

пространства. Эта способность носит название *стереоскопического зрени*<sup>1)</sup>.

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

<sup>1)</sup> От греч. stereos — кубический, пространственный и skopeo — смотрю.

предмета  $A_1B_1$  получается за сетчаткой. Если между предметом и глазом мы вставим выпуклую линзу, то фокусное расстояние всей системы (линза плюс глаз) может настолько укоротиться, что изображение попадет на сетчатку. Добавление такой линзы как бы делает глаз очень близоруким. Для определенности рассмотрим случай глаза, аккомодированного на бесконечность. Такой глаз фокусирует на сетчатке параллельные пучки лучей. В нашем случае это значит, что лупа должна делать параллельным каждый расходящийся пучок лучей,

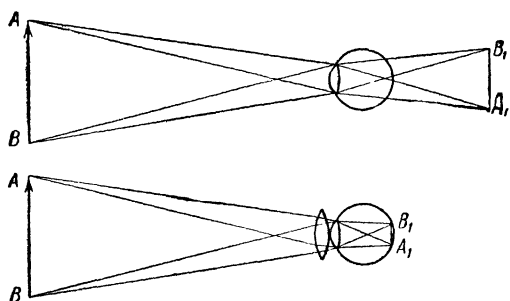


Рис. 24. Действие лупы.

испускаемый отдельной точкой предмета.

Для этого надо предмет поместить в фокальной плоскости лупы, т. е. на фокусном расстоянии от линзы. Если фокусное расстояние линзы равно  $f$ , то угол между пучками, испускаемыми крайними точками предмета, будет обратно пропорционален  $f$ .

Этот угол в данном случае, очевидно, равен углу зрения, под которым глаз видит предмет сквозь лупу. С другой стороны, при рассмотрении предмета без лупы на «расстоянии ясного зрения» глаз видит предмет под другим углом зрения.

Отношение углов зрения в обоих случаях равно отношению «расстояния ясного зрения» к фокусному расстоянию лупы (более строго всюду углы заменить тангенсами).

Увеличение угла зрения воспринимается нами как увеличение видимых размеров предмета. Поэтому можно сказать, что *увеличение лупы равно отношению так называемого расстояния ясного зрения, равного обычно 25 см, к фокусному расстоянию лупы*, если при рассмотрении в нее глаз аккомодирован без напряжения, т. е. на бесконечность. Увеличение не изменится и в том случае, если поместить глаз близко к главному фокусу лупы и аккомодировать его так, как при чтении или письме; если же при такой аккомодации глаз поместить вплотную к лупе, то увеличение будет на единицу больше.

Простые лупы пригодны только для получения сравнительно небольших увеличений. Если бы мы хотели получить при помощи простой лупы увеличение в 2500 раз, нам пришлось бы взять линзу с фокусным расстоянием, равным  $\frac{25 \text{ см}}{2500}$ , т. е. 0,1 мм.

Но, с одной стороны, наблюдение с такой линзой было бы крайне затруднительно (нельзя даже поместить покровное стекло, обычно защищающее микроскопические объекты), с другой стороны, каче-

ство изображения, даваемого ею, было бы весьма плохим ввиду слишком большой кривизны ограничивающих поверхностей [см. формулу (6)].

Поэтому для больших увеличений применяют микроскопы, оптическая система которых состоит из объектива и окуляра.

Объектив микроскопа обладает фокусным расстоянием, не меньшим 1,5 мм, и дает увеличенное действительное изображение предмета  $A_1B_1$  (рис. 25). Длину тубуса  $\Delta$  приближенно принимают равной  $a_2$ , т. е. пренебрегают фокусными расстояниями объектива и окуляра по сравнению с общей длиной тубуса. Изображение,

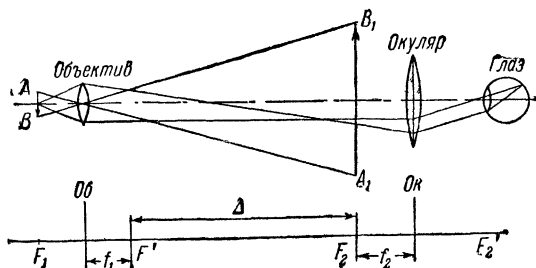


Рис. 25. Ход лучей в микроскопе.

