

ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

§ 42. ИДЕАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Реальная оптическая система дает изображение конечной величины при помощи достаточно широких пучков лучей. Попытки создать такую систему только на основе законов параксиальной области оказались бы неудачными, так как погрешности оптической системы, называемые абберациями, вызвали бы нерезкость в изображении и нарушение подобия предмету. Знание же сущности и теории аббераций позволяет, пользуясь приемами вычислительной оптики, создавать реальные оптические системы, которые всеми своими оптическими свойствами соответствуют оптическим системам, созданным на базе законов параксиальной области.

Для осуществления оптической системы необходимо знание всех конструктивных элементов системы. К конструктивным элементам относятся: радиусы кривизны поверхностей, толщины оптических деталей, воздушные промежутки, диаметры оптических деталей и оптические постоянные стекол. Эти элементы становятся известными после окончания коррегирования системы на абберации. Предварительное определение габаритов системы (диаметров и длин) в преобладающем числе случаев не требует абберационного расчета. Определить фокусные расстояния компонентов системы, их расстояния друг от друга и диаметры световых отверстий становится возможным при помощи законов, выведенных для параксиальной области, стоит только предположить, что система идеальна в отношении аббераций.

Первоначально создают оптическую систему, дающую изображение заданной величины в виде комбинаций отдельных оптических узлов определенного диаметра, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Затем приемами вычислительной оптики обосновываются значения радиусов кривизны поверхностей, толщин и оптических постоянных оптических деталей, удовлетворяющих требуемому качеству изображения.

Оптическая система, свободная от aberrаций, дающая изображение конечной величины при помощи широких пучков, называется *идеальной оптической системой*. Теория идеальной оптической системы основана на следующих положениях.

1 В пространстве предметов и в пространстве изображений существуют соответственные точки. Каждой точке в пространстве предметов соответствует одна и только одна точка в пространстве изображений.

2 В пространстве предметов и в пространстве изображений существуют соответственные линии. Каждой линии в пространстве предметов соответствует одна и только одна линия в пространстве изображений.

3 Если в пространстве предметов какая-нибудь точка лежит на прямой, то в пространстве изображения соответствующая ей точка также лежит на прямой, соответствующей прямой в пространстве предметов. Такие точки и прямые называются *сопряженными*.

Вместо точки можем представить себе источник света, или точку предмета, а вместо прямых — лучи, тогда получим гомоцентрический пучок в пространстве предметов, которому будет соответствовать ему сопряженный, гомоцентрический пучок в пространстве изображений.

§ 43 ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для определения положения точки изображения необходимо из сопряженной точки предмета в оптическую систему направить два луча. В месте их пересечения по выходе из системы и будет располагаться точка изображения. Оптическая система располагается в однородной среде и показывается в виде главных плоскостей.

Для нахождения положения изображения применяют несколько приемов.

Прием первый. Из точки предмета вне оптической оси в оптическую систему направляют два луча. Первый луч направляется параллельно оптической оси. Этот луч по выходе из системы должен пройти через точку заднего фокуса. Второй луч направляется через точку переднего фокуса. По выходе из системы этот луч должен пойти параллельно оптической оси. Рис. 53 иллюстрирует построение изображения первым приемом. Предмет l расположен перед отрицательной (рассеивающей) линзой. Каждый луч входит в линзу на передней главной

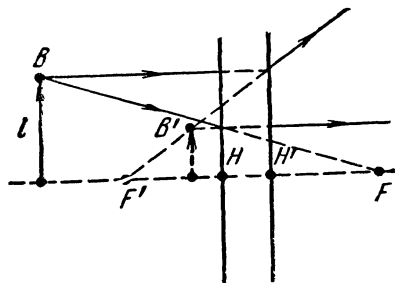


Рис. 53 Построение изображения. Предмет расположен перед оптической системой.

плоскости на определенной высоте и на такой же высоте выходит из задней главной плоскости, так как линейное увеличение в главных плоскостях равно единице. В пространстве изображений пересекаются только продолжения вышедших лучей. Из точки пересечения продолжений лучей опустим нормаль на оптическую ось, которая и будет мнимым уменьшенным изображением.

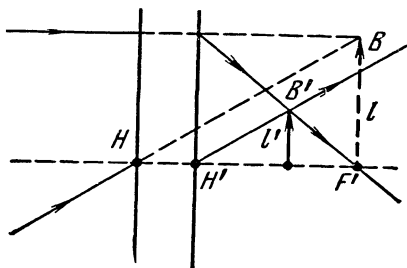


Рис 54 Построение изображения. Предмет расположен за оптической системой

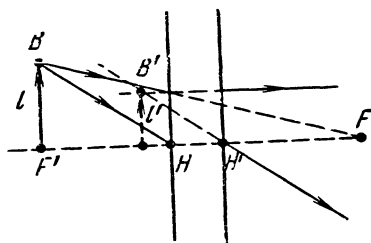


Рис 55 Построение изображения. Предмет расположен в заднем фокусе оптической системы

Прием второй. Из точки предмета вне оптической оси в систему также направляются два луча и один из них направляется параллельно оптической оси, а другой направляется в переднюю главную точку. Здесь используется свойство главных точек оптической системы, расположенной в однородной среде, образующих одинаковые углы луча с осью ($\gamma = +1$).

