

Найдем зависимость y' от x . Для этого сначала определим по чертежу h

$$h = -\beta_2 x, \quad (\text{I. 230})$$

затем величину β_3 по формуле (I. 188):

$$\beta_3 = \beta_2 (1 - \varphi_2 x). \quad (\text{I. 231})$$

Теперь нетрудно найти и y' , если учесть, что по чертежу

$$s'_F = l - t' - x. \quad (\text{I. 232})$$

После небольших упрощений находим

$$y' = -\beta_2 [l - t' - (l - t') \varphi_2 x + \varphi_2 x^2]. \quad (\text{I. 233})$$

Продифференцировав выражение (I. 233) по x и приравняв результат нулю, получим для x значение

$$x = \frac{l - t'}{2}, \quad (\text{I. 234})$$

а потому по формуле (I. 232)

$$s'_F = \frac{l - t'}{2} \quad (\text{I. 235})$$

и по чертежу

$$d = t' + x = \frac{l + t'}{2}. \quad (\text{I. 236})$$

Найдем t' из формулы (I. 229)

$$t' = \frac{t}{1 + \varphi_1 t}. \quad (\text{I. 237})$$

Поэтому вместо (I. 235) и (I. 236)

$$\left. \begin{aligned} s'_F &= \frac{1}{2} \left(l - \frac{t}{1 + \varphi_1 t} \right); \\ d &= \frac{1}{2} \left(l + \frac{t}{1 + \varphi_1 t} \right). \end{aligned} \right\} \quad (\text{I. 238})$$

Применяя формулу (I. 194) для отрезка s'_F системы, состоящей из двух компонентов, получим с учетом (I. 238) после некоторых упрощений

$$2 - (\varphi_1 + \varphi) l - \frac{(\varphi_1 - \varphi) t}{1 + \varphi_1 t} = 0. \quad (\text{I. 239})$$

Входящие в это выражение величины φ , l и t можно считать исходными данными, известными конструктору, приступающему

к расчету телеобъектива. Поэтому выражение (I. 239) содержит только одну неизвестную φ_1 , для нахождения которой получается квадратное уравнение

$$\varphi_1^2 + \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{l} + \varphi\right) \varphi_1 - \frac{2}{tl} + \varphi \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{l}\right) = 0. \quad (\text{I. 240})$$

Решая это уравнение и отбрасывая практически непригодный отрицательный корень, получим

$$\varphi_1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{l} + \varphi\right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{t} - \frac{1}{l} - \varphi\right)^2 + \frac{8}{tl}}. \quad (\text{I. 241})$$

Учитывая возможность перевода зрительной трубы через зенит и через надир, часто бывает удобно ввести условие: $t = \frac{1}{2}l$. При этом формула (I. 241) несколько упрощается

$$\varphi_1 = \frac{1}{2l} [\sqrt{(1 - \varphi l)^2 + 16} - 1 - \varphi l]. \quad (\text{I. 242})$$

Для силы φ_2 второго компонента найдем по формуле (I. 192) выражение

$$\varphi_2 = \frac{\varphi - \varphi_1}{1 - \varphi_1 d}. \quad (\text{I. 243})$$

Таким образом, расчет аналактического телеобъектива с внутренней фокусировкой может быть выполнен применением формулы (I. 241) или при $t = \frac{1}{2}l$ формул (I. 242), (I. 238) и (I. 243). Вопрос о величине перемещения второго компонента телеобъектива при фокусировке на заданное конечное расстояние a до рейки требует особого рассмотрения.

Не останавливаясь подробно на этом вопросе, приведем здесь окончательные формулы. После выполнения расчета по приведенным выше формулам задаются рядом малых отрицательных значений линейного увеличения V объектива в пределах: $-f' : E_0 < V < 0$. Здесь E_0 — наименьшее расстояние до рейки (приблизительно). Для каждого значения V вычисляют расстояние E от аналактической точки A до рейки и величину d_E по формулам:

$$\left. \begin{aligned} d_E &= \frac{1}{2} \left[l - f'_1 - \sqrt{(l - f'_1)^2 + 4(1 - V)f'_1 f'_2} - \right. \\ &\quad \left. - 4(f'_1 + f'_2)l \right]; \\ \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d_E; \\ E &= \frac{1}{\varphi} \left(\varphi t - \frac{1}{V} + 1 - \varphi_2 d_E \right). \end{aligned} \right\} \quad (\text{I. 244})$$

Тогда фокусировочное перемещение δd второго компонента для каждого значения E найдется по формуле

$$\delta d = d_E - d, \quad (\text{I. 245})$$

где d — расстояние между компонентами для случая бесконечно далекого предмета, определенное по второй формуле (I. 238).

§ 25. Графический способ определения хода нулевого луча

При габаритном расчете сложных оптических систем рекомендуется параллельно с численным определением основных параметров рассчитываемой системы производить вычерчивание хода лучей в этой системе. Вычерчивание хода лучей создает ряд существенных преимуществ: во-первых, этим обеспечивается наглядность получаемых результатов расчета, позволяющая быстро в процессе расчета обнаруживать и устранять варианты, неблагоприятные в конструктивном отношении или неудобные в эксплуатации будущего прибора; во-вторых, возникающими на чертеже соотношениями (например, подобием треугольников) можно воспользоваться для численного определения того или иного рассчитываемого параметра; в-третьих, вычерчивание хода лучей может служить контролем правильности расчета и средством для обнаружения ошибок в вычислениях.

Для графического построения хода луча, преломленного оптической системой (компонентом сложной системы), можно рекомендовать следующий простой способ (рис. I. 55). Пусть на чертеже отмечено положение условно совмещенных главных плоскостей HH' системы и положение ее заднего фокуса. Предполагается, что система окружена воздухом. На чертеже задано положение падающего на систему луча MP . Требуется начертить ход преломленного луча в пространстве изображений.

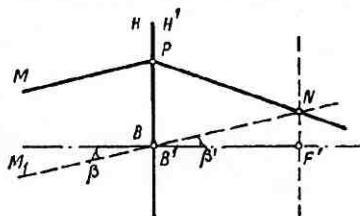


Рис. I. 55

Пусть на чертеже отмечено положение условно совмещенных главных плоскостей HH' системы и положение ее заднего фокуса. Предполагается, что система окружена воздухом. На чертеже задано положение падающего на систему луча MP . Требуется начертить ход преломленного луча в пространстве изображений.

Проще всего задача эта решается так. В пространстве предметов проводят вспомогательный луч M_1B , параллельный заданному лучу MP , но проходящий через совмещенные главные точки B и B' . Вследствие того что система окружена воздухом, с ее главными точками B и B' совпадают и ее узловые точки (т. е. точки, в которых угловое увеличение равно единице). Вследствие этого показанные на чертеже углы β и β' равны или, другими словами, луч $B'N$ в пространстве изображений является продолжением луча M_1B в пространстве предметов.

Так как лучи MP и M_1B в пространстве предметов параллельны, то сопряженные с ними лучи должны пересечься в задней фокальной плоскости NF' . Но один из них — луч $B'N$ пересекает заднюю фокальную плоскость системы в точке N . Следовательно, через точку N должен пройти и искомый луч PN , что и позволяет нанести его на чертеж.

Если опустить приведенные здесь пояснения, то весь процесс построения вышедшего из системы луча будет состоять из трех простых графических операций. Первая операция: проведение

прямой $B'N$ через точку B' параллельно заданному лучу MP ; вторая операция: проведение прямой NF' через точку F' перпендикулярно к оптической оси системы и, наконец, третья операция: проведение искомого луча через точки P и N .

В случае рассеивающей системы (рис. I. 56) построение выполняется точно так же, несмотря на иное расположение заднего фокуса F' .

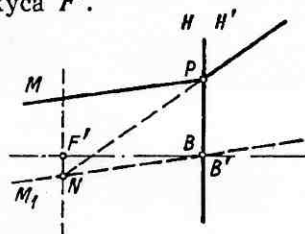


Рис. I. 56

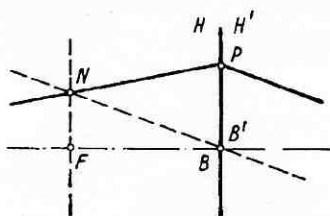


Рис. I. 57

Если задано на чертеже положение переднего фокуса F (рис. I. 57), то построение выполняется в обратном порядке: 1) находят точку N пересечения заданного луча с передней фокальной плоскостью NF ; 2) соединяют вспомогательной прямой точку N с передней главной точкой B ; 3) искомый преломленный луч проводят через точку P параллельно линии NB .

Во многих случаях может оказаться полезным при построении хода луча следующее простое правило: разность высот l и l' , образуемых падающим и преломленным лучами на задней фокальной плоскости, равна высоте h этих лучей на главных плоскостях. Несмотря на его простоту, это правило впервые предлагается здесь нами. Справедливость его вытекает из построения, показанного на рис. I. 55. Математически это правило формулируется так:

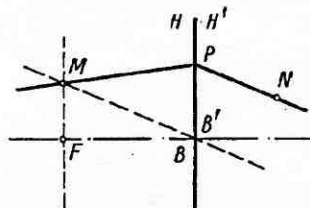


Рис. I. 58

$$l - l' = h. \quad (\text{I. 246})$$

Оно справедливо и для рассеивающих систем. Если определять разность высот в передней фокальной плоскости, то в формуле (I. 246) меняется знак:

$$l' - l = h. \quad (\text{I. 247})$$

Перед конструктором нередко возникает такая задача: через точку M , лежащую в передней фокальной плоскости MF оптической системы, заданной на чертеже (рис. I. 58) положением ее условно совмещенных главных плоскостей HH' , и через

произвольно расположенную в пространстве изображений точку N нужно провести луч. В частном случае точка N может лежать на оптической оси.

Для решения этой задачи следует вспомнить, что все лучи, проходящие в пространстве предметов через точку M , должны в пространстве изображений быть параллельны друг другу и лучу MB . Поэтому построение искомого луча выполним так: соединим прямой точки M и B . Через точку N проведем луч параллельно прямой MB и отметим точку P его пересечения с задней главной плоскостью системы. Через точки M и P проведем искомым луч в пространстве предметов.

ГЛАВА II

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

А. ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ

§ 34. Работа оптического прибора в реальных условиях

В геометрической оптике при рассмотрении действия оптических систем допускается ради упрощения рассуждений такая схематизация условий и протекания работы оптического прибора, которая подчас находится в резком противоречии с реальными условиями работы. Такая схематизация необходима с целью установления геометрических принципов и закономерностей, лежащих в основе действия оптических систем. Но теперь, приступая к изучению общих свойств оптических приборов, знание которых необходимо для рационального конструирования этих приборов, следует внести в наши представления об условиях их работы ряд существенных дополнений и поправок.

1. Положение солинейного сродства о том, что всякому лучу в пространстве предметов обязательно соответствует луч в пространстве изображений, не выполняется в реальных условиях работы оптических приборов. Вследствие неизбежно ограниченных поперечных размеров линз, призм и прочих оптических деталей и их механических оправ через оптический прибор могут проникнуть лишь лучи, проходящие внутри этих размеров. Любому лучу в пространстве предметов, проходящему вне границ, определяемых поперечными размерами оптических деталей и диафрагм, не соответствует никакой реальный луч в пространстве изображений.

Ограниченный размер отверстий в оптическом приборе приводит, во-первых, к ограничению телесного угла пучков лучей, исходящих из отдельных точек предмета, и во-вторых, — к ограничению поля зрения оптического прибора. Эти обстоятельства необходимо учитывать при конструировании оптических приборов.

2. Ограничение пучков лучей, проходящих через оптический прибор, влечет за собой ограничение количества световой энергии, проходящей через прибор и участвующей в образовании оптического изображения. Поэтому при конструировании оптического прибора необходимо позаботиться о том, чтобы создаваемое им оптическое изображение не было слишком темным. Для этого следует составить для рассчитываемого прибора световой баланс, позволяющий определить его светосилу.

До последнего времени при определении освещенности изображения конструктор должен был довольствоваться тем количеством световой энергии, которое поступает во входное отверстие прибора. В настоящее время мы располагаем электронно-оптическими преобразователями (эопами), позволяющими сделать изображение, создаваемое оптическим прибором, более ярким, т. е. увеличить световой поток, добавив в него энергию со стороны. Это не освобождает, однако, конструктора от необходимости тщательно учитывать световой баланс оптических приборов, подсчитывая потери, которые несет свет при его прохождении через оптический прибор.

3. Подавляющее большинство оптических приборов в конечном счете обслуживает человеческий глаз. Это относится не только к визуальным оптическим приборам, создающим изображение прямо на светочувствительной сетчатой оболочке человеческого глаза (зрительные трубы, очки, лупы, микроскопы), но и к проекционным приборам (диапроекторы и кинопроекторы, эпидиаскопы), где изображение возникает на экране, к фотографическим приборам, создающим изображение, зафиксированное на фотоснимках, и к приборам с телевизионными приемниками, позволяющими наблюдать изображение на телевизионном экране. При конструировании всех этих приборов необходимо учитывать требования, предъявляемые к ним со стороны глаза человека, а потому необходимо познакомиться с физиологическими особенностями строения и работы глаза, с основными понятиями физиологической оптики.

4. На основе представления о совместной работе прибора с глазом наблюдателя вводится понятие о видимом увеличении оптического прибора, дающее возможность определять его увеличивающую способность. В то же время устанавливается условие неискаженной передачи перспективы оптическим прибором, так называемое условие естественного впечатления, лежащее в основе оценки эстетического воздействия оптического изображения (художественная фотография, кино).

5. В геометрической оптике предполагалось, что в пространстве предметов имеется плоскость предметов, перпендикулярная к оптической оси. Ее изображение возникает в сопряженной с ней плоскости изображений. Условия работы реальных оптических приборов обычно не выполняют эти требования. Предметы, одновременно попадающие в поле зрения оптического прибора, нередко

оказываются хаотически размещенными в пространстве предметов на различных расстояниях от прибора. В то же время в пространстве изображений всегда имеется плоскость (или поверхность), на которой возникает и улавливается изображение предметов, — экран приемника световой энергии. В частности, таким экраном может служить фотографическая пленка или сетчатая оболочка глаза.

Очевидно, что не все объекты, разбросанные по пространству предметов, одинаково резко изобразятся на экране приемника. Следовательно возникает вопрос о глубине резкости изображаемого пространства, требующий внимания со стороны конструктора оптических приборов.

б. Опыт показывает, что разрешающая способность человеческого глаза имеет определенный предел, зависящий от структуры сетчатки глаза. Аналогичными пределами разрешающей способности обладают и другие приемники световой энергии (зернистость фотоземлюльсий, разбивка на строки и точки телевизионного изображения). Этим накладывается ограничение и на разрешающую способность оптических приборов, что необходимо учитывать при проектировании оптических приборов.

Но помимо этой внешней причины, ограничивающей разрешающую способность оптических приборов, есть еще внутренняя причина, заключающаяся в возникновении дифракционных пятен рассеяния света, обусловленных ограничением проходящих через прибор пучков световых лучей. Дифракционная разрешающая способность должна быть сбалансирована известным образом с разрешающей способностью приемника световой энергии.

Здесь перечислен круг вопросов, подлежащих рассмотрению в гл. II настоящего курса.

§ 35. Ограничение апертуры оптических приборов

Всякий оптический прибор имеет в пространстве предметов входное отверстие MN (рис. II. 1), которое ограничивает пучок световых лучей, исходящий из осевой точки A предмета. Так как оптический прибор центрирован, то отверстие это обязательно имеет форму круга с центром в точке C на оптической оси. Исключением из этого правила служат некоторые спектрометрические и интерферометрические приборы, имеющие щелевидные входные отверстия.

Входное отверстие оптического прибора, расположенное в пространстве предметов и ограничивающее пучки лучей, идущие от отдельных точек предмета, называется *входным зрачком* оптического прибора (по аналогии со зрачком человеческого глаза, также ограничивающим входящие в глаз пучки световых лучей).

Угол $\alpha = \angle CAM$, образованный с осью крайним лучом пучка, исходящего из точки A , называется *передним апертурным углом*.

Слово апертура обозначает отверстие. Пучок лучей, идущий из осевой точки A предмета и заполняющий отверстие входного зрачка прибора, имеет форму прямого конуса, ось которого совпадает с оптической осью. Если же взять внеосевую точку A_1 предмета, то для нее получим пучок, ограниченный на чертеже лучами A_1M и A_1N и имеющий форму наклонного конуса лучей.

Рассечем этот наклонный конус лучей произвольной плоскостью PQ , перпендикулярной к оптической оси. Поперечное сечение пучка будет круглым, так как сечение это параллельно основанию конуса, совпадающему с круглым входным зрачком, и известно, что все сечения конуса, параллельные основанию, подобны этому основанию.

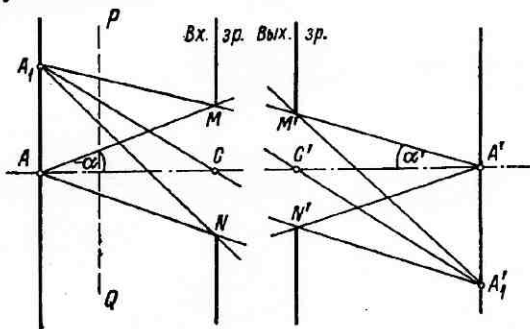


Рис. II. 1

Легко можно найти положение центра круглого поперечного сечения пучка лучей. Для этого следует разделить пополам отрезок вертикальной прямой, заключенный внутри угла, образованного крайними лучами A_1M и A_1N пучка. Если соединить линией центры всех поперечных сечений пучка, то получим прямую, проходящую через точки A_1 и C . Луч, совпадающий с прямой A_1C и проходящий через центры поперечных сечений пучка лучей, называется *главным лучом* пучка.

Если в пространстве предметов имеется множество светящихся точек, то от каждой точки можно провести главный луч. Все главные лучи в пространстве предметов образуют гомоцентрический пучок с центром в точке C (в центре входного зрачка прибора).

В пространстве изображений находится изображение входного зрачка прибора. При помощи формул оптики Гаусса нетрудно определить величину и положение этого изображения $M'N'$ входного зрачка. При этом все лучи пучков, исходящих из точек A и A_1 и заполняющих входной зрачок MN прибора, после прохождения через прибор должны заполнить изображение $M'N'$ и собраться в точках A' и A_1' изображения предмета. Отсюда сле-

дует, что изображение $M'N'$ входного зрачка, называемое *выходным зрачком* оптического прибора, в пространстве изображений точно также ограничивает пучки лучей, собирающиеся в точках изображения, как это делает входной зрачок в пространстве предметов, хотя по нашему предположению выходной зрачок не является материальной диафрагмой, а лишь ее оптическим изображением.

Крайний луч $M'A'$ пучка, собирающегося в точке A' , образует с осью угол $\alpha' = C'A'M'$, называемый *задним апертурным углом* оптического прибора. Главные лучи $C'A'$ наклонных пучков в пространстве изображений, сопряженные с главными лучами AC , образуют также гомоцентрический пучок лучей с центром в центре C' выходного зрачка.

