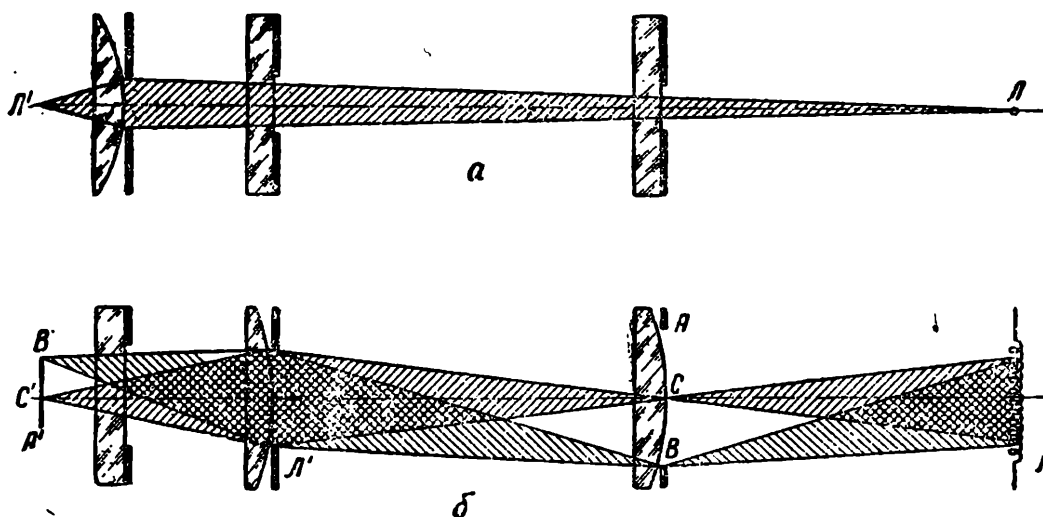


Рис. 117. Схема хода лучей, обслуживающих середину и край штриха в цилиндрической читающей системе

диафрагмы ограничивает только длину штриха, а толщина определяется диаметром спирали и фокусным расстоянием третьей линзы. Поэтому название бесщелевой, строго говоря, подходит к цилиндрической системе лишь в отношении толщины штриха.

Все три линзы закреплены в общей оправе и удерживаются на соответствующих расстояниях благодаря распорным втулкам и пружине, расположенной между втулками; взаимная перпендикулярность осей отдельных линз сохраняется благодаря прямоугольной форме линз и такой же прямоугольной форме просвета оправы.

Расстояние от спирали лампы до фильма составляет ровно 45 мм и при этом резкое изображение спирали, даваемое третьей линзой, совпадает с резким изображением входной диафрагмы, даваемым второй линзой, а оптический штрих имеет размеры $1,65 \times 0,016$ мм, если спираль лампы прямая и параллельна оси третьей линзы, которая в свою очередь должна быть перпендикулярна направлению движения фонограммы.

Если ось спирали лампы будет не параллельна оси третьей линзы, толщина штриха будет расти и становиться тем больше, чем больше перекос спирали, причем штрих будет сохранять горизонтальное положение, независимо от положения спирали, в довольно больших пределах. Если же повернуть цилиндрическую систему с оправой, то настолько же повернется и штрих, который будет располагаться всегда параллельно оси третьей линзы.

Следовательно, правильное горизонтальное положение штриха определяется целиком положением третьей линзы, и потому однажды отъюстированная система будет обеспечивать горизонтальность положения штриха независимо от положения спирали лампы, перекос которой будет приводить только к утолщению штриха, но не к перекосу его.

Разумеется, также будет действовать и искривление спирали, однако картина действия дефектов спирали на качество штриха осложняется тем обстоятельством, что спираль имеет по всей длине неодинаковую яркость и поэтому вместо штриха с постоянной яркостью по толщине получается толстый штрих, часть которого, расположенная посередине или с краю, обладает большей яркостью и потому может быть принята за самостоятельный штрих, если остальная площадь штриха сильно уступает ему по яркости.

Может возникнуть вопрос, чем объяснить, что в обычной щелевой системе для получения хорошего штриха требуется коррегированный светосильный микрообъектив довольно сложной конструкции, а цилиндрическая система, состоящая из простых неахроматизированных линз, работает тем не менее не хуже. Этот вопрос тем более законен, что форма всех трех цилиндрических линз одинаковая—плосковыпуклая и продиктована она не требованием коррекции, то-есть является не наивыгодной формой в смысле качества изображения, а вытекает из технологических соображений производства линз, так как изготовление двояковыпуклых

или вогнуто-выпуклых цилиндрических линз встречает на практике чрезвычайные трудности и увеличивает стоимость линз в десятки раз.

Легче всего изготовить цилиндрические линзы плоско-выпуклой формы или в виде полного цилиндра, то-есть стеклянного стержня.

Дело в том, что благодаря компактности всей системы фокусные расстояния линз получаются чрезвычайно небольшими, что при малом поле зрения дает настолько незначительные aberrации, что они практически могут не приниматься во внимание, тогда как микрообъектив для того, чтобы покрыть поле в 2 мм, должен обладать большим фокусным расстоянием. Здесь, казалось бы, имеет место такое же требование, однако, если обратить внимание на то, что длина штриха относится к его толщине, как 100:1, нетрудно сообразить, что выгодно разделить функции оптической системы, заставив ее работать в каждом сечении по-разному. В сечении, рисуящем толщину штриха, мы получим настолько ничтожное поле, что при фокусном расстоянии 3 мм aberrации простой линзы по абсолютной величине будут чрезвычайно малы даже при большом относительном отверстии, а ведь получение тонкого штриха и составляет главную трудность оптической системы звуковоспроизведения. Следовательно, задача получения тонкого штриха решается в цилиндрической системе чрезвычайно просто одной линзой с фокусным расстоянием около 3 мм.

Что же касается длины штриха, тут требования не так жестки, так как уже один допуск на длину штриха (0,05 мм) втрое больше, чем вся толщина штриха—0,016 мм. Кроме того, здесь, как мы уже видели, применена более сложная система, повторяющая обычную кинопроекторную систему и обеспечивающая одинаковую яркость по всей длине штриха.

В эксплуатации проектора нередки случаи, когда почему-либо необходимо разобрать цилиндрическую оптику и снова собрать ее.

Надо иметь в виду, что разборка и сборка всякой оптической системы весьма нежелательны и в большинстве случаев приводят к ухудшению ее качества и поэтому к такой мере следует прибегать лишь в самых крайних случаях.

Разборка начинается с отвинчивания двух винтов, удерживающих входную диафрагму первой линзы. После удаления одного винта и ослабления второго необходимо, придерживая диафрагму, чтобы под давлением пружины не выскочила находящаяся под ней первая линза, вывести ее в сторону, вдоль прореза, и, пока диафрагма еще по-

жрывает линзу, осторожно приподнять ее, дав тем самым пружине возможность распрямиться. При этом линза, выйдя из оправы, упадет на стол, который следует предварительно покрыть чистой бумагой. Затем вынимают первую втулку.

Для разборки остальных деталей следует изготовить следующее несложное приспособление, которое будет служить также и при сборке системы. Небольшую деревянную палочку, например, обыкновенную школьную ручку, конец которой заточен в виде тонкого стержня длиной в 26 мм (рис. 118) и диаметром 3,5 мм, с верхнего конца следует гладко срезать в виде плоскости, перпендикулярной оси, а затем установить в какую-либо тяжелую подставку или зажать в тиски стержнем вверх.

Цилиндрическая оптика ставится на этот стержень так, чтобы конец его попал в отверстие выходной (круглой) диафрагмы, и легким нажимом оправа надвигается постепенно на стержень, который выжимает из оправы последовательно все элементы. Сначала вынимают пружину, затем вторую втулку, далее диафрагму второй линзы, вторую линзу, короткую втулку, за ней диафрагму третьей линзы и, наконец, третью линзу. Надвигать оправа следует медленно, без рывков и не применяя большого усилия. Само собой разумеется, стержень должен свободно входить в отверстие диафрагмы третьей линзы.

