

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

§ 22. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА

С помощью оптических приборов человек может изменять масштаб и освещенность изображений предметов, а также изменять их цвета. Однако оптические системы не позволяют безгранично увеличивать пределы и возможности наблюдения. Прежде всего, оправы оптических деталей ограничивают прохождение пучков лучей в прибор, а размеры изображения определяются возможностями оптической системы образовывать хорошее или удовлетворительное по резкости изображение. Главными оптическими характеристиками приборов являются: 1) увеличение (масштаб изображения), 2) освещенность изображения (светосила), 3) поле зрения.

Масштаб изображения зависит от фокусного расстояния системы или от расстояния между предметом и системой. *Освещенность изображения* зависит от яркости предмета, от диаметров диафрагм, ограничивающих светопропускание, и от потерь света в приборе. *Поле зрения* ограничивается размерами диафрагм и величиной достаточно резкого изображения.

§ 23. ВИДИМОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ

Видимым увеличением называется отношение тангенса угла, под которым глаз наблюдателя видит изображение, образованное оптической системой, к тангенсу угла, под которым предмет виден невооруженным глазом (рис. 20):

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \gamma'}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (23,1)$$

Если это отношение положительно, то оптическая система образует прямое изображение. На это указывает одинаковость зна-

ков γ и γ' . Перевернутое (обратное) изображение оптической системы характеризуется различными по знаку углами γ и γ' , следовательно, и величина видимого увеличения будет отрицательна. Однако на практике пренебрегают знаком видимого увеличения и оно всегда считается положительным, а вид изображения, прямое или обратное, оговаривается особо.

Глаз наблюдателя (рис. 20), помещенный в точку B , видит предмет l под углом γ , а изображение l' этого предмета, образованное оптической системой, наблюдает с расстояния k' под углом γ' . При положении предмета в бесконечности

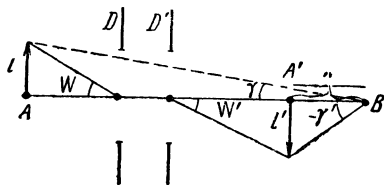


Рис. 20. К выводу формулы видимого увеличения

$$l' = f' \operatorname{tg} \omega',$$

но одновременно

$$l' = k' \operatorname{tg} \gamma'.$$

Если оптическая система расположена в однородной среде и $\omega \cong \omega'$, а угол γ практически мало отличается от ω , тогда

$$f' \operatorname{tg} \gamma = k' \operatorname{tg} \gamma'$$

и

$$\Gamma = \frac{f'}{k'}. \quad (23,2)$$

Последнее уравнение указывает на условие *естественной перспективы*. Чтобы $\Gamma=1$ (или $\Gamma=-1$), k' должно быть равным f' , т. е. при наблюдении снимка необходимо помещать глаз перед снимком на расстоянии, равном фокусному расстоянию съемочного объектива.

Для фотографических объективов вместо видимого увеличения применяют масштаб изображения. Масштаб изображения определяется отношением фокусного расстояния объектива к расстоянию от объектива до предмета. Масштаб изображения принято обозначать следующим образом: 1 : 10 000, 1 : 25 000 и т. д.

Для других оптических систем, например для репродукционных объективов, проекционных систем и т. п., вместо видимого увеличения рассматривается отношение величины изображения к величине предмета. Для многих систем в таких случаях формула линейного увеличения заменяет формулу видимого увеличения.

§ 24. ОСНОВНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ

Светом, или *оптическим излучением*, называется электромагнитное излучение, характеризующееся длинами световых волн, расположенными в диапазоне от 0,01 нм до 1 см.

Та часть излучения, которая воспринимается глазом человека, называется *видимым* излучением. Глаз способен воспринимать свет в диапазоне длин волн от 380 до 770 нм.

Источник света испускает в пространство энергию излучения, которая оценивается и количественно и качественно. Основными фотометрическими величинами видимого излучения являются: сила света (I), яркость (B), световой поток (F), освещенность (E), светность (R).

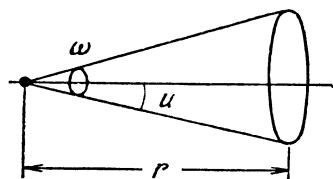


Рис. 21. Телесный угол

Основной единицей фотометрических величин является единица силы света 1 свеча ($св$). Все остальные световые единицы являются производными от основной величины.

Световым эталоном силы света служит так называемый полный излучатель в виде специального сосуда с отверстием, которое светится как черное тело. В этом сосуде имеется блок из платины, которая разогревается до температуры затвердевания. Отверстие этого сосуда рассматривается как плоская площадка, дающая 60 $св$ с 1 $см^2$, или, точнее, одну свечу с площади $16,667 \cdot 10^{-7} м^2$ в перпендикулярном к ней направлении, причем сила света рассматривается на таких расстояниях, на которых размерами площади излучателя можно пренебречь. Достоинством такого источника света является его хорошая воспроизводимость. Эталон силы света хранится во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии.

Яркостью B называется поверхностная плотность силы света в заданном направлении I_i , равная отношению силы света к площади проекции светящейся поверхности S_i на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:

$$B = \frac{I_i}{S_i}, \quad (24,1)$$

или, с учетом угла наклона i , светящейся поверхности к направлению луча:

$$B = \frac{I_i}{S \cos i}, \quad (24,2)$$

где S — площадь светящейся поверхности.

Единица яркости нит ($нт$) — это яркость предельно малой, одинаково во всех точках светящейся поверхности, для которой отношение силы света (в свечах) к ее площади (в квадратных метрах) равно единице, причем яркость и сила света определяются в перпендикулярном направлении к этой поверхности:

$$1 \text{ нт} = \frac{k \cdot 1 \text{ св}}{k \cdot 1 \text{ м}^2},$$

где k — произвольный предельно малый множитель.

Наиболее часто встречающиеся яркости приведены в табл. 3 в приложении.

Под световым потоком F понимают среднюю мощность оптического излучения за время, значительно большее периода световых колебаний. Источник света с силой I св излучает в окружающее пространство световой поток, равный

$$F_0 = 4\pi I. \quad (24,3)$$

Здесь 4π есть полный телесный угол ω .