даваемое объективом, считается находящимся в фокусе окуляра, что соответствует глазу, аккомодированному на бесконечность.

Окуляр микроскопа служит лупой, сквозь которую мы рассматриваем действительное изображение, даваемое объективом. Фокусное расстояние окуляров не менее 8,5—10 мм. Нетрудно видеть, что, пользуясь такими относительно длиннофокусными объективами и окулярами, можно получить увеличение порядка 2500—3000.

Согласно формуле (11) увеличение изображения, даваемого объективом, будет равно отношению расстояния  $\Delta$ , равного длине тубуса микроскопа, к фокусному расстоянию объектива  $f_1$ .

Увеличение, даваемое окуляром, будет равно отношению «расстояния ясного зрения» к фокусному расстоянию окуляра  $f_2$ . Общее увеличение, даваемое микроскопом в целом, будет, очевидно, равно произведению этих увеличений.

Таким образом, *увеличение микроскопа определится следующей формулой:*

$$\frac{\text{Длина тубуса} \times \text{расстояние ясного зрения}}{\text{фокусное расстояние объектива} \times \text{фокусное расстояние окуляра}}$$

При длине тубуса от 150 до 200 мм эта формула действительно приводит к увеличениям порядка 2500—3000.

До сих пор речь шла о приборах, увеличивающих углы зрения для маленьких, но близких к глазу предметов; теперь мы разберем приборы, увеличивающие углы зрения для удаленных предметов.

В этих случаях причиной малых углов зрения для невооруженного глаза является обычно не малый размер предмета, а большое расстояние до него. В особенности это справедливо для астрономических объектов. Например, диаметр звезды  $\alpha$  из созвездия Ориона равен 45 млн. км, а видимая угловая величина равна 0,05 угловой секунды.

Зрительная труба, или телескоп, обладает, так же как микроскоп, объективом и окуляром, и, так же как в микроскопе, объектив дает действительное изображение предмета. Но так как в данном случае благодаря большому удалению предмета от объектива он дает уменьшенное изображение, то выгодно иметь объектив с возможно большим фокусным расстоянием.

Согласно формуле (10) величина изображения  $A_1B_1$  будет пропорциональна этому фокусному расстоянию (рис. 26).

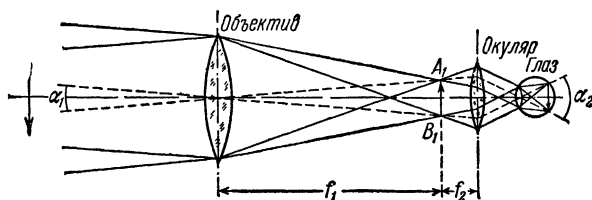


Рис. 26. Ход лучей в зрительной трубе.

Пусть лучи, испускаемые крайними точками предмета, образуют угол  $\alpha_1$  (под этим углом зрения предмет виден невооруженным глазом). Изображение предмета  $A_1B_1$  глаз наблюдает сквозь окуляр под углом зрения  $\alpha_2$ . При удаленном предмете изображение предмета  $A_1B_1$  получается практически на расстоянии  $f_1$ , равном фокусному расстоянию объектива. Так как это изображение одновременно должно находиться на расстоянии  $f_2$  (глаз аккомодирован на бесконечность) от окуляра, где  $f_2$  — фокусное расстояние окуляра, то угол  $\alpha_2$  относится к углу  $\alpha_1$  (точнее, тангенсы углов), как фокусное расстояние объектива к фокусному расстоянию окуляра.

Иными словами, *увеличение телескопа равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.*

Окуляр может быть как положительной линзой (кеплерова труба), так и отрицательной (галилеева труба, или бинокль).

Галилеева труба применяется в тех случаях, когда не требуется большого увеличения, например в театральных биноклях.

При сильном увеличении действие отрицательного окуляра крайне невыгодно вследствие большого угла расхождения лучей, проходящих мимо глаза. Кеплерова труба дает перевернутое изображение. Поэтому для земных наблюдений в окуляр вставляют дополнительную линзу, обращающую изображение.

