

13. Геометрическая оптика

Линзы. Ход лучей в линзах. Формула тонкой линзы

Линзы

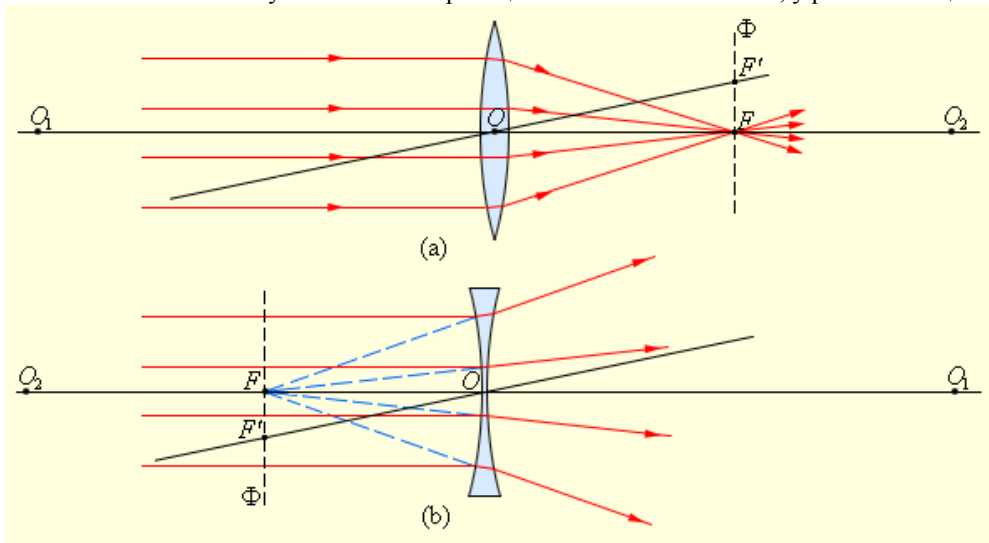
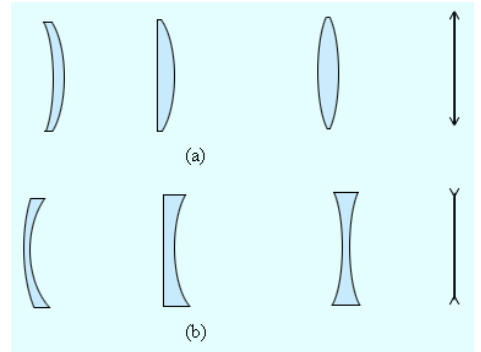
Линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то линзу называют *тонкой*.

Линзы входят в состав практически всех оптических приборов. Линзы бывают *собирающими* и *рассеивающими*. Собирающие (положительные) линзы - это линзы, преобразующие пучок параллельных лучей в сходящийся. Рассеивающие (отрицательные) линзы - это линзы, преобразующие пучок параллельных лучей в расходящийся.

Линзы, у которых середины толще чем края - собирающие, а у которых толще края — рассеивающие. Эти условия выполняются, если показатель преломления стекла, из которого изготовлена линза, больше показателя преломления среды, в которой используется линза.

Прямая, проходящая через центры кривизны O_1 и O_2 сферических поверхностей, называется *главной оптической осью линзы*. В случае тонких линз приближенно можно считать, что главная оптическая ось пересекается с линзой в одной точке, которую принято называть *оптическим центром линзы* O . Луч света проходит через оптический центр линзы, не отклоняясь от первоначального направления. Все прямые, проходящие через оптический центр, называются *побочными оптическими осями*.

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения через линзу лучи (или их продолжения) соберутся в одной точке F , которая называется *главным фокусом* линзы. У тонкой линзы имеются два главных фокуса, расположенных симметрично на главной оптической оси относительно линзы. У собирающих линз фокусы действительные, у рассеивающих — мнимые. Пучки лучей, параллельных одной из побочных оптических осей, после прохождения через линзу также фокусируются в точку F' , которая расположена при пересечении побочной оси с *фокальной плоскостью* Φ , то есть плоскостью, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус. Расстояние между оптическим центром линзы O и главным фокусом F называется *фокусным расстоянием*. Оно обозначается той же буквой F . У собирающей линзы считают $F > 0$, у рассеивающей $F < 0$.



Величину D , обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы:

$$D = \frac{1}{F}$$

Единицей измерения оптической силы в СИ является диоптрия (дптр). 1 диоптрия – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м:

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}$$

Основное свойство линз – способность давать изображения предметов. Изображения бывают прямыми или перевернутыми, действительными или мнимыми, увеличенными или уменьшенными.