Если световой поток ограничен конусом, в вершине которого расположен источник света, а основанием является освещаемая площадка или отверстие в оптической системе, то

$$F = \omega I, \quad (24,4)$$

где ω — телесный угол (рис. 21), вырезающий из центра сферы с радиусом кривизны r на ее поверхности некоторую площадь S :

$$\omega = \frac{S}{r^2}. \quad (24,5)$$

Единицей телесного угла является ст е р а д и а н (*стер*). Одним стерадианом называется телесный угол, вырезающий из центра сферы на ее поверхности с радиусом кривизны r площадь S , равную квадрату радиуса этой сферы.

Зависимость между телесным углом ω и плоским u определяется соотношением

$$\omega = 2\pi (1 - \cos u). \quad (24,6)$$

Единицей светового потока является лю мен (*лм*). Один люмен равен световому потоку, испускаемому источником света с силой в 1 св в пределах телесного угла в 1 *стер*

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ стер} \times 1 \text{ св}.$$

Освещенностью поверхности E называют поверхностную плотность светового потока излучения, равную отношению падающего на поверхность светового потока к площади освещаемой поверхности S :

$$E = \frac{F}{S}. \quad (24,7)$$

Единицей освещенности является лю к с (*лк*). Один люкс есть освещенность поверхности в 1 м^2 , на которую равномерно распределяется световой поток в 1 *лм*:

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} : 1 \text{ м}^2.$$

Подставим (24,4) и (24,5) в (24,7), тогда получим

$$E = \frac{I}{r^2}. \quad (24,8)$$

Если освещаемая площадка расположена под углом i к направлению луча, то

$$E = \frac{I \cos i}{r^2} \quad (24,9)$$

(закон косинусов для освещенности поверхности).

Между освещенностью и яркостью одной и той же идеально рассеивающей поверхности существует зависимость

$$B = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (24,10)$$

где ρ — коэффициент отражения освещаемой поверхности. В кинематографии яркость освещенной поверхности (например, экрана) принято определять в апостильбах ($асб$). Один апостильб есть яркость белой поверхности, на которой создана освещенность в один люкс ($1 \text{ асб} = 0,318 \text{ нт}$).

Светностью R называется поверхностная плотность светового потока излучения, равная отношению светового потока к площади светящейся поверхности:

$$R = \frac{F\rho}{S}. \quad (24,11)$$

Между падающим на поверхность световым потоком и отраженным E_ρ существует зависимость

$$F_\rho = \rho F, \quad (24,12)$$

где ρ — коэффициент отражения.

Единицей светности является люмен на квадратный метр — это светность одинаково во всех точках светящейся плоской поверхности, которая испускает в одну сторону световой поток в один люмен с площади в один квадратный метр:

$$1 \text{ лм/м}^2 = 1 \text{ лм} : 1 \text{ м}^2.$$

Пример 12. Определить яркость кратера дуговой лампы прожектора, если сила света по оси равна 100 000 свечей, а диаметр кратера равен 12 мм.

Решение. Площадь светового тела

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 0,000113 \text{ м}^2$$

и, далее,

$$B = \frac{I}{S} = 8,85 \cdot 10^8 \text{ нт}.$$

Пример 13. Определить яркость листа белой бумаги с коэффициентом отражения 0,8, на которой создана освещенность в 200 лк.

Решение. Применив формулу (24,10), получим

$$B = 50,9 \text{ мт.}$$

§ 25. ПОТЕРИ СВЕТА

Световой поток, падающий в оптическую систему, состоящую из преломляющих и отражающих поверхностей, не весь проходит через нее. Яркость пучков лучей, проходящих через преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей, составляющих прибор, ослабляется в связи с тем, что часть световых лучей поглощается массой стекла и отражается при переходе от одной среды к другой. Отношение потока излучения, пропущенного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него, называется *коэффициентом пропускания* τ .

Та часть световой энергии, которая поглощается массой стекла, определяется коэффициентом поглощения α . *Коэффициентом поглощения* называется отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него:

$$\alpha = \frac{F_\alpha}{F} = 1 - \theta', \quad (25,1)$$

где F — начальный поток излучения; F_α — поток излучения, поглощенный данным телом; l — длина пути луча в стекле, выраженная в сантиметрах. Величина θ в оптике получила наименование *коэффициента прозрачности*. Оптическое стекло не является идеальной прозрачной средой. Внутри среды имеются материальные непрозрачные частицы, которые рассеивают свет и вызывают потери его на поглощение. Для современных сортов оптического стекла потеря света на поглощение характеризуется величиной 1% на 1 см хода луча в стекле, следовательно, $\theta = 0,99$.

Часть световой энергии, которая рассеивается на границе преломления или отражения, определяется коэффициентом отражения ρ . *Коэффициентом отражения* называется отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него.

Потери света на отражение и поглощение в линзе схематически показаны на рис. 22.

Коэффициент отражения для случая двух прозрачных сред с идеально полированной поверхностью соприкосновения определяется по известной формуле Френеля

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} + \frac{\text{tg}^2(i - i')}{\text{tg}^2(i + i')} \right]. \quad (25,2)$$

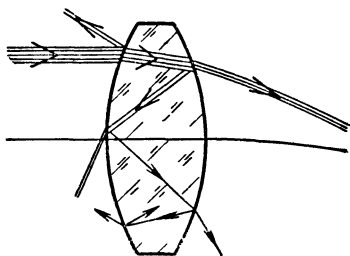


Рис. 22. Схема потерь света в линзе

Если угол падения равен нулю, то в этой формуле синусы и тангенсы углов можно заменить дугами, после чего, используя выражение $ni = n'i'$, получим

$$\rho = \frac{(n' - n)^2}{(n' + n)^2}. \quad (25,3)$$

Коэффициент пропускания для одной поверхности определяется формулой

$$\tau = 1 - \rho. \quad (25,4)$$

Общее пропускание света через оптическую систему, с учетом потерь света на поглощение и отражение, находится путем перемножения коэффициентов пропускания отдельных поверхностей с учетом коэффициентов поглощения, т. е.

$$\tau = \prod_{k=1}^{k=m} (1 - \rho_k) \prod_{k=1}^{k=m+1} \theta_k^l. \quad (25,5)$$

Величина ρ зависит от показателя преломления среды. Так, например, если $1,5 < n < 1,57$, то принимают $\rho = 0,04$, а если $1,57 < n < 1,65$, то $\rho = 0,05$. Для отражающих поверхностей (посеребренных, алюминированных) достаточно принять $\rho = 0,1$.