Сборка производится в обратном порядке. Надев пустую оправу на стержень, вкладывают в оправу третью линзу, которая ложится плоской стороной на плоский срез стержня, причем ось линзы должна проходить через шпонку; затем, слегка приподнимая оправу, утапливают линзу настолько, чтобы легко можно было вставить диафрагму третьей линзы, отверстие которой должно быть ориентировано также вдоль шпонки, и тут же вставляют короткую втулку и т. д. Линзы вторая и первая должны лежать осями поперек плоскости, проходящей через шпонку. Все три линзы обращены выпуклостью наружу, то есть к диафрагме, закрепляемой винтами. Вторая линза отличается от первой большей кривизной — она имеет более крутую цилиндрическую поверхность и более узкие фаски, так как края у нее тоньше.

Наложив последнюю линзу, которая вместе со втулкой выступает из оправы, прижимают ее диафрагмой пока она не попадет в отверстие оправы и, слегка смещая диафрагму вдоль прореза, завинчивают винты.

Как линзы, так и оправа и промежуточные детали при сборке должны быть совершенно чистыми.

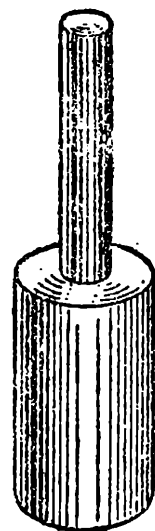
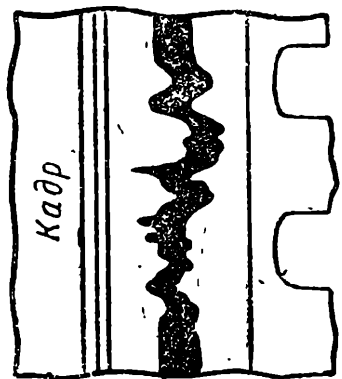


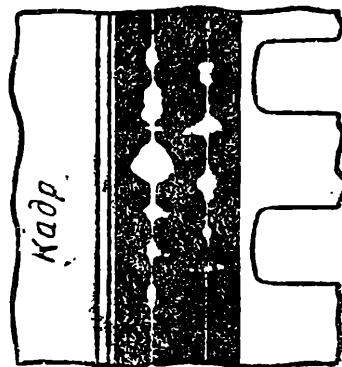
Рис. 118. Приспособление для сборки цилиндрической оптики 16-ЗП

Регулировка цилиндрической оптики состоит из трех операций:

- 1) получение резкого штриха при помощи фокусировки;
- 2) устранение перекоса штриха вращением тубуса вокруг его оси;
- 3) установка лампы для получения равномерной освещенности вдоль штриха.



Класс А—негатив



Класс В—позитив

Рис. 119. Противофазная фонограмма

Так же как и при сферической оптике, окончательная регулировка должна проводиться при помощи контрольного фильма.

Некоторую особенность представляет собой оптическая система для воспроизведения противофазной или пушпульной фонограммы.

Так как в противофазной фонограмме (рис. 119) каждая полоса считается отдельно, после пленки стоит расщепительная система, которая раздваивает пучок света, прошедший через фонограмму, на два полупучка соответственно двум полосам противофазной

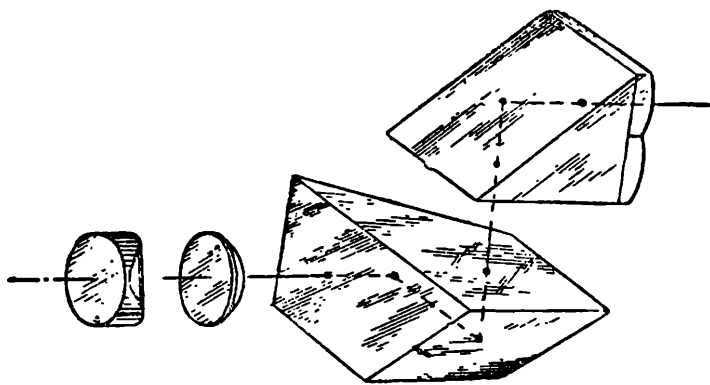


Рис. 120. Расщепительная система

фонограммы и направляет их на два катода одного фотоэлемента или на два отдельных фотоэлемента. Схема такой расщепительной системы показана на рис. 120. Рассматриваемая система в части получения штриха ничем не отличается от обычной звуковоспроизводящей. Расщепительная система состоит из сфероцилиндрического объектива, рисующего штрих по длине на выходной грани призмной системы, а по ширине—в бесконечности.

Сфероцилиндрический объектив в свою очередь состоит из двух плоско-выпуклых линз—цилиндрической с вертикально расположенной геометрической осью и сферической.

В горизонтальном сечении действуют обе линзы, составляющие вместе систему из двух положительных линз, а в вертикальном сечении цилиндрическая линза равноценна плоскопараллельной пластинке, и собирающее действие производит только сферическая линза, относительно которой читающий штрих оказывается в переднем главном фокусе. В горизонтальном сечении, то-есть относительно системы из двух линз, штрих находится в переднем сопряженном фокусе, а в заднем сопряженном фокусе расположена выходная грань призмной системы, несущая на себе две цилиндрические линзы. Система из трех прямоугольных отражательных призм поворачивает пучок вокруг его оси так, что изображение штриха на выходной грани занимает вертикальное положение.

Наклеенные на выходную грань две цилиндрические линзы несколько раздвигают выходящие из системы пучки, направляя их на соответствующие катоды фотоэлемента.

При регулировке положения штриха необходимо добиться возможно более точного совпадения середины штриха с осевой линией фонограммы. Чтобы свет с одной полоски фонограммы не попадал на соседний фотокатод, изображение осевой линии должно лежать на стыке двух цилиндрических линз выходной грани. Для этого передвигают расщепительную систему в горизонтальном направлении, отчего изображение штриха перемещается вдоль своей длины по вертикальному направлению.

Невыполнение этого условия приводит к значительным искажениям.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ОПТИКИ

Оптическая система и яркость источника света определяют световую мощность кинопроектора, то-есть тот полезный световой поток, который может отбросить объектив проектора на экран.

Выше было показано, что расчетный световой поток 35-мм кинопроектора составляет:

$$F = 2,5 \tau \cdot B \left(\frac{1}{\kappa} \right)^2. \quad (33)$$

Чтобы получить действительное значение светового потока при работающем обтюраторе и с учетом всех потерь, связанных как с отражением и поглощением в стекле, так и с несовершенством оптики, введем в выражение (33) числовые значения этих потерь.

Для коэффициента пропускания обтюратора может быть принято среднее значение $T = 0,5$. Для коэффициента про-

пускания осветительной и проекционной системы может быть принято значение $\tau = 0,6$, а для учета влияния погрешностей оптики и установки $\eta_0 = 0,55$.

Таким образом, реальное значение полезного светового потока имеет вид:

$$F = T \cdot \tau \cdot \eta_0 \frac{2,5}{K^2} B = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,55 \cdot \frac{2,5}{K^2} B \approx \frac{0,4}{K^2} B. \quad (34)$$

При относительном отверстии объектива 1:2, как это имеет место в большинстве 35-мм проекторов, световой поток составит:

$$F \approx 0,1 B, \quad (35)$$

то-есть полезный световой поток проектора, выраженный в люменах, равен $1/10$ яркости источника света, выраженной в стильбах.

Несмотря на ряд округлений, допущенных при выводе формулы (35), она вполне пригодна для всех практических расчетов с точностью $\pm 10\%$.

Световая мощность проектора определяет в свою очередь размеры экрана, который может быть покрыт с требуемым уровнем освещенности. Яркость изображения на экране зависит от освещенности экрана, его коэффициента яркости и от коэффициента пропускания кадра.

Экспериментальным путем установлено, что наиболее благоприятной, так сказать отличной яркостью экрана является яркость около 100 асб и наименьшей допустимой — 12 асб.

Если принять в качестве среднего значения коэффициента яркости экрана $r = 0,75$, то освещенность экрана должна составлять:

$$E = \frac{100}{0,75} = 135 \text{ лк.}$$

С другой стороны, площадь экрана составляет:

$$S = H \cdot B = 0,73B \cdot B = 0,73B^2,$$

а световой поток будет равен:

$$F = 135 \cdot 0,73B^2 \approx 100B^2, \quad (36)$$

то-есть световой поток, необходимый для получения отличной яркости на экране шириной B метров, составляет $100 B^2$ лм.

