

## Глаз как оптическая система. Коррекция зрения. Модель телескопа.

*Методические указания  
по курсу общей физики*

Рецензент: С.А. Чудинова, доцент, кандидат физ.-мат. наук

Составитель: О. Я. Березина, ст. преподаватель, кандидат физ.-мат. наук

Петрозаводск  
2007

## Глаз как оптическая система. Коррекция зрения. Модель телескопа.

### Цель работы:

- 1) изучить устройство глаза;
- 2) смоделировать близорукий и дальнозоркий глаза, «скорректировать зрение» с помощью линз;
- 3) собрать модель телескопа Кеплера, определить его увеличение.

**Принадлежности.** Магнитная доска, трансформатор, источник света 12 В / 50 Вт, набор линз, набор щелей, зеркало, диафрагма.

### Введение

### Основные понятия

Оптическая система любого прибора представляет собой совокупность преломляющих и отражающих поверхностей. Система называется *центрированной* или *коаксиальной*, если центры кривизны всех составляющих его поверхностей лежат на одной прямой, называемой *оптической осью* системы. Очевидно, луч, направленный вдоль оптической оси системы, проходит ее без преломления.

Точка оптической оси, сопряженная с точкой, бесконечно удаленной в положительном направлении, называется *первым фокусом* преломляющей поверхности, а расстояние до нее – *первым фокусным расстоянием*.

Точка оптической оси, сопряженная с точкой, бесконечно удаленной в отрицательном направлении, называется *вторым фокусом*, а расстояние до нее – *вторым фокусным расстоянием*.

Величина  $\Phi = (n' - n)/r$  (где  $r$  – радиус кривизны поверхности,  $n$  и  $n'$  – показатели преломления среды перед и за поверхностью) называется *оптической силой* сферической поверхности. Оптическая сила поверхности, равная одному обратному метру, принимается за единицу и называется диоптрией.

Причем  $f = -n/\Phi$ ;  $f' = n'/\Phi$ .

На рис. 1 показано расположение второго фокуса сферической поверхности при  $\Phi > 0$  и  $\Phi < 0$ .

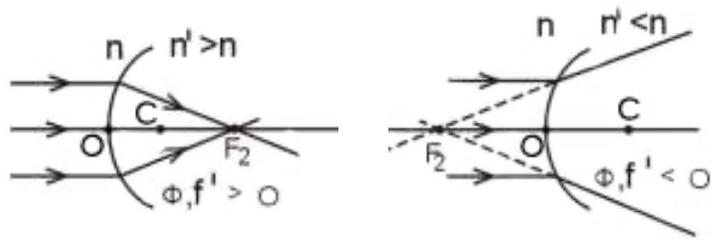


Рис. 1. Расположение фокусов сферических поверхностей

Отношение величины изображения к величине предмета называется *линейным увеличением*. Угол между лучом и оптической осью меняется при преломлении на сферической поверхности. Отношение  $\gamma = u'/u$  (рис.2) называется *угловым увеличением*.

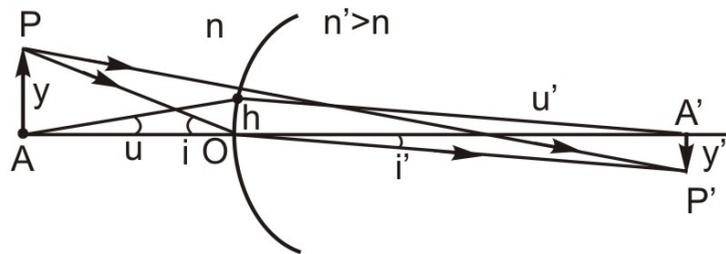


Рис. 2. Изображение предмета, даваемое сферической поверхностью

Линза называется *тонкой*, если расстояние между вершинами преломляющих поверхностей много меньше радиусов кривизны поверхностей. *Оптическая сила тонкой линзы*

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2,$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – оптические силы поверхностей линзы.