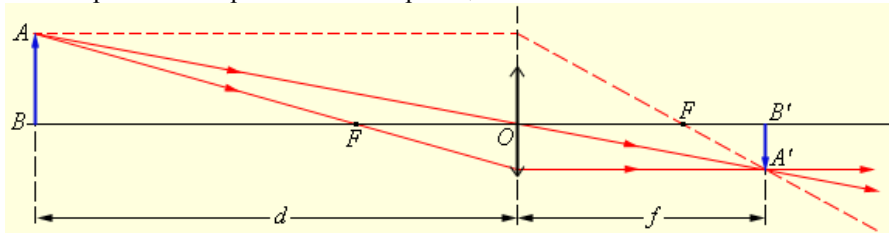
Положение изображения и его характер можно определить с помощью геометрических построений. Для этого используют свойства некоторых стандартных лучей (замечательных лучей), ход которых известен. Это лучи, проходящие через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной или одной из побочных оптических осей.

Построение изображения в тонкой линзе:

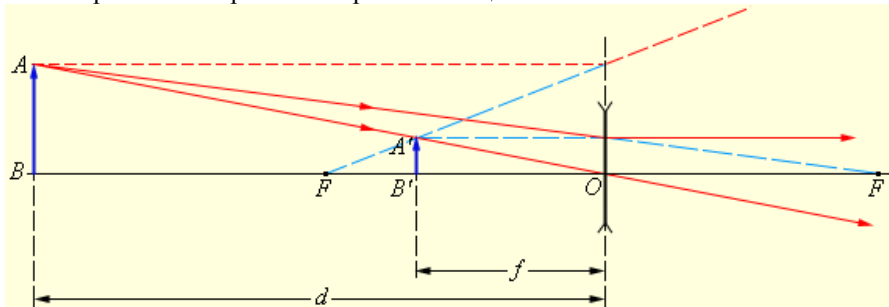
1. Луч, параллельный главной оптической оси, проходит через точку главного фокуса.
2. Луч, параллельный побочной оптической оси, проходит через побочный фокус (точку на побочной оптической оси).
3. Луч, проходящий через оптический центр линзы, не преломляется.
4. Действительное изображение - пересечение лучей. Мнимое изображение - пересечение продолжений лучей.

Примеры таких построений представлены на рисунках ниже.

1 - Построение изображения в собирающей линзе:

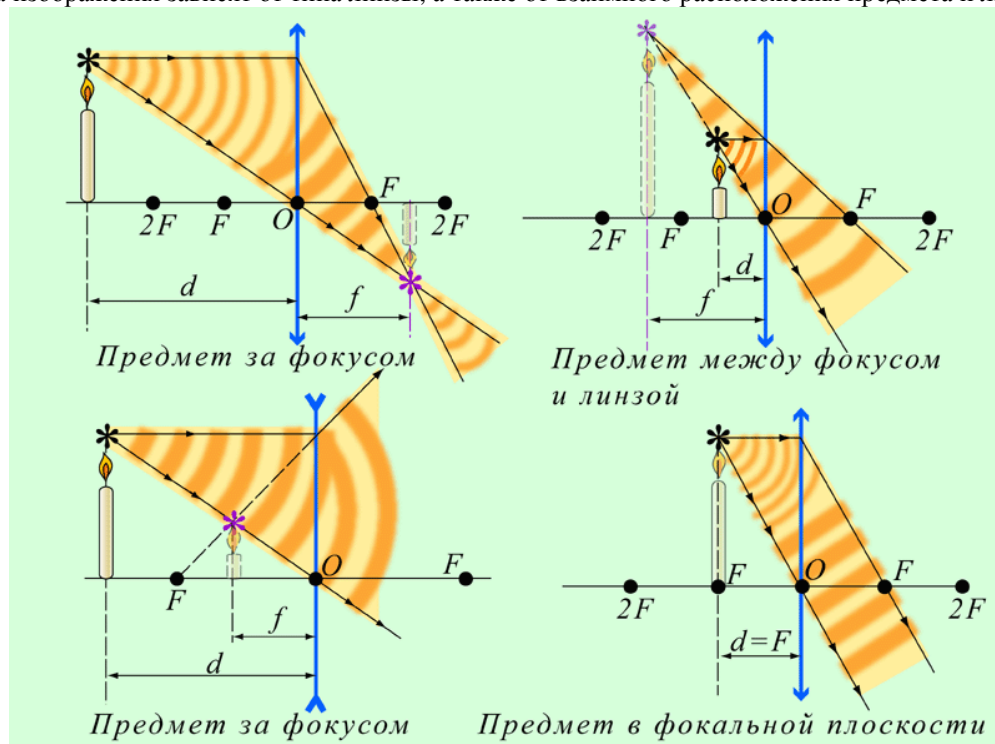


2 - Построение изображения в рассеивающей линзе:



Следует обратить внимание на то, что некоторые из замечательных лучей, использованных на рисунках для построения изображений, не проходят через линзу. Эти лучи реально не участвуют в образовании изображения, но они могут быть использованы для построений.