Предмет расположен (рис. 54) за положительной оптической системой. В точку B из пространства предметов (слева направо) направляются два луча — один из них идет параллельно оптической оси, а второй направляется через переднюю главную точку. Получили действительное и уменьшенное изображения.

Прием третий. Из точки предмета вне оптической оси в систему направляются два луча — один из них направляется в переднюю главную точку, а другой — в задний фокус. На рис. 55 предмет l расположен в заднем фокусе отрицательной линзы. Лучи, вышедшие из точки B , после преломления в линзе образуют изображение l' . Изображение получилось мнимое и уменьшенное.

Примеры положения предмета и изображения для положительной и отрицательной тонких линз показаны на рис. 56, 57.

§ 44. ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПОЛОЖЕНИЯМИ ПРЕДМЕТОВ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Оптическая система (рис. 58) представлена в виде системы главных плоскостей H и H' . Предмет l , расположенный в точке A , находится на расстоянии x от точки переднего фокуса. Изображение l' графически определяется пересечением в пространстве изображения двух лучей, один из которых выходит из точки B и идет

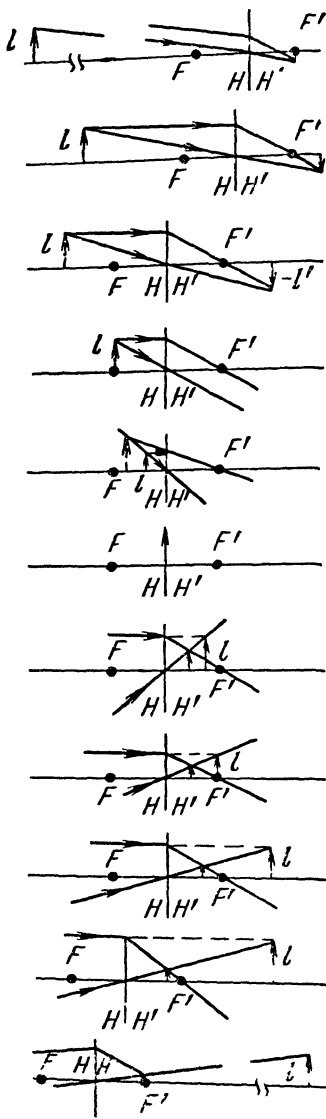


Рис. 56. Образование изображения положительной линзой

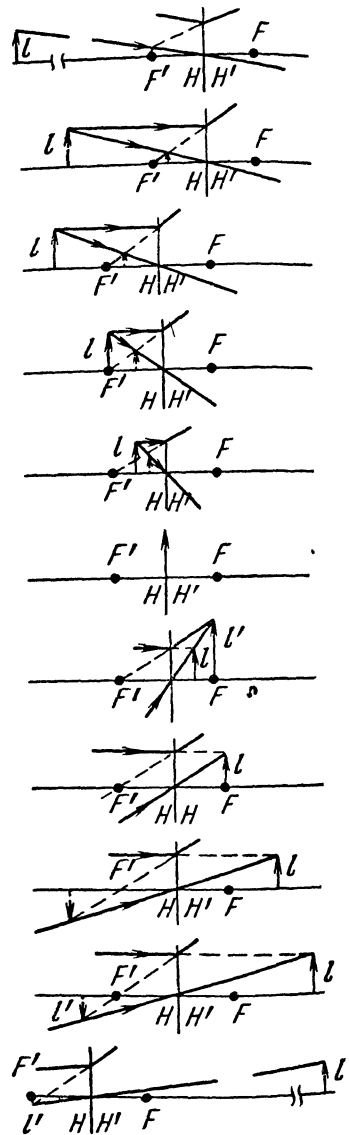


Рис. 57. Образование изображения отрицательной линзой

параллельно оптической оси, а другой направляется в точку переднего фокуса F . По выходе из системы первый луч должен пройти через точку заднего фокуса F' , а другой — параллельно оптической оси. Оба луча пересекаются в точке B' и образуют изображение l' .

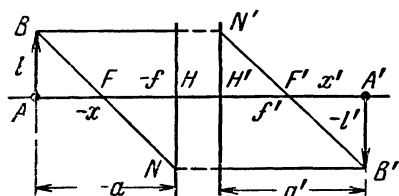


Рис 58 К выводу формулы Ньютона

Из подобия треугольников BAF и FHN следует

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x}. \quad (44,1)$$

Аналогично из подобия треугольников $N'H'F'$ и $F'A'B'$

$$\frac{l'}{l} = -\frac{x'}{f'}. \quad (44,2)$$

Отсюда получаем выражение, называемое *формулой Ньютона*:

$$xx' = ff'. \quad (44,3)$$

Если оптическая система находится в однородной среде, то $-f=f'$ и вместо уравнения (44,3) имеем

$$xx' = -f'^2. \quad (44,4)$$

Из выражений (44,1) и (44,2) получаем формулы линейного увеличения идеальной оптической системы

$$\beta = -\frac{f}{x}, \quad (44,5)$$

$$\beta = -\frac{x'}{f'}. \quad (44,6)$$

Согласно рис. 58, имеем $x=a-f$ и $x'=a'-f'$. Подставляя эти выражения в формулу (44,3) и раскрывая скобки, получим