Вырежем в непрозрачной пластинке круглое отверстие (диафрагму), равное по величине выходному зрачку прибора. Материальную диафрагму, стоящую во входном зрачке, уберем, а новую диафрагму поставим в выходном зрачке. Очевидно, что после такой перемены диафрагм ничего не изменится в ходе лучей в пространстве изображений. Таким образом, материальная диафрагма может находиться не во входном зрачке, а в выходном. В этом случае входным зрачком будет служить изображение выходного зрачка через всю оптическую систему прибора в обратном ходе лучей.

Материальная диафрагма, ограничивающая пучки лучей, исходящие из отдельных точек предмета, называется *апертурной диафрагмой*. Она может находиться либо в пространстве предметов и служит тогда входным зрачком прибора, либо в пространстве изображений, где она становится выходным зрачком. Возможен, однако, и третий случай расположения апертурной диафрагмы: она может находиться в одном из междулинзовых промежутков оптического прибора. В таком случае выходным зрачком служит оптическое изображение апертурной диафрагмы в прямом ходе лучей через часть прибора, следующую за апертурной диафрагмой, а входным зрачком — изображение той же апертурной диафрагмы в обратном ходе лучей через часть прибора, предшествующую апертурной диафрагме.

Конечно, если во входном зрачке нет материальной диафрагмы, то в прибор может войти луч, проходящий вне отверстия входного зрачка. Однако этот луч задерживается материальной апертурной диафрагмой, стоящей либо в междулинзовом промежутке, либо в выходном зрачке, и в пространство изображений этот луч не пройдет. При конструировании оптического прибора следует учитывать только те лучи, которые участвуют в образовании оптического изображения в пространстве изображений. Поэтому достаточно принимать во внимание только те лучи, которые проходят через входной зрачок прибора. В таком смысле и нужно понимать положение о том, что оптическое изображение

материальной диафрагмы ограничивает проходящие через оптическую систему пучки лучей.

Все три указанные выше случая расположения апертурной диафрагмы встречаются в практике оптического приборостроения. Так, например, в призмённом бинокле и в ряде других зрительных труб апертурной диафрагмой и одновременно входным зрачком служит наружная оправа объектива, расположенная в простран-

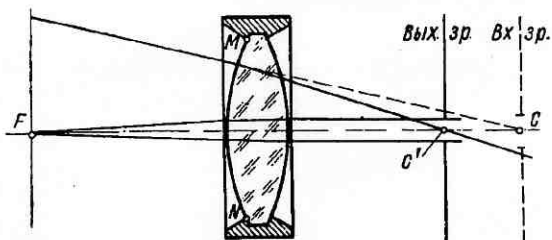


Рис. 11. 2

стве предметов, а выходным зрачком — действительное изображение этой оправы через всю систему, находящееся за окуляром трубы. Здесь его легко можно обнаружить опытным путем в виде светлого кружка на куске кальки.

В случае лупы (рис. 11. 2) предмет находится в передней фокальной плоскости прибора. Пучок световых лучей, исходящий из осевой точки F предмета, превращается после прохождения через лупу в параллельный пучок. Этот пучок ограничивается зрачком глаза наблюдателя, пользующегося лупой. Зрачок глаза служит поэтому апертурной диафрагмой (диаметр зрачка глаза при ярком освещении не превышает 2 мм) и одновременно выходным зрачком лупы. Диаметр оправы лупы делается значительно большего размера для свободного прохождения наклонных пучков, а потому оправа лупы не ограничивает пучков лучей, исходящих из отдельных точек предмета. Рассчитав в обратном направлении ход главного луча, проходящего через центр C' выходного зрачка, можно определить величину и положение мнимого входного зрачка с центром в точке C .

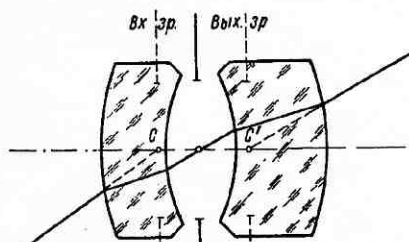


Рис. 11. 3

Примером третьего случая, когда апертурная диафрагма помещается в междулинзовом промежутке, может служить любой современный фотографический объектив — анастигмат. На

рис. II. 3 схематически представлена конструкция фотографического объектива, состоящего из двух компонентов, между которыми находится ирисовая диафрагма, служащая апертурной диафрагмой (тут же располагается часто и затвор фотоаппарата). Входным и выходным зрачками являются мнимые изображения апертурной диафрагмы через передний и задний компонент объектива.

§ 36. Отрезки, определяющие положение зрачков

На чертеже (рис. II. 4) показано схематически расположение осевых точек A и A' предмета и его изображения, фокусов F и F' оптической системы и ее зрачков с центрами в точках C и C' . Мы будем в дальнейшем пользоваться линейным увеличением V_c в зрачках как одной из оптических характеристик прибора. Введем теперь отрезки p и p' , считаемые от точек C и C' до точек A

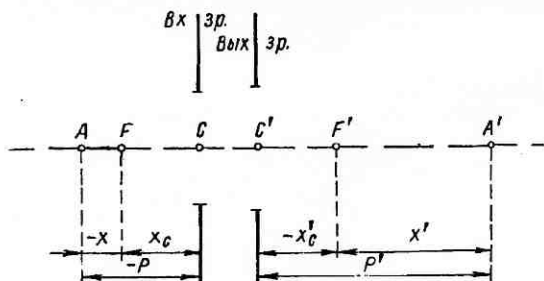


Рис. II. 4

и A' . Так как это сопряженные отрезки (их концы сопряжены попарно), они связаны между собой через продольное увеличение Q

$$Q = \frac{p'}{p} = -\frac{f'}{f} VV_c. \quad (\text{II. 1})$$

Пользуясь формулой для отношения фокусных расстояний, найдем

$$\frac{p'}{p} = \frac{n'}{n} VV_c. \quad (\text{II. 2})$$

Для определения этих отрезков введем еще отрезки $x = FA$ и $x' = FA'$ и аналогичные отрезки $x_c = FC$ и $x'_c = F'C'$. По чертежу находим

$$\left. \begin{aligned} p &= x - x_c; \\ p' &= x' - x'_c. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 3})$$

Четыре отрезка x , x' , x_c и x'_c определяются через линейные увеличения V и V_c

$$\left. \begin{aligned} V &= -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}; \\ V_c &= -\frac{f}{x_c} = -\frac{x'_c}{f'}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 4})$$

Из выражений (II. 4) следует

$$\left. \begin{aligned} x &= -\frac{f}{V}; \\ x' &= -Vf'; \\ x_c &= -\frac{f}{V_c}; \\ x'_c &= -V_c f'. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 5})$$

Подставляя эти значения в формулы (II. 3), найдем

$$p = -f \frac{V_c - V}{VV_c} \quad (\text{II. 6})$$

и

$$p' = f' (V_c - V). \quad (\text{II. 7})$$

Пользуясь выражением

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}, \quad (\text{II. 8})$$

можно привести формулу (II. 6) к виду

$$p = \frac{n}{n'} f' \frac{V_c - V}{VV_c}. \quad (\text{II. 9})$$

Формулы (II. 7) и (II. 9) удобны при практических расчетах и позволят нам в дальнейшем сократить некоторые выкладки. К сожалению, эти формулы для отрезков p и p' мало известны конструкторам и редко применяются ими в практической работе.

§ 37. Ограничение поля зрения оптических приборов

Даже в самых простых оптических приборах помимо входного зрачка имеется по крайней мере еще одна диафрагма, которая ограничивает поле зрения прибора. Например, в случае лупы (рис. II. 2) кроме входного зрачка в пространстве предметов находится еще оправа MN лупы, которая и ограничивает пучок главных лучей, направляющихся в центр C входного зрачка.

Пусть в общем случае в пространстве предметов кроме входного зрачка PQ с центром в точке C имеется еще одна диафрагма

MN , ограничивающая поле зрения прибора. Эту диафрагму мы назовем *входным люком* (рис. II. 5).

Для пучка лучей, исходящего из осевой точки A предмета, диафрагма MN не играет никакой роли. Но если двигать точку A вверх от оптической оси, то она достигает такого положения A_1 , при котором крайний луч A_1P пучка пройдет через край M входного люка. При дальнейшем подъеме точки A_1 край входного люка будет срезать часть пучка, исходящего из этой точки. Вследствие этого и количество световой энергии, посылаемой этой точкой в оптический прибор, будет уменьшаться. Если точка предмета A_2

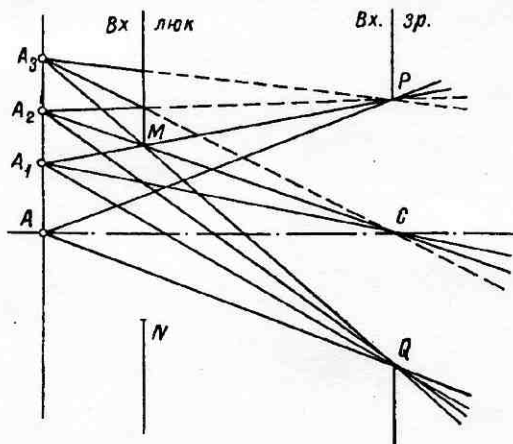


Рис. II. 5

расположена так, что главный луч A_2C пучка проходит через край M входного люка, срезается вся верхняя половина пучка. Если точка предмета находится в положении A_3 , когда нижний крайний луч A_3Q пучка касается края M входного люка, количество световой энергии, поступающей в прибор от точки A_3 , равно нулю. Это положение справедливо также и для всех точек предмета, находящихся от оптической оси дальше точки A_3 .

Таким образом диафрагма MN действительно ограничивает поле зрения прибора, но это ограничение происходит не сразу, а постепенно. На плоскости изображения (рис. II. 6) расположены точки A' , A'_1 , A'_2 и A'_3 , сопряженные с точками A , A_1 , A_2 и A_3 , показанными на рис. II. 5.

В пределах первой зоны, лежащей внутри окружности, проведенной из точки A' как из центра радиусом $A'A'_1$, наблюдается полная освещенность. Начиная от точки A'_1 и до точки A'_3 простирается вторая кольцеобразная зона, в пределах которой наблюдается падение освещенности от полной освещенности на

внутренней границе зоны до полной темноты на ее внешней границе. Наконец, за пределами окружности радиуса $A'A_3'$ простирается (до бесконечности) третья зона, в которой освещенность равна нулю.

Таким образом, ограничение поля зрения происходит в оптических приборах не сразу, а постепенно. Это явление называется *затенением* или *виньетированием*, а вторая зона на плоскости изображения, в пределах которой совершается постепенное падение освещенности, называется *зоной затенения*.

Изображение входного люка в пространстве изображений



Рис. II. 6

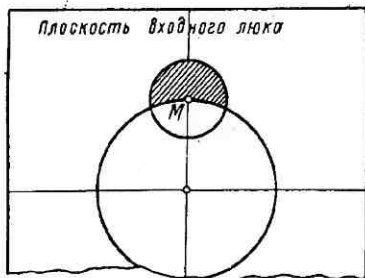


Рис. II. 7

называется *выходным люком*. Выходной люк ограничивает поле зрения прибора в пространстве изображений. Входной люк не обязательно должен быть материальной диафрагмой, но может быть изображением материальной диафрагмы, находящейся в пространстве изображений (и служащей там выходным люком) или внутри оптической системы, в одном из ее междулинзовых промежутков. Такая материальная диафрагма, ограничивающая поле зрения прибора, называется *полевой диафрагмой*.

Глаз человека малочувствителен к падению освещенности на краю поля зрения прибора. Он совсем не обнаруживает падения освещенности на 50%, возникающего внутри зоны затенения на уровне точки A_2' (штриховая окружность на рис. II. 6). Поэтому в целях уменьшения поперечных размеров оптических деталей затенение в 50% считается допустимым во многих оптических приборах.

Впрочем, следует заметить, что для точки A_2' (рис. II. 5) пучок лучей срезается даже несколько больше чем на 50%. Пусть ход лучей рассеен плоскостью, совпадающей с плоскостью входного люка. На чертеже (рис. II. 7) представлена эта плоскость. Большая окружность — отверстие входного люка. Главный луч $A_2'S$ проходит через точку M , лежащую на краю входного люка. Малая окружность с центром в точке M — поперечное сечение

пучка лучей, исходящего из точки A_2 предмета. Пройти через оптическую систему может, очевидно, только часть пучка, лежащая внутри отверстия входного люка. Поэтому вся верхняя (заштрихованная) часть пучка срезана входным люком, а по чертежу видно, что срезанная площадь поперечного сечения пучка составляет несколько больше половины его полного (круглого) поперечного сечения. В практических расчетах это обстоятельство не учитывается.

Затенение можно уменьшить, приближая входной люк к плоскости предмета, так как при этом ширина поперечного сечения пучков, измеренная в плоскости входного люка, уменьшается (рис. II. 5), а поэтому уменьшается и ширина зоны затенения на плоскости изображений. Если же входной люк совместить с плоскостью предмета, ширина поперечного сечения пучков станет равной нулю, а вследствие этого станет равной нулю и ширина зоны затенения. В самом деле, в этом случае возможны только два случая: либо точка предмета лежит внутри входного люка, и тогда через систему проходят все лучи, идущие от этой точки и заполняющие входной зрачок, либо точка предмета лежит за пределами входного люка, и тогда от нее через систему не проходит ни один луч.

Для того чтобы входной люк совпал с плоскостью предмета, необходимо поместить полевую диафрагму в плоскости промежуточного изображения предмета. Если в оптической системе не возникает промежуточное действительное изображение, то и затенение не может быть в ней полностью устранено.

§ 38. Определение положения зрачков и люков

Оптическая система любого оптического прибора может рассматриваться как последовательность ряда линз и диафрагм.

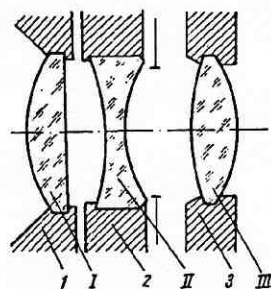


Рис. II. 8

При этом нужно иметь в виду, что материальными диафрагмами служат не только диафрагмы, специально поставленные для ограничения хода лучей, но также и оправы линз. На чертеже (рис. II. 8) показано устройство трехлинзового объектива, называемого триплетом. Каждая линза объектива закреплена при помощи металлической оправы. Между второй и третьей линзами помещается ирисовая (переменного диаметра) диафрагма, служащая апертурной диафрагмой объектива.

Для определения положения зрачков и люков такого объектива следует сначала оптически спроектировать все материальные диафрагмы в пространство предметов, иными словами, найти

величину и положение изображений каждой из этих диафрагм в обратном ходе лучей в пространстве предметов. Проще всего это делается для оправы 1 линзы I, так как она сама находится в пространстве предметов и ее поэтому не нужно проектировать. Изображение оправы 2 линзы II нужно найти в обратном ходе лучей через линзу I. Затем, построив изображение ирисовой диафрагмы и оправы 3 линзы III через линзы II и I в обратном ходе лучей, найдем еще два изображения материальных диафрагм.

В результате такой операции получим в пространстве предметов целую серию диафрагм различной величины. На чертеже (рис. II. 9) показаны для примера три такие диафрагмы. Соеди-

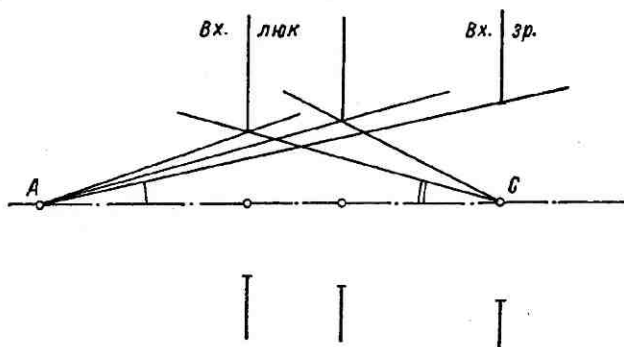


Рис. II. 9

ним теперь лучами края этих диафрагм с осевой точкой A предмета и отметим ту из диафрагм, которая видна из точки A под наименьшим углом. Эта диафрагма — входной зрачок прибора. Материальная диафрагма, сопряженная со входным зрачком, есть апертурная диафрагма прибора.

Края остальных диафрагм соединим с центром C входного зрачка и отметим ту из них, которая видна из точки C под наименьшим углом. Эта диафрагма — входной люк прибора, а материальная диафрагма, сопряженная с входным люком, — полевая диафрагма прибора.

Приведенное здесь правило определения положения апертурной диафрагмы неприменимо в случае, если предмет находится на бесконечности. В этом случае все диафрагмы видны из точки A под углом, равным нулю. Вместо приведенного выше правила в таком случае следует применить измененное правило: входным зрачком служит диафрагма, имеющая наименьший диаметр. В случае же, когда входной зрачок находится на бесконечности, входным люком является та из остальных диафрагм, которая имеет наименьший диаметр.

§ 39. Случай двух зрачков

Особый интерес представляет случай, когда две диафрагмы в пространстве предметов видны из осевой точки A под одним углом зрения (рис. II. 10). Пусть $p_1 = -AC_1$ и $p_2 = -AC_2$, диаметры диафрагм: $D_1 = MN$, $D_2 = PQ$. При этом имеет место соотношение

$$\frac{D_1}{p_1} = \frac{D_2}{p_2}. \quad (\text{II. 10})$$

Рассматриваемый случай характеризуется тем, что при смещении точки A с оптической оси сразу же начинается срезание пучка лучей и затенение, так что диаметр первой зоны (фиг. II. 6), в которой нет затенения, равен нулю.

Пусть точка A_1 удалена от оптической оси на отрезок $y = AA_1$. От точки A_1 в систему проходит пучок, ограниченный лучами A_1M и A_1Q . На плоскости PQ второй диафрагмы луч A_1M проходит через точку R . Главный луч A_1C пучка, исходящего из точки A_1 , проходит на плоскости PQ через точку S , делящую пополам отрезок RQ . Этим определяется положение точки C пересечения главного луча с осью. В этом месте целесообразно поставить еще одну диафрагму UT , которая будет служить входным зрачком системы. При этом $UT = D$; $AC = -p$.