*Оптическая сила толстой линзы:*

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d}{n_1} \Phi_1 \cdot \Phi_2$$

Где  $n_1$  – показатель преломления линзы,  $d$  – расстояние между вершинами преломляющих поверхностей,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – оптические силы поверхностей, ограничивающих линзу.

*Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких линз*

$$\Phi = \Phi_{Л1} + \Phi_{Л2} - \frac{L}{n_0} \Phi_{Л1} \cdot \Phi_{Л2},$$

где  $\Phi_{Л1}$  и  $\Phi_{Л2}$  – оптические силы двух тонких линз,  $L$  – расстояние между ними,  $n_0$  – показатель преломления среды между линзами.

### Устройство глаза, коррекция зрения

Вероятно, простейшим оптическим прибором можно считать устройство, состоящее из одной собирающей линзы, дающей действительное изображение предмета на светочувствительной поверхности. Примерами таких оптических систем служат фотоаппарат и глаз (рис. 3).

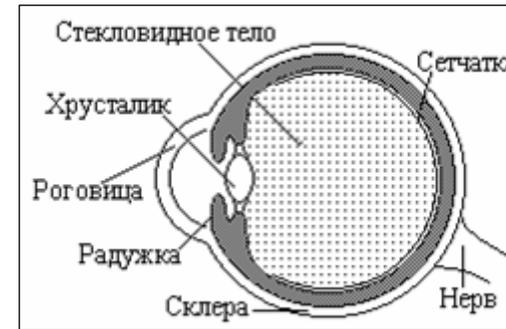


Рис. 3. Глаз как оптическая система

Дно глазного яблока, называемое *сетчаткой*, состоит из слоя светочувствительных элементов. Поскольку глаз часто входит как составная часть в оптическую систему, изучение его характеристик весьма существенно для инструментальной оптики. Преломление света в глазе происходит главным образом на его внешней поверхности – *роговой оболочке*, или *роговице*, а также на поверхностях *хрусталика*, находящегося позади способной к сокращению *радужной оболочки (ирисы)*. Последняя определяет апертурный диаметр, величина которого в соответствии с полным световым потоком, попадающим в глаз, может изменяться произвольным мышечным усилием, приблизительно от 1.5 до 6 мм. Хрусталик имеет форму двояковыпуклой линзы с плотностью (а

следовательно, и показателем преломления), снижающейся по направлению к периферии, что уменьшает создаваемую им сферическую абберацию. Средняя величина показателя преломления хрусталика равна 1.44, тогда как у стекловидного тела, находящегося между хрусталиком и сетчаткой, она составляет 1.34, то есть, близка к показателю преломления воды.

Для многих чисто оптических задач преломляющая система глаза может быть заменена *приведенным глазом*, построенным из однородного прозрачного вещества и имеющим следующие постоянные (по Гульстранду):

Оптическая сила	58.48 дптр
Длина глаза	22 мм
Радиус кривизны преломляющей поверхности	5,7 мм
Показатель преломления среды	1.33
Радиус кривизны сетчатки	9.7 мм

Т.к. изображение в глазу получается внутри среды, отличной от воздуха, то переднее и заднее фокусные расстояния не равны между собой (17.1 и 22.8 мм).

Радиус кривизны хрусталика может изменяться сокращением мышц, меняя, таким образом, фокусировку глаза. Эта способность называется *аккомодацией*. Наименьшее расстояние отчетливого видения для нормального, или *эметропического*, глаза примерно равно 25 см. Аккомодация глаза в большой степени изменяется от одного индивидуума к другому; она изменяется также с возрастом. На рис.4 заштрихованные места показывают, как расположены области, ясно различаемые глазом в пределах доступной ему аккомодации. Нормальный глаз в состоянии аккомодировать область от  $A_p = 10-22$  см до бесконечности. Для близорукого глаза область аккомодации приближена и ограничена на своей дальней границе. Для дальноруккого глаза начало области аккомодации отодвинуто, а даль-

