

тем оно больше. Это нетрудно показать, заменив в формуле (10) a_1 через a_2 из (9):

$$\frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = \frac{a_2}{f}. \quad (11)$$

До сих пор речь шла лишь о предметах, не имеющих протяжения вдоль оси системы. Для того чтобы получить продольное увеличение, даваемое системой, найдем, как будет изображаться бесконечно малый отрезок da_1 , расположенный вдоль оси.

Увеличением в данном случае будет отношение $\frac{da_2}{da_1}$, т. е. производная от a_2 по a_1 . Согласно формуле (9) эта производная имеет следующий вид:

$$\frac{da_2}{da_1} = - \left(\frac{f^2}{a_1^2} \right). \quad (12)$$

Мы видим, что с убыванием a_1 возрастает a_2 , так как $\frac{da_2}{da_1} < 0$. Это означает, что при приближении предмета изображение удаляется.

Кроме того, продольное увеличение равно квадрату поперечного увеличения [ср. (11) и (12)]. Если предмет будет иметь вид маленького шара, то изображение получится в виде эллипсоида. При поперечном увеличении, равном трем, продольное равно девяти, т. е. отношение осей такого эллипсоида равно трем. Чем больше увеличение, тем сильнее эллипсоид будет отличаться от сферы.

Все сказанное свидетельствует о том, что идеального изображения, по форме подобного предмету, не может быть. Оптические системы разрешают эту задачу лишь приближенно.

Все полученные нами выводы относятся и к отдельной линзе. Как мы уже указывали, для нее главные плоскости сливаются. Формулы (10), (11) и (12) справедливы и для нее и легко могут быть получены из формулы (9).

§ 11. Глаз как оптическая система

Чарльз Дарвин в «Происхождении видов» рассматривает эволюцию органов зрения у животных как одно из фундаментальных подтверждений справедливости теории биологического развития. Например, он пишет: «Известно, что многие животные, принадлежащие к самым различным классам и живущие в подземных пещерах, совершенно слепы. У некоторых ракообразных стебелек глаза сохранился, но самый глаз исчез—штатив телескопа сохранился, но телескоп с его стеклами уже не существует».

Человеческий глаз представляет «итог изменений организма под действием внешней среды и борьбы за существование, за лучшую приспособленность к внешнему миру» (С. И. Вавилов).

Эта эволюция привела к возникновению довольно сложной оптической системы (рис. 22). Падающие световые лучи сначала преломляются на поверхности роговой оболочки глаза, а затем на двух поверхностях хрусталика (напоминающего своей формой линзу) и, пройдя сквозь глазную жидкость, наполняющую глаз, собираются на сетчатой оболочке глаза.

Сетчатая оболочка состоит из весьма мелких светочувствительных элементов размером меньше 0,01 мм. Каждый элемент является окончанием нерва, по которому световое ощущение передается в мозг. При указанном расположении прозрачных сред глаза и сетчатой оболочки на последней получается действительное изображение предметов, находящихся перед глазом. Естественно, что изображение на сетчатке оказывается перевернутым. Правильное впечатление создается за счет работы мозга. При помощи специальных мускулов хрусталик может менять свою кривизну, что позволяет видеть предметы резкими независимо от расстояний до них. Способность оптической системы глаза приспособлять фокусное расстояние к расстоянию наблюдаемого предмета называется *аккомодацией*¹⁾.

Аккомодация позволяет глазу видеть предметы отчетливо только до некоторого расстояния, ближе которого он уже «фокусировать» не может. Это расстояние, в среднем равное 15—20 см («расстояние ясного зрения»), с возрастом человека увеличивается вследствие того, что мускулы хрусталика теряют свою упругость, — глаз делается дальнозорким. Для исправления этого недостатка служат очки с выпуклыми линзами. Такие очки позволяют получить изображение на сетчатой оболочке, в то время как у дальнозоркого глаза это изображение находится за сетчаткой вследствие малой кривизны хрусталика. Другой недостаток — близорукость, заключающийся в слишком большой выпуклости хрусталика, исправляют очками с вогнутыми стеклами, удаляющими действительное изображение.

Видимые размеры предметов определяются размерами изображений, получающихся на сетчатке глаза. Последние в свою очередь определяются *углом зрения*, т. е. углом между крайними лучами, идущими в глаз от рассматриваемого предмета.

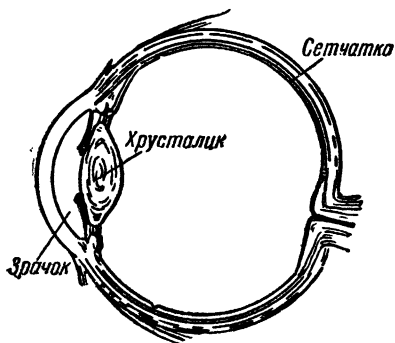


Рис. 22. Устройство глаза.

¹⁾ От лат. *accomodatio* — приспособление, приурочивание.