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1. \quad (44,7)$$

Кроме того, учитывая (15,2),

$$\beta = \frac{n_1 a'}{n_{\text{посл}} \cdot a}. \quad (44,8)$$

Если система находится в однородной среде, то выражение (44,7) принимает вид формулы, известной под названием *формулы отрезков*:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'}, \quad (44,9)$$

а из (44,8) получим

$$\beta = \frac{a'}{a}. \quad (44,10)$$

Подставив выражение (44,10) в (44,9), получим

$$a = \frac{(1-\beta)f'}{\beta}, \quad (44,11)$$

$$a' = (1-\beta)i'. \quad (44,12)$$

Формулы (44,9—44,12) справедливы при $-f=f'$.

Пример 20. Определить необходимое фокусное расстояние проекционного объектива, с помощью которого необходимо передать изображение с экрана осциллоскопа на обычный экран с 5-кратным увеличением, если расстояние между экранами 3 м.

Решение. Дано: $\beta = -5$, $-a + a' = 3000$ мм.

Подставим эти данные в формулу отрезков (44,9) и учтем (44,10):

$$a = \frac{-a + a'}{\beta - 1} = -500 \text{ мм}$$

и, следовательно, $a' = 2500$ мм.

Затем из формулы (44,12) окончательно получим:

$$f' = \frac{a'}{1 - \beta} = 417 \text{ мм.}$$

На практике f' объектива подбирают ближайшим к вычисленному. Так, например, если $f' = 300$ мм, то по формуле (44,11) $a = -360$ мм, а по формуле (44,12) $a' = 1800$ мм, следовательно, расстояние между осциллоскопом и экраном 2160 мм.

§ 45. ПРОДОЛЬНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

Оптическая система (рис. 59) представлена в виде главных точек H и H' .

Ее оптическая ось A_1A_2' . Перед системой в точке A_1 расположен предмет, а в точке A_1' его изображение. Если предмет передвинется в сторону системы на расстояние Δx и окажется в точке A_2 , его изображение переместится в точку A_2' на расстояние $\Delta x'$ от точки A_1' . Точки A_1 и A_1' , а также A_2 и A_2' являются точками сопряженными. Найдем отношение $\Delta x'$ к Δx . Предел отношения $\Delta x'$ к Δx , когда Δx стремится к нулю, называется *продольным увеличением* в данной паре сопряженных точек

$$\alpha = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta x'}{\Delta x} \right) = \lim_{(x_2 - x_1) \rightarrow 0} \left(\frac{x_2' - x_1'}{x_2 - x_1} \right) = \frac{dx'}{dx}.$$

Дифференцируя $xx' = ff'$ по x и x' , получим

$$x dx' + x' dx = 0,$$

или

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \quad (45,1)$$

Из (44,5) и (44,6) выделим x и x' и подставим их в формулу (45,1)

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta^2. \quad (45,2)$$

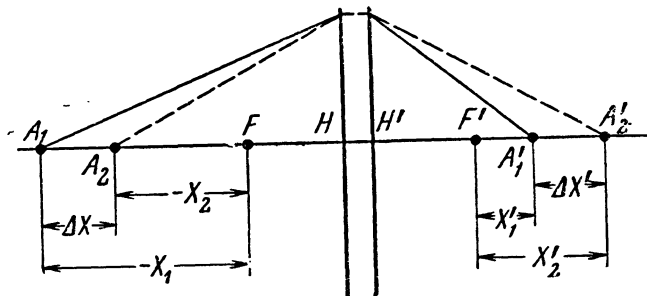


Рис. 59. К выводу формулы продольного увеличения

Заменим отношение фокусных расстояний по формуле (13,13)

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2. \quad (45,3)$$

Отсюда следует, что продольное увеличение пропорционально квадрату линейного.

Ранее была получена формула (15,2), устанавливающая связь между линейным и угловым увеличением.

Найдем из этой формулы отношение показателей преломления и подставим в формулу (45,3). Тогда окончательно получим связь между продольным, линейным и угловым увеличением

$$\alpha\gamma = \beta. \quad (45,4)$$

Пример 21. Конденсор проектирует световое тело источника света на щель спектрального прибора с 3-кратным увеличением. Определить необходимое смещение щели, если источник света передвинулся на расстояние 1 мм.

Решение. Дано $\beta = -3$; $dx = 1$ мм.

Применяя формулы (45,1) и (45,3), при $n = n'$, получим

$$dx' = \beta^2 dx = 9 \text{ мм.}$$

§ 46. ТОНКАЯ ЛИНЗА И СИСТЕМА ТОНКИХ ЛИНЗ

Если в реальной толстой линзе толщина мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей, то такая линза называется *тонкой*. Главные плоскости тонкой линзы совпадают.