В больших астрономических телескопах объективы часто заменяют параболическим зеркалом. При помощи дополнительного зеркала  $M_2$  (рис. 27) действительное изображение, создаваемое большим зеркалом  $M_1$ , передают к окуляру  $O$ .

Самый большой астрономический телескоп — рефрактор <sup>1)</sup> имеет объектив диаметром 1 м. Он дает увеличение в 2000 раз. Настоящий переворот в астрономической оптике произвели изобретенные А. А. Максутовым в 1941 г. менисковые системы. На рис. 28 изображена одна из таких систем. В системах А. А. Максутова используется простая выпукло-вогнутая линза (мениск)  $B$  для компенсации

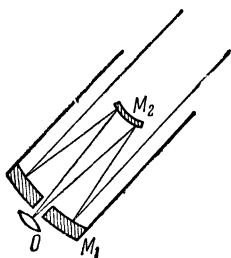


Рис. 27. Зеркальный телескоп.

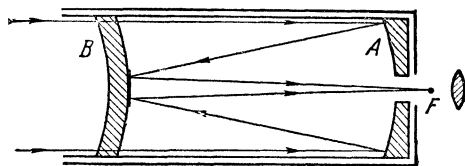


Рис. 28. Телескоп системы Максутова.

недостатков сферического зеркала  $A$ . И зеркало и линза в отдельности обладают большими aberrациями, но противоположных знаков (см. выше). Вся система в целом благодаря компенсации aberrаций обладает замечательными оптическими качествами. Телескопы, построенные по системе А. А. Максутова, отличаются большой светосилой при малых размерах и весе.

В трубах призматического бинокля вместо обращющей линзы земной трубы применены две прямоугольные стеклянные призмы (рис. 29). Длина трубы значительно сокращается. Бинокль представляет собой две призматические трубы, у которых объективы вследствие «излома» хода лучей оказываются широко расставленными. Последнее обстоятельство делает изображение более рельефным.

На этом эффекте мы остановимся подробнее в следующем параграфе.

Ряд зрительных труб нескольких особых типов применяется в военном деле (в настоящем параграфе мы остановимся на трех из них): прицельная трубка для винтовок, артиллерийская панорама и перископ для подводных лодок.

<sup>1)</sup> Рефракторами называют телескопы, в которых действительное изображение создается линзовым объективом.

Прицельная трубка представляет собой земную зрительную трубу, укрепляемую над стволом винтовки, причем оптическая ось трубы параллельна стволу.

На рис. 30 изображен разрез прицельной трубки. Объектив  $O_1$  дает перевернутое изображение цели в плоскости  $B_1$ , где находится

либо проволочный крест, либо стеклянная пластинка с вытравленным крестом на ней. Этот крест может передвигаться прицельным приспособлением, расположенным над  $B_1$ , что дает возможность устанавливать прицел в зависимости от расстояния до цели. За  $B_1$  находится оборачивающая система  $U$ , дающая уже прямое изображение цели в плоскости  $B_2$ . Это изображение рассматривается

через окуляр  $O_2$ , причем окуляр сконструирован так, что сквозь него удобно смотреть с расстояния, примерно равного 8 см. На этом расстоянии стреляющий располагает глаз при прицеливании,

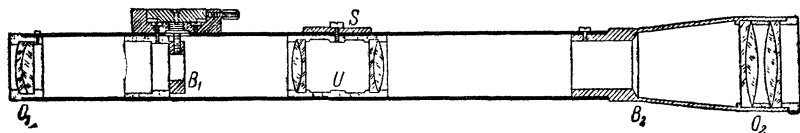


Рис. 30. Прицельная труба.

чем устраняется опасность удара в глаз при отдаче во время выстрела. Процесс прицеливания состоит в совмещении центра видимого изображения цели с центром креста.

При артиллерийской стрельбе часто наводка орудия производится по какой-либо точке, лежащей в стороне от цели (при стрельбе из-за укрытия). При этом ось канала орудия и линия визирования должны образовывать какой-то угол в горизонтальной плоскости (от 0 до 360°) и в вертикальной плоскости (от 0 до 90°).