Тогда можно написать приближенную формулу для подсчета пропускания света в случае отсутствия просветленных поверхностей:

$$\tau = 0,96^{N_1} \cdot 0,95^{N_2} \cdot 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l, \quad (25,6)$$

где N_1 — число преломлений на поверхностях, разделяющих воздух и стекло, с $n < 1,57$; N_2 — число преломляющих поверхностей, разделяющих воздух и стекло, с $n > 1,57$; N_3 — число отражающих поверхностей; l — длина хода луча в сантиметрах в стекле по оптической оси.

Потери света неприятны не только тем, что ослабляют освещенность изображения, но в особенности тем, что снижают контраст изображения. Свет, отраженный от поверхностей, частично возвращается обратно путем отражений от предыдущих поверхностей и, пройдя через поверхности оптической системы, образует вторичные изображения. Если эти вторичные изображения находятся вблизи основного изображения, то они могут настолько его испортить, что основное изображение будет непригодным для использования. Таким образом, свет, отраженный от поверхностей при преломлении, так же как и свет, рассеянный средой стекла, является светом вредным, и борьба с ним имеет важное значение.

Влияние рассеянного света на изображение принято характеризовать коэффициентом светорассеяния (s), под которым принято понимать отношение освещенности образуемого объективом изображения черного предмета (E_T), расположенного на равно-

мерно ярком фоне, к освещенности изображения яркого фона (E_c), т. е.

$$s = \frac{E_T}{E_c}. \quad (25,7)$$

Так, например, современные фотографические объективы имеют $s=0,03 \div 0,04$.

В последнее время удалось значительно повысить прозрачность оптического стекла. В особенности значительные успехи достигнуты в области снижения потерь света на отражение путем просветления поверхностей. *Просветлением оптики* называется процесс уменьшения отражения света от поверхностей оптических деталей. Теоретические разработки сущности снижения потерь света методами просветления принадлежат нашим соотечественникам — академику И. В. Гребенчикову и А. Г. Власову. Просветление заключается в том, что на полированные поверхности оптических деталей наносят весьма тонкие прозрачные пленки. В этих тонких пленках происходит явление интерференции. Теория этого явления так же, как и теория цвета тонких пластинок в отраженном свете, известна из физической оптики. Толщина пленки приближенно определяется по формуле

$$d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4n}, \quad (25,8)$$

где λ — длина волны света, а $k=0; 1; 2; 3$ и т. д.; n — показатель преломления пленки.

Показатель преломления пленки n_2 находится из условия $\rho_1 = \rho_2$, так как необходимо, чтобы яркости обоих интерферирующих пучков были одинаковы. Из формулы (25,3) следует, что

$$\left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \left(\frac{n_0 - n_2}{n_3 + n_2} \right)^2.$$

Преобразуя, получим, что при $n_1 = 1$

$$n_2 = \sqrt{n_3}. \quad (25,9)$$

В практике мы имеем дело со светом широкого спектрального состава, и лучи идут в систему под различными углами поля зрения, поэтому для таких пучков лучей оказывается невозможным полностью уничтожить потери света.

Различные методы, применяемые для просветления оптики, можно разбить на три группы:

1. Химическое взаимодействие стекла с растворами кислот и солей (химический метод).

2. Испарение и конденсация фторидов или других веществ в вакууме (физический метод).

3. Использование легкогидролизующихся растворов (метод гидролизации).

Просветление травлением водными растворами кислот создает прочную пленку и повышает химическую устойчивость стекла. Физическими методами достигаются хорошие результаты по просветлению, но проблема надежного упрочнения слоя еще не решена, в связи с чем применение этих методов не рекомендуется для просветления наружных поверхностей. Просветление на основе использования легкогидролизуемых соединений, в основном на базе ортокремниевой кислоты, создает прочный слой и позволяет применять многослойные пленки с хорошими показателями.

В табл. 1 приведены сравнительные данные результатов просветления различными методами. Коэффициент отражения одной поверхности до просветления находится в пределах от 0,04 до 0,055.

Просветление оптических приборов дает хорошие результаты и широко применяется. Например, просветление одного из фотографических объективов позволило увеличить светопропускание с 39 до 72%. В среднем можно считать, что просветление почти вдвое повышает пропускание света в оптических приборах и, кроме того, резко снижает действие рассеянного паразитного света.

Таблица 1

Метод	Коэффициент отражения в %		
	до просветления	после просветления	
Химический	4,5—5,5	1,7—2,2	
Физический	4,5—5,5	0,4—1,4	
Гидролизация {	однослойный	—	0,8—2,5
	двухслойный	4,5—5,5	1—1,2
	трехслойный	—	0,2—0,6

Внедрение просветления в практику оптического приборостроения позволяет дать новую приближенную формулу коэффициента пропускания света:

$$\tau = 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l \cdot 0,99^{N_4} \cdot 0,98^{N_5}, \quad (25,10)$$

где N_4 — число поверхностей, просветленных физическим методом и методом гидролизации; N_5 — число поверхностей, просветленных химическим методом.

Пример 14. Оптическая система состоит из зеркала с внутренним серебрением, из зеркала с внешним алюминированием, из трех непросветленных линз с показателем преломления $n=1,54$, свободно расположенных в воздухе, и двух ахроматических двухлинзовых склеенных объективов, просветленных химическим методом. Общая толщина оптического стекла по оптической оси со-

ставляет 67 мм (~7 см). Определить коэффициент пропускания света и потери света.

Решение. В нашем случае $N_1=8$; $N_3=1$; $N_5=4$; $l=7$. На основании (25,6) и (25,10) составим формулу

$$\tau = 0,96^{N_1} \cdot 0,9^{N_3} \cdot 0,99^l \cdot 0,98^{N_5},$$

тогда получим

$$\tau = 0,96^8 \cdot 0,9 \cdot 0,99^7 \cdot 0,98^4 = 0,561,$$

т. е. потери составляют 43,9%.

§ 26. ДИАФРАГМЫ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ

Диафрагмами называются непрозрачные экраны, имеющие отверстия для пропускания световых лучей.

Изображение оптической системы образуется при помощи пучков лучей, имеющих конечные размеры. Из каждой точки объектива в пространстве предметов по направлению к оптической системе выходят пучки лучей в пределах весьма больших телесных углов. Но в оптическую систему попадают лишь пучки лучей, ограниченные оправой оптических деталей. Оправы оптических деталей выполняют роль диафрагм.