Решая равенство (36) относительно B , получаем:

$$B \approx 0,1 \sqrt{F}, \quad (37)$$

то-есть ширина экрана при наилучшей освещенности составляет $1/10$ корня квадратного из светового потока, выраженного в люменах.

В Советском Союзе применяются звуковые кинопроекторные аппараты четырех типов: два типа для театральной проекции и два типа передвижек— одна на 35-мм пленку и другая на 16-мм. Все эти аппараты отечественного производства и представляют собой хорошо зарекомендовавшие себя конструкции отечественной разработки.

1. Наиболее распространенным театральным проектором является проектор СКП-26 (прежнее название КЗС-22). Схема проекционной системы проектора СКП-26 приведена на рис. 103 (стр. 131). В проекторе применена дуговая лампа с пламенными углями, осветительная система из зеркала типа манжен с фокусным расстоянием 116,8 мм диаметром 250 мм и линзы такого же диаметра с фокусным расстоянием 533 мм.

Кратер дуги помещается в фокусе зеркала, которое отбрасывает на линзу пучок параллельных лучей. Плосковыпуклая сферическая линза собирает пучок параллельных лучей вблизи кадрового окна в главном фокусе линзы, где и образуется изображение (действительное и увеличенное) кратера дуги. В подобных схемах для обеспечения параллельности хода пучка зеркало должно иметь параболическую форму, но ввиду того, что изготовление параболического зеркала сопряжено с большими техническими трудностями, здесь использовано зеркало типа манжен, хотя и уступающее параболическому, но зато легко изготавливаемое технологически.

Зеркало ограничено двумя сферическими поверхностями, описанными из разных центров. Собственно зеркалом является тыльная посеребренная поверхность, имеющая меньшую кривизну. Чтобы слой серебра не подвергался повреждению, он омедняется и покрывается бакелитовым лаком. Коэффициент отражения зеркала составляет вначале не менее 85%, но со временем уменьшается вследствие забрызгивания зеркала частичками меди, покрывающей уголь.

Получаемое в кадровом окне световое пятно— „яблочко“ представляет собой несколько размытое изображение кратера дуги. Увеличение осветительной системы составляет около 4,5, и если бы не было обсоса углей и осветительная система не имела аберраций, пятно имело бы диаметр от 45 до 54 мм при диаметре угля от 10 до 12 мм. На самом деле осветительная система имеет значительные аберрации и, кроме того, полезной частью кратера является только ее центральная, наиболее яркая часть, составляющая по диаметру примерно 60% диаметра угля. Изображение этой наиболее яркой части и покрывает кадровое окно, диагональ которого составляет около 26 мм.

Объектив П-4 с относительным отверстием 1:2 и с фокусным расстоянием от 9 до 18 см приведен в табл. 13 (стр. 108).

Обтюратор—цилиндрический, расположенный перед кадровым окном.

Полезный световой поток проектора 1700—2000 *лм* при питании дуги постоянным током.

Следовательно, ширина экрана при наилучшей освещенности составляет:

$$B = 0,1 \sqrt{2000} = 4,5 \text{ м.}$$

При освещенности около 80 *лк* ширина экрана будет 6 м.

Звуковоспроизводящая система проектора СКП-26—сферическая с микрообъективом $10 \times 0,25$ и с лампой К-7—12 *в* \times 30 *вт*.

2. Более мощным проектором является театральный проектор КПТ-1. В проекторе применена автоматическая дуговая лампа с невращающимися углями интенсивного горения, автоматически поддерживающая нормальное расстояние между углями. Схема проекционной системы дана на рис. 121. Осветителем служит эллиптическое (вернее, сфероэллиптическое) зеркало диаметром 350 *мм*. Кадровое окно защищено от чрезмерного нагрева теплофильтром из специального стекла ИК.

Теплофильтр, поставленный перед кадровым окном, поглощает, кроме тепла, еще заметную долю видимого света и уменьшает относительное содержание красных лучей. Как известно, недостаток зеркальной осветительной системы заключается в том, что, отражая вместе с видимыми лучами тепловые лучи, она сильно нагревает фильм. Тем не менее только зеркальные осветительные системы обеспечивают получение наибольшего светового потока.

В отличие от зеркала манжен, у которого толщина края больше толщины середины, эллиптическое зеркало имеет равномерную толщину. Посеребренной поверхностью и здесь является тыльная поверхность. Эллиптическое зеркало проектора КПТ-1 имеет в середине отверстие для пропуска отрицательного угля.

Объективы те же, что и в аппарате СКП-26 (см. табл. 13, стр. 108).

Полезный световой поток проектора около 3000 *лм*, что обеспечивает отличную освещенность при экране шириной 5,5 м. При освещенности 80 *лк* ширина экрана больше 7 м.

Звуковоспроизводящая система та же, что и в проекторе СКП-26.

3. Передвижной проектор К-101 работает с лампой накаливания К-22 с плоской спиралью 30 *в* \times 400 *вт*, питаемой через трансформатор. Схема оптики приведена на рис. 122 и состоит из трехлинзового конденсора с контр-отражателем и объектива с относительным отверстием 1:2.