Прицельные трубки, дающие возможность наблюдать все точки пространства вокруг наблюдателя при неизменном положении окуляра, называются панорамными. Панорамная прицельная трубка соединяется с угломерными устройствами для измерения горизонтальных и вертикальных углов.

Оптическая часть *артиллерийской панорамы* изображена на рис. 31. Она состоит из призмы отражателя  $P_1$ , трапециевидной призмы  $P_2$ , объектива  $L_1$ , крышеобразной призмы  $P_3$ , пластинки  $B$  с крестом и, наконец, окуляра  $L_2, L_3$ . Пластика  $B$  находится в главном фокусе объектива, на ней поэтому получают изображения предметов; она находится одновременно в главном фокусе окуляра. Призма отражатель может вращаться вместе с призмой  $P_2$  вокруг вертикальной оси и самостоятельно вокруг горизонтальной оси. Остальные

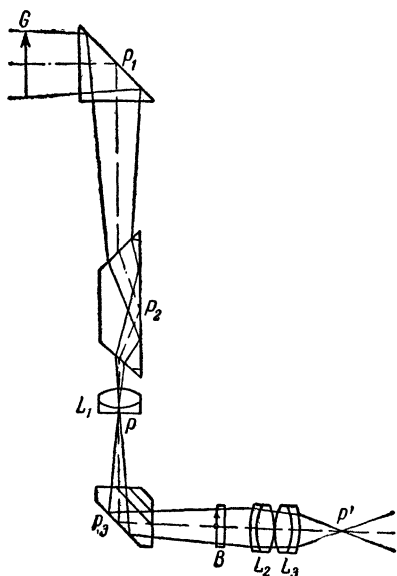


Рис. 31. Артиллерийская панорама.

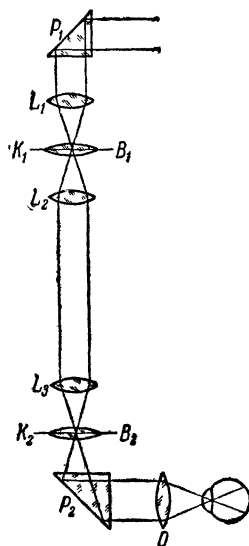


Рис. 32. Перископ.

части неподвижно соединены с орудием. При наводке орудия панораму устанавливают на предмет, служащий для визирования, и поворачивают орудие до тех пор, пока горизонтальный и вертикальный углы не примут нужных значений.

*Перископы*, представляющие собой также зрительные трубы особого рода, широко применяются на подводных лодках. Перископ позволяет производить наблюдения из погруженной подводной лодки. Для перископов характерными являются большая длина и маленький диаметр верхней части. Это создает известные затруднения для оптиков.

На рис. 32 изображена оптическая система перископа. Особенностью этой системы является наличие коллективных линз, изменяющих ход лучей, но не влияющих на изображение. Роль коллективных линз сводится к уменьшению диаметров световых пучков внутри системы.

После отражения от призмы  $P_1$  световые лучи проходят сквозь короткофокусный объектив  $L_1$ ; этот объектив дает изображение в плоскости  $B_1$ , где помещена коллективная линза  $K_1$ , уменьшающая углы между пучками, образующими изображение. Далее пучки проходят систему  $L_2$ , делающую их параллельными, затем расположена система  $L_3$ , дающая прямое изображение в  $B_2$ , где помещена коллективная линза  $K_2$ . После  $K_2$  лучи отражаются от призмы  $P_2$  и попадают в окуляр  $O$ . Описанная система позволяет доводить длину перископа до нескольких метров при диаметре порядка 5 см.

Мы уже указывали, что восприятие глубины пространства обусловлено различием изображений, получающихся в левом и правом глазах наблюдателя. Это различие будет тем больше, чем больше расстояние между глазами.

Применение некоторых оптических приборов равносильно увеличению расстояния между глазами. В первую очередь таким прибором является *призматический бинокль*.

Путь лучей в бинокле показан на рис. 29. Расстояние

между объективами бинокля примерно в 2 раза больше расстояния между глазами, что достигается применением отражающих призм, которые попутно обращают изображение и позволяют уменьшить размеры прибора при большом фокусном расстоянии объективов. В бинокле благодаря большому расстоянию между объективами изображения кажутся более рельефными.