Представим себе систему из трех тонких линз с главными точками H_1, H_2 и H_3 (рис. 60), расположенными друг от друга на расстояниях d_1 и d_2 .

Направим в систему луч под углом $\alpha=0$. По известному правилу графического определения положения главных плоскостей найдем положение эквивалентной задней главной плоскости H'_3 . Рас-

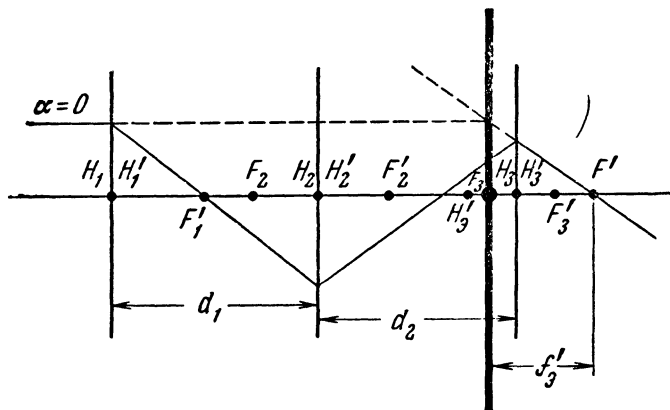


Рис. 60. Система тонких линз

стояние $H'_3F' = f'_3$ равно эквивалентному заднему главному фокусному расстоянию сложной системы из трех тонких линз.

Все сложные оптические системы, а в практике главным образом с ними и приходится встречаться, можно представить в виде систем тонких линз. Рассмотрим основные признаки таких систем. Все реальные оптические системы классифицированы по признакам положения предмета и изображения.

1. Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$), а изображение находится на конечном расстоянии. Примером такой системы является фотографический объектив (рис. 61, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования бесконечно удаленных предметов, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется с помощью светочувствительного материала, или непосредственно рассматривается на матовой поверхности наблюдателем, или передается по электронно-оптическому тракту, если предварительно образовано на фотокатоде ЭОПа или телевизионной передающей трубки. Такие системы будем называть *фотографическими*.

2. Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$). Изображение находится также в бесконечности

($+\infty$). Примером такой системы является зрительная труба (рис. 61, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения бесконечно удаленных предметов. К их числу относится большая группа военных и геодезических наблюдательных приборов: бинокли, стереотрубы, прицелы, дальномеры, перископы, нивелиры, тео-

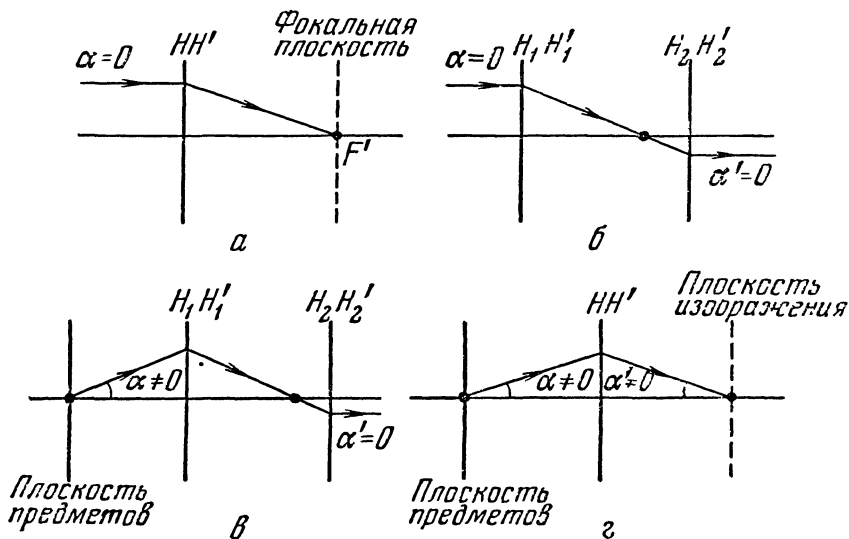


Рис. 61. Типы оптических систем: а — фотографический объектив; б — телескопическая система; в — система микроскопа; г — проекционная и репродукционная система

долиты и др. Системы подобного рода называются *телескопическими*, или *афокальными*.

3. Предмет расположен на конечном расстоянии, а изображение — в бесконечности ($+\infty$). Примером такой системы является микроскоп (рис. 61, в). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения близко расположенных предметов. К их числу относится большая группа различных микроскопов: отсчетных, биологических, поляризационных, а также фотограмметрические приборы: стереометры, компараторы, стереопланиграфы. Такие системы называются системами *микроскопа*.

4. Предмет расположен на конечном расстоянии и изображение также находится на конечном расстоянии. Примерами такой системы являются проекционный объектив и фоторепродукционный объектив (рис. 61, г). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования предметов, расположенных на конечном расстоянии, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном

расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется на светочувствительном материале, или рассматривается на экране. Экраном может быть и матовое стекло.