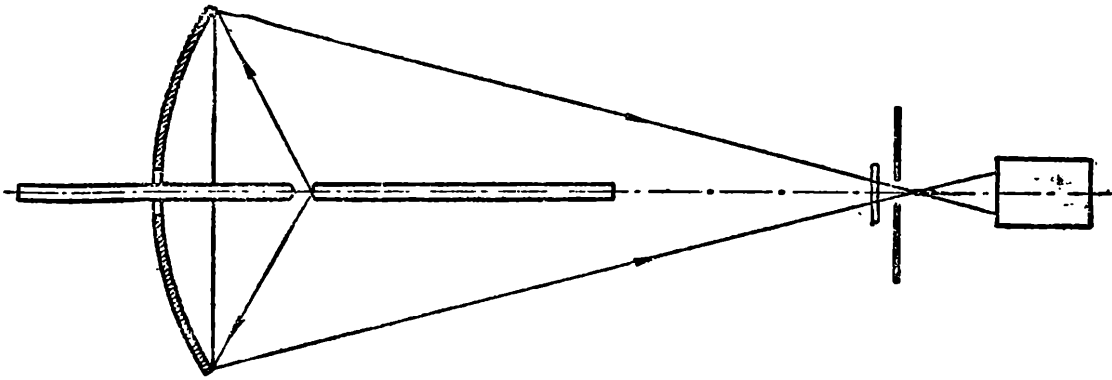


Рис. 121. Схема проекционной системы проектора КРТ-1

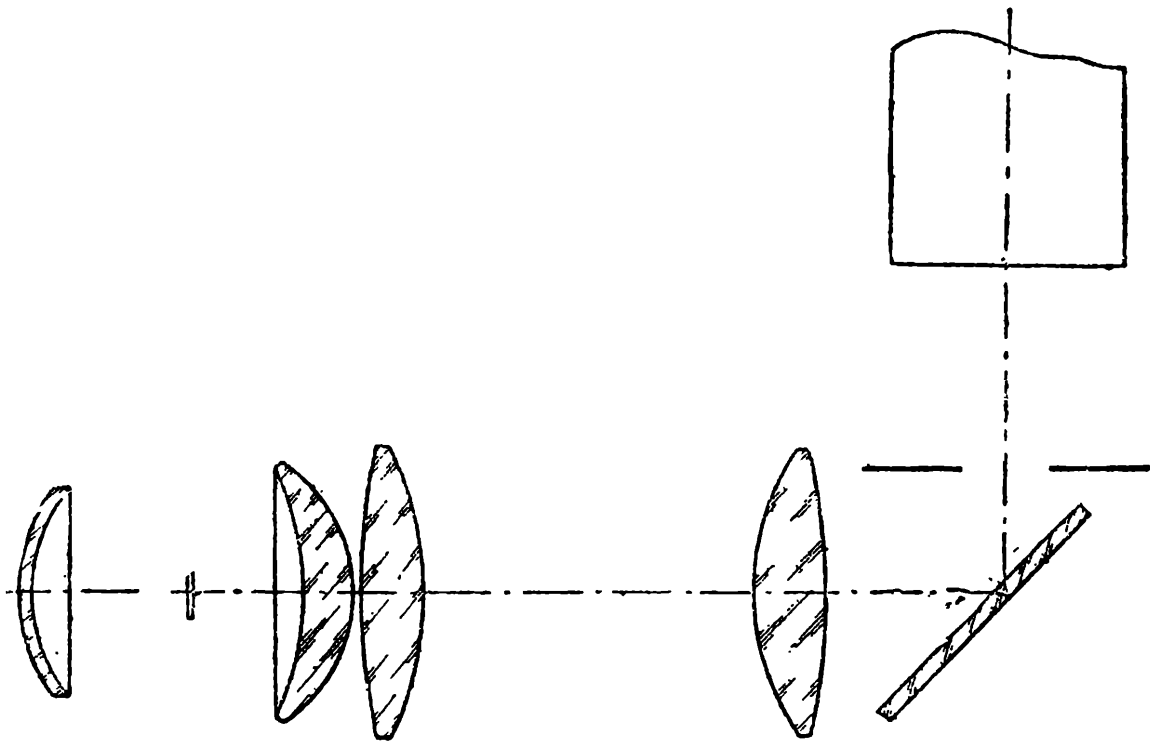


Рис. 122. Схема проекционной системы К-101

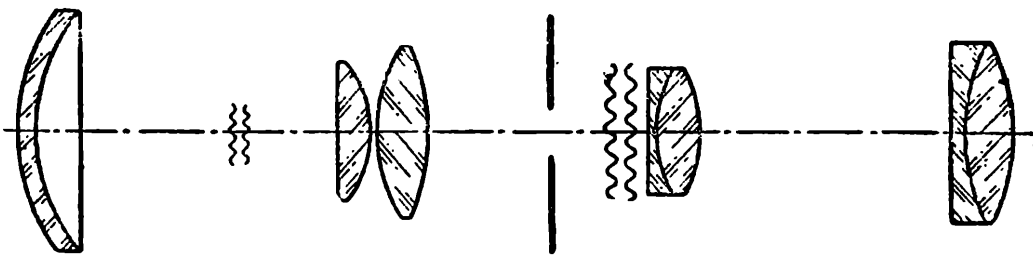


Рис. 123. Схема проекционной системы 16-3П

Изображение спирали рисуется вблизи кадрового окна. Чтобы лучше использовать всю поверхность светящегося тела, ему придана форма, подобная форме кадрового окна. Для защиты кадрового окна от сильного нагрева поворотное зеркало изготовлено из стекла ИК, чтобы не вводить в ход пучка лишних отражающих поверхностей.

Полезный световой поток около 250 лм. Если принять для кинопередвижки пониженную норму освещенности 50—75 лк, то ширина экрана составит 2,1—2,6 м.

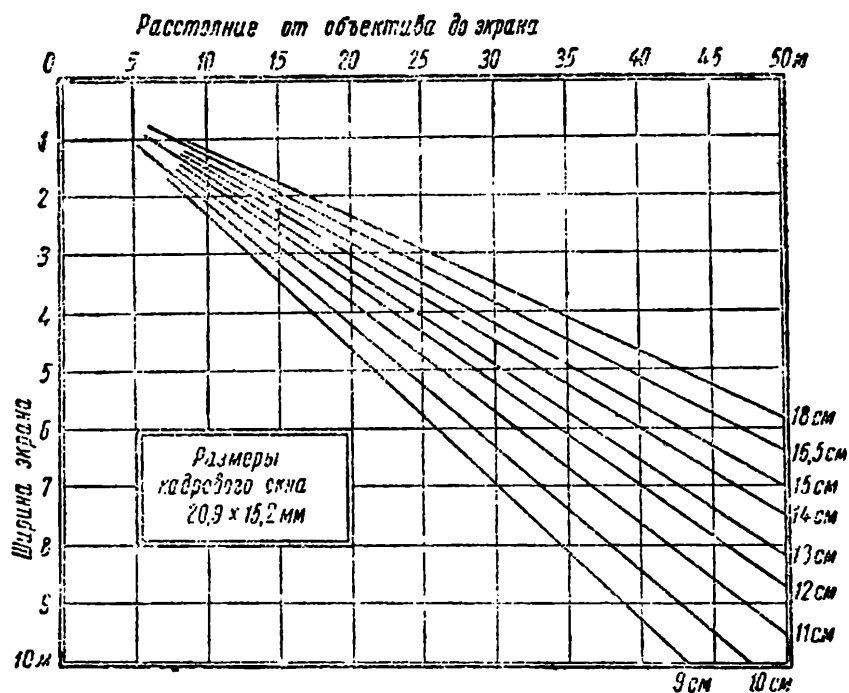


Рис. 124. График для расчета проекционного расстояния для 35-мм фильма

Звуковоспроизводящая система—сферическая, отличающаяся от системы СКП-26 наличием полупрозрачной призмы-куб, поставленной в месте поворота пучка. Лампа КЗ—5 в × 35 вт питается через трансформатор от сети переменного тока. Лампа имеет низкую цветовую температуру 2150°К и очень малую световую отдачу 2,2 лм на 1 вт при большом токе 7а, благодаря чему отсутствует фон переменного тока.

Так как кислородно-цезиевый фотоэлемент, с которым работает лампа, имеет максимум чувствительности в инфракрасной части, излучения ее вполне достаточно для работы фотоэлемента.

4. Передвижной 16-мм кинопроектор 16 ЗП работает с лампой накаливания типа биплан 110в × 500вт и 110в × 750вт. Схема проекционной системы представлена на рис. 123 и состоит из двухлинзового конденсора с контротражателем и проекционного объектива с относительным отверстием 1:1,65 и фокусным расстоянием 3,5 или 5 см.

Полезный световой поток при лампе 750 вт составляет

около 160 лм. При норме освещенности 50—75 лк проектор покрывает экран шириной 1,7—2,1 м.

Звуковая оптика — цилиндрическая с лампой 4 в × 3 вт, питаемой от генератора высокой частоты.

На стр. 105 приведены формулы (24) для расчета размеров экрана, фокусного расстояния и проекционного расстояния.

Если вопрос о яркости экрана решен, прежде всего надо определить, какой экран охватывает данный проектор по световой мощности при той освещенности, которая признана желательной. Определив ширину экрана и установив проекционное

расстояние, легко подсчитать, какое необходимо фокусное расстояние объектива, чтобы покрыть заданный экран. Практически достаточно точные результаты дает простой график, приведенный на рис. 124. Здесь в графической форме выражена связь между фокусным расстоянием прсеccionного объектива f , шириной экрана B и проекционным

расстоянием P для стандартного кадра 35-мм фильма. На рис. 125 приведен такой же график для 16-мм фильма.

Обращаясь к регулировке оптики, следует указать, что регулировка осветительной системы проектора имеет целью получить максимальную освещенность экрана при достаточной ее равномерности, а регулировка объектива и положения кадрового окна имеет целью получить наибольшую и равномерную резкость по всему экрану.

Допустимая неравномерность освещенности экрана для черно-белой проекции может быть значительная: освещенность края может составлять до 0,6 освещенности середины без заметного понижения качества проекции. При проекции цветных фильмов такое падение освещенности недопустимо, так как это приводит к искажению цвета. В этом случае освещенность на краю экрана должна составлять не менее 0,8 освещенности в центре.