Если на первую поверхность оптической системы, ограниченную оправой первой оптической детали, упал пучок лучей конечных размеров, то это еще не означает, что весь пучок лучей пройдет через всю оптическую систему. Внутри оптической системы могут существовать оправы других оптических деталей, которые ограничивают пучки световых лучей. Все эти оправы выполняют роль диафрагм. Но, кроме оправ линз и призм, естественно ограничивающих пучок световых лучей, могут быть и специальные диафрагмы. Диафрагмы, как правило, располагаются перпендикулярно оптической оси, а их центры совпадают с оптической осью системы.

Среди многих диафрагм, существующих в оптической системе, имеется одна, наиболее существенным образом влияющая на светопропускание, называемая действующей, или апертурной. *Апертурной диафрагмой* называется такая диафрагма, которая ограничивает осевую и наклонные пучки лучей, проходящие через оптическую систему.

Чтобы в реальной оптической системе отыскать местоположение апертурной диафрагмы, надо определить путь и конечные размеры пучка лучей, проходящего через оптическую систему в меридиональной плоскости. Здесь имеют значение только те лучи, которые действительно проходят через систему и дают изображение.

Найдем положение такой диафрагмы на примере сложной оптической системы из двух линз (рис. 23).

Из точки предмета B на оптическую систему падает пучок лучей сечения LBN , но через оптическую систему проходит только

пучок лучей сечения MVN . Лучи из точки B поступают в систему и выше точки M , но не проходят, так как срезаются задней частью оправы. Из системы могли бы выйти лучи и ниже точки N' , но этих лучей нет, так как их не пропускает передняя часть оправы.

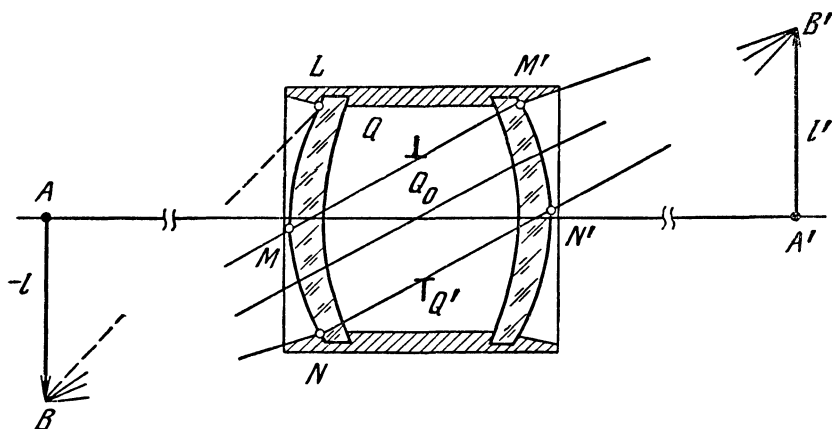


Рис 23 Ход наклонного пучка лучей через оптическую систему

Средний луч проходящего пучка лучей пересекает оптическую ось в точке Q_0 . Этот луч называется главным лучом. Там, где он пересекает оптическую ось, и находится центр действующей, или апертурной диафрагмы. Таким образом, QQ' есть действующая (апертурной) диафрагмы. При уменьшении диаметра диафрагмы диаметр пучка лучей также симметрично уменьшается. Легко видеть, что только в точке Q_0 можно установить такую диафрагму. Диафрагма, поставленная в любое другое место, будет вызывать несимметричное уменьшение количества лучей в пучке.

Всякая диафрагма, поставленная правее точки Q_0 , вызывает срезание верхней части пучка, а диафрагма, поставленная левее точки Q_0 , — срезание нижней части пучка. Пучок лучей, идущий из точки вне оптической оси, называется *наклонным пучком лучей*.

Апертурная диафрагма влияет также и на ограничение лучей осевого пучка. Допустим, что из точки A падает пучок лучей на оптическую систему (рис. 24). Этот пучок лучей проходит через края действующей диафрагмы QQ' . Существует только одно место в оптической системе, в точке Q_0 , где диафрагма одновременно и симметрично влияет на оба пучка лучей: наклонный и осевой. Действительно, если сместим диафрагму QQ' , например, вправо, так, чтобы она не ограничивала осевой пучок лучей, то она будет ограничивать наклонный пучок лучей снизу, а если влево, — то сверху.

Найдем изображение апертурной диафрагмы через переднюю половину оптической системы. Из точки Q как бы выходят влево два луча, после преломления их продолжения пересекаются в a , а два луча, выходящие влево из точки Q' , преломляются так, что их продолжения пересекаются в точке b . Отсюда следует, что ab — есть изображение QQ' . Такое световое отверстие называется *входным зрачком*. Входным зрачком называется отверстие, через которое световые лучи входят в оптическую систему. Оно может быть мнимым и действительным.

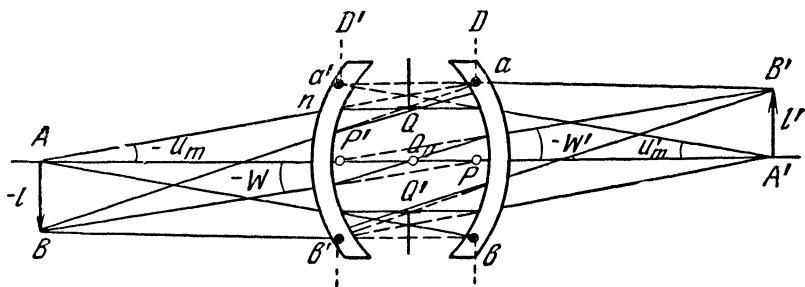


Рис. 24. Апертурная диафрагма

Аналогичным образом два луча из точек Q и Q' , идущие вправо, после преломления в задней половине оптической системы образуют изображение действующей диафрагмы $a'b'$ через заднюю половину системы. Из этого отверстия как бы выходят световые лучи. Оно называется *выходным зрачком*. Выходным зрачком называется отверстие, из которого лучи выходят из оптической системы. Его отличие от других любых отверстий состоит в том, что из этого зрачка одновременно выходят и осевые и наклонные пучки лучей. Первая поверхность (а также и последняя) не удовлетворяет этому условию.

Входной зрачок явился изображением действующей диафрагмы через переднюю половину оптической системы. Точка P — центр входного зрачка, P — изображение точки Q_0 — центра действующей диафрагмы. Выходной зрачок явился изображением действующей диафрагмы через заднюю половину оптической системы. Точка P' — центр выходного зрачка, P' — изображение точки Q_0 — центра диафрагмы. Следовательно, выходной зрачок D' является изображением входного зрачка D через всю оптическую систему.