По чертежу находим, пользуясь подобием треугольников AMA_1 и PMR :

$$PR = y \frac{p_2 - p_1}{p_1}; \quad (\text{II. 11})$$

$$RQ = D_2 - PR = D_2 - y \frac{p_2 - p_1}{p_1}; \quad (\text{II. 12})$$

$$SQ = \frac{1}{2} RQ = \frac{1}{2} D_2 - \frac{1}{2} y \frac{p_2 - p_1}{p_1}; \quad (\text{II. 13})$$

$$C_2S = \frac{1}{2} D_2 - SQ = \frac{1}{2} y \frac{p_2 - p_1}{p_1}. \quad (\text{II. 14})$$

Вследствие подобия треугольников ACA_1 и C_2CS находим отношение

$$\frac{C_2S}{p_2 - p} = \frac{y}{p}. \quad (\text{II. 15})$$

Отсюда получим, подставив значение C_2S из формулы (II. 14);

$$\frac{1}{2} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) = \frac{p_2}{p} - 1. \quad (\text{II. 16})$$

Окончательно находим

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} \right). \quad (\text{II. 17})$$

Диаметр $UT = D$ входного зрачка определяется из соотношения

$$\frac{D}{\rho} = \frac{D_2}{\rho_2}. \quad (\text{II. 18})$$

Исключая отсюда ρ при помощи выражения (II. 17), найдем

$$D = \frac{2D_2\rho_1}{\rho_1 + \rho_2}. \quad (\text{II. 19})$$

Из (II. 10) следует

$$\rho_2 = \frac{D_2}{D_1} \rho_1. \quad (\text{II. 20})$$

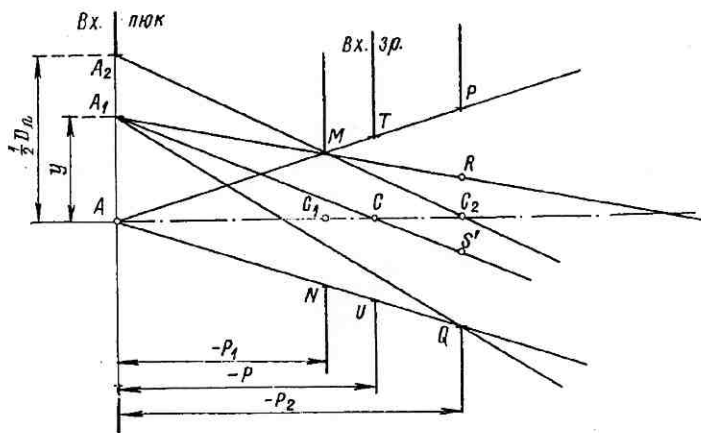


Рис. II. 10

Подставив это значение отрезка ρ_2 в формулу (II. 19), получим после некоторых упрощений

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right). \quad (\text{II. 21})$$

Рассмотрим вопрос о расположении входного люка в этой системе в предположении, что можно допустить затенение в 50% и что при этом граница поля зрения должна быть резкой. Последнее соображение приводит к необходимости поместить входной люк в плоскости AA_1 предмета. Диаметр D_A входного люка определяется из того соображения, что луч, исходящий из края A_2 люка и проходящий через край M первой диафрагмы, должен пройти также и через центр C_2 второй диафрагмы, чтобы получилось затенение в 50%. Поэтому, пользуясь подобием треугольников AC_2A_2 и C_1C_2M , находим соотношение

$$\frac{D_A}{\rho_2} = \frac{D_1}{\rho_2 - \rho_1}. \quad (\text{II. 22})$$

Вследствие формулы (II. 20) получим после упрощения

$$\frac{1}{D_4} = \frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2}. \quad (\text{II. 23})$$

§ 40. Передача перспективы оптическими приборами

Центр входного зрачка прибора имеет особое значение. В этой точке пересекаются все главные лучи, несущие изображение предмета, поэтому она является центром перспективы в пространстве предметов.

Подобным же образом и центр выходного зрачка служит центром перспективы в пространстве изображений. В зависимости от расположения центра входного зрачка относительно предмета меняется характер перспективы; поэтому оптические приборы могут в известных случаях исказить перспективу, и необходимо соблюдать некоторые особые меры для того, чтобы такие искажения не происходили.

Известно, например, что неопытный фотограф иногда получает снимки с очень неудачной неестественной перспективой. Так, рука фотографируемого человека, вытянутая вперед, на снимке кажется громадной по сравнению с самим человеком.

В таких неудачах виноват не фотоаппарат, а фотограф, неудачно выбравший положение центра входного зрачка в момент съемки. Но бывает и так, что положение входного зрачка не зависит от наблюдателя. Тогда за искажение перспективы несет ответственность не наблюдатель, а конструктор прибора.

Рассмотрим случай наблюдения небольшого предмета через увеличительное стекло (или лупу) и на этом простом примере покажем, какие искажения перспективы может вносить оптический прибор. Предположим сначала, что зрачок глаза, являющийся в то же время выходным зрачком лупы, находится между самой лупой и ее задним фокусом F' (рис. II. 11, *a*). Пространственный предмет, рассматриваемый через лупу, пусть состоит из двух стрелок равной величины, причем одна из них (стрелка FP) лежит в передней фокальной плоскости лупы. Прочертим ход главного луча, проходящего через точку P и через центр S' выходного зрачка лупы. Для этого проведем вспомогательный луч через точку P и через условно совмещенные главные точки лупы. Параллельно этому лучу проводим главный луч MS' в пространстве изображений. Через точки P и M проводим теперь главный луч в пространстве предметов. В точке S пересечения этого луча с осью находится центр входного зрачка лупы. Через точки S и S' проводим теперь второй главный луч P_1M_1C' , исходящий из внеосевого конца второй стрелки. При этом обнаруживается, что более далекая стрелка PF представляется глазу наблюдателя

под углом $MC'F$, а более близкая стрелка — под углом $M_1C'F$, причем $MC'F < M_1C'F$. С такой же закономерностью мы имеем дело и при рассматривании предметов невооруженными глазами: из двух равных по величине предметов более далекий мы видим под меньшим углом зрения, чем более близкий. Перспектива, в которой действует это правило, называется *энтоцентрической* или *нормальной перспективой*.

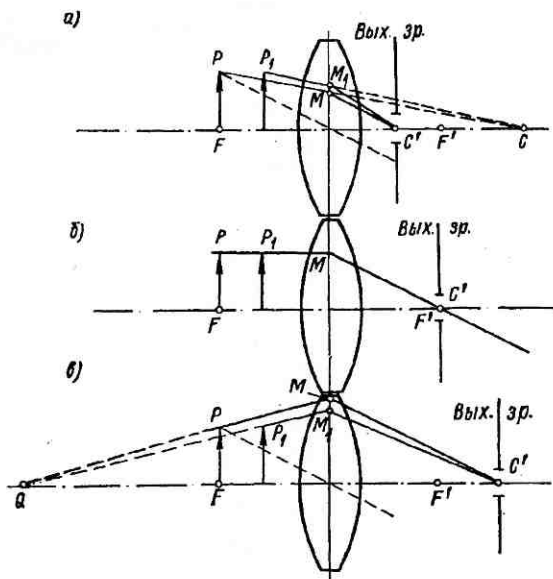


Рис. II. 11

Пусть теперь зрачок глаза, а следовательно, и выходной зрачок лупы лежит в ее задней фокальной плоскости (точки F' и C' совпадают, как показано на рис. II. 11, б). В этом случае центр C входного зрачка лежит на бесконечности, а все главные лучи в пространстве предметов параллельны оптической оси. При этом концы P и P_1 стрелок оказываются лежащими на одном луче, а потому обе стрелки видны наблюдателю под одним и тем же углом $MC'F$. В природных условиях такая перспектива не встречается; только при рассматривании очень далеких предметов перспектива приближается к этим условиям. Но в то же время мы хорошо знакомы с такой перспективой, так как пользуемся ею в технических чертежах (ортогональная проекция). Такую перспективу называют *телецентрической*, а параллельный ход главных лучей называется *телецентрическим ходом лучей*.

Представим себе теперь, что выходной зрачок лупы C' удален от нее дальше ее заднего фокуса F' (рис. II. 11, в). Прделавав такое же построение хода главных лучей, какое было проделано выше, убедимся, что центр S входного зрачка теперь оказывается расположенным по другую сторону лупы. На выполненном таким образом чертеже обнаруживается, что более близкий к прибору предмет виден из точки S' под меньшим углом, чем предмет более далекий. Это совсем неестественная перспектива. Она наблюдается только в некоторых оптических приборах. Мы называем эту перспективу *гиперцентрической*. Если оптический прибор должен давать наблюдателю правильное представление о пространственной форме предметов, гиперцентрическая перспектива недопустима. Особенно недопустима она в тех случаях, когда мы ожидаем получения художественного эффекта от изображения (художественная фотография, кино).

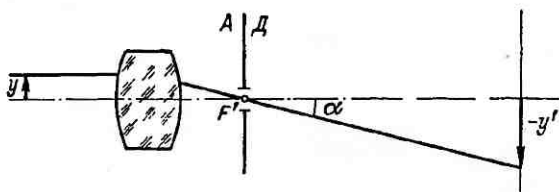


Рис. II. 12

Телецентрический ход лучей используется во многих измерительных оптических приборах. Дело в том, что при неточной наводке на резкость изменяется несколько величина изображения, а это вносит ошибку в измерение величины предмета. В то же время точно выполнить наводку на резкость глаз человека не в состоянии: при перемещении предмета в некоторых пределах его изображение кажется почти одинаково резким. Фотографы знают, что при наводке на резкость по матовому стеклу существуют некоторые пределы перефокусировки, внутри которых невозможно подметить изменения резкости. Однако в этих пределах существенно меняется величина изображения. Поэтому в измерительных приборах наводка на резкость связана обычно с потерей точности. Чтобы этого избежать, по идее Аббе следует создать в пространстве предметов телецентрический ход лучей, поместив для этого апертурную диафрагму AD (рис. II. 12) в задней фокальной плоскости объектива. При этом перемещение предмета относительно прибора (или прибора относительно предмета y), происходящее при фокусировке, не вызовет изменения угла α' , а следовательно, и величины y' изображения. Таким образом, введение телецентрического хода лучей исключает ошибку измерения, вносимую неточной фокусировкой.

§ 41. Основные фотометрические величины

При рассмотрении вопросов передачи световой энергии оптическими приборами необходимо оперировать некоторыми понятиями и величинами фотометрии. Поэтому здесь уместно кратко напомнить некоторые сведения о фотометрических величинах и единицах их измерения.

1. *Световой поток* F — количество световой энергии, протекающее в единицу времени через поперечное сечение пучка лучей и оцениваемое по зрительному ощущению. Единица измерения светового потока — люмен ($лм$) есть одна шестидесятая часть све-

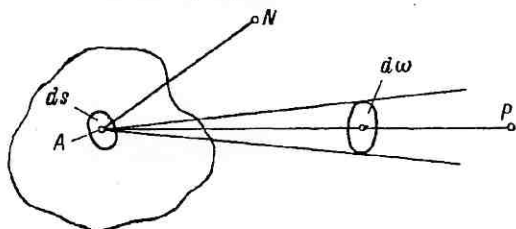


Рис. II. 13

тового потока, излучаемого черным телом при температуре затвердевания платины 2042°K с площади в 1 см^2 .

2. *Сила света* I какого-либо источника света — угловая плотность светового потока, излучаемого источником света

$$I = \frac{dF}{d\omega}. \quad (\text{II. 24})$$

Здесь dF — элементарный световой поток, излучаемый внутри элементарного телесного угла $d\omega$, выраженного в стерadianах (*стер*).

Единицей измерения силы света служит свеча ($св$): это сила света точечного источника света в том направлении, в котором он излучает световой поток в один люмен внутри телесного угла в один стерадиан.

3. *Яркость* B источника света — сила света, излучаемого единицей светящейся площади в заданном направлении

$$B = \frac{I}{ds \cos \varphi}. \quad (\text{II. 25})$$

Здесь ds — площадь элементарной площадке, а угол φ образован главным лучом AP элементарного пучка лучей с нормалью AN к этой площадке (рис. II. 13).

Единицы измерения яркости — стильб (*сб*) и нит (*нт*) представляют собой яркость по направлению нормали к светящейся поверхности, площадь которой равна 1 см^2 или 1 м^2 и сила света равна одной свече: $1 \text{ сб} = \text{св}/\text{см}^2$; $1 \text{ нт} = \text{св}/\text{м}^2$; $1 \text{ сб} = 10\,000 \text{ нт}$.

4. Освещенность E — поверхностная плотность светового потока, падающего на освещаемую поверхность:

$$E = \frac{dF'}{ds'}. \quad (\text{II. 26})$$

Здесь dF' — элементарный световой поток, падающий на элементарную площадку ds' освещаемой поверхности.

Единицами освещенности служат люкс (*лк*) и фот — освещенность поверхности, на единицу площади которой падает поток в один люмен: люкс — $\text{лм}/\text{м}^2$; фот — $\text{лм}/\text{см}^2$; $1 \text{ фот} = 10\,000 \text{ лк}$.

ГОСТ 7932—56, введенный в СССР в 1956 г., устанавливает в качестве основной фотометрической единицы свечу. Единицей яркости принят нит, а единицей освещенности — люкс. Стильб и фот — нестандартные единицы.

5. Кроме этих употребляемых в фотометрии величин, мы введем здесь еще величину, характеризующую способность оптического прибора создавать более или менее светлое изображение. Такой величиной является светосила H оптического прибора, определяемая как отношение освещенности, измеренной на поверхности изображения оптического прибора, к яркости предмета

$$H = \frac{E}{B}. \quad (\text{II. 27})$$

Приведем основные фотометрические формулы. Исключив величину I из формул (II. 24) и (II. 25), найдем формулу для элементарного светового потока d^2F (в пространстве предметов)

$$d^2F = B ds d\omega \cos \varphi. \quad (\text{II. 28})$$

Аналогично получаем и в пространстве изображений

$$d^2F' = B' ds' d\omega' \cos \varphi'. \quad (\text{II. 29})$$

Между яркостью B предмета и яркостью B' изображения связь устанавливается законом Кирхгофа

$$B' = \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B. \quad (\text{II. 30})$$

Здесь n и n' — показатели преломления сред, находящихся в пространствах предметов и изображений;

τ — коэффициент пропускной способности оптического прибора.

Формула Кирхгофа справедлива в том случае, если изображение рассматривается непосредственно глазом (как, например,

в зрительной трубе, в микроскопе) или иным приемником без участия рассеивающего экрана.

Если же рассматривается изображение, создаваемое на рассеивающем экране, то его яркость можно определить по формуле

$$B' = \frac{a}{\pi} E, \quad (\text{II. 31})$$

где a — альbedo, или коэффициент отражательной способности экрана;

E — освещенность на экране.

Для связи световых потоков d^2F и d^2F' можно применить выражение, вытекающее из закона сохранения энергии

$$d^2F' = \tau d^2F. \quad (\text{II. 32})$$

§ 42. Яркости, освещенности и альbedo

Приведем здесь некоторые численные данные о яркостях различных источников света, применяемых в оптическом приборостроении, и об освещенностях, требуемых в некоторых случаях.

Яркости (в кнт)

Ночное небо (без луны)	10^{-7}
Поверхность луны	2,5
Киноэкран	1,5—3,5
Ясное небо (днем)	4,0
Люминесцентные лампы	3,0—10,0
Небо, покрытое белыми облаками	12
Матированная электролампа 40 <i>вт</i>	25
Матированная газополная электролампа 2000 <i>вт</i>	1300
Вольфрамовая нить накаленная	27 000—33 000
Электрическая лампа пустотная высокого напряжения	5000—12 000
Электрическая лампа газонаполненная низкого напряжения	15 000—25 000
Электрическая лампа газонаполненная с перекалом	35 000
Кратер дуговой лампы простой	$13 \cdot 10^4$ — $18 \cdot 10^4$
То же, интенсивного горения	$2 \cdot 10^5$ — $9 \cdot 10^5$
Солнце	$15 \cdot 10^6$
Ртутные лампы сверхвысокого давления	$4 \cdot 10^5$ — $18 \cdot 10^5$
Плазменные источники света	$2 \cdot 10^7$
Лазеры (квантовые генераторы света)	10^8 — 10^9

Требуемые освещенности (в лк)

В рабочих и общественных помещениях:	
общее освещение	80—120
на рабочем месте	150—250
Киноэкран простой	50—120
» широкий	100—180
Освещенность, создаваемая прямым солнечным светом (июль, полдень)	100 000

Альbedo некоторых поверхностей

Белый экран, покрытый окисью магния . . .	0,98
» » » сернистым барием	0,95
» » » алебастром	0,92
» » » белой клеевой краской	0,80
Мел очищенный	0,85—0,95
Снег свежее выпавший	0,78
Пемза (серая)	0,56
Известь (затвердевшая)	0,42
Песок	0,25—0,30
Зеленая растительность лиственная, трава	0,17
» » хвойная	0,11
Вспаханное поле	0,06—0,08
Лава, базальт	0,05
Черный экран, покрытый матовым лаком, сажей	0,01
Черный экран, покрытый черным бархатом	0,002

§ 43. Чувствительность фотоматериалов

Среди всех физических приемников света самой высокой чувствительностью отличается глаз человека. При длине световой волны $\lambda = 555 \text{ нм}$ и продолжительности раздражения около $0,05 \text{ сек}$ он воспринимает поток излучения в $1,2 \cdot 10^{-16} \text{ вт}$ (энергия потока в один квант в секунду в этой области спектра составляет $3,5 \cdot 10^{-18} \text{ вт}$). Отсюда следует, что глаз может почувствовать поток в несколько десятков квантов в секунду.

Рассматривая оптические свойства фотографических материалов, введем коэффициент τ пропускания проявленного фотографического слоя в месте его почернения

$$\tau = \frac{F'}{F}. \quad (\text{II. 33})$$

Здесь F — световой поток, падающий на фотослой, а F' — прошедший через него.

Оптической плотностью D принято называть величину

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau. \quad (\text{II. 34})$$

Назовем количеством освещения величину K

$$K = Et. \quad (\text{II. 35})$$

Здесь E — освещенность фотоэмульсии во время экспозиции в лк; t — продолжительность экспозиции в сек.

Зависимость оптической плотности D от логарифма количества освещения $\lg K$ представляется в виде характеристической кривой (рис. II. 14), определяемой при помощи особого прибора — денситометра.

Прямолинейный участок BC характеристической кривой служит областью нормальных экспозиций (линейная зависимость D

от $\lg K$). Участок AB — область недодержек, а участок CD — область передержек. За точкой D плотность начинает уменьшаться, здесь происходит соляризация (негативное изображение превращается в позитивное).

В местах фотоэмульсии, не подвергавшихся освещению, все же происходит незначительное почернение в процессе проявления, называемое фотографической вуалью. Она обладает некоторой оптической плотностью D_0 .

Светочувствительностью фотоматериала называют величину S , обратно пропорциональную количеству освещения K_s , создающему после проявления заданную оптическую плотность D_s . Плотность D_s называется критерием светочувствительности и в разных системах определяется различным образом. Поэтому для светочувствительности S справедлива общая формула

$$S = \frac{\alpha}{K_s}, \quad (\text{II. 36})$$

где α — коэффициент.

В системе ГОСТа 2817—50 (введенной в СССР в 1951 г.) принята плотность D_s , превышающая плотность вуали на 0,2

$$D_s = D_0 + 0,2. \quad (\text{II. 37})$$

Соответствующее величине D_s значение количества освещения K_s снимается с характеристической кривой, и светочувствительность определяется по формуле (II. 36) при коэффициенте α , равном единице

$$S = \frac{1}{K_s}. \quad (\text{II. 38})$$

В системе Хертера и Дриффильда (сокращенно Х и Д) критерием светочувствительности служит точка инерции E , в которой пересекается продолжение прямой BC с горизонтальной осью графика, а коэффициент α принимается равным 10.

В немецкой системе ДИН (Deutsche Industrienormen) критерием светочувствительности является плотность почернения, превышающая плотность вуали на 0,1.

Точных переходных формул из одной системы в другую не может быть, но ориентировочно может быть применена табл. II. 1.