Так как осветительная система работает вместе с объективом, составляя одну общую проекционную систему, необходимо, чтобы все элементы оптики располагались на одной оптической оси или, как принято говорить, представляли одну центрированную систему. Все расчеты оптики делаются всегда применительно к центрированной системе, то-есть

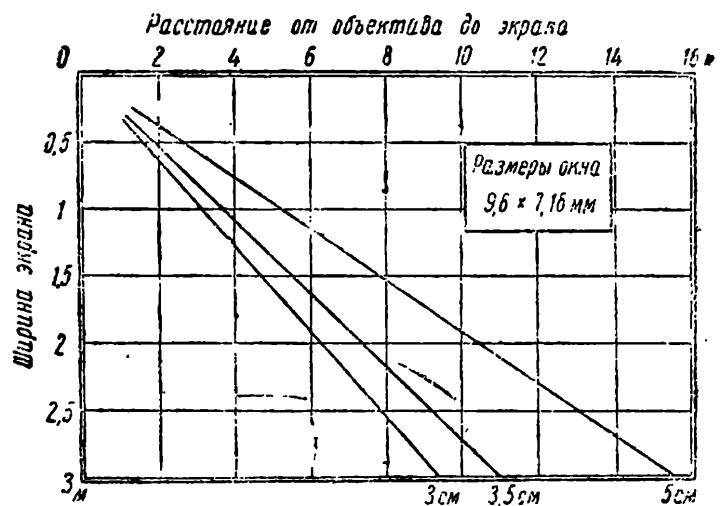


Рис. 125. График для расчета проекционного расстояния для 16-мм фильма

к такой оптической системе, в которой центры кривизны всех поверхностей, образующих линзы, зеркала и т. д., лежат на одной прямой. На этой прямой должны лежать также центр источника света, центр кадра и центр экрана. Особенно чувствительны к децентрировке те элементы проекционной системы, которые работают при больших относительных отверстиях и рассчитаны на малое поле изображения, как например, зеркальный осветитель, особенно если он работает при больших увеличениях. Уже небольшое смещение кратера дуги с оси зеркала может вызвать значительное уменьшение полезного светового потока и появление окраски. Хотя в лампе обычно предусмотрен целый ряд регулировок, могущих компенсировать имеющийся перекося или наклон отдельных элементов, надо все же тщательно следить за центрировкой всех элементов, входящих в систему, и не допускать никаких смещений, если даже их действие поддается компенсации.

Когда центрировка обеспечена, регулировка элементов оптики при монтаже проектора сводится к такой расстановке элементов системы, чтобы при заданном диаметре кратера дуги получить в кадровом окне световое пятно, достаточное для покрытия кадрового окна. Чтобы сообразить, в какую сторону передвигать фонарь относительно головки проектора, необходимо иметь в виду, что при приближении кратера к зеркалу изображение его удаляется от зеркала к объективу и становится больше по размеру и, наоборот, при увеличении расстояния между кратером и зеркалом изображение становится меньше и приближается к осветителю. Если диаметры углей и электрические режимы соответствуют расчетным, нет никакой необходимости в нарушении предписанных расстояний. Наиболее чувствительны к ошибкам установки асферические зеркала, но и при сферической оптике лучше всего придерживаться расчетных расстояний.

Во всех случаях, независимо от того, куда проецируется источник света — около кадра или в зрачок объектива, для получения максимального светового потока необходимо заполнение зрачка объектива. Если на наружную линзу объектива наложить достаточно темное цветное стекло (например, стекло ТС) и рассматривать объектив со стороны, обращенной к экрану, весь объектив должен казаться одинаково ярким и совершенно не иметь отдельных темных участков. Можно также приложить к объективу бумагу и рассматривать ее в темных очках.

Если при проекции обнаруживается постоянная нерезкость на одной стороне или в одном углу экрана, необходимо устранить имеющийся перекося между плоскостью кадра и осью объектива.

В случае, когда проекционный аппарат располагается не со стороны зрительного зала, а находится за экраном, проекция происходит на просвет. В качестве экрана для сквозной проекции обычный полотняный экран оказывается очень густым, и для получения большей прозрачности его смачивают водой, а чтобы экран не высыхал, к воде прибавляют глицерин. Если установка назначена для длительной работы, изготавливается специальный экран сквозной проекции. Одним из наиболее удачных экранов такого рода считается экран из шелкового полотна № 2, пропитанный лаком № 17 „Лакокраска“, но он обладает ясно выраженной желтой окраской. Гораздо приятнее на вид и обеспечивает совершенно белый цвет — шелковое полотно, пропитанное бесцветным нитролаком.

Так как при сквозной проекции изображение получается зеркально обращенным в горизонтальной плоскости, необходимо предусмотреть установку перед проектором отражательной призмы или зеркала с одним или нечетным числом отражений. Зеркало должно быть наружного покрытия, лучше всего алюминированное.

Когда сквозная проекция применяется в стационарной двухпостовой установке, например, в клубах, где имеется небольшая сценическая площадка и аппаратная расположена за сценой, возникает проблема наиболее выгодного размещения проекторов. Выше указывалось, что во всех случаях предпочтительно пользоваться длиннофокусными проекционными объективами, что легко выполняется при проекции на отражение, когда между проектором и экраном находится зрительный зал. При сквозной проекции проектор находится за экраном, и так как вся площадь между проектором и экраном при проекции не используется, совершенно естественно стремление сократить расстояние от проектора до экрана. Поэтому в таких случаях применяются короткофокусные объективы. С другой стороны, если при коротком проекционном расстоянии сохранить нормальное расстояние между осями двух проекторов (то-есть больше чем 1,5 м),

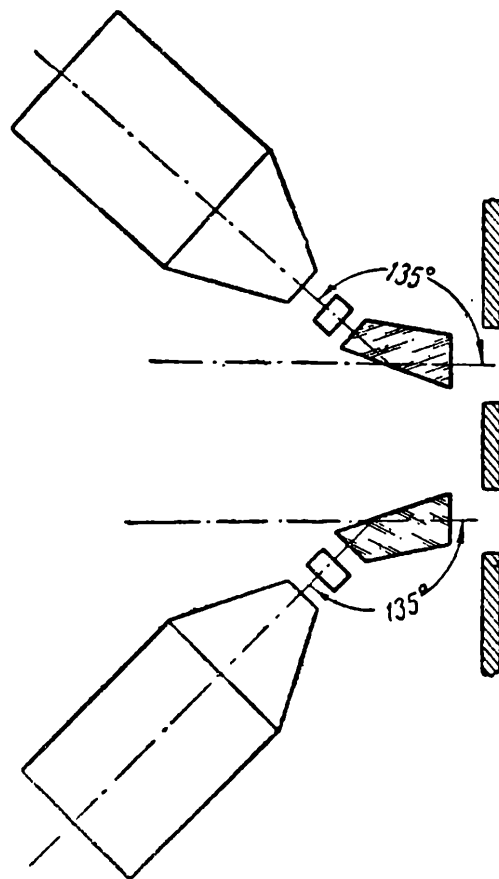


Рис. 126. Расположение проекторов при сквозной проекции с двух постов

пучки будут сильно перекошены, и изображение на экране деформируется. Чтобы сократить расстояние между осями двух пучков, идущих к экрану от двух постов, и тем избежать больших перекосов, располагают проекторы с двух сторон под углом 135° к оси проекции, так что оба проектора устанавливаются под углом 90° друг к другу (рис. 126). И в этом случае при выборе фокусного расстояния следует избегать очень короткофокусных объективов, так как свойственный таким объективам широкий угол изображения требует изготовления специального корпуса автоматической заслонки с широким раструбом или чрезмерного приближения проектора к стене, что создает неудобство в работе кинемеханика. Кроме того, при коротком фокусном расстоянии получается большой экран и соответственно пониженное значение яркости.

Следует отметить трудность фокусировки изображения на экране сквозной проекции. Дело в том, что экран сквозной проекции с большим коэффициентом пропускания обладает незначительным рассеянным отражением в сторону падающего пучка, и кинемеханик практически совсем не видит картины на экране. Чтобы отфокусировать объектив, приходится накладывать на экран бумагу со стороны зала или со стороны проектора и наводить на фокус с бумагой. Разумеется, такая фокусировка неудобна и не всегда осуществима. Чтобы обойти это затруднение, объективодержатель снабжают хорошим стопорным устройством, позволяющим надежно закрепить объектив в отфокусированном виде. Иногда в кадровом окне делают специальный добавочный вырез, приходящийся на участок, расположенный вне проецируемого кадра. Так как проекция этого участка приходится на черную рамку экрана, на это место рамки со стороны, обращенной к аппаратной, наклеивается белая бумага, по которой контролируется положение „рамки“ и фокусировка. Для этого объектив должен иметь хорошо выпрямленное поле или плоскость бумаги должна быть вынесена за плоскость экрана, чтобы достигалась одновременная резкость несмотря на кривизну поля.

Большим недостатком сквозной проекции является наличие на экране светящегося пятна, представляющего собой зрачок объектива, видимый через экран, если коэффициент диффузного рассеяния экрана недостаточен. Это пятно перемещается вместе со зрителем и с точки зрения каждого зрителя занимает особое место. Располагая экран несколько выше, а проектор несколько ниже обычного его положения (рис. 127) так, чтобы нижний край экрана лежал на прямой, соединяющей объектив с самым задним зрителем, можно уничтожить мешающее действие пятна, сосредоточив светящееся пятно ниже границы экрана, где его будет

закрывать нижняя часть рамки. При этом понижается яркость экрана, но зато устраняется раздражающее действие светового пятна.