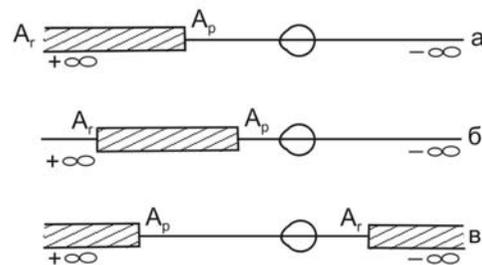


Рис. 4. Ближние  $A_p$  и дальние  $A_r$  точки аккомодации для глаза нормального (а), близорукого (б) и дальноруккого (в)

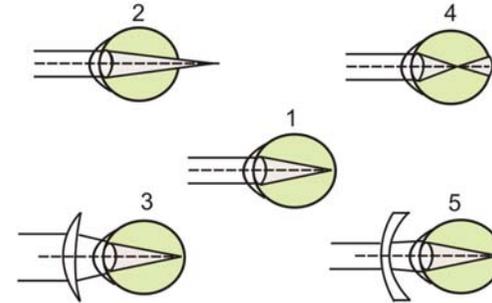
няя точка лежит на *отрицательном расстоянии*, т.е. за глазом. Это значит, что дальноруккий глаз способен рассматривать *мнимые точки*, т.е. сводить на сетчатую оболочку не только параллельные, но и сходящиеся пучки. Т.о., оптическая сила близоруккого глаза больше, а дальноруккого меньше, чем нормального.

Исправление значительных недостатков глаз с помощью дополнительных линз (очков) (рис.5) составляет предмет *офтальмологии*. Глазу свойственны три основных недостатка:

а) *миопия*, или *близорукость*, при которой лучи от бесконечно удаленного точечного источника фокусируются перед сетчаткой. Она корректируется рассеивающей линзой, помещаемой перед глазом;

б) *гиперметропия*, или *дальноруккость*, при которой истинный фокус лучей от бесконечно удаленного предмета лежит за сетчаткой. Она корректируется собирающей линзой.

в) *астигматизм*, при котором преломляющая способность глаза различна в разных плоскостях, проходящих через его оптическую ось. Этот дефект корректируется цилиндрической или тороидальной очковой линзой.



Сетчатка содержит два основных типа светочувствительных приемников, *палочки* и *колбочки*. Последние, согласно принятой теории цветного зрения, делятся на три типа светочувствительных элементов. Колбочки преобладают

Рис. 5. Коррекция зрения с помощью линз. 1 – нормальный глаз; 2,3 – дальноруккий; 4,5 – близоруккий

в средней части сетчатки и их концентрация наиболее велика в так называемой *центральной ямке желтого пятна*. Эта область сетчатки ограничивает поле наиболее отчетливого зрения размером, несколько меньшим  $1^\circ$ , и определяет *фиксацию*, или направление "видения", глаза. Диаметр колбочек в центральной ямке меняется

от 0.0015 до 0.005 мм. Палочки, малочувствительные к цвету, доминируют в периферических участках сетчатки. Они особенно чувствительны к свету малоинтенсивных источников. С этим связано явление "бокового зрения", которое проявляется, например, когда мы рассматриваем картину ночного неба.

Существует некий конечный предел в отчетливости деталей, который может быть достигнут с любой оптической системой. Этот предел, в конечном счете, обусловлен волновой природой света. Большой интерес для конструкторов-оптиков представляет величина нижнего предела разрешения глазом двух соседних точечных объектов, или *острота зрения*, поскольку от этой величины зависят все допуски (как оптические, так и механические), приемлемые при создании приборов для визуальных наблюдений. Для нормального глаза предельное угловое разрешение составляет около 1', что при фокусном расстоянии 15 мм соответствует 0.0045 мм на сетчатке. При диаметре зрачка, большем 5 мм, хроматическая и сферическая аберрации ухудшают разрешающую способность глаза. Поэтому обычно при конструировании приборов для визуальных наблюдений предполагается, что диаметр светового пучка, попадающего в глаз, не превышает 4-5 мм. При расчете таких приборов почти никогда не учитываются недостатки глаза, так как они меняются от человека к человеку.