Наибольших размеров достигает расстояние между входными отверстиями у *стереоскопических дальномеров*.

На рис. 33 изображена упрощенная схема стереоскопического дальнера. Лучи, идущие от предмета и входящие в отверстия  $A$  и  $B$ , составляют угол, величина которого тем больше, чем больше база дальнера  $AB$ .

В морских дальнерах, применяемых на линкорах, это расстояние достигает 30 м. Дальномер укрепляется на большей высоте поперек палубы судна. При наблюдении в такой дальномер изображение кажется, грубо говоря, в 500 раз более рельефным (отношение базы  $AB$  к расстоянию между глазами).

Для количественной оценки расстояний до предметов в стереоскопическом дальномере применено остроумное устройство. В центре поля зрения каждого окуляра нанесен небольшой ромбик (рис. 34). Так как изображения этих ромбиков получаются в одинаковых местах сетчаток обоих глаз, мы воспринимаем их как один ромбик, находящийся в бесконечности (от предмета, находящегося в бес-

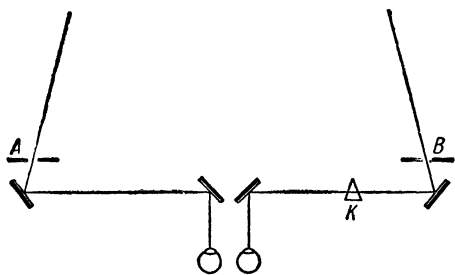


Рис. 33. Схема дальнера.



конечности, на оба глаза падают параллельные между собой лучи, создающие изображения в одинаковых местах сетчаток).

На изображение ромбика наложится изображение рассматриваемого нами в дальномер предмета. Так как от этого предмета в дальномер входят не параллельные между собой лучи (в *A* и *B*, на рис. 33), нам он будет казаться находящимся на расстоянии, более близком, чем ромбик. При помощи компенсатора мы можем скомпенсировать внутри дальномера непараллельность лучей, идущих

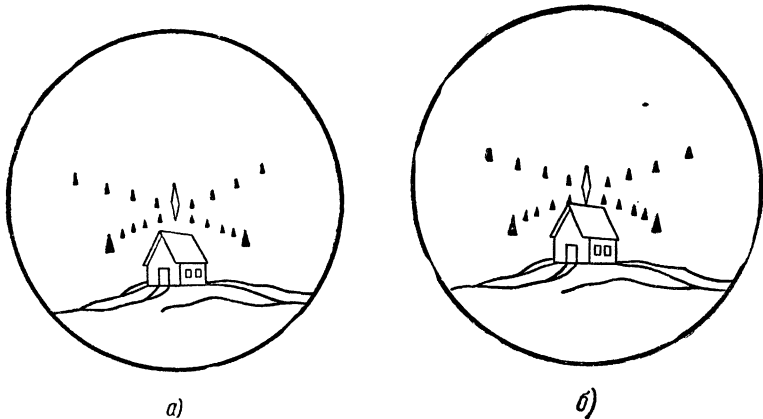


Рис. 34. Поле зрения дальномера.

от предмета, тогда предмет будет казаться находящимся в бесконечности, как и ромбик, т. е. и предмет, и ромбики будут казаться лежащими в одной плоскости. По повороту компенсатора мы можем судить о том, какой угол пришлось скомпенсировать, т. е. чему равно расстояние до предмета.

Интересно отметить, что при этом кажется, что перемещается ромбик, а не изображение предмета. Кроме ромбика в поле зрения наносят еще ряд меток, соответствующих конечным расстояниям.

Наряду с биноклярными применяются и монокулярные дальномеры для наблюдения одним глазом. В таком дальномере в поле зрения получаются два изображения, расположенных друг над другом и даваемых двумя объективами, раздвинутыми на большое расстояние. Компенсируя смещение этих изображений, можно также определить расстояния до предметов.

### § 13. Фотоаппарат и проекционный аппарат

Перейдем к рассмотрению оптических приборов, применяемых не в сочетании с глазом. Эти приборы обычно служат для получения изображений на каких-либо экранах. Такими экранами могут быть обычные киноэкраны, облака, фотопластинки, киноплёнки и т. д.