В зависимости от характера приема изображения такие системы называются *проекционными*, или *репродукционными*. К числу проекционных систем относятся все виды кинопроекционных аппаратов, диаскопы, эпископы, эпидиаскопы, проекционные аппараты для контроля деталей в машиностроении и др. К числу репродукционных систем относятся фотографические репродукционные аппараты, ультрафоты, фотоувеличители и др.

К этим четырем группам можно свести все разнообразие оптических приборов. Есть приборы, которые имеют устройства ряда таких групп. Эти четыре группы приборов имеют свои отличительные свойства, теорию и особенности. Осветительные устройства всех этих систем не влияют на их классификацию.

§ 47. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА СИСТЕМЫ

Фокусное расстояние оптической системы или его обратная величина являются мерой оптического действия системы. Из уравнения (13,13) следует

$$-\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'}. \quad " \quad \bullet$$

Эти отношения определяют *оптическую силу системы*.

Оптическое действие системы проявляется двояко.

Во-первых, чем больше оптическая сила, тем ближе к системе расположено изображение, во-вторых, чем больше оптическая сила, тем меньше величина изображения.

Большей частью оптическую систему рассматривают в воздухе, тогда $n=n'=1$, и за оптическую силу системы линз принимают величину, обратную заднему фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f'}. \quad (47,1)$$

Единицей оптической силы является диоптрия. Одна диоптрия есть оптическая сила системы (линзы) в воздухе с фокусным расстоянием, равным одному метру.

Выразив фокусное расстояние в миллиметрах, получим

$$\Phi = \frac{1000}{f'}. \quad (47,2)$$

Например, линза с фокусным расстоянием 50 мм имеет оптическую силу в 20 *дптр* (диоптрий).

Обычно не принято сложные оптические системы или объективы и окуляры в приборах характеризовать оптической силой в диоптриях. Характеристика линз в диоптриях принята в очковой

оптике. Очковые линзы находят себе применение и в оптических приборах и в исследованиях различного рода. В этом случае линзы получают наименование диоптрийных.

§ 48. ФОРМУЛА УГЛОВ

Точка A расположена на оптической оси системы с главными плоскостями HH' (рис. 62). Ее изображением является точка A' .

Установим зависимость между углами α и α' .

Из рис. 62 следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{h}{a'}$$

Из этих выражений найдем a и a' и подставим в формулу (44,7). Получим

$$\frac{f \operatorname{tg} \alpha}{h} + \frac{f' \operatorname{tg} \alpha'}{n} = 1.$$

Рис 62 К выводу формулы углов тонкой системы

Разделив все члены последнего уравнения на f' и подставив формулу (47,1), получим

$$\operatorname{tg} \alpha' = -\frac{f}{f'} \operatorname{tg} \alpha + h \Phi,$$

или в общем случае

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = -\frac{f_k}{f'_k} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,1)$$

В этом выражении отношение фокусных расстояний заменим, воспользовавшись уравнением (13,13), отношением показателей преломления

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,2)$$

Если оптическая система находится в однородной среде, например в воздухе, то $n_k = n_{k+1}$ и формула (48,2) принимает общеизвестный вид

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k. \quad (48,3)$$

Величина h_k определяется по формуле (13,19), т. е.

$$h_{k+1} = h_k - \operatorname{tg} \alpha_{k+1} d_k. \quad (48,4)$$

§ 49. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ДВУХ СИСТЕМ

Две системы с оптическими силами Φ_1 и Φ_2 расположены на одной оптической оси OO' на расстоянии d друг от друга (рис. 63).

Общее фокусное расстояние обеих систем f' называется *эквивалентным фокусным расстоянием*.

В соответствии с формулой (12,1) имеем

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_3}{h_1}. \quad (49,1)$$

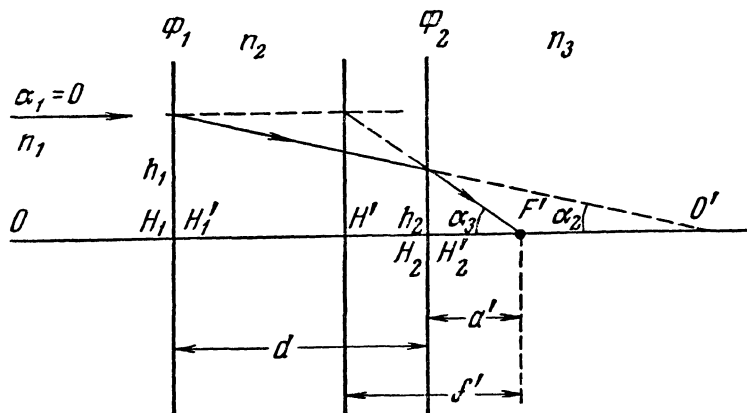


Рис. 63. К выводу формулы оптической силы двух систем

Так как $\alpha_1 = 0$, то, применяя формулу углов (48,2) и формулу высот (48,4), будем иметь

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = h_1 \Phi_1$$

и

$$h_2 = h_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 d = h_1 (1 - \Phi_1 d) \quad (49,2)$$

и далее с учетом $n_3 = 1$,

$$\operatorname{tg} \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \operatorname{tg} \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = n_2 h_1 \Phi_1 + h_1 (1 - \Phi_1 d) \Phi_2. \quad (49,3)$$