Диаметр ab входного зрачка ограничивает размеры осевого пучка лучей. Если лучи идут параллельно оптической оси, то диаметр пучка равен диаметру входного зрачка. Если лучи идут из точки A , находящейся на конечном расстоянии от системы, то входной зрачок ограничивает телесный угол лучей. В главном сечении пучка, в плоскости чертежа, угол u_m называется *апертур-*

ным углом в пространстве предметов. Таким же образом угол u'_m называется *апертурным углом в пространстве изображений*. Если лучи выходят из оптической системы параллельно оптической оси, то диаметр пучка лучей равен диаметру выходного зрачка.

Наклонный пучок падает в оптическую систему под некоторым углом ω к оптической оси. Если лучи идут из бесконечно удаленной точки, расположенной вне оптической оси, то с оптической осью все лучи образуют одинаковый угол, называемый *углом поля зрения*.

Если же лучи идут из точки B (рис. 24), находящейся на конечном расстоянии от оптической системы, то все лучи этого пучка образуют с оптической осью различные углы. Угол поля зрения ω в этом случае определяется главным лучом, который направляется в центр входного зрачка.

В пространстве изображения аналогичным образом будем рассматривать углы *поля изображения* ω' . Пользуясь формулами (15,1) и (15,2), найдем линейное увеличение в зрачках:

$$\beta_p = \frac{D'}{D} = \frac{\text{tg } \omega}{\text{tg } \omega'}, \quad (26,1)$$

где D' — диаметр выходного зрачка, а D — диаметр входного зрачка.

Если в плоскости изображения установить материальную диафрагму, то она будет ограничивать размеры изображения. Такая диафрагма называется *диафрагмой поля зрения*, или *полевой*. Ограничивая величину изображения, она тем самым ограничивает и размеры видимого поля зрения. На рис. 24 $A'B'$ есть радиус диафрагмы поля зрения. Диафрагма поля зрения выбирается такой величины, чтобы ограничивать круг резкого изображения, пригодного для использования.

§ 27. ВИНЬЕТИРОВАНИЕ

Для получения равномерной освещенности плоскости изображения, без учета свойств предмета, нужно выполнить два важных условия: 1) угловые величины телесных пучков лучей в каждой точке изображения должны быть одинаковыми; 2) направления осей пучков лучей в каждой точке изображения должны быть одинаковыми.

Оба эти условия практически весьма трудно выполнить. Входной зрачок в оптической системе является одним и тем же основанием световых конусов лучей от различных точек предмета. Очевидно, что телесный угол тем меньше, чем дальше от оптической оси отстоит точка предмета, или, что то же самое, чем больше поле зрения.

При одном и том же выходном зрачке, расположенном вблизи оптической системы, который является основанием выходящего светового конуса лучей, невозможно получить одинаковые направления пучков лучей в различных точках изображения.

Рассмотрим влияние оправ линз на неравномерность освещенности изображения. Оправы линз выполняют роль диафрагм. Чем больше протяженность оптической системы, тем большая возникает опасность потери света из-за диафрагмирования оправками линз. На рис. 23 показан объектив, в который проходит узкий наклонный пучок лучей. Основание этого пучка на первой поверхности оптической системы значительно меньше общего светового отверстия на этой же поверхности.

Больше всего на уменьшение светового потока влияют оправы наружных линз. Допустим, из точки A_1 (рис. 25) во входной зрачок BB' падает пучок лучей. Перед зрачком находится диафрагма QQ' , которая не влияет на прохождение этих лучей. Если лучи будут попадать из точки A_2 , то эта диафрагма будет задерживать часть лучей. Из точки A_3 будут проходить только лучи, определяемые в главном сечении углом $B'A_3P$. Легко себе представить, что существуют такие точки в пространстве предметов, выше точки A_3 , из которых лучи из-за диафрагмы QQ' совсем не будут попадать во входной зрачок BB' . В результате этого наблюдается явление постепенного затенения пучков лучей, поступающих в оптическую систему, вследствие срезания световых лучей оправками линз, называемое *геометрическим виньетированием*. Борьба с этим явлением путем увеличения диаметра линз не всегда возможно.

Во-первых, возникают конструктивные трудности из-за необходимости значительно увеличивать толщины линз, а во-вторых, возникают аберрационные трудности из-за необходимости исправлять аберрации широких наклонных пучков лучей.

Виньетирование является бичом многих оптических систем, а в особенности фотографических объективов, перископов и др., отличающихся значительным количеством линз. Вследствие виньетирования сечение наклонного пучка лучей всегда значительно меньше сечения осевого пучка лучей (вдвое меньше в обычных фотографических объективах и вчетверо — в сложных телескопических системах).

Блестяще разрешил проблему виньетирования проф. М. М. Рушинов, применив названное им «абerrационное виньетирование» в конструкциях сверхширокоугольных фотографических объективов «Руссар».

На рис. 26 AB есть апертурная диафрагма. Через ее отверстие проходит осевой пучок диаметром $ab = D$ и наклонный в том же сечении, равный $a'b'$, причем $a'b' > ab$. Следовательно, в этом случае в наклонных пучках световых лучей значительно больше, чем в обычном объективе (рис. 23). Вследствие этого удалось значительно увеличить светопропускание к краям изображения и осуществить впервые во всем мире сверхширокоугольные аэросъемочные объективы с полем зрения $2\omega = 140^\circ$.

Обозначим половину диаметра параллельного пучка лучей, идущих из точки на оптической оси, через h , а идущих из точки

вне оптической оси, через m . На рис. 26 h и m будут соответствовать

$$\frac{ab}{2} = h \quad \text{и} \quad \frac{a'b'}{2} = m.$$

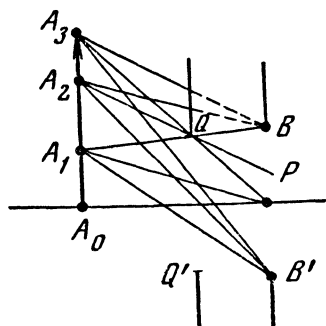


Рис. 25. Виньетирование

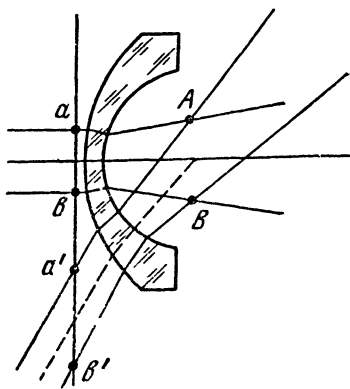


Рис. 26. Аберрационное виньетирование

Отношение этих отрезков и есть коэффициент виньетирования K_w :

$$K_w = \frac{m}{h}. \quad (27,1)$$

§ 28. СВЕТОСИЛА

Светосилой оптического прибора называется отношение освещенности изображения, создаваемого данной системой, к яркости изображаемого предмета. Если в частном случае принять яркость предмета постоянной величиной, то освещенность предмета E' и будет параметром, определяющим светосилу оптической системы.