### Телескопы.

Зрительные трубы (телескопы) вооружают глаз для рассматривания деталей удаленного предмета. Они состоят (рис. 6) из объектива  $L_1$  и окуляра  $L_2$ ; действительное (уменьшенное и перевернутое) изображение удаленного предмета, даваемое объективом, рассматривается в окуляр, как в лупу. В зависимости от расстояния предмета до объектива изображение получается в задней фокальной плоскости объектива или несколько дальше. В соответствии с этим нужно несколько передвигать окуляр (фокусировка).

На рис. 6  $\alpha$  есть угол зрения, под которым виден удаленный предмет;  $\beta$  – угол зрения, под которым видно изображение. Действительно, в глаз попадают параллельные пучки, и оси пучков, идущих от краев изображения, составляют угол  $\beta = bO'a$ , ибо  $a$  и  $b$  лежат в фокальной плоскости окуляра.

Увеличение системы, как видно из рис. 6, есть

$$N = \frac{\operatorname{tg}(\beta/2)}{\operatorname{tg}(\alpha/2)} = \frac{f_1}{f_2},$$

т.е. равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.

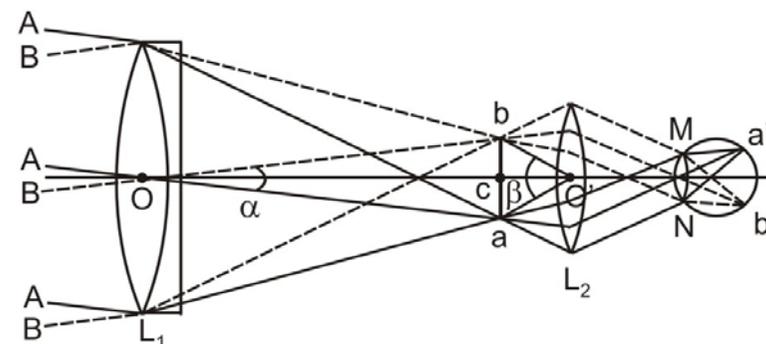


Рис. 6. Схематическое изображение хода лучей в зрительной трубе: сплошные линии – лучи, идущие от верхнего края (точка A) удаленного объектива; штриховые – лучи от нижнего его края (точка B);  $Oc = f_1$  – фокусное расстояние объектива  $L_1$ ;  $cO' = f_2$  – фокусное расстояние окуляра  $L_2$ ;  $MN$  – зрачок глаза, аккомодированного на бесконечность

Нормальный глаз в спокойном состоянии воспринимает параллельные лучи (визуирует бесконечно удаленную точку); поэтому передняя фокальная плоскость окуляра должна быть совмещена с изображением объекта. В частности, если объект бесконечно далек, то задний фокус объектива приводится в соответствие с передним фокусом окуляра (телескопическая система) (рис.7).

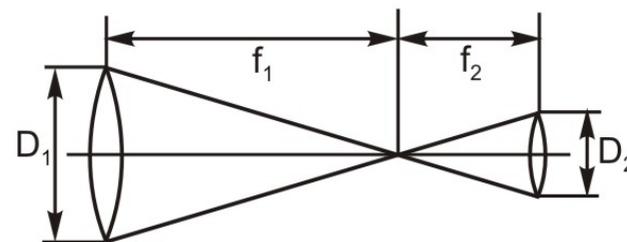


Рис. 7. Ход лучей в телескопической системе (телескоп Кеплера): увеличение системы  $N = \alpha/\beta = f_1/f_2 = D_1/D_2$

Рисунок показывает, что *увеличение* телескопической системы можно выразить также как отношение диаметров сечения пучков, входящих в объектив и выходящих из окуляра, то есть как отношение диаметров входного и выходного зрачков системы ( $D_1/D_2$ ).