Подставив последнее выражение в уравнение (49,1), получим основное уравнение

$$\Phi = n_2 \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (49,4)$$

Если каждая оптическая система находится в однородной среде, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2. \quad (49,5)$$

Расстояние от системы до точки заднего фокуса найдем по формуле

$$a' = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \alpha_3}.$$

Подставив в последнюю формулу выражения (49,2) и (49,3), получим

$$\alpha' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi}. \quad (49,6)$$

Пример 22. Определить воздушный промежуток между двумя линзами с фокусными расстояниями 40 мм, если необходимо получить эквивалентное фокусное расстояние системы из этих двух линз в 25 мм. Дано: $f' = 25$ мм; $f_1' = f_2' = 40$ мм.

Решение. Из формулы (47,1) получим

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{f_1'} = 0,025 \quad \text{и} \quad \Phi = \frac{1}{f'} = 0,04.$$

Из выражения (49,5) следует

$$d = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi}{\Phi_1 \Phi_2} = 16 \text{ мм.}$$

§ 50. НАКЛОННЫЕ ПЛОСКОСТИ ПРЕДМЕТОВ И ИЗОБРАЖЕНИИ

Бесконечно тонкая оптическая система с оптической осью PP' представлена в виде двух слившихся вместе главных плоскостей H и H' (рис. 64).

Плоскость предметов AB наклонена к главной плоскости на угол φ_p , а плоскость изображений $A'B'$ — к главной плоскости на угол φ_t . Требуется доказать, что $A'B'$ есть изображение AB .

Наклонная плоскость предметов отстоит от системы по оптической оси на расстоянии $OP = -a$, а плоскость $A'B'$ — на расстоянии $OP' = a'$. Точки P и P' являются точками сопряженными. Из точки A направим в оптическую систему два луча, один через

главную точку O , который пройдет через систему без преломления в направлении OA' , а второй — через точку P по направлению AN . Последний луч после преломления пойдет по направлению NP' . Оба эти луча пересекаются в точке A' , следовательно, точки A и A' есть точки сопряженные. Аналогично найдем и изображение точки B . Точки B и B' также оказываются сопряженными. Значит и весь отрезок $A'B'$ со-

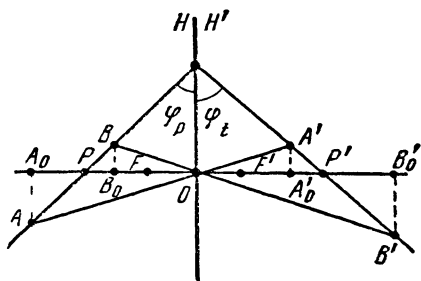


Рис. 64. Плоскость предметов наклонена к оптической оси

пряжен отрезку AB . Отсюда следует, что обе сопряженные плоскости предметов и изображений всегда пересекают главные плоскости объектива в направлении N , перпендикулярном чертежу. Как видно из рис. 64, существует зависимость

$$\operatorname{ctg} \varphi_t = -\frac{a \operatorname{ctg} \varphi_p}{a'}, \quad (50,1)$$

или

$$\operatorname{ctg} \varphi_p = -\beta \operatorname{ctg} \varphi_t. \quad (50,2)$$

Если ординатой точки B является $\overline{PB} = y$, то ординатой точки изображения B' служит отрезок $\overline{B'A'} = y'$, величина которого определяется выражением

$$y' = \frac{a' y \cos \varphi_p}{\cos \varphi_t (a + y \sin \varphi_p + y \cos \varphi_p \operatorname{tg} \varphi_t)}, \quad (50,3)$$

а абсцисса x' точки изображения в плоскости, совпадающей с плоскостью изображения, при условии, что абсциссой предмета в плоскости предмета (в плоскости рисунка $x=0$ и $x'=0$) является x , находится по формуле

$$x' = \frac{y' x \cos \alpha_t}{y \cos \varphi_p}. \quad (50,4)$$

Из рис. 64 следует, что в пределах плоскости изображения $A'B'$ существуют различные линейные увеличения, наибольшее по направлению B' , и наименьшее по направлению A' , перпендикулярные плоскости чертежа.

Обозначив $OA_0 = -a_1$ и $OB_0 = -a_2$, а также $OA_0' = a_1'$ и $OB_0' = a_2'$, запишем

$$\beta_{\text{мин}} = \frac{a_1'}{a_1}, \quad (50,5)$$

$$\beta_{\text{макс}} = \frac{a_2'}{a_2}. \quad (50,6)$$

Зная величину предмета AB (или PB) и угол наклона плоскости предметов φ_p , нетрудно определить a_1 и a_2 , а затем по формуле (44,8) найти a_1' и a_2' .

Наклонные плоскости предмета и изображения встречаются в фототрансформаторах, применяемых с целью исправления перспективных искажений на фотографических снимках, возникающих из-за наклона фотокамеры в момент фотографирования. Применяются фототрансформаторы и для аффинных преобразований оптических изображений.