При проекции в незатемненном помещении или на открытом воздухе — так называемой дневной проекции, необходимо принять все меры к тому, чтобы на экран не попадала прямая засветка от световых проемов (окна, двери) или от источников света. Это достигается соответствующим размещением аппаратуры и экрана. Задача, которую приходится решать при такой проекции, состоит в том, чтобы

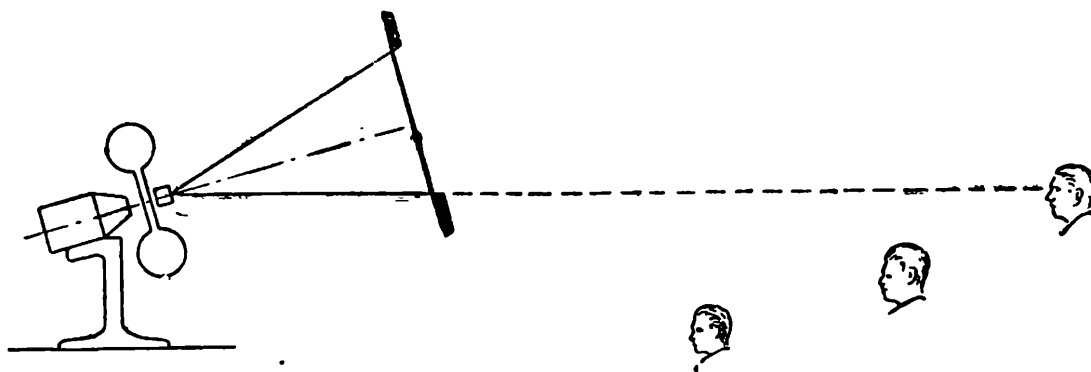


Рис. 127. Расположение проектора для уничтожения пятна

сохранить на экране максимальный контраст проектируемой картины, который сильно уменьшается от засветки посторонним светом, идущим не из проекционного объектива. Так как контраст больше при большей яркости изображения, следует выбирать наименьшую допустимую площадь экрана и так располагать аппаратуру, чтобы на экран не попадали прямые лучи паразитной засветки, а в поле зрения зрителя не попадали посторонние предметы, обладающие большой яркостью и ухудшающие адаптацию зрителя.

Экраном для проекции в незатемненном помещении может служить как экран на отражение, так и экран сквозной проекции. В последнем случае следует выбирать экран с наименьшим коэффициентом рассеянного отражения со стороны зрителей, и, кроме того, необходимо защитить его от посторонней засветки не только со стороны зрителей, но и со стороны проектора, что приводит к значительному усложнению и к громоздкости всего устройства. Поэтому проекция на обычный экран диффузного отражения или на белую матовую стену при соблюдении указанных выше предосторожностей является по существу наиболее простым решением задачи.

При проекции физических опытов и демонстраций следует принимать меры к тому, чтобы поле проекции было по возможности более плоским, то-есть демонстрируемые предметы занимали бы объем, имеющий наименьшее воз-

можное измерение вдоль оптической оси. Так как проекция дает всегда перевернутое изображение, следует устанавливать перед проектором призму или зеркало, оборачивающее изображение в вертикальном сечении, чтобы не дезориентировать зрителей в отношении главным образом направления силы тяжести. В противном случае тела будут падать вверх, капля жидкости будет иметь форму, направленную острием вперед, и т. д. Проще всего пользоваться для этого призмой Довэ (рис. 128). Так как такая призма, строго говоря, должна работать только в параллельном

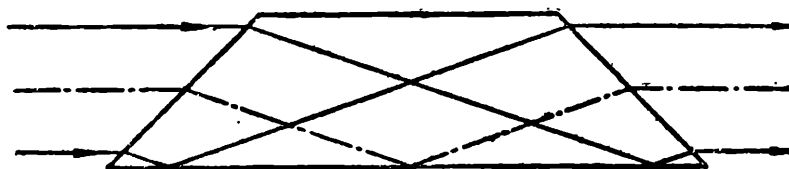


Рис. 128. Призма Довэ

ходе лучей, ее следует устанавливать после объектива, где апертурный угол небольшой и пучки могут считаться параллельными.

Чтобы оптическая система работала хорошо, необходимо содержать ее в чистоте и в исправном состоянии. Не следует разбирать объектив без совершенно явной к тому необходимости. При разборке и сборке любого узла следует внимательно следить за положением линз и не допускать их перевертывания или перестановки. Если линзы завинчиваются в оправы, не следует их слишком сильно зажимать, а завинчивать лишь настолько, чтобы линзы совершенно не шевелились в оправе. Самые оправы с линзами следует завинчивать в тубус плотно и до конца.

Ввиду того, что в представлении эксплуатационников существует некоторая неясность относительно влияния дефектов оптики на качество изображения, уточним, как сказываются эти дефекты.

Оптическое стекло, из которого изготавливаются линзы, призмы и другие точные оптические детали, отличается от технического или художественного стекла своей исключительной однородностью. Теоретически оптическое стекло должно обладать идеальной однородностью, то-есть одинаковыми физическими свойствами на любом участке и во всех направлениях и, вместе с тем, оно должно обладать совершенно определенными константами, то-есть точным значением показателя преломления для каждой длины волны в пределах всего видимого спектра или того спектрального участка, в котором будет протекать нормальная работа деталей. Эти константы совершенно специфичны для каждого сорта оптического стекла и выдерживаются

с большой точностью. Так как для получения заданных констант требуется определенный состав стекла, в оптическое стекло не могут добавляться какие-либо „технологические“ добавки, имеющие целью понизить вязкость стекла при его варке, уничтожить пузырьки или сделать стекло более бесцветным и т. д., то-есть то, что допустимо для художественного стекла (хрусталя), где требуется только большая прозрачность и отсутствие видимых на глаз пороков.

Поэтому во многих сортах оптического стекла остаются заметная пузырность, свильность и окрашенность, практически не влияющие на качество прибора. Иными словами, в оптическом стекле, а следовательно, и в готовом приборе могут оставаться пузырьки, особенно заметные, если они расположены внутри объектива и случайно находятся вблизи фокуса впереди стоящей сильной положительной линзы, и свили, то-есть тонкие нити в виде плавных кривых линий, имеющих другой показатель преломления, наподобие тех, которые возникают на дне стакана с чаем, когда размешивается сахар, уже растворившийся на дне, но не перемешанный со всей массой жидкости. Заметную окраску, совершенно неизбежную, имеют некоторые тяжелые флинты.

Теоретический расчет и практическое исследование оптических систем показывают, что как свили, так и пузырьки в незначительном количестве вполне допустимы в линзах объектива и совершенно не влияют на качество изображения, если площадь, занятая ими, составляет ничтожную долю площади действующего отверстия объектива. Однако они совершенно недопустимы для таких, казалось бы, мало ответственных деталей, как отсчетные сетки, расположенные в фокусе окуляра, конденсорные линзы, расположенные вблизи проектируемой плоскости и тому подобные части, изображаемые на экране или в поле зрения зрительного прибора. То же самое относится к царапинам и мелким механическим дефектам. Если, например, на объективе фотографического увеличительного аппарата имеются пузырьки или отдельные царапины, качество изображения от этого практически не ухудшается в сравнении с качеством, получаемым „полноценным“ объективом, не имеющим пузырьков и царапин, в то время как царапина или свиль на конденсорной линзе, особенно той, которая прижимает негатив к кадровой рамке, даст на увеличении ясно видимое пятно.

Разумеется, не все сорта оптического стекла обладают указанными дефектами. Есть стекла более „легкие“ в технологическом отношении, которые могут быть изготовлены даже совсем без пузырьков. Из такого стекла изготавливаются отражательные призмы, пластинки для сеток и тому

подобные детали, требующие большой чистоты, но не предъявляющие специальных требований к значениям констант. Из такого же стекла изготавливаются линзы конденсоров, если к ним не предъявляются требования в отношении жаростойкости. Когда линза конденсора подвергается резким температурным колебаниям, ее изготавливают из стекла типа пирекс, обладающего меньшим коэффициентом теплового расширения. Из стекла типа пирекс изготавливаются и зеркальные отражатели для дуговых ламп. Так как зеркало осветительной системы на экране не изображается, в нем допустимы свиля, пузырьки и другие дефекты, заметные на глаз.