Коэффициентом контрастности или фактором проявления называют величину γ , представляющую собой тангенс угла на-

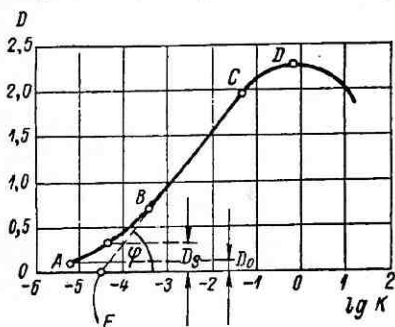


Рис. II. 14

Ориентировочные значения светочувствительности

ГОСТ 2817—50	11	16	22	32	45	65	90	130	180	250
Х и Д	250	350	500	700	900	1400	2000	3000	4000	6000
ДИН	$\frac{12}{10}$	$\frac{13}{10}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{17}{10}$	$\frac{18}{10}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{21}{10}$	$\frac{23}{10}$	$\frac{24}{10}$	$\frac{26}{10}$

клона прямолинейного участка характеристической кривой к оси абсцисс:

$$\gamma = \operatorname{tg} \varphi = \frac{dD}{d \lg K} \quad (\text{II. 39})$$

Если $\gamma = 1$, контраст фотографического изображения равен оптическому контрасту. Если $\gamma > 1$, фотографический контраст больше оптического и наоборот.

Светочувствительные фотоматериалы обладают селективностью по спектру. Максимум чувствительности бромосеребряной фотографической эмульсии лежит вблизи $\lambda = 350 \text{ нм}$. Ее область чувствительности простирается в видимой части спектра до $\lambda \approx \approx 500 \text{ нм}$. Однако в настоящее время широко применяются эмульсии, сенсibilизированные ко всей видимой части спектра (панхром, изопанхром) и даже к его инфракрасной части.

Наконец, важным свойством фотоэмульсий является их разрешающая способность, зависящая от зернистого строения эмульсий. Хотя в настоящее время созданы специальные эмульсии, диаметр зерен которых составляет всего лишь 1,5—2,0 нм, но разрешающая способность фотоплёнок, имеющих в продаже, составляет от 50 до 90 линий на 1 мм (разрешающая способность выше у пленки с меньшей чувствительностью).

Фотографические приемники лучистой энергии выгодно отличаются от глаза человека и от электронно-оптических приемников способностью аккумулировать световую энергию за время экспозиции, что позволяет обнаруживать очень слабые источники света. Например, фотографируя небесный свод с очень большой длительностью экспозиции (много часов), можно обнаружить звезды, которые нельзя увидеть визуально при помощи современных телескопов.

§ 44. Чувствительность фотоэлектрических приемников световой энергии

Фотоэлектрическими приёмниками принято называть приборы, преобразующие лучистую энергию непосредственно в электрическую, используя при этом фотоэлектрический эффект. Сюда

относятся фотоэлементы с внешним фотоэффектом, фотоспротивления и вентильные фотоэлементы, а также электронно-оптические преобразователи (зопы) и электронные фотоумножители. В настоящее время область чувствительности некоторых фотоэлементов и фотоспротивлений простирается в инфракрасной части спектра до длины волн $\lambda \approx 6$ мкм, что позволило создать приборы для наблюдения в темноте по тепловому излучению предметов.

Широко применяются вакуумные кислородноцезиевые фотоэлементы с внешним фотоэффектом, в которых электроны, освобождаемые квантами света, выходят из металла через вакуум. Интегральная чувствительность таких фотоэлементов достигает 50 мка/лм. Сенсibilизированные кислородом сурмяноцезиевые фотоэлементы дают фототок в 100—120 мка/лм.

Чувствительность газонаполненных кислородноцезиевых фотоэлементов достигает 500 мка/лм, но они отличаются более высокой инерционностью.

Существенным недостатком этих фотоэлементов является непостоянство чувствительности их фотокатода в разных точках его. При переходе от центра к краю в кислородноцезиевых фотоэлементах происходит резкое падение чувствительности, достигающее 100% от среднего значения при площади действующего окна 1 мм². В сурмяноцезиевых фотоэлементах при площади окна 0,1 мм² происходят колебания чувствительности порядка 30—40%. Для исключения погрешности, вызванной этим недостатком фотоэлементов, рекомендуется такая конструкция работающей с фотоэлементом оптической системы, при которой на окне фотоэлемента возникает изображение не предмета, обладающего переменной структурой и движущегося в пространстве, а апертурной диафрагмы, неподвижной относительно фотоэлемента. Этим достигается постоянное и равномерное распределение светового потока по площади окна фотоэлемента.

В фотоспротивлениях используется внутренний фотоэффект, выражающийся в изменении электропроводности при облучении светом. В них применяются полупроводники, чаще всего селен, таллофид (сернистый таллий) и сернистый свинец. Охлаждение фотоспротивлений позволяет устранить внутренние помехи (тепловое движение электронов, создающее «шум») и этим повысить чувствительность до 10⁶ мка/лм.

В вентильных фотоэлементах под воздействием освещения возникает электродвижущая сила. На границе полупроводника и металла в них образуется тонкий запирающий слой толщиной ~20 нм, в котором и возникает фотоэффект. Наиболее распространены селеновые, меднозакисные, серноталлиевые и серносеребряные вентильные фотоэлементы.

Чувствительность серноталлиевых фотоэлементов достигает 10 000 мка/лм. Спектральное распределение чувствительности селенового фотоэлемента приближается к распределению чувстви-

тельности глаза человека; поэтому селеновые фотоэлементы получили широкое применение в фотометрах, люксметрах и фотоэлектрических экспонометрах.

В табл. II. 2 приведены некоторые характеристики фотоэлектрических приемников.

Таблица II. 2

Характеристики фотоэлектрических приемников

Типы фотоэлементов	Рабочая область спектра в мк	Спектральный максимум в мк	Интегральная чувствительность в мкс/лм	Порог чувствительности в мк	Размер светового окна в мк	Инерционность в сек
С внешним фотоэффектом						
Кислородноцезиевый, вакуумный	0,4—1,1	0,8	30—50	$5 \cdot 10^{-7}$	Ø 40	10^{-8}
Кислородноцезиевый газонаполненный	0,4—1,0	0,8	250	$5 \cdot 10^{-6}$	Ø 39	10^{-5}
Сурмяноцезиевый	0,38—0,62	0,45	110	10^{-7}	Ø 39	10^{-8}
Сурмяноцезиевый для ультрафиолета	0,2—0,6	0,42	50	—	Ø 15	10^{-8}
Фотосопротивления						
Сернистоталлиевое	0,4—1,35	1,0	$10^5—10^6$	10^{-8}	От 1×1 до 5×5	10^{-3}
Сернистосвинцовое	0,5—3,0	2,7	До 1 в/вт	10^{-9} вт	От 1×1 до 10×10	10^{-4}
Фотоумножители						
Кислородносеребряноцезиевые	0,4—1,1	0,75	$10^6—10^7$	10^{-9}	5×3	10^{-8}
Сурмяноцезиевые	0,37—0,6	0,45	$10^6—10^7$	—	5×3	10^{-8}
Вентильные						
Селеновый	0,4—0,7	0,55	500	10^{-4}	Ø 39	10^{-3}
Серноталлиевый	0,4—1,2	0,95	10 000	—	Ø 30	10^{-3}
Серносеребряный	0,5—1,3	1,05	8 000	—	Ø 20	10^{-3}

Кроме фотоэлектрических приемников лучистой энергии, в инфракрасной области спектра применяются тепловые приемники излучения. Сюда относятся термоэлементы, обладающие чувствительностью 7 в/вт . Полупроводниковые термоэлементы обладают пороговой чувствительностью 10^{-10} вт . Металлические болометры (с золотой пленкой) обладают чувствительностью $4,3 \text{ в/вт}$

и пороговой чувствительностью 10^{-7} вт. Диэлектрические болометры (с нитробензольной пленкой) имеют чувствительность 300 в/вт и пороговую чувствительность 10^{-8} вт. В полупроводниковых болометрах достигается чувствительность в 3500 в/вт при пороге чувствительности 10^{-10} вт.

В последнее время широко применяются термисторы, являющиеся полупроводниковыми сопротивлениями с очень высоким коэффициентом температурного изменения сопротивления (до 6% на градус); их пороговая чувствительность порядка 10^{-9} вт.

К термическим приемникам относятся также оптико-акустические приемники (пороговая чувствительность 10^{-8} вт) и болометры (10^{-10} вт).

§ 45. Световой поток, проходящий через оптическую систему

Определение светосилы H оптического прибора можно разбить на несколько этапов. В первом этапе определяется величина светового потока F , входящего во входной зрачок оптического прибора. Пусть у точки A (рис. II. 15) расположен элемент ds светящейся поверхности. Этот элемент излучает световой поток,

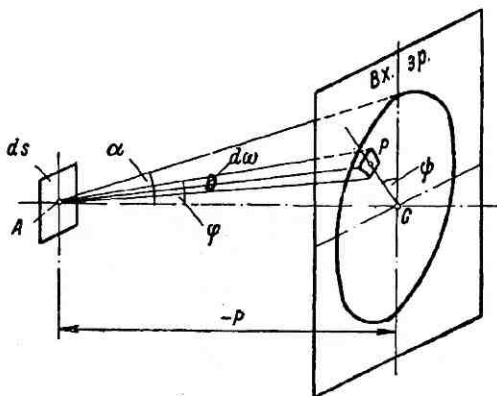


Рис. II. 15

заполняющий отверстие входного зрачка. Передний апертурный угол оптического прибора равен α , а p — отрезок AC .

Для определения величины F светового потока, входящего во входной зрачок оптического прибора, можно воспользоваться формулой (II. 28) для элементарного светового потока dF . Для этого выделим на плоскости входного зрачка элементарную площадку, расположенную у некоторой точки P . Тогда световой поток, излучаемый элементарной площадкой ds и падающий на площадку у точки P , может быть представлен формулой (II. 28). При

этом угол φ образуется главным лучом AP элементарного пучка с оптической осью (нормаль к площадке ds совпадает с осью). Элементарный телесный угол $d\omega$ образован пучком лучей, исходящих из точки A и заполняющих элементарную площадку на входном зрачке. Мы введем еще на плоскости входного зрачка угол ψ , образованный радиусом-вектором CP и вертикальной осью. Углы φ и ψ служат угловыми координатами точки P .

Для того чтобы проинтегрировать выражение (II. 28) по всей конечной площади входного зрачка, следует сначала выразить телесный угол $d\omega$ через приращения $d\varphi$ и $d\psi$ угловых координат.

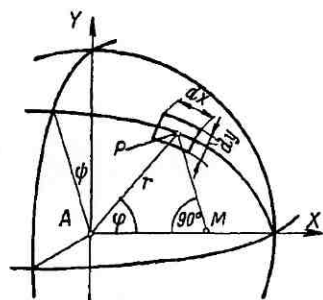


Рис. II. 16

Опишем для этого вокруг точки A сферу с радиусом r (рис. II. 16). AX — оптическая ось системы. AP — главный луч элементарного пучка, вырезающего на поверхности элементарную площадку ds_0 вокруг точки P :

$$ds_0 = dx dy. \quad (\text{II. 40})$$

Плоскость, проведенная через ось AX и луч AP , образует с вертикальной плоскостью YAX двугранный угол ψ . В плоскости PAX находится угол φ , образованный лучом AP с осью AX .

Размер dx элементарной площадки ds_0 можно выразить через приращение $d\varphi$ угла φ

$$dx = r d\varphi. \quad (\text{II. 41})$$

Подобным же образом выражается и размер dy этой площадки через приращение $d\psi$

$$dy = \rho d\psi, \quad (\text{II. 42})$$

причем ρ — длина перпендикуляра PM , опущенного из точки P на ось AX . По чертежу находим ρ

$$\rho = r \sin \varphi. \quad (\text{II. 43})$$

Учитывая формулы (II. 41), (II. 42) и (II. 43), получим вместо выражения (II. 40)

$$ds_0 = r^2 \sin \varphi d\varphi d\psi. \quad (\text{II. 44})$$

При $r = 1$ площадь ds_0 переходит в выражение для телесного угла $d\omega$ (в стерадианах)

$$d\omega = \sin \varphi d\varphi d\psi. \quad (\text{II. 45})$$

Формула (II. 28) для элементарного светового потока после введения в нее этого значения угла $d\omega$ приобретает вид

$$d^2F = B ds \sin \varphi \cos \varphi d\varphi d\psi. \quad (\text{II. 46})$$

Интегрируя это выражение по переменным φ и ψ так, чтобы покрыть всю площадь отверстия входного зрачка прибора, получим искомый световой поток dF , входящий во входной зрачок. При этом будем менять φ в пределах от 0 до α , а ψ — от 0 до 2π . Площадь ds постоянна; с некоторым приближением можно и яркость B предмета считать постоянной (независящей от угла φ). Поэтому получим для dF выражение

$$dF = B ds \int_{\varphi=0}^{\varphi=\alpha} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \int_{\psi=0}^{\psi=2\pi} d\psi. \quad (\text{II. 47})$$

Выполним интегрирование по ψ

$$dF = 2\pi B ds \int_{\varphi=0}^{\varphi=\alpha} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi. \quad (\text{II. 48})$$

Этот интеграл берется легко

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{2} \pi B ds \int_{\varphi=0}^{\varphi=\alpha} \sin 2\varphi d(2\varphi) = \\ &= \frac{1}{2} \pi B ds \left| -\cos 2\varphi \right|_{\varphi=0}^{\varphi=\alpha} = \frac{1}{2} \pi B ds (1 - \cos 2\alpha). \end{aligned} \quad (\text{II. 49})$$

Отсюда получим окончательно

$$dF = \pi B ds \sin^2 \alpha. \quad (\text{II. 50})$$

Таким образом, определилась величина светового потока, входящего во входной зрачок прибора.

Световой поток dF' , выходящий из выходного зрачка прибора, может быть найден двумя путями. Во-первых, можно применить для связи потоков dF' и dF закон сохранения энергии (II. 32), что приводит к выражению

$$dF' = \tau dF = \pi \tau B ds \sin^2 \alpha. \quad (\text{II. 51})$$

Во-вторых, мы можем воспользоваться формулой (II. 29) для элементарного потока d^2F и получить таким образом для пространства изображений формулу, совершенно аналогичную выражению (II. 50):

$$dF' = \pi B' ds' \sin^2 \alpha', \quad (\text{II. 52})$$

где B' — яркость изображения (без экрана);

ds' — элементарная площадка на плоскости изображений, сопряженная с площадкой ds ;

α' — задний апертурный угол прибора.

Закон Кирхгофа (II. 30) позволяет исключить B' из (II. 52):

$$dF' = \pi \tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B ds' \sin^2 \alpha'. \quad (\text{II. 53})$$

Таким образом, для определения величины светового потока, прошедшего через оптический прибор, можно применить любую из двух формул (II. 51) или (II. 52).

§ 46. Общие выражения для светосилы оптического прибора

Следующим этапом в процессе получения формул для светосилы оптического прибора служит определение освещенности E на плоскости изображений. Вследствие выражения (II. 26) получим в нашем случае

$$E = \frac{dF'}{ds'}. \quad (\text{II. 54})$$

Подставив сюда значение dF' из формулы (II. 51), найдем

$$E = \pi\tau B \frac{ds}{ds'} \sin^2 \alpha. \quad (\text{II. 55})$$

Отношение ds'/ds сопряженных, а потому подобных площадок равно, как учит геометрия, квадрату отношения их соответственных линейных размеров, иными словами — квадрату линейного увеличения V

$$\frac{ds'}{ds} = V^2. \quad (\text{II. 56})$$

Поэтому из выражения (II. 55) следует

$$E = \pi\tau B \left(\frac{\sin \alpha}{V} \right)^2. \quad (\text{II. 57})$$

Если же в выражение (II. 54) ввести значение для dF' по формуле (II. 53), то получится

$$E = \pi\tau \left(\frac{n'}{n} \right)^2 B \sin^2 \alpha'. \quad (\text{II. 58})$$

Обе полученные формулы (II. 57) и (II. 58) конструктор может применить для определения освещенности на плоскости изображения. Приравнивая поэтому правые части этих формул, найдем после извлечения квадратного корня выражение

$$V = \frac{n \sin \alpha}{n' \sin \alpha'}. \quad (\text{II. 59})$$

Это известный закон синусов, полученный как условие применимости развиваемых здесь энергетических формул. В дальнейшем (см. § 103—106) будет дано значение закона синусов для коррекции аберраций в оптических приборах.

Здесь необходимо указать, что формулы (II. 57) и (II. 58) справедливы только в том случае, если предметы, с которыми

мы имеем дело, представляют собой светящиеся площадки, но они несправедливы, если эти предметы линейные или точечные. Для каждого оптического прибора существует минимальный размер предмета y_0 , при котором этот предмет еще может быть отличен от геометрической точки. Всякий предмет, наблюдаемый в оптический прибор, проектируется на плоскость предметов в виде двухмерного образа. Если оба размера этого образа (наибольший и наименьший) больше y_0 , предмет называем площадочным и для него справедливы полученные выше формулы. Если одно измерение предмета больше y_0 , другое — меньше y_0 , предмет линейный, а если оба его измерения меньше y_0 , то он точечный.

В случае линейного предмета формула (II. 57) должна быть заменена выражением

$$E = \pi\tau B \frac{\sin^2 \alpha}{V}. \quad (\text{II. 60})$$

Так как закон синусов (II. 59) остается справедливым и в этом случае, получим вместо выражения (II. 58) выражение

$$E = \pi\tau BV \left(\frac{n'}{n} \sin \alpha' \right)^2. \quad (\text{II. 61})$$

В случае точечного предмета вместо формулы (II. 57) действует выражение

$$E = \pi\tau B \sin^2 \alpha, \quad (\text{II. 62})$$

а потому получим вместо формулы (II. 58), пользуясь опять законом синусов,

$$E = \pi\tau B \left(\frac{n'}{n} V \sin \alpha' \right)^2. \quad (\text{II. 63})$$

Теперь мы можем совершить последний шаг к определению светосилы H оптического прибора, применяя для этого формулу (II. 27). При этом получим по два выражения светосилы для каждого из трех типов предметов.

Для площадочных предметов справедливы формулы

$$\left. \begin{aligned} H &= \pi\tau \left(\frac{\sin \alpha}{V} \right)^2; \\ H &= \pi\tau \left(\frac{n'}{n} \sin \alpha' \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 64})$$

В случае линейных предметов следует пользоваться формулами

$$\left. \begin{aligned} H &= \pi\tau \frac{\sin^2 \alpha}{V}; \\ H &= \pi\tau V \left(\frac{n'}{n} \sin \alpha' \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 65})$$

Наконец, при точечных предметах действуют формулы

$$\left. \begin{aligned} H &= \pi\tau \sin^2 \alpha; \\ H &= \pi\tau \left(\frac{n'}{n} V \sin \alpha' \right)^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 66})$$

Линейные предметы встречаются сравнительно редко в практике оптического приборостроения (например, деления тонких шкал). С точечными предметами мы встречаемся при рассмотрении звезд при помощи астрономических приборов (см. § 82).

В формулах для светосилы оптических приборов введен коэффициент τ прозрачности или пропускной способности. Для определения величины этого коэффициента необходимо рассмотреть физические причины, вызывающие потери света при его прохождении через оптический прибор. Одной из этих причин служит отражение света от преломляющих поверхностей.

Из физической оптики известно, что на границе двух диэлектриков (например, на поверхности, разграничивающей стекло и воздух) происходит частичное отражение света. Большая часть света, преломляясь, проходит через эту границу, а меньшая часть, отражаясь, возвращается обратно в первую среду. Этот отраженный световой поток теряется, не участвуя в образовании изображения.