Угол зрения зависит от истинных размеров предмета и от его расстояния до глаза. Чем ближе предмет, тем больше угол зрения, и, наоборот, чем дальше, тем меньше угол зрения. Таким образом, приближая предметы, мы как будто можем безгранично увеличивать их кажущиеся размеры и тем самым сделать видимыми самые маленькие предметы. На деле это не так: мы ведь не приближаем предмет на расстояние, меньшее расстояния ясного зрения, равного 25 см и соответствующего наилучшим условиям наблюдения. С другой стороны, если предмет так мал, что, находясь на «расстоянии ясного зрения», он дает изображение на сетчатке, меньшее 0,01 мм, то нельзя уже различить форму этого предмета. Все изображение предмета уложится на одном светочувствительном элементе сетчатки и даст ощущение одной точки. Как показывает опыт, при этом угол зрения равен примерно одной минуте, что соответствует отрезку длиной в $\frac{1}{20}$ мм, находящемуся на «расстоянии ясного зрения», или соответственно большему отрезкам, находящимся на больших расстояниях.

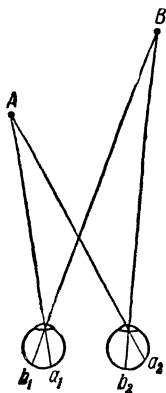


Рис. 23. Стереоскопическое зрение.

Благодаря указанному ограничению ничем не вооруженный человеческий глаз непригоден ни для рассматривания близких, но очень маленьких предметов, ни для рассматривания больших, но очень удаленных предметов.

И в том, и в другом случаях необходимо вооружить глаз какими-либо приборами, увеличивающими искусственно углы зрения, под которыми видны предметы.

На описании таких приборов мы остановимся в следующих параграфах, сейчас же перейдем к вопросам, связанным с видением двумя глазами.

До сих пор мы говорили только о размерах предметов в направлении, перпендикулярном к лучу зрения, теперь же речь будет идти о размерах и расстояниях, направленных по лучу зрения, об ощущении рельефа местности, об ощущении глубины пространства. Последние ощущения связаны в основном с видением двумя глазами.

Две точки A и B (рис. 23), расположенные на разных расстояниях от глаз, дают в них изображения $a_1 b_1$ и $a_2 b_2$, причем длины отрезков $a_1 b_1$ и $a_2 b_2$ различны. Различие в длинах, как видно из рисунка, связано с тем, что глаза расположены на некотором расстоянии друг от друга (среднее расстояние 65 мм).

Оба изображения сливаются в мозгу в один зрительный образ, причем указанное различие в изображениях вызывает ощущение различия в расстояниях от точек A и B до глаз. Таким образом, наблюдая двумя глазами, мы можем оценивать расстояния в глубину

пространства. Эта способность носит название *стереоскопического зрени*¹⁾.

Естественно, что чем дальше обе точки *A* и *B* от наблюдателя, тем меньше будет сказываться расстояние между ними на различие изображений, даваемых глазами, и тем ближе друг к другу они будут нам казаться. Опыт показывает, что не вооруженные ничем глаза не различают расстояния предметов, удаленных более чем на 1,35 км.

Например, все звезды нам кажутся находящимися на одном и том же расстоянии, несмотря на то, что расстояния между ними достигают многих миллионов километров. Вооружая глаза соответствующими приборами, удастся значительно расширить радиус стереоскопического зрения и перейти к количественной оценке расстояний.

Применение таких приборов по существу эквивалентно увеличению расстояния между глазами. Описание этих приборов дано в § 12.

Кроме формы предметов глаза воспринимают их яркость и цвет, но эти свойства уже связаны не только с вопросами геометрической оптики и будут разобраны в главе, посвященной физическим основам светотехники.

§ 12. Приборы, вооружающие глаз

Мы видим, что человеческий глаз, несмотря на свое совершенство, далек по своим свойствам от идеального универсального оптического прибора. Поэтому необходимо применять приборы, вооружающие человеческий глаз новыми возможностями, приборы, расширяющие возможности человеческого глаза. Рассматривая различные приборы, вооружающие глаз, следует все время помнить, что в каждом случае эти приборы и глаз образуют единую оптическую систему, существенным элементом которой является хрусталик глаза.

Вся эта система в целом дает изображение предмета на сетчатке глаза, и кажущаяся величина предмета оценивается нами по величине этого изображения.

Одной из особенностей оптической системы, включающей в свой состав глаз, является то, что параметры этой системы могут несколько изменяться благодаря изменениям фокусного расстояния хрусталика при аккомодации глаза. Высказанные соображения позволяют без труда разобрать действие увеличительной лупы, представляющей собой простую выпуклую линзу.

Пусть предмет *AB* находится на расстоянии, меньшем, чем «расстояние ясного зрения» от глаза. Как видно из рис. 24, изображение

¹⁾ От греч. stereos — кубический, пространственный и skopeo — смотрю.