Таким образом, требования к чистоте поверхности и отсутствию локализованных дефектов на оптических деталях должны вытекать из роли, которую выполняет данная деталь в общей системе, а не из стоимости или точности изготовления самой детали. Во всяком случае нужно помнить, что объектив сам по себе нигде не рисуется и локализованные дефекты его также не изображаются и не влияют на качество изображения. Это станет понятным, если вспомнить, что в образовании изображения каждой точки принимает участие вся площадь действующего отверстия объектива, а не отдельные участки объектива рисуют отдельные участки поля изображения, как это иногда пытаются представить.

Загрязнения или дефекты, занимающие суммарно значительную часть площади действующего отверстия оптических элементов, сказываются очень сильно, но по-разному в зависимости от функции, выполняемой рассматриваемым элементом в общей системе. Само собой разумеется, что для получения полноценной проекции все рабочие поверхности линз и зеркал должны быть совершенно чистыми, без пятен, царапин, выколов и других повреждений и загрязнений. При этом, если нарушение чистоты поверхности имеется на элементах осветительной системы, это приводит к падению освещенности и к световым потерям. Когда же загрязняются рабочие поверхности изображающей оптики, то-есть объектива, призмы, оборачивающего зеркала или других элементов, стоящих по ходу пучка после кадрового окна, это приводит к нерезкости изображения и, что самое главное, к понижению контраста изображения за счет появления общего фона, распределенного по всему экрану и понижающего контрасты, то-есть создающего белесоватость изображения.

Из этого ни в коем случае не следует, что надо как можно чаще вытирать объектив. Наоборот, вытирать его следует как можно реже, но необходимо всячески оберегать его от возможности загрязнения.

Если вывернуть передний компонент объектива, долго находившегося в эксплуатации, и посмотреть внимательно в лупу на наружную поверхность линзы и поверхность, обращенную внутрь, нетрудно заметить между ними значительную разницу, а именно: наружная поверхность вся испещрена мелкими царапинами, прямыми и круговыми, идущими во всех направлениях, в то время как внутренняя поверхность отличается равномерно блестящей полировкой. Эти царапины представляют собой следы твердых частичек пыли и нанесены при вытирании объектива носовым платком, замшей и другими случайными материалами, которыми, к сожалению, слишком часто и усердно вытирают объектив. Линзы объектива изготавливаются из оптического стекла, которое всегда мягче и менее стойко, чем любое техническое стекло. В частности, многие сорта оптического стекла сильно пачкаются, то-есть принимают пятна и изменяют на воздухе, особенно в присутствии сильной влажности, свой состав, покрываясь налетом. Поэтому не следует касаться полированных поверхностей пальцами, которые всегда оставляют на стекле пятна пота или жира. Если объектив загрязнен, то, прежде чем вытереть его, надо сдуть или смахнуть с него пыль. Для этого надо иметь мягкую беличью или хорьковую кисть. Только после того, как объектив очищен от пыли, можно вытереть его, если на нем остались какие-либо пятна. Вытирать линзы следует чистой гигроскопической ватой или мягкой хорошо выстиранной полотняной тряпкой*.

Не следует вытирать линзы замшей. Тряпку, которая служит для вытирания, или вату и кисточку следует хранить в закрытой стеклянной банке или закрытом ящичке. Безусловно, нельзя проводить кисточкой по ладони или касаться ею металлических частей. Тряпку или вату надо слегка увлажнить спиртом или чистой водой и сейчас же вытирать линзу насухо. Вату надо брать каждый раз свежую. Вытирая объектив ватой, надо стараться касаться только стекла и только когда поверхность стекла стала чистой, можно этой ватой протереть и окружающую оправу, но уже больше не касаться стекла. Ни в коем случае не следует настолько смачивать вату спиртом, чтобы он мог затечь в оправу, или опускать склеенные линзы в спирт, ацетон или эфир, так как это может вызвать размягчение слоя бальзама, которым склеиваются линзы.

Следует оберегать оптику от сильных и внезапных температурных скачков. Если, например, передвижка вносится

* В производстве оптики стеклянные детали вытираются специальными салфетками. Каждая салфетка имеет две ясно различимые стороны, например, сшита из двух различных слоев, причем одна сторона касается только деталей, а к другой прикасаются руками.

в помещение с мороза, не следует ставить ее около печки, плиты или как-нибудь прогревать ее. Надо дать аппарату постепенно принять температуру помещения. Немедленное включение лампы в проекторе, внесенном с холода, может вызвать растрескивание линз. Нагретое до высокой температуры зеркало стационарного проектора не следует подвергать внезапному охлаждению, открывая дверцу фонаря, если в аппаратной очень холодно, или при наличии сквозняков. Так как стекло плохой проводник тепла, при охлаждении

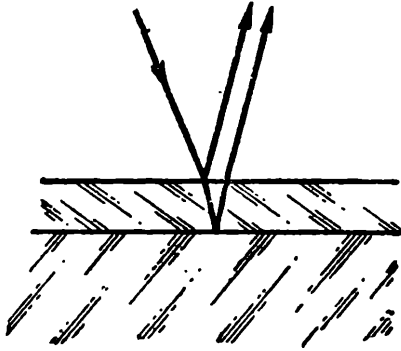


Рис. 129. Действие просветляющей пленки

наружный слой сокращается, а внутри стекло остается еще горячим и занимает прежний увеличенный объем, вызывая растяжение и растрескивание наружного слоя.

Особенно деликатного обращения требуют просветленные детали, или так называемая „голубая“ оптика. Микроскопически тонкий слой пленки, покрывающей детали, легко повреждается механически и боится масляных пятен.

Просветление оптических деталей является, несомненно, крупным достижением современной оплотехники и его значение выходит далеко за пределы простой экономии света, за счет возмещения потерь на отражение; устранение рассеянного света в сложных оптических системах с большим количеством граничащих с воздухом стеклянных поверхностей позволяет оптику-конструктору усложнять приборы без боязни ухудшить качество изображения за счет рассеянного света.

Сущность просветления состоит в следующем: законы физической оптики показывают, что если на готовую полированную поверхность стеклянной детали нанести тонкую прозрачную пленку, которая могла бы иметь в отдельности одинаковое отражение от передней поверхности раздела воздух-пленка и от задней поверхности раздела пленка-стекло (рис. 129), то при толщине пленки, равной $\frac{1}{4}$ длины волны падающего света, общее отражение от обеих поверхностей должно совершенно отсутствовать. Чтобы получить одинаковое отражение от передней и задней поверхностей пленки, необходимо, чтобы показатель преломления пленки относительно воздуха $\frac{n_n}{n_v}$ равнялся показате-

лю преломления стекла относительно пленки $\frac{n_{ст}}{n_n}$ и, следовательно:

$$n_n \cdot n_n = n_{ст} \cdot n_v = n_{ст},$$

или
$$n_n = \sqrt{n_{ст}},$$

то-есть показатель преломления пленки должен быть равен корню квадратному из показателя преломления просветляемого стекла. Если взять длину волны средней части спектра $\lambda=0,556 \mu$, то толщина пленки должна составлять:

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,556}{4} = 0,139 \mu,$$

то-есть примерно $\frac{1}{7} \mu$.

Чтобы наглядно представить эту величину, вспомним, что толщина кинопленки составляет 0,14—0,15 мм или около 140—150 μ . Нетрудно сообразить, что толщина просветляющего слоя составляет $\frac{1}{1000}$ долю толщины кинопленки, то есть представляет собой достаточно деликатную величину.

Из этого же следует, что какой бы ни была выбрана толщина пленки, полное просветление достижимо только для одной длины волны; и, следовательно, при белом свете оптика будет обладать различным отражением для лучей различного цвета. Благодаря этому может показаться, что просветленная оптика должна действовать как светофильтр, имеющий преимущественную прозрачность для некоторых участков спектра, и что непросветленный объектив имеет одинаковый коэффициент пропускания для всех участков спектра, однако это далеко не так: увеличение пропускания для лучей любого цвета может иметь место в лучшем случае только в пределах

возмещения тех потерь, которые происходили бы при обычном отражении, если бы не было просветления, то-есть не более 4—5% для каждой поверхности. Однако, как показывает кривая (рис. 130), коэффициент отражения просветленной поверхности не превосходит 1,2% для темнофиолетовых лучей, для которых просветление оказалось минимальным, тогда как для всего участка спектра от 0,45 μ до 0,76 μ коэффициент отражения не превышает 0,5%, достигая значения 0 при $\lambda=0,556 \mu$.