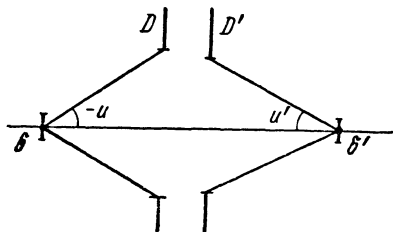


Рис. 27. К выводу формулы светосилы

Если изображение рассматривается глазом человека, то в оценке его освещенности имеется фактор субъективности. В этом случае в глазу возникает световое раздражение, психо-физиологическое восприятие которого называется *субъективной яркостью*. Если же изображение фиксируется светочувствительным фотографическим слоем или поверхностью фотоэлектрического или другого светоприемника,

то освещенность его оценивается объективно и может быть определена в люксах.

В оптическую систему от малого элемента площади предмета δ (рис. 27) падает пучок света в пределах телесного угла, опирающегося на входной зрачок. Световой поток dF от малого элемента δ равномерно светящейся поверхности с яркостью B , входящий во входной зрачок оптического прибора, определяется, как известно, выражением

$$dF = \delta \pi B \sin^2 u,$$

где u — апертурный угол в пространстве предметов. Аналогично можно написать

$$dF' = \delta' \pi B' \sin^2 u',$$

где u' — апертурный угол в пространстве изображений.

Известно, что если предмет с яркостью B расположен в оптической среде с показателем преломления n , а изображение с яркостью пучка B' в среде с показателем преломления n' , то яркость пучка зависит от соотношения показателей преломления и от коэффициента пропускания света τ и определяется выражением

$$B' = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B. \quad (28,1)$$

Освещенность изображения находится как отношение светового потока dF' , прошедшего через систему, к площади изображения δ' :

$$E' = \left(\frac{n'}{n_1} \right)^2 \pi B \tau \sin^2 u'. \quad (28,2)$$

Это основная формула для определения освещенности изображения.

Если предмет расположен в бесконечности, а оптическая система в однородной среде, например в воздухе, то $n_1 = n'$, а угол u' может быть заменен отношением половины диаметра зрачка входа к фокусному расстоянию, тогда

$$E' = \frac{\pi B \tau}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2. \quad (28,3)$$

Отношение диаметра входного зрачка D к фокусному расстоянию f' называется *относительным отверстием*. Квадрат относительного отверстия называется *геометрической светосилой*, а произведение коэффициента пропускания света τ на геометрическую светосилу называется *физической светосилой*.

Величина, обратная относительному отверстию, называется *знаменателем значения геометрического относительного отверстия* (диафрагменное число):

$$n = \frac{f'}{D}. \quad (28,4)$$

Относительное отверстие принято обозначать следующим образом: 1:4,5; 1:6,3 и т. д. Соответствующими знаменателями значения геометрического относительного отверстия являются: $n = 4,5$; $n = 6,3$ и т. д.

Пример 15. Определить освещенность изображения Луны в фокальной плоскости фотографического объектива с фокусным расстоянием 50 мм и отверстием 10 мм, если $\tau = 0,65$.

Решение. Яркость Луны 2500 нт, $D = 0,01$ м, $f' = 0,05$ м, $\pi = 3,14$ и $\tau = 0,65$.

Применив формулу (28,3), получим

$$E' = 51 \text{ лк.}$$

§ 29. ОСВЕЩЕННОСТЬ ПО ПОЛЮ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Найдем освещенность по полю изображения, если известна освещенность в центре поля. Оптическая система представлена в виде выходного зрачка диаметром D' . Яркость предмета постоянна. Расстояние от выходного зрачка до плоскости изображения также остается без изменения. Требуется определить зависимость в освещенности точек изображения, удаленных от оптической оси на различные расстояния.

Световой поток F_0' распространяется внутри телесного угла ω_0 и освещает бесконечно малый элемент площади изображения δ_0' на оптической оси системы (рис. 28). Аналогичным образом световой поток F_w' распространяется внутри телесного угла ω_w и освещает элемент площади изображения δ_w' в точке K' , удаленной от оптической оси.

Эти элементы отстоят от выходного зрачка на различных расстояниях, и освещенность их, как известно из физики, обратно пропорциональна квадратам расстояний, но сами расстояния пропорциональны косинусу угла наклона главного луча w' , а площадь выходного зрачка, так же как и элемент изображения, наклонена к главному лучу под тем же углом w' .

Следовательно, освещенность элемента изображения в точке, удаленной от оптической оси, пропорциональна косинусу четвертой степени угла поля изображения по отношению к освещенности в центре поля изображения:

$$E_w' = E_0' \cos^4 w'. \quad (29,1)$$

Эта общеизвестная формула справедлива в случае малого диаметра выходного зрачка и при отсутствии виньетирования. Обычно выходные зрачки достаточно велики, поэтому формула косинусов четвертой степени является формулой приближенной.