Но дело не только в этом. Вследствие многократного отражения от преломляющих поверхностей часть потеряннного светового потока проникает на плоскость изображения, где она может вызвать появление бликов (светлых пятен неопределенной формы) или вуали (более или менее равномерной засветки). Такой «паразитный» свет не участвует в образовании изображения. Попадая на те участки картины, которые должны быть темными, он засвечивает их и этим снижает контраст изображения.

Для вычисления потери света при отражении от преломляющей поверхности можно применить формулу Френеля для светового потока F_r , отраженного на границе двух диэлектриков при нормальном падении его на поверхность

$$F_r = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 F. \quad (\text{II. 92})$$

Здесь F — световой поток, падающий на преломляющую поверхность;

n и n' — показатели преломления разделяемых ею сред.

В таком простом виде эта формула справедлива, строго говоря, только при угле падения, равном нулю. Однако исследование показывает, что при изменении угла падения в широких пределах поток F_r остается практически постоянным до значения угла падения, равного углу Брюстера, а он составляет на границе воздуха и стекла примерно 56° . Такие углы падения практически встречаются крайне редко, что и позволяет всегда пользоваться формулой (II. 92).

Преломляющие поверхности бывают двух родов: поверхности, по которым оптическая деталь (линза или призма) соприкасается с воздухом, и поверхности склейки. Склеивание линз производится при помощи бальзама или бальзамина. Но между склеиваемыми поверхностями имеется ничтожное количество этого вещества. По-

этому его можно не учитывать и считать, что на поверхности склейки соприкасаются два стекла с разными показателями преломления.

Поверхности склейки вызывают очень незначительные потери света. Пусть, например, $n = 1,5$, а $n' = 1,6$. По формуле Френеля найдем: $F_r = 0,01$; $(3,1)^2 F = 0,00104F$, т. е. около 0,1% от падающего на поверхность светового потока. Такой малой величиной потерь можно пренебречь. Поэтому при подсчете световых потерь поверхности склейки совсем не принимаются во внимание. Если же поверхность граничит с воздухом, то формула (II. 22) приобретает вид

$$F_r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 F \quad (\text{II. 93})$$

независимо от того, проходит ли свет из воздуха в стекло или из стекла в воздух. При $n = 1,5$ найдем по этой формуле

$$F_r = \left(\frac{0,5}{2,5} \right)^2 F = \frac{1}{25} F = 4\% F.$$

Таким образом, на каждой поверхности, разграничивающей воздух и крон, потеря света на отражение составляет 4%. На границе воздуха и флинта по той же причине теряется 5% света. Поэтому коэффициент пропускной способности составит 0,96 для поверхности воздух—крон и 0,95 для поверхности воздух—флинт. Если же имеется оптическая система, состоящая из ряда преломляющих поверхностей, граничащих с воздухом (поверхности склейки не учитываются), то коэффициент τ_1 пропускной способности, обусловленной потерей света на отражение от преломляющих поверхностей, может быть выражен степенной зависимостью

$$\tau_1 = 0,96^k \cdot 0,95^f, \quad (\text{II. 94})$$

где k — число поверхностей воздух—крон;

f — число поверхностей воздух—флинт.

В случае сложных приборов потеря света на отражение от преломляющих поверхностей может оказаться большой. Так, в перископах для подводных лодок насчитывается до 30 поверхностей, граничащих с воздухом ($k = 20$, $f = 10$). Количество прошедшего через перископ света благодаря действию одной рассматриваемой причины составит не более 27% от света, падающего на его входной зрачок. Таким прибором можно пользоваться при дневном свете, но при этом изображение получается малоконтрастным из-за большого количества паразитного света, попадающего в глаз наблюдателя.

До тридцатых годов нашего столетия эти потери света считались неустраняемыми. Но в настоящее время известно, что они могут быть существенно уменьшены. Это не значит, что можно

отменить физический закон, выражаемый формулой Френеля. Но можно использовать другие физические явления для уменьшения потерь света. Такой путь предложен академиками И. В. Гребенчиковым и А. А. Лебедевым. Их метод известен под названием *просветление оптики* и состоит в том, что преломляющая поверхность линзы покрывается тонким прозрачным слоем с показателем преломления n_c , определяемым по формуле

$$n_c = \sqrt{n}, \quad (\text{II. 95})$$

где n — показатель преломления стекла линзы. Толщина слоя — порядка одной четверти длины волны света.

Световые потоки, отраженные от двух поверхностей слоя, взаимно погашаются вследствие интерференции, и вся световая энергия направляется в поток, проходящий через преломляющие поверхности слоя. Теория просветления оптики более подробно излагается в курсе физической оптики. Невозможность практически выполнить условие (II. 95) уменьшает эффективность метода. Однако применяя многослойные покрытия, можно достичь практически очень благоприятных результатов. Ориентировочно можно принимать коэффициент пропускания τ_1 оптической системы с просветленными преломляющими поверхностями, пользуясь следующими значениями:

при однослойном покрытии

$$\left. \begin{array}{l} \tau_1 = 0,98^{k+f}; \\ \text{двухслойном} \\ \tau_1 = 0,99^{k+f}; \\ \text{трехслойном} \\ \tau_1 = 0,995^{k+f}. \end{array} \right\} \quad (\text{II. 96})$$

Просветление оптики позволяет широко применять более сложные и потому более совершенные оптические системы, отличающиеся большой светосилой и высоким качеством изображения.

Вторая физическая причина, вызывающая потери света, заключается в поглощении и рассеянии света в массе стекла оптических деталей. Хотя оптическое стекло и отличается особой чистотой и прозрачностью, часть световой энергии теряется в массе стекла. Сами молекулы стекла (и других прозрачных сред) поглощают и рассеивают часть светового потока. Кроме того, такое же действие производят и имеющиеся в стекле посторонние включения: мелкие непрозрачные частицы и пузырьки газов, образующиеся при варке стекла.

Пропускная способность оптического стекла отличается некоторой спектральной избирательностью. Поэтому стекла некото-

рых марок представляются в проходящем свете слегка окрашенными (кроны — голубоватые, флинты — желтоватые). Мы рассмотрим здесь интегральную пропускную способность стекол для белого света.

Пусть F_0 — световой поток, прошедший через входную поверхность некоторой оптической детали (рис. II. 21) и определяемый на ее внутренней стороне. Таким образом, здесь не учитывается потеря света, вызываемая отражением от входной поверхности. Световой поток F , прошедший путь d внутри стекла, становится меньше F_0 вследствие поглощения и рассеяния света

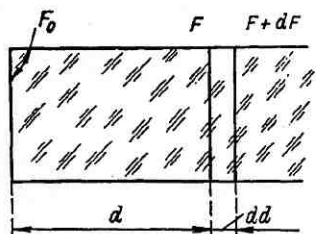


Рис. II. 21

в стекле. Придадим расстоянию d бесконечно малое приращение dd . Световой поток F получит при этом приращение dF , которое должно быть отрицательным и выражается формулой

$$dF = -\alpha F dd, \quad (\text{II. 97})$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Это дифференциальное уравнение можно проинтегрировать путем разделения переменных. Вводя постоянную C интегрирования, найдем

$$\int \frac{dF}{F} = -\alpha d + C. \quad (\text{II. 98})$$

Выполняя интегрирование, получим

$$\ln F = -\alpha d + C \quad (\text{II. 99})$$

или иначе

$$F = e^{-\alpha d + C}. \quad (\text{II. 100})$$

Для исключения неопределенной постоянной C перейдем к начальным условиям: $d = 0$; $F = F_0$. При этом получим из выражения (II. 100)

$$F_0 = e^C. \quad (\text{II. 101})$$

Эта формула позволяет исключить C из выражения (II. 100)

$$F = F_0 e^{-\alpha d}. \quad (\text{II. 102})$$

Практически удобно ввести в это выражение постоянный коэффициент a

$$a = e^{-\alpha}, \quad (\text{II. 103})$$

благодаря чему формула приобретает окончательный вид

$$F = F_0 a^d. \quad (\text{II. 104})$$

Отсюда находится коэффициент τ_2 пропускной способности

$$\tau_2 = \frac{F}{F_0} = a^d. \quad (\text{II. 105})$$

Коэффициент a пропускной способности стекла зависит от категории стекла по светопоглощению (ГОСТ 3514—57):

Категории	a
00	0,996
0	0,994
1	0,992
2	0,990
3	0,985

При приблизительном подсчете потерь можно для всех марок оптического стекла принимать $a = 0,990$. Величина d представляет собой суммарную длину хода осевого луча во всех оптических деталях данного прибора, выраженную в *см*.

Если в состав оптической системы прибора входят плоские, вогнутые или выпуклые металлические зеркала, то действует третья физическая причина потерь света, так как при отражении света от металлических поверхностей часть света поглощается. Наиболее высоким коэффициентом отражения, равным 0,94, обладает серебро. Но серебро нестойко. Оно быстро тускнеет на воздухе и теряет свою первоначальную высокую отражающую способность.

Чтобы предохранить серебряный отражающий слой от влияния атмосферы, его наносят на заднюю поверхность пластинки или линзы (рис. II. 22). Луч света падает сначала на переднюю поверхность зеркала, преломляется в ней, затем, отразившись от серебряного слоя на задней поверхности, снова преломляется на первой поверхности. Серебряный слой покрывается защитным покрытием, надежно предохраняющим его от соприкосновения с воздухом. В качестве защитного слоя применяют гальваническое омеднение или покрытие бакелитовым лаком. Такое зеркало не теряет своих отражающих свойств в процессе эксплуатации, но в нем происходят дополнительные потери при двукратном прохождении через переднюю преломляющую поверхность.

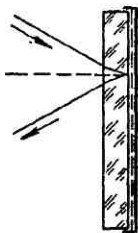


Рис. II. 22

Зеркала с серебряным покрытием на задней стороне в настоящее время вытесняются зеркалами, покрытыми специальными алюминиевыми сплавами, обладающими антикоррозийными свойствами при достаточно высокой отражательной способности. Такие покрытия наносятся непосредственно на переднюю поверхность зеркала. Коэффициент отражения таких зеркал 0,85—0,90. Однако наиболее целесообразным оказалось зеркало, покрытое серебряным или алюминиевым слоем (на передней поверхности), защищенным тонкой пленкой окиси алюминия. Его коэффициент отражения за счет интерференции света в пленке достигает 0,98. Такие

зеркала вытесняют в настоящее время даже отражательные призмы с полным внутренним отражением, при котором практически не происходит поглощения света.

Коэффициент τ_3 пропускной способности зеркал определяется по одной из следующих трех формул:

$$\left. \begin{aligned} \tau_3 &= 0,94^{s_1}; \\ \tau_3 &= 0,85^{s_2}; \\ \tau_3 &= 0,98^{s_3}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II. 106})$$

Здесь s_1 — число серебряных отражающих поверхностей, имеющих в рассматриваемом приборе;

s_2 — число алюминиевых отражающих поверхностей;

s_3 — число серебряных или алюминиевых просветленных поверхностей.

§ 51. Общая формула для потерь света в оптических приборах

Резюмируя сказанное в предыдущем разделе, можно объединить все потери света при прохождении через оптический прибор в одной приближенной формуле для быстрого вычисления коэффициента τ пропускной способности:

$$\tau = 0,96^k \cdot 0,95^f \cdot 0,98^{m_1} \cdot 0,99^{m_2} \cdot 0,995^{m_3} \cdot 0,99^d \cdot 0,94^{s_1} \cdot 0,85^{s_2} \cdot 0,98^{s_3}, \quad (\text{II. 107})$$

где k — число непросветленных поверхностей воздух—крон;

f — число непросветленных поверхностей воздух—флинт;

m_1 — число однослойно просветленных поверхностей;

m_2 — число двухслойно просветленных поверхностей;

m_3 — число трехслойно просветленных поверхностей;

d — суммарная длина хода осевого луча в стекле оптических деталей в см;

s_1 — число серебряных отражающих поверхностей;

s_2 — число алюминиевых отражающих поверхностей;

s_3 — число серебряных или алюминиевых просветленных отражающих поверхностей.

Поверхности склейки и отражающие поверхности призм, на которых происходит полное внутреннее отражение, совсем не принимаются во внимание.

При практическом применении формулы (II. 107) ее целесообразно прологарифмировать:

$$\lg \tau = k (0,982271 - 1) + f (0,977724 - 1) + m (0,997823 - 1) + \\ + d (0,995635 - 1) + s_1 (0,973128 - 1) + s_2 (0,929419 - 1) + \\ + s_3 (0,991226 - 1). \quad (\text{II. 108})$$

Пусть, например: $k = f = s_1 = s_2 = 0$; $m = 10$; $d = 50$ см; $s_3 = 2$. По формуле (II. 108) находим, располагая слагаемые столбцом и суммируя их,

$$\begin{array}{r} 0,97823 - 1 \\ 0,78175 - 1 \\ 0,98245 - 1 \\ \hline \lg \tau = 0,74243 - 1 \\ \tau = 0,5526. \end{array}$$

Приведенные здесь формулы не учитывают потерь, вносимых светофильтрами. Последние характеризуются их оптической плотностью D_λ , связанной с пропускной способностью τ_λ формулой

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda. \quad (\text{II. 109})$$

Как τ_λ , так и D_λ меняются с изменением длины волны света. В значения D_λ , приводимые в каталогах, включены потери света на отражение от преломляющих поверхностей светофильтров.

Для приблизительной оценки потерь света в светофильтрах, применяемых в фотографии, можно пользоваться их интегральной кратностью K , связанной с их интегральной пропускной способностью τ соотношением

$$K = \frac{1}{\tau}. \quad (\text{II. 110})$$

Например, светофильтр с кратностью $K = 4$ обладает пропускной способностью $\tau = 0,25$. Формулы (II. 107) и (II. 108) не учитывают также потерь, вносимых светоделительными устройствами (призмами с полупрозрачными поверхностями).

Наконец, при расчете осветительных систем, применяемых в проекционных установках, нередко за источником света ставится рефлектор — сферическое зеркало, центр кривизны которого совпадает с осевой точкой источника света. Направляя обратно в источник света световой поток, который без рефлектора не был бы использован, рефлектор существенно повышает полезный световой поток проектора. Это следует учитывать путем введения в формулу (II. 107) множителя τ_r , который больше единицы. В случае применения рефлектора с кинолампами накаливания $\tau_r = 1,4$. Следовательно, введение рефлектора увеличивает полезный световой поток на 40%.

В. ДЕЙСТВИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА СОВМЕСТНО С ГЛАЗОМ ЧЕЛОВЕКА

§ 52. Строение глаза человека

В последние десятилетия в связи с внедрением в промышленность фотоэлектрических приемников чаще стали применяться оптические приборы, не имеющие никакого отношения к работе

человеческого органа зрения (например, устройства для записи и воспроизведения звука в кино). Однако подавляющее большинство оптических приборов обслуживает глаз человека. При конструировании таких приборов необходимо учитывать ряд требований, которые позволяют создать наиболее рациональные условия работы глаза совместно с оптическим прибором. Поэтому здесь следует рассмотреть некоторые физиологические и оптические свойства человеческого глаза. Эти свойства исследуются специальной наукой, находящейся на стыке биологии (медицины) и физики (оптики) и называемой физиологической оптикой. Здесь мы кратко изложим только наиболее важные практически основные понятия и положения этой науки.

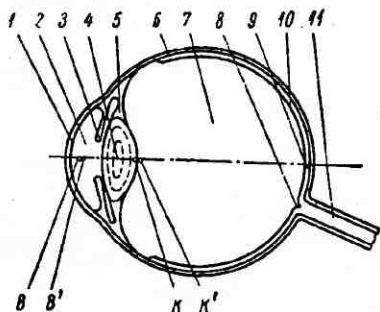


Рис. II. 23

На рис. II. 23 показано сечение правого *глазного яблока* человека диаметральной горизонтальной плоскостью. Глазное яблоко заключено в эластичную белую оболочку, называемую склерой 6. Склера непрозрачна за исключением ее передней слегка выпуклой части, называемой *роговой оболочкой* или *роговицей* 1, отличающейся высокой прозрачностью и позволяющей поэтому свету проник-

нуть в *переднюю камеру* 2 глаза, заполненную прозрачной жидкостью — *водянистой влагой*. Сзади передняя камера ограничена непрозрачной перегородкой, называемой *ирисовой оболочкой* или *радужкой* 3. По окраске радужки определяется цвет глаза человека. В центре радужки находится круглое отверстие, называемое *зрачком* глаза. За радужной оболочкой расположена *задняя камера* глаза, в передней части которой находится *хрусталик* 4 — линзообразное прозрачное тело, обладающее эластичностью хряща и слоистым строением. Хрусталик заключен в тонкой прозрачной капсуле (мешочке), прикрепленной при помощи так называемых *цинновых связок* 5 к мускульному кольцу. Вся большая полость глаза, находящаяся между хрусталиком и задней стенкой глаза, заполнена студенистым прозрачным веществом, называемым *стекловидным телом* 7. Внутренняя поверхность склеры со стороны стекловидного тела покрыта светочувствительной *сетчатой оболочкой* 10, называемой также *ретиной*, или *сетчаткой*. В пигментированном слое сетчатки, толщина которого (у *желтого пятна*) составляет около 0,1 мм, заключены *палочки* и *колбочки* — светочувствительные клеточные окончания нервных путей. В палочках заключается светочувствительное вещество *родопсин* или *зрительный пурпур* розового цвета. Колбочки содержат светочувствительное вещество *иодопсин* фиолетового цвета. Сетчатка глаза человека

Данные схематического глаза по А. Гульстранду
(длины в мм; рефракция и аметропия в дптр)

Наименование величин	Строгий		Упрощенный	
	Покой аккомодации	Наибольшая аккомодация	Покой аккомодации	Наибольшая аккомодация
Показатели преломления				
Роговица	1,376	1,376	1,336	1,336
Водянистая влага и стекловидное тело	1,336	1,336	1,336	1,336
Хрусталик (наружные слои) . . .	1,386	1,386	1,413	1,424
Ядро хрусталика	1,406	1,406	—	—
Расстояния от передней вершины роговицы				
Задняя поверхность роговицы	0,50	0,50	—	—
Передняя поверхность хрусталика	3,60	3,20	3,60	3,20
Передняя поверхность ядра хрусталика	4,145	3,874	—	—
Задняя поверхность ядра хрусталика	6,565	6,528	—	—
Задняя поверхность хрусталика	7,20	7,20	7,20	7,20
Передняя главная точка <i>B</i> глаза	1,348	1,772	1,505	1,821
Задняя главная точка <i>B'</i> глаза	1,602	2,086	1,631	2,025
Передняя узловая точка <i>K</i> глаза	7,078	6,533	7,130	6,579
Задняя узловая точка <i>K'</i> глаза	7,332	6,847	7,256	6,783
Передний фокус глаза	—15,707	—12,397	—15,235	—12,355
Задний фокус глаза	24,387	21,016	23,996	20,963
Центральная ямка сетчатки . . .	24,000	24,000	24,000	24,000
Входной зрачок глаза	3,047	2,668	3,048	2,671
Выходной зрачок глаза	3,667	3,212	3,519	3,096
Положение ближней точки <i>B</i> глаза	—	—102,3	—	—100,8
Радиусы кривизны				
Передняя поверхность роговицы	7,70	7,70	7,800	7,800
Задняя поверхность роговицы	6,80	6,80	—	—
Передняя поверхность хрусталика	10,00	5,33	10,000	5,330
Передняя поверхность ядра хрусталика	7,911	2,655	—	—

Наименование величин	Строгий		Упрощенный	
	Покой аккомодации	Наибольшая аккомодация	Покой аккомодации	Наибольшая аккомодация
Задняя поверхность ядра хрусталика	—5,760	—2,655	—	—
Задняя поверхность хрусталика	—6,000	—5,330	—6,000	—5,330
Оптические характеристики глаза				
Рефракция глаза	58,64	70,57	59,74	70,54
Переднее фокусное расстояние	—17,055	—14,169	—16,740	—14,176
Заднее фокусное расстояние	22,785	18,930	22,365	18,938
Линейное увеличение в зрачках	0,909	0,941	0,923	0,955
Аметропия (осевая рефракция)	+1,0	—9,6	0,0	—9,7

содержит около $13 \cdot 10^7$ палочек и $7 \cdot 10^6$ колбочек. В средней части сетчатки преобладают колбочки, а ее периферические части состоят главным образом из палочек. Местом наиболее ясного видения служит желтое пятно сетчатки. Оно заполнено колбочками, имеющими малые размеры (диаметр около 5 мкм). Угловой размер желтого пятна около $6-7^\circ$. В центре желтого пятна находится центральная ямка 9. В сторону носа сбоку от желтого пятна расположено слепое пятно 8. В этом месте сетчатки отсутствуют палочки и колбочки. Все нервные волокна, идущие от палочек и колбочек, собираются здесь и сплетаются в зрительный нерв 11, который здесь покидает глазное яблоко, направляясь в мозг человека, где в затылочных долях коры больших полушарий происходит восприятие и расшифровка зрительных впечатлений.