На рис. 130 кривая имеет крутую форму благодаря искусственному выбору большого масштаба для вертикального направления. Стоит взглянуть на кривые пропускания светофильтров, приведенные на рис. 33 (стр. 50), чтобы понять, что кривая АБВ (см. рис. 130), будучи перечерчена в масштабе рис. 33, почти не будет отличаться от горизонтальной прямой.

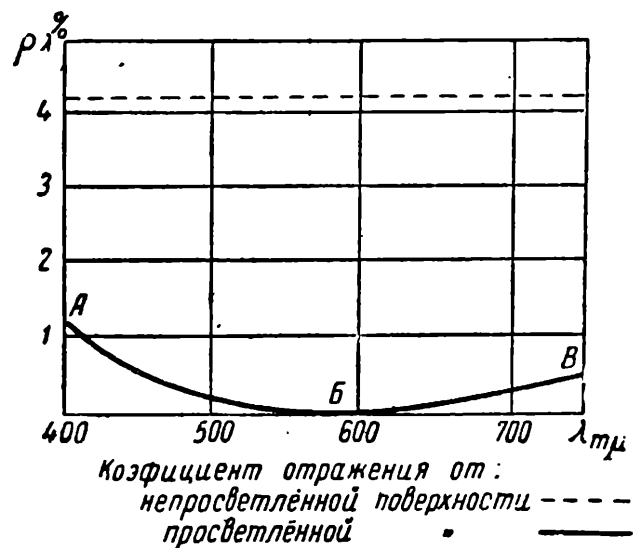


Рис. 130. Коэффициент отражения от непросветленной и просветленной поверхностей

Принятые в настоящее время промышленные способы просветления, к сожалению, еще не обеспечивают получения поверхностей с минимальным коэффициентом отражения, механически столь же прочных, как чистая поверхность стекла. Большое количество разработанных методов просветления поверхностей оптических деталей может быть разбито на две группы: на физические и химические методы просветления. При физических методах просветления на поверхность готовой детали наносится тонкая прозрачная пленка другого материала, имеющего меньший в сравнении со стеклом детали показатель преломления, тогда как при химическом методе просветления подвергается выщелачиванию наружный слой стекла самой детали, благодаря чему уменьшается показатель преломления вместе с изменением состава и структуры тончайшего наружного слоя стекла.

Химический метод дает наиболее стойкое просветление, причем образуемый просветляющий слой не только достаточно устойчив против царапин, но еще представляет собой хорошую защиту против атмосферных влияний на стекло, однако химический метод дает неполное просветление, то-есть незначительно снижает коэффициент отражения для стекол типа крон и обладает некоторыми технологическими недостатками, делающими его невыгодным для широкого промышленного применения. Детали, просветленные химическим методом, можно протирать и чистить обычными способами, как и непросветленные детали.

Просветление при помощи нанесения однослойных и двухслойных пленок физическими методами отличается значительным (примерно в 10—15 раз) снижением коэффициента отражения независимо от сорта стекла просветляемой детали и не имеет технологических дефектов, свойственных химическому методу, однако оно пока еще не обеспечивает получения механической прочности просветляющей пленки и, кроме того, при некоторых способах физического просветления наблюдается значительная чувствительность просветляющей пленки к жировым и масляным пятнам, имеющим тенденцию расползаться по всей поверхности и существенно ухудшать просветляющее действие пленки. Поэтому такие детали рекомендуется не протирать, а только сдвигать или смахивать с них пыль мягкой кисточкой. Появление на просветляющей пленке отдельных блестящих точек не имеет никакого значения и не следует пытаться их стирать. Необходимо оберегать такие линзы от царапин и масляных пятен.

Проводимые в настоящее время работы дают основание надеяться, что в ближайшее время будут освоены методы получения просветляющих пленок настолько прочных, что обращение с просветленными деталями не будет отличаться от обращения с обычной непросветленной оптикой.

Размеры изображения (в сантиметрах) в зависимости от фокусного расстояния объектива и проекционного расстояния (Размер кадрового окна 20,9 × 15,2 мм)

Расстояние между объективом и экраном (в м)									
Фокусное расстояние (в см)	5	6	7	8	10	12	14	16	18
9	115 × 83	138 × 100	161 × 117	184 × 134	232 × 169	278 × 202	324 × 236	371 × 270	417 × 304
10	104 × 75	125 × 91	146 × 106	167 × 121	209 × 152	250 × 182	292 × 212	334 × 243	375 × 273
11		114 × 83	133 × 96	152 × 110	190 × 138	228 × 166	266 × 194	304 × 221	342 × 249
12		104 × 75	121 × 88	139 × 101	174 × 126	208 × 151	243 × 176	278 × 202	312 × 227
13			112 × 81	128 × 93	160 × 116	192 × 139	225 × 163	257 × 187	288 × 209
14			104 × 75	119 × 86	149 × 108	178 × 129	208 × 151	238 × 173	268 × 195
15				111 × 83	139 × 101	167 × 121	195 × 142	222 × 161	250 × 182
16,5				101 × 73	126 × 91	152 × 110	177 × 128	202 × 147	228 × 166
18					116 × 84	139 × 101	162 × 118	185 × 134	208 × 151
Расстояние между объективом и экраном (в м)									
Фокусное расстояние (в см)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
9	464 × 337	530 × 385	695 × 505	810 × 590	835 × 610	855 × 622	868 × 632	834 × 606	894 × 650
10	418 × 304	522 × 380	627 × 557	730 × 530	760 × 552	782 × 568	802 × 583	819 × 595	835 × 607
11	380 × 226	475 × 345	570 × 415	665 × 484	695 × 505	722 × 525	744 × 541	765 × 556	759 × 552
12	347 × 252	435 × 316	522 × 379	608 × 442	642 × 467	670 × 487	695 × 506	695 × 506	695 × 506
13	320 × 232	400 × 291	482 × 350	562 × 409	595 × 433	627 × 455	632 × 460	637 × 463	637 × 463
14	295 × 214	373 × 271	442 × 321	520 × 378	556 × 404	570 × 415	580 × 424		
15	278 × 202	345 × 251	417 × 303	487 × 358	505 × 367	521 × 389			
16,5	253 × 184	316 × 230	379 × 275	442 × 321	463 × 337				
18	232 × 169	290 × 211	345 × 251	405 × 294					

Размеры изображения (в сантиметрах) в зависимости от расстояния до экрана и фокусного расстояния объектива

(Размер кадрового окна $9,6 \times 7,16$ мм)

Фокусное расстояние (в см)	Расстояние между объективом и экраном (в м)				
	2	3	4	5	6
3	$64 \times 47,5$	$96 \times 71,5$	$128 \times 95,5$	160×119	192×143
3,5		82×61	110×82	137×102	165×122
5			$76,5 \times 57$	96×71	115×85
Фокусное расстояние (в см)	Расстояние между объективом и экраном (в м)				
	8	10	12	14	16
3	256×191	320×239			
3,5		274×204	330×245		
5		192×143	230×171	268×200	305×229

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Понятие о свете. Элементы лучевой оптики . .	5
Законы распространения света	10
Плоские и сферические зеркала	18
Световые величины и единицы	29
Видимость тел и световые характеристики . .	37
Линзы	58
Недостатки простых линз и пути получения ка- чественного изображения	75
Источники света	88
Объектив	102
Проекционная система как единое целое	120
Оптические системы для воспроизведения звука	136
Эксплоатация проекционной оптики	151
Приложения	169

Редактор *В Кравченко*
Техн. редактор *Г. Усачев*
Корректор *А. Ратницкая*

*

А-03398. Подп. к печ. 16/V 1950 г. Тираж 20 000
Уч.-изд. 10,475. Бум. 60x92¹/₁₆, бум. л. 5³/₈,
печ. л. 10³/₄. Изд. № 2977. Заказ 1009.

*

Серпуховская типография
Мособлполиграфиздата