Учет коэффициента виньетирования K_w для данного наклона пучка лучей приводит к формуле:

$$E_w' = E_0' K_w \cos^4 w'. \quad (29,2)$$

Величина K_w может быть и больше единицы, являясь переменной в пределах рассматриваемого поля изображения. Если этому коэффициенту дать значение обратной величины косинуса угла поля изображения, то тогда освещенность изображения будет пропорциональна косинусу третьей степени. Для такого частного случая справедлива формула

$$E'_w = E'_0 \cos^3 w'. \quad (29,3)$$

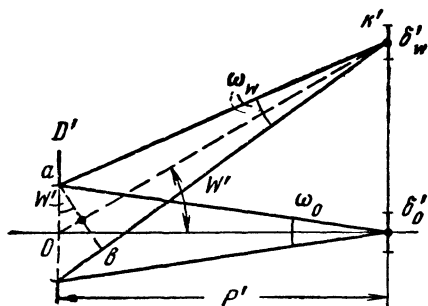


Рис. 28. Освещенность по полю изображения

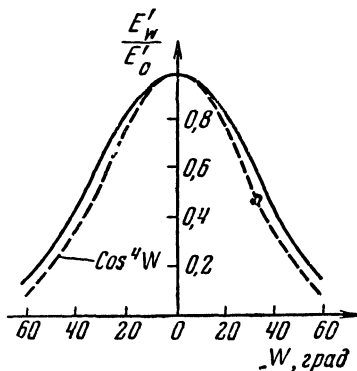


Рис. 29. Характеристическая кривая падения освещенности изображения объектива «Руссар-25», 1 : 6,3; $2w=110^\circ$

Подобного рода светопропускание пучков лучей было осуществлено по идее М. М. Русинова в сверхширокоугольных объективах «Руссар».

Падение освещенности принято характеризовать графиком. Для его построения откладывают по оси ординат отношения освещенности точек изображения, удаленных от центра, к освещенности в центре, а по оси абсцисс — углы поля зрения (рис. 29).

§ 30. ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

Поле зрения называется та часть пространства предметов, которая видна или изображается с помощью данной оптической системы.

Поле зрения оптических систем принято характеризовать в угловой мере, если наблюдаются значительно удаленные предметы, и в линейной мере, если наблюдаются близко расположенные предметы.

Поле зрения телескопических систем и фотографических объективов характеризуется в угловой мере. Например, поле зрения полевого бинокля $2w=12^\circ$, а поле зрения фотообъектива «Ю-8», $2w=45^\circ$. Поле же зрения репродукционных и проекционных объ-

ективов определяется и в угловой мере (например, $2\omega=45^\circ$), и в линейной (например, 70×80 см). Поле зрения микроскопов определяется в линейной мере (например, $2l=0,5$ мм).

Поле зрения ограничивается *диафрагмой поля зрения*, или *левой диафрагмой*. Диафрагма обычно имеет форму круга в наблюдательных приборах, работающих совместно с глазом человека, и форму прямоугольника в фотографирующих.

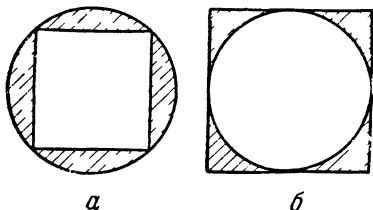


Рис 30 Круг полезного изображения

Размер диафрагмы определяется:

1. Величиной резкого изображения, заметно неухудшенного аберрациями, пригодного для практических целей.
2. Величиной изображения с достаточной освещенностью, уменьшенной виньетированием и действием закона четвертой степени косинуса угла поля изображения.

Созданное таким образом поле изображения называется полезным. Вне установленного поля зрения оптическая система образует изображение, практически непригодное для использования.

Центрированная оптическая система круговой симметрии дает изображение в виде круга. Существует два метода использования полезного круга изображения. Тот или иной формат или вписывается в круг (рис. 30, а), или описывается около круга (рис. 30, б). В последнем случае полезный круг изображения используется полностью и изображение имеет форму квадрата. Вне этого круга, на уголках квадрата изображения, качество изображения значительно понижено как по резкости, так и по световой интенсивности. Такой принцип использования полезного изображения в настоящее время используется в некоторых аэрофотоаппаратах.

§ 31. ГЛУБИНА ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА

Глубиной изображаемого пространства называется измеренное вдоль оптической оси расстояние между точками пространства предметов, определяющим границы его резкого изображения оптической системой в данной плоскости. Различают глубину в пространстве предметов (глубина изображаемого пространства) и глубину в пространстве изображений (глубина резкости). В основе их лежат одинаковые представления, а именно: способность глаза человека видеть изображения, образованные кружками рассеяния, в виде резких точечных изображений.

Рассмотрим оптическую систему, изображенную в виде зрачков входа и выхода (рис. 31).

Допустим, что плоскость M' оптически сопряжена с плоскостью M . Точки P_1 и P_2 проектируются на плоскость изображения

M' в виде кружков рассеяния δ' . Если глаз человека, имеющий определенную разрешающую способность, не сможет увидеть кружки рассеяния из-за их малости, то вместе с предметами, расположенными в плоскости M , он будет видеть резко точки P_1 и P_2 . Глубина в пространстве предметов определяется формулой

$$T = T_1 + T_2, \quad (31,1)$$

где T_1 — передняя глубина, T_2 — задняя глубина.

Плоскость M называется *плоскостью наводки*.

Из подобия треугольников CEP_1 и P_1BA имеем

$$\frac{\delta}{D} = -\frac{T_1}{p_1}.$$

Заменяя $p_1 = p + T_1$ и преобразуя, получим

$$T_1 = -\frac{\delta p}{D + \delta}. \quad (31,2)$$

Аналогичным образом найдем заднюю глубину

$$T_2 = -\frac{\delta p}{D - \delta}. \quad (31,3)$$

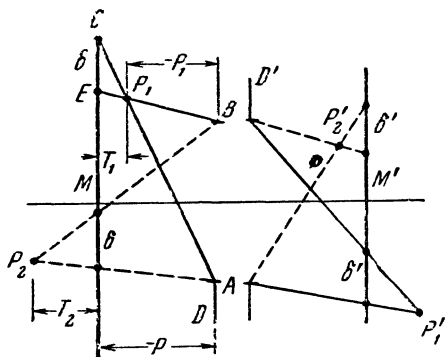


Рис 31. Глубина в пространстве предметов

Кружки рассеяния δ' видны, если их угловые размеры превосходят разрешающую силу глаза. Кружку рассеяния δ' соответствует в плоскости предметов M кружок рассеяния δ . Между δ и δ' для случая бесконечно удаленных предметов существует простая зависимость:

$$\frac{\delta'}{\delta} = -\frac{f'}{f}.$$

Если разрешающую силу в угловой мере обозначим через ψ , то $\delta' = f' \operatorname{tg} \psi$ и последнее выражение примет вид

$$\delta = -p \operatorname{tg} \psi.$$

Подставляя это равенство в формулу (31,2) и (31,3), получим

$$T_1 = \frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D - p \operatorname{tg} \psi} \quad (31,4)$$

и

$$T_2 = \frac{p^2 \operatorname{tg} \psi}{D + p \operatorname{tg} \psi}. \quad (31,5)$$

Подставляя в (31,1), получим

$$T = \frac{2Dp^2 \operatorname{tg} \psi}{D^2 - p^2 \operatorname{tg}^2 \psi}. \quad (31,6)$$

Найдем такое положение плоскости наводки, начиная с которого и далее от оптической системы все предметы изображаются резко, т. е. $T_2 = \infty$.