Прозрачные среды глаза человека: роговая оболочка, жидкая влага, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему глаза, создающую изображение рассматриваемых предметов на сетчатой оболочке. Значения характеристических величин, близко подходящие к средним, наблюдаемым фактически, даны в так называемом схематическом глазе А. Гульстранда и приведены в табл. II. 3. Данные таблицы относятся к нормальному (эмметропическому) глазу в двух случаях: для покоя аккомодации (предмет на бесконечности) и для наибольшей аккомодации (предмет на расстоянии 102,3 мм). Переднее и заднее фокусные расстояния глаза не равны друг другу по абсолютной величине вследствие формулы

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}. \quad (\text{II. 111})$$

Для человеческого глаза имеем: $n = 1$, $n' = 1,336$.

§ 53. Острота зрения

Под термином *острота зрения* понимается способность глаза человека видеть раздельно два предмета, расположенных близко друг от друга, в частности, две светящиеся точки. Наименьший угол γ , под которым глаз человека видит две точки раздельно, называется *предельным углом разрешающей способности*. Средняя величина угла γ составляет $1'$. Соответствующее этому углу расстояние между изображениями точек на сетчатке глаза — около 5 мкм , что равно диаметру колбочки в желтом пятне сетчатки.

Острота зрения S определяется по формуле

$$S = \frac{1}{\gamma}, \quad (\text{II. 112})$$

причем предельный угол разрешающей способности γ выражается в угловых минутах. Например, если предельный угол разрешающей способности у некоторого наблюдателя равен $2'$, то его острота зрения будет $S = 0,5$. Есть люди, обладающие очень большой остротой зрения $S > 3$.

Острота зрения, в основном определяемая диаметром колбочек, зависит, кроме того, от многих факторов.

1. От контраста предметов. Контрастом K принято называть отношение

$$K = \left| \frac{E_n - E_\phi}{E_n + E_\phi} \right|, \quad (\text{II. 113})$$

где E_n — освещенность предметов;

E_ϕ — освещенность фона.

Величина K достигает значения единицы, если E_n или E_ϕ обращается в нуль. Острота зрения более или менее пропорциональна величине K , если последняя не сильно отличается от единицы.

2. От освещенности в поле наблюдения. При наблюдении темных предметов на светлом поле наибольшая острота зрения наблюдается в пределах освещенности от 50 до 200 лк , а при наблюдении светлых предметов на темном фоне — от 5 до 10 лк (*темновая адаптация* глаза).

3. От диаметра зрачка глаза $D_{з.а.}$. С величиной $D_{з.а.}$ связан диаметр δ дифракционного пятна рассеяния на сетчатке

$$\delta = - \frac{1,2\lambda}{D_{з.а.}} f_{з.а.}, \quad (\text{II. 114})$$

где λ — длина волны света;

$f_{з.а.}$ — переднее фокусное расстояние глаза.

При наименьшем (без прибора) диаметре зрачка глаза $D_{з.а.} = 2,0 \text{ мм}$, $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ и $f_{з.а.} = -17 \text{ мм}$ находим: $\delta = 5 \text{ мкм}$. Следовательно, диаметр кружка рассеяния в этом случае равен диаметру колбочки. При увеличении диаметра $D_{з.а.}$ величина δ по формуле (II. 114) уменьшается, но острота зрения при этом

не повышается, так как она лимитируется размером колбочек сетчатки. В случае если глаз работает вместе с оптическим прибором, диаметр D' выходного зрачка которого меньше 2 мм, величина δ становится больше 5 мкм и разрешающая способность глаза уменьшается (угол γ становится больше $1'$).

4. От места изображения на сетчатке. При удалении от центральной ямки желтого пятна острота зрения падает очень резко.

5. От длины волны λ света. Максимальная разрешающая способность наблюдается при $\lambda = 0,56$ мкм.

6. От дефектов зрения. Близорукость, дальнозоркость и астигматизм (особенно последний) существенно снижают остроту зрения. Сюда же относятся и aberrации оптической системы глаза. Их влияние, однако, незначительно и обычно не обнаруживается.

Поверхность сетчатки (рис. II. 24), рассматриваемая при помощи микроскопа, представляется как бы покрытой сеткой с шестигранными ячейками (отсюда название сетчатка). Каждая клетка (колбочка) может воспринимать одновременно лишь одно

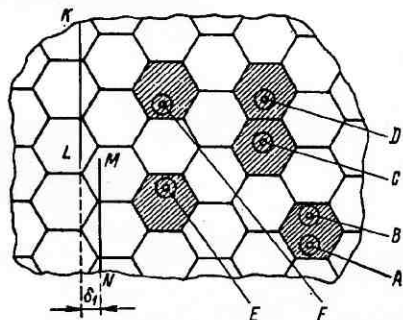


Рис. II. 24

зрительное впечатление. Иными словами, если засвечена некоторая часть клетки, то клетка реагирует вся целиком. Если, например, изображения A и B двух источников света (звезд) попадают на одну ячейку, то глаз их различить не сможет. Но даже если изображения двух звезд C и D падают на соседние клетки, глаз не в состоянии видеть их раздельно. Только если между двумя засвеченными колбочками находится по крайней мере одна незасвеченная, точки E и F представляются глазу видимыми раздельно. Отсюда вытекает, что наименьшее расстояние между изображениями двух точек на сетчатке, при котором они находятся на пределе разрешения, должно быть равно диаметру колбочки.

В устройствах для отсчета по шкалам иногда возможно создать условия, способствующие повышению остроты зрения. Так, номинальное совмещение двух штрихов может быть выполнено с погрешностью в $10''$. Следовательно, острота зрения при этом оказывается в 6 раз больше обычной. Объяснить этот факт можно тем, что изображения KL и MN (рис. II. 24) двух штрихов на сетчатке попадают на два разных ряда колбочек даже в том случае, если величина сдвига δ_1 значительно меньше диаметра колбочки. С такой же повышенной остротой зрения глаз человека производит установку по бисектору, когда штрих шкалы устанавливается в середине между двумя параллельными штрихами индекса.

§ 54. Адаптация глаза и его пороговая чувствительность

Глаз человека способен работать в чрезвычайно широком интервале яркостей: от 10^{-7} до 10^6 нт, что составляет перепад в отношении $1 : 10^{13}$. По ширине интервала работы глаз далеко превосходит все приборы, созданные руками человека. Способность человеческого глаза приравниваться к различным уровням освещенности называется *адаптацией*. Адаптация в широких пределах достигается глазом при помощи трех структурно-физиологических устройств или, как принято говорить, трех механизмов.

Первый механизм адаптации: при яркости от 10^{-7} до 1 нт работают главным образом палочки сетчатки, отличающиеся более высокой чувствительностью, но не различающие цвета; при яркостях от 1 до 10^6 нт работают в основном колбочки, обладающие цветной чувствительностью.

Вторым механизмом адаптации служит изменение диаметра отверстия зрачка глаза в пределах от 2 до 8 мм. Это изменение диаметра происходит помимо воли человека, благодаря работе мускульных волокон, заложенных в радужке. Площадь отверстия зрачка и пропускаемый им световой поток изменяются, таким образом, только в 16 раз.

Значительно сильнее изменяется яркостный диапазон работы глаза посредством третьего механизма. Этот механизм двойной: во-первых, чем выше освещенность, тем ниже концентрация неразложившегося светочувствительного вещества (родопсина или иодопсина), а потому меньше светочувствительность сетчатки; во-вторых, в слое сетчатки происходит перемещение темного пигмента; при повышении освещенности пигмент перемещается к наружной поверхности сетчатки, частично заслоняя ее клетки от светового воздействия.

Различают темновую (ночную, сумерочную) и световую (дневную) адаптации. Существуют и промежуточные ступени адаптации,

§ 55. Аккомодация глаза. Аметропический глаз

Аккомодацией мы называем способность глаза отчетливо видеть фиксируемые предметы независимо от расстояния от глаза до предмета. Фиксация какого-либо предмета состоит из двух действий. Первое заключается в направлении визирной оси глаза на предмет, чтобы его изображение возникло на желтом пятне сетчатки, где острота зрения максимальна. Это действие выполняется сознательно, по воле человека. Второе действие заключается в аккомодации глаза. Эта операция выполняется глазом без участия воли человека. В отличие от фотографического

аппарата, где фокусировка на резкость производится путем изменения расстояния от объектива до светочувствительной пленки, расстояние от роговицы до сетчатки (длина глазного яблока) не меняется. Аккомодация глаза производится путем изменения силы оптической системы глаза, что достигается изменением кривизны поверхностей хрусталика. Если мускульное кольцо, к которому прикреплены цинновы связи 5 (рис. II. 23), расслаблено, связи натягивают мешок хрусталика 4 и кривизна его поверхностей становится минимальной. В таком случае на сетчатке получается резкое изображение наиболее далекого предмета. По мере сжатия мускульного кольца натяжение цинновых связок уменьшается, а вследствие этого возрастают кривизна поверхностей хрусталика и его сила. При максимальном сжатии мускульного кольца глаз отчетливо видит наиболее близкие предметы.

Расстояние от вершины Γ роговицы глаза (или от его входного зрачка) до точки A предмета, представляет собой *расстояние аккомодации* a (рис. II. 25, а). При действительном предмете это расстояние отрицательное. Обратная величина расстояния a называется *величиной аккомодации* и выражается в диоптриях.

$$Akk = \frac{1000}{a}. \quad (\text{II. 115})$$

Точка D визирной оси глаза, которую он видит резко при отсутствии напряжения аккомодационного аппарата, называется

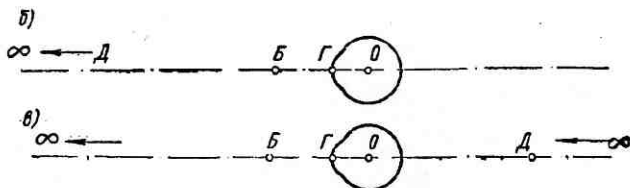


Рис. II. 25

жении аккомодации, — *ближней точкой глаза*. Объемом (или шириной) аккомодации принято называть величину V_a .

$$V_a = \frac{1000}{a_B} - \frac{1000}{a_D}. \quad (\text{II. 116})$$

Зона аккомодации простирается от точки B до точки D .

Сфера DE , центр которой совпадает с центром вращения O глазного яблока, проходящая через дальнюю точку D глаза, называется *дальней сферой глаза*. Такая же сфера BB , но проходящая через ближнюю точку B глаза, является *ближней сферой глаза*.

Глаз называется *нормальным* или *эмметропическим*, если его дальняя точка D лежит на бесконечности (рис. II. 25, б). При этом зона аккомодации простирается от точки B налево до бесконечности. Эмметропический глаз способен поэтому видеть звезды отчетливо без напряжения аккомодации. В случае если дальняя точка глаза не лежит на бесконечности, глаз называется *аметропическим*. *Аметропия* — очень распространенный недостаток зрения. Она выражается в диоптриях как обратная величина расстояния a_d .

$$A = \frac{1000}{a_d}. \quad (\text{II. 117})$$

Различаются два вида аметропии. Если точка D лежит перед глазом (на рис. II. 25, а слева от точки Γ), то глаз называется *близоруким* или *миопическим*. Близорукость характеризуется отрицательным значением отрезка a_d и аметропии A . Без напряжения аккомодации он видит предмет, находящийся перед ним на конечном расстоянии. Он совершенно не способен видеть отчетливо далекие предметы (звезды).

Если дальняя точка глаза лежит за глазом (на рис. II. 25, в справа от точки Γ), то глаз называется *дальнозорким* или *гиперметропическим*. Для дальнозоркости характерны положительные значения отрезка a_d и аметропии A . Дальнозоркий глаз может отчетливо видеть бесконечно далекие предметы, но ему необходимо для этого некоторое напряжение аккомодации. Без напряжения аккомодации он видел бы мнимый предмет, находящийся у точки D и создаваемый входящими в зрачок глаза конвергирующими (сходящимися) пучками лучей. Зона аккомодации гиперметрического глаза простирается от точки B налево до бесконечности и справа от бесконечности до точки D .

Причиной аметропии часто служит неправильная длина глазного яблока: при увеличенной его длине — *миопия*, при уменьшенной — *гиперметропия*. Но иногда встречаются случаи аметропии, вызванной неправильной формой роговицы или хрусталика. Известна прогрессирующая близорукость у детей школьного возраста, вызываемая чрезмерным напряжением зрения при чтении, устранимая при помощи соответствующих очков.

Ближняя точка B глаза за время жизни человека непрерывно отодвигается от роговицы глаза. Отрезок — a_B (в мм) следующим образом меняется с возрастом:

10 лет	71	40 лет	222
20 »	100	50 »	400
30 »	143	60 »	2000

В качестве средней величины принимается $a_B = -125$ мм. Когда расстояние a_B возрастает до -330 мм, наступает состояние, называемое старческой дальнозоркостью или *пресбиопией*.

Когда человек читает книгу, он держит ее на некотором расстоянии от глаз. Это расстояние принято называть расстоянием наилучшего видения, что, по существу, неправильно, так как никакого наилучшего видения здесь не получается. Это расстояние устанавливается человеком инстинктивно в результате взаимодействия двух противоречивых требований. С одной стороны, нужно книгу (или вообще предмет, обладающий мелкими структурными деталями) держать как можно ближе к глазам для того, чтобы видеть буквы (детали) под большими углами зрения. С другой стороны, для уменьшения напряжения аккомодации, а следовательно, и утомления при чтении следует отодвигать книгу от глаз. Практически человек держит книгу на таком расстоянии, которое не требует очень сильного напряжения аккомодации, но в то же время достаточно мало, чтобы различать мелкий шрифт. Это расстояние вдвое больше расстояния до ближней точки глаза и в среднем принимается равным -250 мм или -4 дптр.

§ 56. Коррекция недостатков зрения

Основное назначение очков заключается в исправлении (коррекции) аметропии глаз. Достигается это очень просто. Перед глазом помещается линза, которая создает изображение осевой точки бесконечно далекого предмета в дальней точке глаза. Тогда глаз отчетливо видит бесконечно далекую точку без напряжения акко-

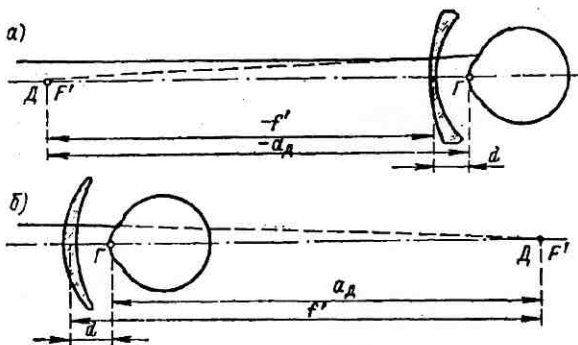


Рис. II. 26

модации, а значит, вся система глаза вместе с очковой линзой действует как эметропический глаз.

На чертеже (рис. II. 26, а) показана коррекция миопического глаза при помощи отрицательной линзы, расположенной перед

глазом на расстоянии d от вершины Γ роговицы глаза. Задний фокус F' линзы совмещен с дальней точкой D близорукого глаза. Заднее фокусное расстояние f' очковой линзы связано с отрезком a_d при помощи выражения, считываемого с чертежа

$$f' = a_d + d. \quad (\text{II. 118})$$

Переходя от f' к рефракции (силе) D линзы и от отрезка a_d к аметропии A по формуле (II. 117), получаем

$$D = \frac{A}{1 + \frac{A}{1000} d}. \quad (\text{II. 119})$$

В случаях когда d мало по сравнению с отрезком a_d , можно заменить эту формулу более простым выражением

$$D = A. \quad (\text{II. 120})$$

На чертеже (II. 26, б) показано действие положительного очкового стекла в случае гиперметропического глаза. И здесь линза расположена перед глазом таким образом, что ее задний фокус F' совпадает с дальней точкой D глаза. Формулы (II. 118)—(II. 120) остаются справедливыми и для коррекции дальнозоркости.

Довольно часто встречается недостаток зрения, называемый *глазным астигматизмом* (не следует путать с астигматизмом наклонных пучков в оптических системах). Чаще всего встречается астигматизм роговицы глаза, заключающийся в том, что в разных меридиональных сечениях радиус кривизны роговицы имеет различные значения. Вследствие этого рефракция глаза, а потому и его аметропия становятся различными в разных меридиональных сечениях. При этом существуют две взаимно перпендикулярные меридиональные плоскости, называемые главными меридиональными сечениями, в которых аметропия имеет экстремальные значения (в одном главном сечении — минимум аметропии, в другом — максимум). Реже встречается астигматизм глаза, обусловленный неправильностью формы преломляющих поверхностей хрусталика.

Для коррекции аметропии астигматического глаза очковая линза должна обладать в двух главных меридиональных сечениях различной рефракцией, необходимой для исправления аметропии глаза в этих сечениях. Достигается такой результат применением цилиндрических, а еще лучше — торических преломляющих поверхностей.

В Европе очки известны уже в конце средних веков: первое изображение человека с очками встречается на картине Томасо да Модена (1352 г.). Но до начала нашего столетия очки не были свободны от существенного недостатка: астигматизма наклонных пучков лучей.

На чертеже (рис. II. 27) представлено взаимное расположение очкового стекла и глазного яблока, вращающегося вокруг центра Z'

вращения глаза. При повороте глазного яблока на некоторый угол $\beta = P_2 Z' S_2$ относительно оптической оси очковой линзы вдоль визирной оси $P_2 Z'$ направляется в зрачок глаза пучок лучей, проходящий через краевую (не центральную) зону очковой линзы. Но в таком наклонном пучке лучей обнаруживается значительный астигматизм, если очковое стекло имеет форму двояковыпуклой линзы, широко применявшейся прежде.