Изображение, даваемое объективом, перевернутое. Окуляр в некоторых случаях оставляет изображение перевернутым (астрономические трубы), в иных переворачивает еще раз, давая, в конечном счете, прямое изображение. Получение прямого изображения, важное для земных наблюдений, достигается различными способами (устройство окуляра, дополнительно переворачивающие призмы – призматические бинокли). Для каждой реальной трубы важно установить расположение диафрагм и оправ, определяющих апертурную диафрагму (входной и выходной зрачки) и диафрагму поля зрения.

Телескопы увеличивают угол зрения в десятки и сотни раз. Кроме того, телескоп собирает гораздо больше света, чем зрачок человеческого глаза, имеющий даже в полной темноте диаметр не более 8 мм. Очевидно, что количество света, собираемого телескопом, во столько раз больше, во сколько площадь объектива больше площади зрачка. Это отношение равно отношению квадратов диаметров объектива и зрачка. Очень важной величиной, характеризующей объектив телескопа, является его *относительное отверстие*, т.е. отношение диаметра объектива телескопа к его фокусному расстоянию. *Светосилой объектива* называется квадрат относительного отверстия телескопа. Чем больше светосила объектива, тем более яркие изображения дает телескоп.

### Методика проведения.

Модели глаза и телескопа собираются с помощью набора линз на магнитной доске (рис.8). Источники света позволяют получать один луч, несколько параллельных лучей или расходящийся пучок. Создаваемые модели далеки от реальных объектов, однако дают представление об их устройстве.

### Упражнение 1. Модель глаза

1. Определите положение фокусов для всех использующихся в работе линз. Для этого направляйте на линзы параллельный пучок

лучей от источника и измеряйте расстояния от линзы до фокуса. Учтите несимметричность линз. Результаты представьте в виде чертежей (см. рис.8).

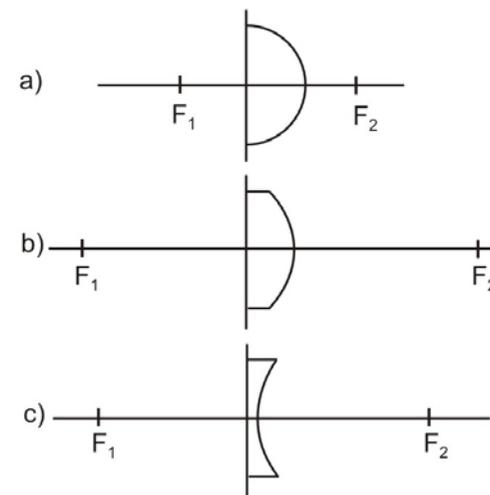


Рис.8. Применяемые в работе линзы

2. Соберите схему согласно рис. 9. Свет должен выходить из источника расходящимся пучком. Перемещая зеркало («сетчатку»), сфокусируйте на нем световой пучок. Измерьте расстояния от источника до линзы и от линзы до зеркала.

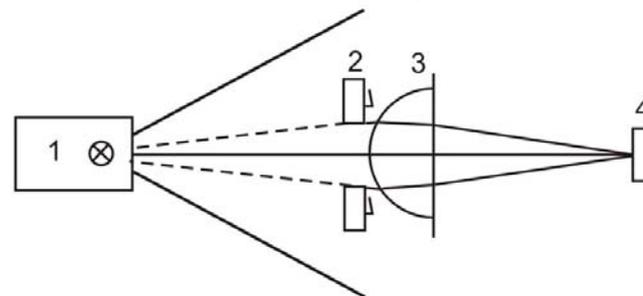


Рис.9. Получение изображения удаленного предмета. 1 – источник света, 2 – диафрагма («зрачок»), 3 – линза («хрусталик»), 4 – зеркало («сетчатка»)

3. Убедитесь, что при приближении источника света к глазу изображение перестает фокусироваться на сетчатке. Поставьте

еще одну собирающую линзу (рис.10), тем самым Вы моделируете аккомодацию глаза, т. е., увеличение толщины хрусталика. Измерьте расстояния от источника до линзы и от линзы до зеркала. Сделайте выводы.