§ 51. АНАМОРФОЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Оптические системы круговой симметрии позволяют получать изображения, пропорциональные по величине фокусному расстоянию или линейному увеличению в пределах всей площади изображения. С подобными оптическими системами в виде линз, объек-

тивов и окуляров и приходится чаще всего встречаться в обычных оптических приборах. Однако практика потребовала получать изображения непропорциональные в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Достаточно привести пример с проблемой освещения щели любого спектрального прибора. Щель обычно имеет

весьма малую ширину (сотые доли миллиметра) и относительно большую длину (несколько миллиметров). Проектирование на эту щель изображения светового тела источника света обычными средствами приводит к большим потерям световой энергии, так как световое тело имеет толщину, значительно превосходящую ширину щели, а длина светового тела меньше щели. В результате большая часть изображения светового тела ложится на непрозрачную часть щели и не используется.

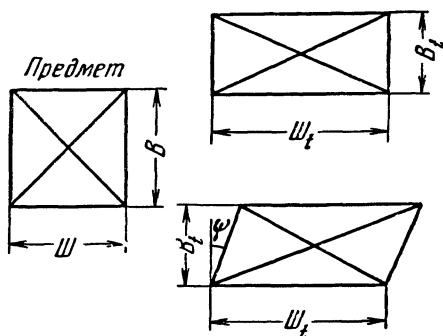


Рис 65 Виды трансформированных изображения

Применением оптических систем с цилиндрическими линзами или особых приемов с обычными системами круговой симметрии удастся получать разномасштабные изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Процесс подобного непропорционального репродуцирования оптического изображения называется *трансформированием*, а оптические системы, позволяющие получать масштаб изображения, различный в двух взаимно перпендикулярных направлениях, называются *анаморфозными*.

Трансформирование изображения обычно производят по высоте и ширине. Обозначим отношение высоты трансформированного изображения B_t к высоте самого предмета B через K_B — *коэффициент высоты*

$$K_B = \frac{B_t}{B}, \quad (51,1)$$

а отношение ширины трансформированного изображения $Ш_t$ к ширине самого предмета $Ш$ через $K_{Ш}$ — *коэффициент ширины* (рис. 65).

$$K_{Ш} = \frac{Ш_t}{Ш}. \quad (51,2)$$

Отношение коэффициента ширины к коэффициенту высоты назовем *коэффициентом анаморфирования* (коэффициент трансформирования)

$$A = \frac{K_{Ш}}{K_B}. \quad (51,3)$$

Наклонное (ромбовидное) изображение также является одним из видов трансформированного. Наклон изображения характеризуется угловым отклонением ψ средней осевой вертикальной линии предмета

Известно много методов для получения трансформированного изображения. На рис 66 схематически показаны различные мето-

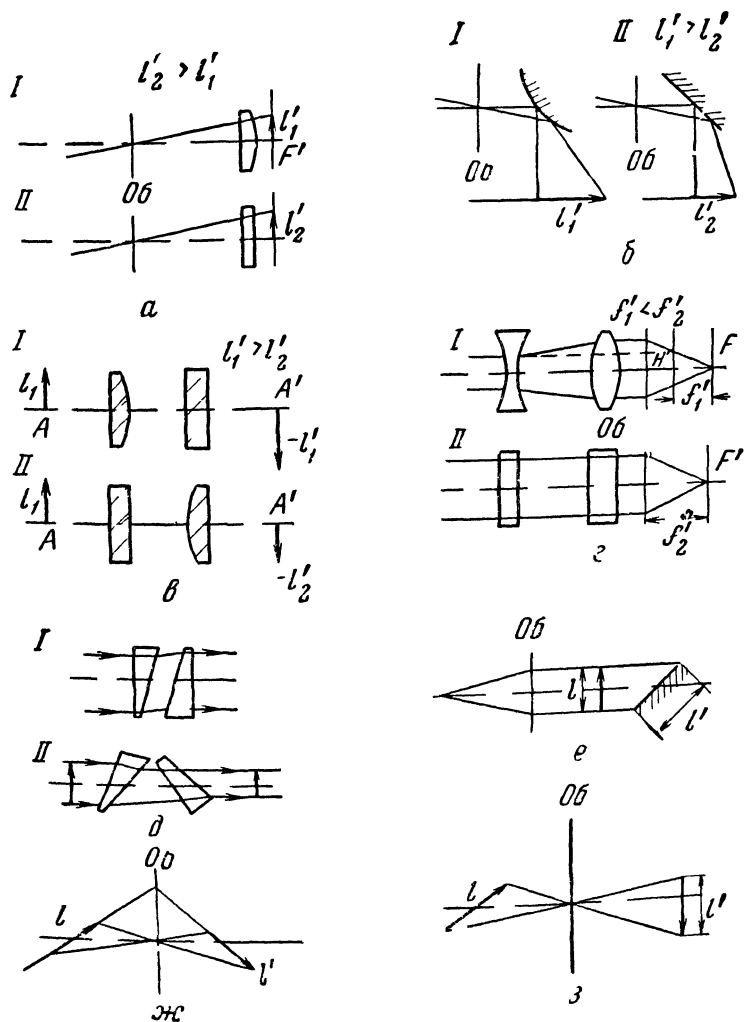


Рис 66 Получение трансформированных изображений а — метод преломляющей цилиндрической поверхности, б — метод отражающей цилиндрической поверхности, в — метод цилиндрического объектива — анаморфота, г — метод цилиндрической афокальной насадки, д — призмный метод, е — теневой метод, ж — оптический метод (двух-этапный), з — ракурсный метод (двухэтапный)

ды, нашедшие себе применение в практике трансформирования оптического изображения.