В 1899 г. М. Чернинг показал, что астигматизм наклонных пучков, главные лучи которых пересекаются в центре Z' вращения глаза, может быть полностью устранен путем придания очковой линзе менискообразной формы, рассчитываемой при помощи специальной формулы, полученной им на основании теории aberrаций третьего порядка. Такие очковые стекла получили название *пунктальных* стекол и довольно быстро вытеснили прежние несовершенные формы очковых линз.

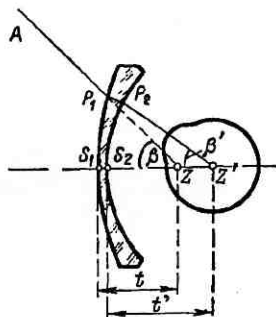


Рис. II. 27

Центр вращения Z' глаза находится на расстоянии 14,43 мм от передней вершины роговицы глаза, поэтому расстояние от вершины S_2 задней поверхности очковой линзы до центра Z' глаза принимается обычно равным $i' = 25$ мм (40 дптр).

Главные лучи AP_1 в пространстве предметов пересекаются в точке Z , сопряженной с точкой Z' . Отрезок $t = S_1 Z$ зависит от рефракции очковой линзы.

Формула Чернинга представляет собой уравнение второй степени, позволяющее определить рефракцию D_1 первой поверхности стекла, если известны: показатель преломления n стекла линзы, рефракция D всей линзы и обратная величина τ' отрезка t' , выраженная в диоптриях

$$(n + 2)D_1^2 - [(n + 2)D + 2(n^2 - 1)\tau']D_1 + n[D + (n - 1)\tau']^2 = 0. \quad (\text{II. 121})$$

Рефракция D_2 второй поверхности линзы и ее радиусы находятся по формулам

$$D_2 = D - D_1; \quad (\text{II. 122})$$

$$r_1 = \frac{n-1}{D_1}; \quad r_2 = -\frac{n-1}{D_2}. \quad (\text{II. 123})$$

Толщина d линзы принята равной нулю. На графике (рис. II. 28) представлена зависимость D_1 от D , выражаемая формулой (II. 121), при $\tau' = 40$ дптр и $n = 1,523$. Из графика видно, что устранение астигматизма возможно при условии

$$-24,5 \leq D \leq \pm 8 \text{ дптр.}$$

Для коррекции зрения глаза с высокой степенью гиперметропии порядка $+14 \div +16$ дптр, которая возникает после оперативного удаления хрусталика, пунктальные стекла (с устранением астигматизма) могут быть созданы только при условии применения асферических поверхностей.

В последние годы в связи с получением высококачественных прозрачных пластмасс распространяется применение контактных линз для коррекции недостатков зрения. Контактными линзами называются прозрачные колпачки, надеваемые на переднюю поверхность глазного яблока и действующие как рассеивающая (рис. II. 29, а) или собирающая (рис. II. 29, б) линза, исправляющая тот или иной недостаток зрения. В последнее время стали применять так называемые плавающие контактные

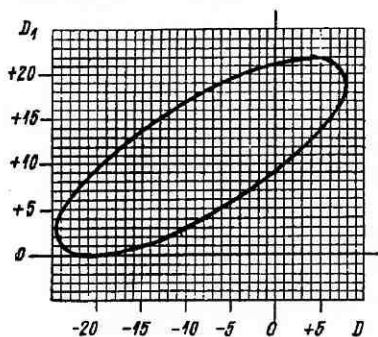


Рис. II. 28

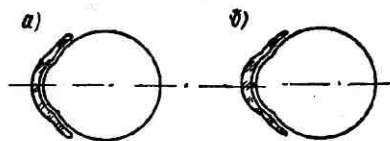


Рис. II. 29

линзы, которые в отличие от линз, показанных на рис. II. 29, не имеют наружной части, опирающейся на склеру глаза, и надеваются только на поверхность роговой оболочки. Такие линзы не вызывают болезненных явлений при продолжительном ношении. Нужно, однако, иметь в виду, что контактные линзы требуют очень тщательной индивидуальной подгонки к форме роговой оболочки глаза.

§ 57. Видимое увеличение оптического прибора. Условие естественного впечатления

Кроме введенных в геометрической оптике трех увеличений: линейного V , углового W и продольного Q — нам необходимо еще ввести четвертое увеличение, называемое *видимым* и обозначаемое заглавной греческой буквой Γ (гамма). Видимое увеличение характеризует способность оптического прибора создавать на сетчатке глаза более крупное (или более мелкое) изображение по сравнению с изображением, возникающим на сетчатке глаза при рассматривании того же предмета невооруженным глазом.

Нетрудно убедиться в том, что другие увеличения непригодны для указанной цели. Определим, например, линейное увеличение V лупы (увеличительного стекла), пользуясь формулами

$$V = -\frac{l}{x} = -\frac{x'}{f'} \quad (\text{II. 124})$$

Так как дальняя точка D эмметропического глаза лежит на бесконечности, то для устранения утомляющей глаз аккомодации нужно так расположить лупу относительно предмета, чтобы изображение этого предмета находилось тоже на бесконечности. Тогда оно совпадет с дальней сферой глаза, который при этом освобождается от аккомодационного усилия. Но в таком случае предмет должен находиться в передней фокальной плоскости лупы, а потому $x = 0$; $x' = \infty$. Вследствие этого обе формулы (II. 124) при-

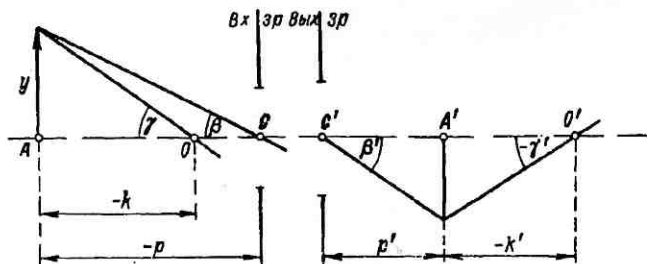


Рис. II. 30

водят к результату $V = \infty$, справедливому для любой лупы, независимо от того, какой увеличивающей способностью она обладает.

Так как величина изображения на сетчатке глаза, очевидно, пропорциональна углу γ , под которым рассматриваемый предмет виден из центра зрачка глаза, можно выразить видимое увеличение Γ формулой

$$\Gamma = \frac{\gamma'}{\gamma}, \quad (\text{II. 125})$$

где γ — угол, под которым предмет виден невооруженному глазу наблюдателя, смотрящего на этот предмет без прибора;

γ' — угол, под которым глазу наблюдателя видно изображение того же предмета при рассматривании его через оптический прибор.

Выведем здесь общую формулу, служащую для вычисления видимого увеличения Γ и справедливую для любого оптического прибора, действующего совместно с глазом человека.

Пусть y осевой точки A (рис. II. 30) находится предмет y . Кроме того, в пространстве предметов расположен еще входной зрачок оптического прибора с центром в точке C . В пространстве изображений находится выходной зрачок с центром в точке C' . Там же находится и изображение предмета y с осевой точкой A' . Это изображение рассматривается глазом наблюдателя, центр зрачка которого помещается в точке O' . На чертеже показаны отрезки $p = CA$ и $p' = C'A'$.

Представим себе далее ход главного луча, идущего от внеосевого конца предмета y и проходящего через точки C и C' , а также через внеосевой конец изображения. Этот луч образует с оптической осью углы β и β' . Наблюдатель, центр зрачка глаза которого лежит в точке O' , видит изображение y' под углом γ' . При этом мы вводим отрезок $k' = O'A'$ и условимся считать началом этого отрезка лежащим в точке O' . Так как свет распространяется всегда по направлению к глазу (к точке O'), то отрезок k' — всегда отрицательный.

То же самое следует сказать и относительно отрезка $k = OA$ в пространстве предметов, причем в точке O помещается центр зрачка глаза наблюдателя, который (для сравнения) рассматривает непосредственно предмет y и видит его под углом γ .

Углы γ и γ' находятся из соответствующих треугольников:

$$\gamma = -\frac{y}{k}; \quad \gamma' = -\frac{y'}{k'}. \quad (\text{II. 126})$$

Подставив эти выражения в формулу (II. 125) и учитывая, что $V = y'/y$, получим

$$\Gamma = V \frac{k}{k'}. \quad (\text{II. 127})$$

Этой формулой для видимого увеличения мы в дальнейшем будем пользоваться в некоторых теоретических выкладках. Для практических задач она неудобна, так как приобретает во многих частных случаях неопределенный вид.

Представив формулу (II. 127) в виде

$$\Gamma = \frac{y'}{y} \frac{k}{k'}, \quad (\text{II. 128})$$

найдем величины y и y' из другой пары треугольников

$$y = -\beta p; \quad y' = -\beta' p'. \quad (\text{II. 129})$$

После подстановки этих значений в формулу (II. 128), (II. 129) получается

$$\Gamma = \frac{\beta' p' k}{\beta p k'}. \quad (\text{II. 130})$$

Отношение β'/β есть угловое увеличение W_c в зрачках

$$\frac{\beta'}{\beta} = W_c. \quad (\text{II. 131})$$

От углового увеличения W_c можно перейти к линейному увеличению V_c в зрачках при помощи формулы:

$$V_c W_c = -\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}, \quad (\text{II. 132})$$

отсюда следует

$$W_c = \frac{n}{n'V_c}. \quad (\text{II. 133})$$

Подставляя эту величину W_c вместо отношения β'/β в формулу (II. 130), получим для видимого увеличения Γ выражение

$$\Gamma = \frac{np'k}{n'pk'V_c}. \quad (\text{II. 134})$$

Эта формула позволяет определить видимое увеличение любого оптического прибора. При этом в зависимости от того, служит ли прибор для рассматривания далеких или близких предметов, должен быть различным образом выполнен выбор отрезков k и k' , оставшихся неопределенными в общей формуле (II. 134).

Рассмотрим применение формулы для Γ в случае приборов ближнего действия, имея в виду простейший из таких приборов — лупу. Положение выходного зрачка лупы определяется положением зрачка глаза наблюдателя. Зрачок глаза служит здесь и апертурной диафрагмой. Поэтому отрезок p' (расстояние от выходного зрачка прибора до изображения) и отрезок k' (расстояние от зрачка глаза до изображения), по сути дела, совпадают, независимо от их величины. В результате формула (II. 134) приобретает для прибора ближнего действия вид

$$\Gamma = \frac{nk}{n'V_{cp}}. \quad (\text{II. 135})$$

Воспользуемся далее формулой для отрезка p

$$p = \frac{n}{n'} f' \frac{V_c - V}{VV_c}.$$

Тогда получим вместо (II. 135)

$$\Gamma = \frac{kV}{f'(V_c - V)}. \quad (\text{II. 136})$$

Линейные увеличения V и V_c определяются по формулам:

$$V = -\frac{x'}{f'}; \quad V_c = -\frac{x'_c}{f'}. \quad (\text{II. 137})$$

Вследствие этого находим вместо выражения (II. 136)

$$\Gamma = \frac{kx'}{f'(x'_c - x')}. \quad (\text{II. 138})$$

На чертеже (рис. II. 31) представлена лупа, действующая совместно с аметропическим глазом. Предмет y находится на расстоянии x от переднего фокуса F лупы. Изображение y' находится на расстоянии x' от заднего фокуса F' лупы. Зрачок глаза, служащий выходным зрачком лупы, находится на расстоянии x'_c от

заднего фокуса F' лупы. Для того чтобы глаз мог работать без напряжения аккомодации, необходимо, чтобы осевая точка A' изображения совпала с дальней точкой D глаза. Поэтому отрезок $C'A'$ является не только одновременно отрезками p и k , но и отрезком a , связанным с аметропией A глаза формулой

$$a = \frac{1000}{A}. \quad (\text{II. 139})$$

По чертежу находим

$$x' = a + x'_c, \quad (\text{II. 140})$$

а на основании выражения (II. 139)

$$x' = \frac{1000}{A} + x'_c. \quad (\text{II. 141})$$

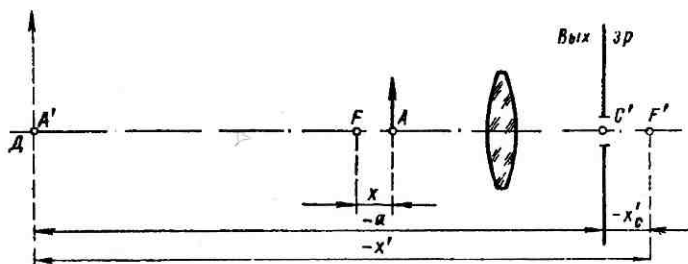


Рис. II. 31

Вследствие этого выражение (II. 138) приводится к виду

$$\Gamma = -\frac{k}{f'} \left(1 + \frac{Ax'_c}{1000} \right). \quad (\text{II. 142})$$

Остается еще условиться относительно выбора отрезка k : с какого расстояния наблюдатель рассматривает предмет невооруженным глазом? Чтобы напряжение аккомодации не было для него утомительным, будет наиболее правильным считать отрезок k равным расстоянию наилучшего видения, принимаемому 250 мм; $k = -250$ мм, так как отрезок k отрицательный.

В случае эметропического глаза в формуле (II. 142) нужно положить: $A = 0$. Поэтому для видимого увеличения Γ_0 лупы при эметропическом глазе получается известная формула

$$\Gamma_0 = \frac{250}{f'}. \quad (\text{II. 143})$$

Видимое увеличение Γ_0 лупы зависит только от одного ее конструктивного параметра — фокусного расстояния. Эта формула справедлива и для микроскопа.

Для аметропического глаза находим из выражения (II. 142)

$$\Gamma = \Gamma_0 \left(1 + \frac{Ax'_c}{1000} \right). \quad (\text{II. 144})$$

Однако, если зрачок глаза совмещен с задней фокальной плоскостью лупы и $x'_c = 0$, увеличение лупы для аметропа будет таким же, как и для эметропа: $\Gamma = \Gamma_0$.

Переходим к рассмотрению видимого увеличения приборов дальнего действия, имея в виду в основном фотоаппарат, применяемый для ландшафтной съемки, и пользуясь снова формулой (II. 134). При этом полагаем: $n = n' = 1$, поскольку фотообъектив окружен воздухом. На каком же расстоянии k от фотографируемого предмета нужно поставить наблюдателя, чтобы сравнить действие фотокамеры с действием невооруженного глаза? Очевидно, он должен находиться возле камеры. Следовательно, отрезок k нужно считать равным расстоянию p от входного зрачка прибора до предмета. Поэтому в формуле (II. 134) можно сократить отрезки k и p . Тогда получим

$$\Gamma = \frac{p'}{V_c k'}. \quad (\text{II. 145})$$

Пользуясь формулой

$$p' = f' (V_c - V), \quad (\text{II. 146})$$

находим для видимого увеличения Γ

$$\Gamma = \frac{f'}{k'} \left(1 - \frac{V}{V_c} \right). \quad (\text{II. 147})$$

Наконец, применив формулы (II. 137), получим выражение

$$\Gamma = \frac{f'}{k'} \left(1 - \frac{x'}{x'_c} \right). \quad (\text{II. 148})$$

Здесь x' — расстояние от заднего фокуса фотообъектива до светочувствительной поверхности фотопленки.

Если фотографируются далекие предметы, можно считать x' равным нулю; тогда получим вместо (II. 148)

$$\Gamma = \frac{f'}{k'}. \quad (\text{II. 149})$$

При выборе отрезка k' возникает необходимость рассмотреть четыре различных случая в зависимости от способа получения и рассматривания изображения.

Во-первых, можно задаться вопросом, каково будет видимое увеличение для фотографа, который рассматривает невооруженным глазом изображение, возникающее на матовом стекле, помещенном

на месте фотопленки. Фотокамеры, в которых именно таким способом производится наводка на резкость, ныне применяются только в фотоателье для портретной съемки. В этом случае расстояние k' от глаза фотографа до матового стекла можно считать равным расстоянию наилучшего видения: $k' = -250$ мм, и формула (II. 149) приобретает вид

$$\Gamma = -\frac{f'}{250}. \quad (\text{II. 150})$$

Так как f' положительно, для видимого увеличения Γ получится отрицательная величина. Это свидетельствует о том, что фотограф видит на матовом стекле изображение, перевернутое сверху вниз и справа налево.

Во-вторых, пусть рассматривается отпечатанный на фотобумаге снимок, полученный при помощи контактной печати. Контактная фотопечать заключается в том, что проявленный негатив накладывается эмульсионным слоем на эмульсионный слой светочувствительной бумаги, а затем бумага освещается сквозь негатив. На бумаге получается после проявления позитивный отпечаток, величина которого в точности равна величине изображения на негативе. Поэтому абсолютная величина увеличения Γ в случае контактной печати не изменится. Однако никто не станет рассматривать перевернутый снимок, его при рассмотривании поставят в правильное положение. Поэтому в случае контактной печати следует только отбросить знак минус в формуле (II. 150):

$$\Gamma = \frac{f'}{250}. \quad (\text{II. 151})$$

В-третьих, можно определить видимое увеличение, создающееся в зеркальных малоформатных фотографических камерах при наводке на резкость по изображению на матовом стекле. Это изображение рассматривается фотографом через лупу. Пусть фокусное расстояние объектива фотоаппарата будет $f'_{об}$. Представим себе сначала, что изображение на матовом стекле рассматривается прямо глазом, без лупы. Тогда получится видимое увеличение $\Gamma_{об}$, определяемое по формуле (II. 151)

$$\Gamma_{об} = \frac{f'_{об}}{250}.$$

Мы применили здесь эту формулу, а не формулу (II. 150) потому, что при помощи специальной призмы изображение переворачивается и становится прямым. На чертеже (рис. II. 32) показано схематически устройство такой фотокамеры в вертикальном сечении. Между фотографическим объективом 1 и фотопленкой 2 помещается плоское зеркало 3 (его положение в момент экспозиции показано пунктиром). После отражения от зеркала 3 свет проходит

через коллектив 4, нижняя плоская поверхность которого матирована и удалена от зеркала 3 на такое же расстояние (вдоль осевого луча), как и пленка 2. Далее свет проходит через пентапризму с крышей 6, которая и создает прямое изображение, через двухлинзовую лупу 5 и поступает в глаз фотографа.

Если изображение, возникшее на матовой поверхности коллектива 4, рассматривается не непосредственно глазом, а через лупу, обладающую видимым увеличением Γ_A , то величина изображения на сетчатке глаза возрастет в Γ_A раз. Поэтому общее видимое увеличение Γ можно определить по формуле

$$\Gamma = \Gamma_{об} \Gamma_A. \quad (II. 152)$$

Вследствие формул (II. 151) и (II. 143) получим из (II. 152) выражение

$$\Gamma = \frac{f'_{об}}{f'_A}, \quad (II. 153)$$

где f'_A — фокусное расстояние лупы.

Аналогичную формулу мы получим в § 78 для видимого увеличения зрительной трубы.