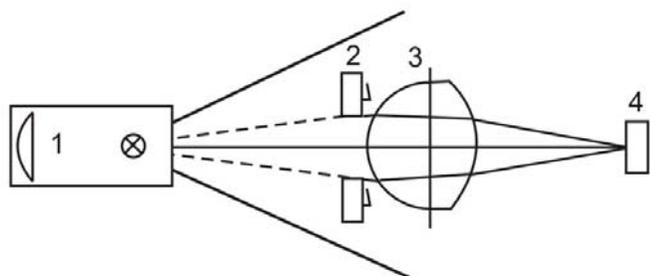


Рис.10. Получение изображения предмета, расположенного близко к глазу

### Упражнение 2. Коррекция зрения

1. Соберите еще раз схему согласно рис. 9. Свет должен выходить из источника параллельным пучком. Измерьте расстояние  $L_1$  от линзы («хрусталика») до зеркала, на котором фокусируются лучи («сетчатки»). Это модель здорового глаза.

2. Соберите модель близорукого глаза, для этого используйте линзы а) и б) с рис.6. Направьте на «глаз» параллельный пучок лучей, измерьте расстояние  $L_2$  от середины линз до зеркала, на котором фокусируются лучи.

3. Поставьте перед «глазом» рассеивающую линзу («очки») так, чтобы лучи фокусировались приблизительно на прежнем расстоянии  $L_1$ , соответствующем здоровому глазу. Измерьте расстояние  $L$  от рассеивающей линзы («очков») до собирающих линз («хрусталика»).

4. Проверьте справедливость формулы для системы тонких линз

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - (L/n_{cp}) \Phi_1 \Phi_2.$$

5. Соберите модель дальнозоркого глаза, для этого используйте линзы а) и с) с рис.8. Повторите п.п. 5 -7. Для коррекции зрения используйте собирающую линзу.

6. Сделайте выводы.

### Упражнение 3. Модель астрономического телескопа Кеплера

1. Соберите схему согласно рис. 11. Угол падения лучей на линзу  $\alpha$  должен быть маленьким ( $<6^\circ$ ).
2. Добейтесь параллельности выходящих из телескопа лучей.
3. Измерьте углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Определите угловое увеличение модели.

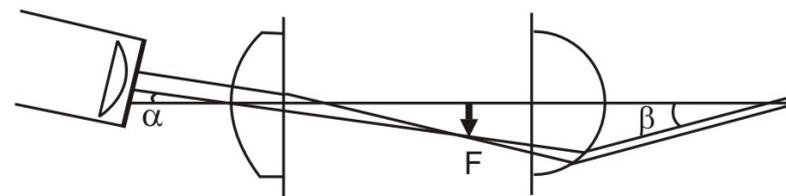


Рис.11. Модель телескопа Кеплера

### Контрольные вопросы

1. Опишите строение глаза.
2. Что такое аккомодация?
3. Какие недостатки зрения вам известны? Как их можно скорректировать?
4. Человек привык читать книгу, держа ее на расстоянии 20 см от глаз. Какова должна быть оптическая сила очков, которые должен носить человек, чтобы читать книгу, держа ее на расстоянии наилучшего зрения  $d_0 = 25$  см?
5. Дальнозоркий человек может читать книгу, держа ее на расстоянии не менее 80 см от глаз. Какова должна быть оптическая сила очков, которые должен носить человек, чтобы читать книгу, держа ее на расстоянии наилучшего зрения  $d_0 = 25$  см?
6. Опишите устройство телескопа Кеплера. От чего зависит его увеличение?
7. Что называется светосилой объектива?

### Литература

1. Матвеев А.Н. Оптика. М. Высшая школа. 1985., гл. 4.
2. Ландсберг Г.С. Оптика - М.: Физматлит, 2003, гл. XXII, XXIV.