Если перед плоскостью предметов или плоскостью изображений (рис. 66, *a*) поместить цилиндрическую линзу, то действие цилиндрической линзы в двух взаимно перпендикулярных направлениях будет не одинаковым. В одном из них (*I*) как бы действует обычная линза, а в другом (*II*) плоскопараллельная пластина, в результате изображения l_1' и l_2' оказываются неодинаковыми при одинаковых l_1 и l_2 , не показанных на рисунке. Изображения l_1' и l_2' оказываются, строго говоря, не в одной плоскости, но достаточно резкими для практического использования, так как смещение плоскостей изображения относительно друг друга мало, а пучки лучей достаточно узкие.

Аналогичное действие возникает и при применении отражающей цилиндрической поверхности (рис. 66, *b*).

Если объектив, проектирующий предмет l_1 (рис. 66, *в*), составить надлежащим образом из двух цилиндрических линз, то в плоскости изображения A' изображения l_1' и l_2' будут по величине различными. Первая линза в направлении *I* действует как обычная сферическая линза, а в направлении *II* она действует как плоскопараллельная пластина; в перпендикулярном направлении *II* вторая линза действует как обычная сферическая линза, а в направлении *I* — как плоскопараллельная пластина. Цилиндрический объектив применяется при звуковоспроизведении с киноплёнки.

Афокальные цилиндрические приставки (рис. 66, *г*) по системе Кретьена нашли себе применение в широкоэкранный кинематографе как для съёмки кинофильмов, так и для проекции: они состоят из двух цилиндрических линзовых компонентов, первого — отрицательного и второго — положительного. В направлении *I* они составляют телескопическую систему, а в направлении *II* действуют как плоскопараллельные пластины.

Если фокусное расстояние первого компонента приставки $f_{I'}$, а второго — $f_{II'}$, то коэффициент анаморфозы приставки определится выражением

$$A = - \frac{f_{I'}}{f_{II'}}. \quad (51,4)$$

Афокальная цилиндрическая система приставляется к обычному киносъёмочному объективу и укорачивает его фокусное расстояние, а во взаимно перпендикулярном направлении она не изменяет фокусного расстояния объектива. Таким образом, при съёмке f_1' в направлении *I* меньше f_2' в направлении *II* и

$$f_1' = f_2' A. \quad (51,5)$$

В кинематографии большей частью применяют при съёмке $A=0,5$. При проекции аналогичная, но другая система пристав-

ляется к обычному кинопроекционному объективу, положительным компонентом к объективу; тогда при проекции $A=2$, а в результате на экране масштаб изображения в двух взаимно перпендикулярных направлениях будет одинаковым. При киносъемке происходит сжатие изображения по горизонтали, а при проекции — расширение. Тем самым удастся на обычной нормальной 35-миллиметровой киноплёнке разместить изображение, которое в обычных условиях потребовало бы 70-миллиметровой киноплёнки.

Клин (см. рис. 16) позволяет получать трансформированное изображение, но один клин изменяет направление пучка, а его трансформирующее действие невелико. Применение двух клиньев (рис. 66, д) дает возможность сохранить параллельными входящий и выходящий световые пучки лучей и усилить трансформирующее действие. Подобного рода клиновые системы нашли применение и как системы для проекции, вместо цилиндрических афокальных приставок, и как основная часть фотографического репродукционного объектива.

Обычные оптические системы круговой симметрии также позволяют получать трансформированные изображения. Простейшим способом является трансформирование в параллельном пучке лучей (рис. 66, е). Если на пути параллельного пучка, полученного с помощью любого объектива, поставить полупрозрачный негатив, то на экране получится трансформированное теневое изображение, пропорциональное косинусу угла наклона экрана.

Наклонные плоскости предмета и изображения (рис. 66, ж) позволяют получить изображение квадратного предмета в виде трапеции. Если полученное трапециевидное изображение снова установить на наклонную плоскость предметов и децентрировать его, то на наклонной плоскости изображения можно получить изображение в виде прямоугольника. Подобный метод, позволяющий получать на обоих этапах съемки резкие изображения, назван *оптическим*.

Расположение на каждом из этапов съемки плоскости изображения, перпендикулярной оптической оси, так же, как и в оптическом методе, позволяет получать трансформированные правильные изображения. На этой плоскости (рис. 66, з) располагается не само изображение, а его ракурс, в связи с чем метод и получил наименование *ракурсного*. Применение узких пучков лучей и небольшого по высоте поля зрения позволило получать практически годные изображения, поэтому этот метод нашел себе применение в полиграфии, картографии и фотографии.