Для этого необходимо, чтобы

$$D + p \operatorname{tg} \psi = 0,$$

или

$$p = -\frac{D}{\operatorname{tg} \psi}. \quad (31,7)$$

Определим переднюю глубину T_1 для такого положения плоскости предметов.

В формулу (31,4) вместо p подставим $-D/\operatorname{tg} \psi$:

$$T_1 = \frac{\frac{D^2}{\operatorname{tg}^2 \psi} \operatorname{tg} \psi}{D + \frac{D \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \psi}} = \frac{D}{2 \operatorname{tg} \psi},$$

или

$$T_1 = -\frac{p}{2}. \quad (31,8)$$

Найденное расстояние до плоскости наводки $p = -D/\operatorname{tg} \psi$, при котором задняя глубина $T_2 = \infty$ называется *гиперфокальным фокусным расстоянием*. В этом случае все предметы, расположенные от объектива на расстоянии от $p_1 = -D/2\operatorname{tg} \psi$ до бесконечности, изображаются в плоскости изображения резко. Расстояние p_1 и следует именовать «началом бесконечности».

Преобразуем формулы (31,2) и (31,3), заменив в них величины δ и D следующими выражениями:

$$\delta = -\frac{p\delta'}{p'} \quad \text{и} \quad D = \frac{f'}{n}.$$

Тогда

$$T_1 = \frac{p^2 \delta' n}{f'^2 - \delta' p n} \quad (31,9)$$

и

$$T_2 = \frac{p^2 \delta' n}{f'^2 + \delta' p n}. \quad (31,10)$$

Мы получили рабочие формулы для расчета глубины изображаемого пространства.

Пример 16. Найти глубину изображаемого пространства для фотографического объектива с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1:3,5 при наводке на плоскость, расположенную от объектива на расстоянии 5 м, если разрешающая способность объектива 25 *штр/мм*.

Решение. Дано: $f' = 50$ мм; $p = -5000$ мм; $n = 3,5$. Данной разрешающей способности в линейной мере соответствует $\delta' = 0,04$ мм. Применяя формулы (31,9) и (31,10), получим

$$T_1 = 1,09 \text{ м}, \quad T_2 = 1,94 \text{ м}$$

и полная глубина

$$T = T_1 + T_2 = 3,03 \text{ м}.$$

§ 32. ГЛУБИНА РЕЗКОСТИ

Глубиной резкости называется расстояние вдоль оптической оси, измеренное между точками пространства изображений, определяющими границы резкого изображения оптической системой плоскости, заданной в пространстве предметов.

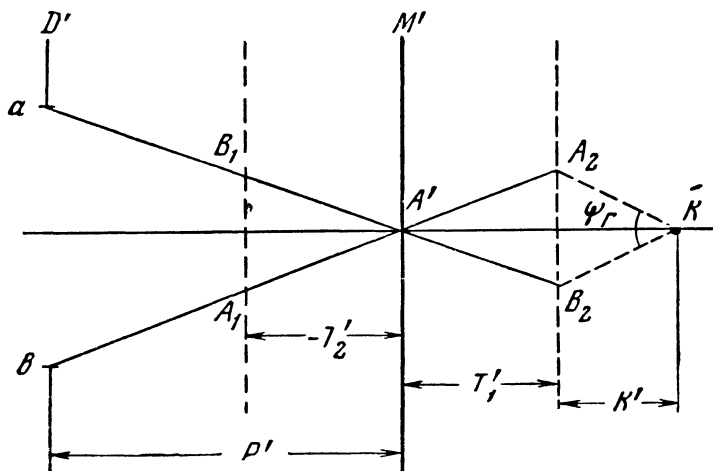


Рис 32. Глубина в пространстве изображений

Пучок лучей, выходящий из выходного зрачка оптической системы (рис. 32), образует изображение в точке A' в плоскости изображения M' . Ближе и дальше этой плоскости на расстояниях T_1' и T_2' точка образовывается в виде кружка рассеяния

$$\delta' = A_1B_1 = A_2B_2.$$

Из рисунка 32 следует, что $T_1' = -T_2'$ и глубина в пространстве изображений будет равна

$$T' = 2T_1'.$$

Из подобия треугольников abA' и $A'A_2B_2$ следует:

$$\frac{\delta'}{D'} = \frac{\Delta_1'}{p'}. \quad (32,1)$$

Из треугольника KA_2B_2 : $\delta' = k' \operatorname{tg} \psi_r$. Угол ψ_r есть предельный угол разрешающей способности глаза, а k' — расстояние, с которого наблюдается изображение. Подставив последнее выражение в предыдущее и преобразовав, получим

$$T'_1 = \frac{\rho' k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} \quad (32,2)$$

Отсюда получим уравнение глубины в пространстве изображений в общем виде:

$$T' = \frac{2\rho' k' \operatorname{tg} \psi_r}{D'} \quad (32,3)$$

В пределах T' можно смещать плоскость изображения, а изображения предметов, расположенных в одной плоскости, будут оставаться для глаза резкими.

Если рассматриваются изображения бесконечно удаленных предметов, то $\rho' = f'$, в то же время k' есть расстояние наилучшего зрения, равное 250 мм.

Тогда

$$T' = \frac{500f' \operatorname{tg} \psi_r}{D} \quad (32,4)$$

Если изображение фотографируется, то δ' определяется из предела разрешающей способности в линиях на миллиметр. Тогда из соотношения (32,1) имеем при $\rho' = f'$

$$T'_1 = \frac{\delta' f'}{D} \quad (32,5)$$

Для высококачественного объектива допустимо $\delta' = 0,01$ мм, тогда

$$T' = 0,02n \quad (32,6)$$

Глубина резкости оптической системы представляет наибольший интерес для фотографических приборов. В практике чаще всего применяются относительные отверстия 1:2—1:4, и в этих случаях глубина резкости составляет 0,05—0,1 мм.