Наконец, в четвертых, рассмотрим случай, когда отпечаток на фотобумаге получается при помощи увеличителя. В этом случае в момент печатания снимка между негативом и светочувствительной бумагой расположен репродукционный объектив. При этом эмульсионный слой фотобумаги находится в плоскости, сопряженной с плоскостью эмульсии негатива. Таким образом, величина изображения на бумаге может быть сделана в V раз больше величины негативного изображения, если V — линейное увеличение увеличителя. Поэтому и видимое увеличение при рассмотрении увеличенного снимка возрастет в V раз по сравнению с видимым увеличением при рассмотрении негатива. Пользуясь для последнего формулой (II. 149), получим

$$\Gamma = \frac{VF'}{k'}. \quad (II. 154)$$

Введем масштаб увеличения M

$$M = |V| \quad (II. 155)$$

и отрезок l

$$l = |k'|. \quad (II. 156)$$

Тогда получим из выражения (II. 154) известную фотограмм формулу

$$\Gamma = \frac{Mf'}{l}. \quad (II. 157)$$

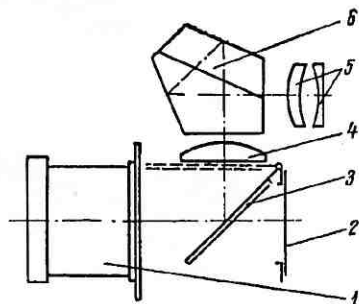


Рис. II. 32

В настоящее время, когда широко применяются малоформатные фотокамеры, обладающие короткофокусной оптикой, увеличение фотоснимков становится совершенно необходимым. При этом отрезок l следует выбирать сообразуясь с условиями рассматривания увеличенного снимка. Так, например, если снимок предназначен для газетной или книжной иллюстрации, то l следует сделать равным расстоянию наилучшего видения. Если же снимок будет экспонирован в фотовитрине, на фотовыставке, в стенной газете и т. п., следует учитывать, что его будут рассматривать со значительно большего расстояния. В таких случаях целесообразно выбрать l порядка 500—2000 мм в зависимости от местных условий.

На первых шагах развития художественной фотографии возник вопрос об естественном впечатлении, получаемом от фотографических снимков. Фотографы убедились, что оно возникает не всегда. Путем опытов было установлено, что естественное впечатление создают фотоснимки, получаемые фотографическими объективами с фокусным расстоянием примерно равным 250 мм. В то время снимки получались только контактной печатью [см. формулу (II. 151)]. При $f' = 250$ мм эта формула дает $\Gamma = 1$. В этом причина естественного впечатления. При видимом увеличении, равном единице, глаз, рассматривающий снимок, видит изображение строго под теми же углами, под которыми он видел бы самые предметы, если бы его зрачок находился на месте входного зрачка фотографического объектива в момент съемки. Благодаря этому создается безукоризненно правильная передача перспективы, позволяющая легко ориентироваться в пространстве, возникает объемное представление от простого плоского снимка. Конечно, здесь невозможно получить настоящий стереоскопический эффект, но правильность передачи перспективы — несомненно основное требование, предъявляемое к художественному фотоснимку.

В процессе развития фотографических камер фокусное расстояние f' объективов непрерывно уменьшалось и продолжает уменьшаться. При $f' = 250$ мм камера тяжела и громоздка, к ней нужны большие фотопластинки и требуется большой расход фотоматериалов, она неудобна в работе и дорога. Поэтому в настоящее время наша промышленность выпускает короткофокусные малоформатные фотокамеры. Это, однако, не значит, что современный фотолобитель лишен возможности получать снимки, дающие естественное впечатление. При помощи формулы (II. 157) можно прикинуть, каким должен быть масштаб увеличения M при условии естественного впечатления $\Gamma = 1$

$$M = \frac{l}{f'}. \quad (\text{II. 158})$$

Пусть, например, снимок получен фотокамерой «Зоркий» или «Ленинград» с объективом, имеющим фокусное расстояние $f' =$

= 50 мм. Если снимок будет рассматриваться с близкого расстояния (например, в альбоме), нужно положить: $l = 250$ мм, и формула (II. 158) дает: $M = 5$. Если же снимок предназначен для выставки, положим $l = 1000$ мм и получим $M = 20$. Такое увеличение снимка может быть получено при условии применения современной мелкозернистой фотопленки и специальных приемов обработки отпечатков.

Теоретическим основанием условия естественного впечатления служит требование равенства углов β и γ' (рис. II. 30), Под углом β виден предмет y из центра входного зрачка прибора. Под углом γ' мы видим изображение y' того же предмета. Условие естественного впечатления выражается формулой

$$\beta = \gamma'. \quad (\text{II. 159})$$

Пользуясь первой формулой (II. 129) и второй формулой (II. 126), получаем вместо выражения (II. 159),

$$\frac{y}{p} = \frac{y'}{k'}. \quad (\text{II. 160})$$

Имея в виду соотношение $\frac{y'}{y} = V$, найдем из формулы (II. 160)

$$\frac{1}{p} = \frac{V}{k'}. \quad (\text{II. 161})$$

Воспользуемся теперь формулой (II. 127) для видимого увеличения Γ . Вследствие (II. 161) из этой формулы находится выражение

$$\Gamma = \frac{k}{p}. \quad (\text{II. 162})$$

Отсюда следует, что Γ в общем случае не равно единице, как было указано выше. Однако для приборов дальнего действия, для которых мы полагаем $k = p$, величина Γ становится действительно равной единице. Но это требование не может быть применено к приборам ближнего действия, лупе и микроскопу, так как в этом случае отрезки k и p не равны.

В случае лупы (а также и микроскопа) требование естественного впечатления выражается формулой (II. 162). Сравнивая ее с выражением (II. 135), найдем

$$\frac{n}{n'V_c} = 1. \quad (\text{II. 163})$$

Наконец, вследствие выражения (II. 133) получаем

$$W_c = 1. \quad (\text{II. 164})$$

Таким образом, для приборов ближнего действия условие естественного впечатления сводится к требованию, чтобы угловое увеличение в зрачках прибора было равно единице.

Следует заметить, что в специальной литературе иногда встречается запутанная трактовка вопроса об естественном впечатлении. Изложенные здесь соображения помогут избежать ошибок в этом вопросе.

Условие естественного впечатления важно не только для художественной фотографии, оно не менее важно в области кино и телевидения. Для рассмотрения естественного впечатления в кино применим формулу (II. 157), полагая в ней $\Gamma = 1$,

$$l = Mf'. \quad (\text{II. 165})$$

Здесь l — расстояние от экрана в кинозале до глаза зрителя;
 f' — фокусное расстояние объектива киносъёмочной камеры, которой сняты кадры, проектируемые в данный момент на экран;

M — масштаб увеличения, которое дает кинопроекторный аппарат.

Формула (II. 165) позволяет найти расстояние l , на котором зритель получит естественное впечатление. При этом встречается затруднение: неизвестно фокусное расстояние f' киносъёмочной камеры. Однако обычно применяют фокусные расстояния, лежащие в пределах от 30 до 120 мм, в среднем можно применять $f' = 75$ мм. Масштаб M определяется по формуле

$$M = \frac{B}{b}, \quad (\text{II. 166})$$

где B — ширина экрана;

b — ширина кинокадра, равная 22 мм.

Подставляя эти значения в формулу (II. 165), находим выражение

$$l = 3,4B. \quad (\text{II. 167})$$

Это выражение справедливо и для случая передачи кинофильмов по телевидению.

В широкоэкранным кино коэффициент формулы (II. 167) вдвое меньше

$$l = 1,7B. \quad (\text{II. 168})$$

§ 58. Глубина резкости фотографического аппарата

Глубина резкости изображаемого пространства — камень преткновения для многих начинающих фотолюбителей, получающих на снимках нерезкое изображение слишком далеких или слишком близких предметов. Эта нерезкость вызвана тем, что фотографический объектив может дать резкое изображение только той части

пространства предметов, которая заключена между двумя ограничивающими ее плоскостями, называемыми передним и задним планами.

На чертеже (рис. II. 33) представлены входной и выходной зрачки оптического прибора, например фотографического аппарата, с центрами в точках C и C' . В пространстве изображений всегда имеется плоскость E' экрана приемника световой энергии, например поверхность светочувствительной пленки. В пространстве предметов, однако, обычно нет материальной плоскости предметов. Фотографируемые (или просто рассматриваемые) предметы расположены в пространстве произвольно, одни — ближе, дру-

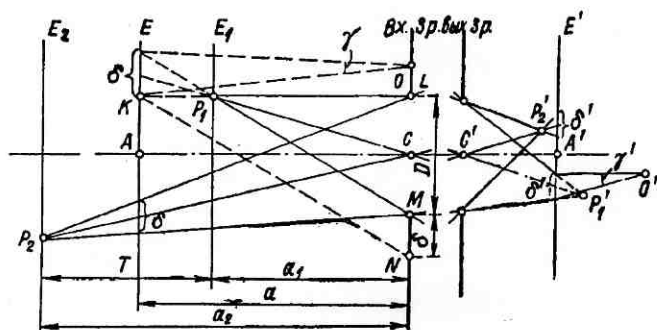


Рис. II. 33

гие — дальше. Но мы можем представить себе в пространстве предметов плоскость E , сопряженную с плоскостью E' пленки. Плоскость E (воображаемую) назовем плоскостью наводки, так как фотоаппарат действительно наведен на плоскость E , и если какая-либо материальная точка предмета лежит в этой плоскости, то на плоскости E' фотопленки возникнет безукоризненно резкое изображение этой точки (влиянием aberrаций и дифракции мы здесь пренебрегаем).

Отрезок $a = AC$ будем здесь считать положительным. Пусть некоторая точка P_1 материального предмета расположена ко входному зрачку ближе плоскости наводки. Тогда пучок лучей, исходящих из точки P_1 и заполняющих отверстие входного зрачка с диаметром D , после выхода из выходного зрачка направится в точку P_1' , сопряженную с точкой P_1 и не лежащую в плоскости E' . При этом на плоскости E' вместо резкого изображения точки P_1 возникнет кружок рассеяния с диаметром δ' .

Из сказанного можно было бы сделать неправильный вывод, что резкое изображение точки может быть получено только в случае, если эта точка лежит на плоскости наводки. На самом деле это не так, потому что надо еще учитывать остроту зрения глаза,

рассматривающего фотографический снимок. Будет ли изображение точки P_1 представляться глазу наблюдателя с центром зрачка в точке O' резким или нерезким, зависит еще и от величины угла γ' , под которым глаз увидит диаметр δ' кружка рассеяния. Если угол γ' меньше предельного угла разрешающей способности глаза, то изображение точки P представится ему совершенно резким, в противном случае — нерезким.

Представим себе теперь, что плоскость E_1 , в которой лежит точка P_1 , находится на таком расстоянии от плоскости наводки E , что кружок рассеяния δ' виден из точки O^1 под углом γ' , как раз равным предельному углу разрешающей способности, принимаемым в среднем равным $1'$. Тогда плоскость E_1 , очевидно, является передним планом и любая предметная точка, расположенная к объективу ближе плоскости E_1 , изобразится нерезко. Положение переднего плана определяется отрезком a_1 .

Для нахождения отрезка a_1 сначала определим отрезок δ , сопряженный с диаметром δ' кружка рассеяния на пленке. Отрезок δ лежит на плоскости наводки E , а его концы — на обратном продолжении лучей P_1L и P_1M . Отрезок δ является диаметром кружка рассеяния, перенесенного в пространство предметов. Пусть в пространстве предметов находится наблюдатель, центр зрачка глаза которого находится в плоскости входного зрачка, например, в точке O . Тогда он увидит диаметр δ кружка рассеяния под углом γ , находимым по чертежу

$$\gamma = \frac{\delta}{a}. \quad (\text{II. 169})$$

Очевидно, что в приборах дальнего действия, т. е. при $k = p$, углы γ и γ' связаны через видимое увеличение Γ

$$\Gamma = \frac{\gamma'}{\gamma}. \quad (\text{II. 170})$$

При соблюдении условия естественного впечатления $\Gamma = 1$, а потому $\gamma = \gamma' = 1'$. В приборах ближнего действия, если выходной зрачок прибора совмещен со зрачком глаза наблюдателя, углы γ и γ' связаны через угловое увеличение W_c в зрачках

$$W_c = \frac{\gamma'}{\gamma}. \quad (\text{II. 171})$$

Этот случай мы рассмотрим ниже при определении глубины резкости лупы.

Проведем теперь через нижний край K кружка δ вспомогательную линию, параллельную лучу P_1M . Пользуясь подобием треугольников OP_1M и OKN , находим соотношение

$$\frac{a}{a_1} = \frac{D + \delta}{D}, \quad (\text{II. 172})$$

откуда следует

$$\frac{1}{a_1} = \frac{1}{a} + \frac{\delta}{aD}. \quad (\text{II. 173})$$

Получаем окончательную формулу

$$\frac{1}{a_1} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a_0}. \quad (\text{II. 174})$$

Исключив δ при помощи формулы (II. 169), найдем вспомогательную величину a_0

$$a_0 = \frac{D}{\gamma}, \quad (\text{II. 175})$$

где a_0 — расстояние, с которого диаметр D входного зрачка виден под предельным углом разрешающей способности.

Аналогично рассматривается случай, когда предметная точка P_2 лежит на заднем плане E_2 , находящемся на расстоянии a_2 от входного зрачка прибора, причем $a_2 > a$. Изображение P_2' точки P_2 также не лежит в плоскости E' , где возникает кружок рассеяния δ^1 . Сопряженный с ним кружок δ лежит на плоскости наводки E . При этом легко находится формула, аналогичная формуле (II. 174)

$$\frac{1}{a_2} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_0}. \quad (\text{II. 176})$$

И в этой формуле вспомогательная величина a_0 определяется выражением (II. 175). Расстояние T от заднего плана до переднего

$$T = a_2 - a_1 \quad (\text{II. 177})$$

называется *полной глубиной* изображаемого резко пространства.

Как видно из формул (II. 174)—(II. 177), глубина резкости никак не зависит от фокусного расстояния фотографического объектива. Это утверждение встречает возражение со стороны фотографов, которые из опыта знают, что короткофокусные объективы обладают большей глубиной, чем длиннофокусные. Но это возражение основано на простом недоразумении: фотографы сравнивают объективы при равных относительных отверстиях, благодаря чему при смене объективов меняются не только фокусные расстояния, но и диаметры входного зрачка D . Однако D входит в формулу (II. 175), и его изменение влияет и на глубину резкости. Если при смене объективов позаботиться о сохранении диаметра D постоянным, обнаружится полная независимость глубины резкости от фокусного расстояния.

В руководствах и справочниках по фотографии можно встретить другой подход к определению глубины резкости фотокамер.

Вместо остроты зрения, определяющей предельную величину кружка рассеяния, они вводят зернистость фотоэмульсии. В тридцатых годах нашего века такой подход еще можно было как-то оправдать. В самом деле, в те годы высокочувствительные фото- пленки имели зерно диаметром примерно 12 мкм. При пятикратном увеличении малоформатного снимка, необходимым для достижения естественного впечатления, получалась величина нерезкости 60 мкм. Это приближается к диаметру 75 мкм, который различается невооруженным глазом с расстояния 250 мм. В настоящее же время промышленность выпускает специальную пленку высокой светочувствительности с зерном порядка 2—3 мкм. Такая пленка допускает увеличение снимков в 25—37 раз без обнаружения зернистого строения. В руководствах же по фотографии все еще исходят по старинке из зернистости пленки, принимая допустимый диаметр δ' кружка рассеяния 10—50 мкм. Такой подход в наши дни ничем не может быть оправдан, но при этом действительно получается, что глубина резкости зависит от фокусного расстояния f' . При съемке далеких предметов имеем для угла γ выражение

$$\gamma = \frac{\delta'}{f'}, \quad (\text{II. 178})$$

а потому получим из выражения (II. 175)

$$a_0 = \frac{D}{\delta'} f'; \quad (\text{II. 179})$$

в связи с этим и глубина резкости делается зависящей от f' .

Более правильно было бы считать, что допустимый диаметр δ' зависит от aberrаций объектива. Но в таком случае его можно считать пропорциональным величине f' . При этом величина a_0 по формуле (II. 179) снова становится независимой от f' .

При съемке далеких предметов (видовая съемка) наиболее простой способ наводки на резкость состоит в совмещении плоскости фотопленки с задней фокальной плоскостью объектива. Плоскость наводки при этом отодвигается на бесконечность: $a = \infty$. По формуле (II. 174) находим положение переднего плана: $a_1 = a_0$. Итак, если плоскость наводки на бесконечности, то передний план находится на расстоянии a_0 . Это расстояние, введенное выше как вспомогательная величина, приобретает поэтому определенный физический смысл. Его принято называть *началом бесконечности* или *гиперфокальным расстоянием*.

При рассмотренном способе наводки на резкость используется только передняя глубина, считаемая от переднего плана до плоскости наводки. Вся же задняя глубина, считаемая от плоскости наводки до заднего плана, оказывается совсем неиспользованной. Поэтому возможен более целесообразный способ наводки на резкость. Для этого следует принять $a_1 = \infty$, что обеспечивает рез-

кость наиболее далеких фотографируемых предметов. Тогда из формулы (II. 176) находим положение плоскости наводки: $a = a_0$. Следовательно, при этом способе в начале бесконечности должна помещаться плоскость наводки. Передний же план находится по формуле (II. 174): $a_1 = \frac{1}{2}a_0$. Таким образом, при наводке на резкость по второму способу передний план расположен вдвое ближе к камере, чем по первому способу, что дает существенный выигрыш глубины резкости, которым не следует пренебрегать. Второй способ особенно рекомендуется для фотоаппаратов ящичного типа, в которых расстояние от фотообъектива до пленки постоянно и раз навсегда устанавливается при заводской регулировке аппарата.

При съемке сравнительно близких предметов плоскость наводки помещается ближе начала бесконечности, а глубина резкости не простирается до бесконечности. С уменьшением расстояния a глубина резкости T уменьшается очень быстро. Поэтому, например, при съемке групп людей фотограф должен тщательно следить за тем, чтобы все снимаемые люди не выходили за пределы глубины T . Особенно трудным становится соблюдение этого условия при портретной фотографии. В этом случае глубина T может оказаться очень малой.

На основании формул (II. 174) и (II. 176) найдем из выражения (II. 177)

$$T = \frac{aa_0}{a_0 - a} - \frac{aa_0}{a_0 + a}. \quad (\text{II. 180})$$

Отсюда после упрощения

$$T = \frac{2a_0a^2}{a_0^2 - a^2}. \quad (\text{II. 181})$$

Учитывая, что при съемке близких предметов расстояние a много меньше гиперфокального расстояния, можно эту точную формулу заменить приближенной

$$T = \frac{2a^2}{a_0}. \quad (\text{II. 182})$$

Пусть, например, портретный снимок производится при следующих данных: $a = 2$ м; $D = 30$ мм; $\gamma = 1' = 0,0003$. Сначала определим начало бесконечности a_0 по формуле (II. 175): $a_0 = 100$ м. Затем найдем T по формуле (II. 182): $T = 0,08$ м = 80 мм. Благодаря столь малой глубине резкости нередко на портретах, снятых анфас, можно наблюдать при резком изображении передней части лица заметную нерезкость изображения ушей.

Для того чтобы фотограф, не делая громоздких вычислений, мог в своей работе учитывать глубину резкости, в современных