Свойства изображения зависят от типа линзы, а также от взаимного расположения предмета и линзы:



Положение изображения и его характер (действительное или мнимое) можно также рассчитать с помощью *формулы тонкой линзы*. Если расстояние от предмета до линзы обозначить через d , а расстояние от линзы до изображения через f , то формулу тонкой линзы можно записать в виде:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D$$

Величины d и f также подчиняются определенному *правилу знаков*: $d > 0$ и $f > 0$ – для действительных предметов (то есть реальных источников света, а не продолжений лучей, сходящихся за линзой) и изображений; $d < 0$ и $f < 0$ – для мнимых источников и изображений.

В зависимости от положения предмета по отношению к линзе изменяются линейные размеры изображения. *Линейным увеличением линзы* Γ называют отношение линейных размеров изображения H и предмета h :

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \left| \frac{f}{d} \right|$$

Величине H удобно приписывать знаки плюс или минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Величина h всегда считается положительной. Поэтому для прямых изображений $\Gamma > 0$, для перевернутых $\Gamma < 0$.

Тонкие линзы обладают рядом недостатков, не позволяющих получать высококачественные изображения. Искажения, возникающие при формировании изображения, называются *абберациями*. Главные из них – *сферическая* и *хроматическая абберации*.

Сферическая абберация проявляется в том, что в случае широких световых пучков лучи, далекие от оптической оси, пересекают ее не в фокусе. Формула тонкой линзы справедлива только для лучей, близких к оптической оси. Изображение удаленного точечного источника, создаваемое широким пучком лучей, преломленных линзой, оказывается размытым.

Хроматическая абберация возникает вследствие того, что показатель преломления материала линзы зависит от длины волны света λ . Это свойство прозрачных сред называется дисперсией. Фокусное расстояние линзы оказывается различным для света с разными длинами волн, что приводит к размытию изображения при использовании немонохроматического света.

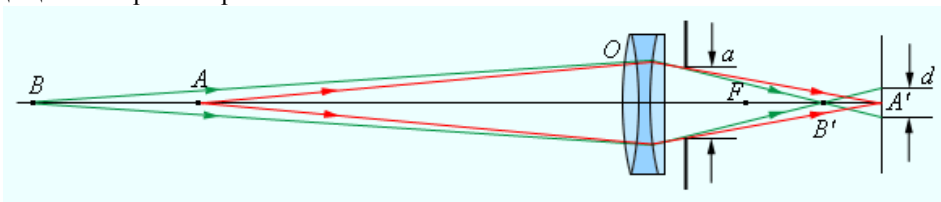
В современных оптических приборах применяются не тонкие линзы, а сложные многолинзовые системы, в которых удается приближенно устранить различные абберации.

Формирование собирающей линзой действительного изображения предмета используется во многих оптических приборах, таких как фотоаппарат, проектор и т. д.

Фотоаппарат представляет собой замкнутую светонепроницаемую камеру. Изображение фотографируемых предметов создается на фотопленке системой линз, которая называется объективом. Специальный затвор позволяет открывать объектив на время экспозиции.

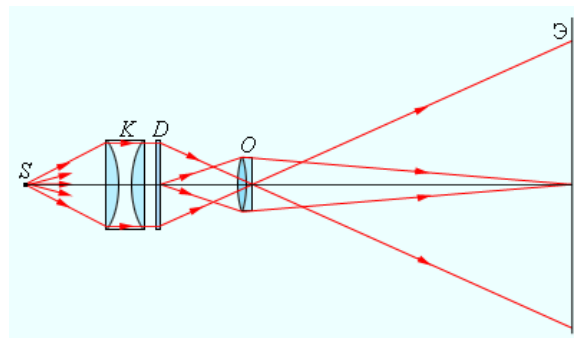
Особенностью работы фотоаппарата является то, что на плоской фотопленке должны получаться достаточно резкими изображения предметов, находящихся на разных расстояниях.

В плоскости фотопленки получаются резкими только изображения предметов, находящихся на определенном расстоянии. Наведение на резкость достигается перемещением объектива относительно пленки.

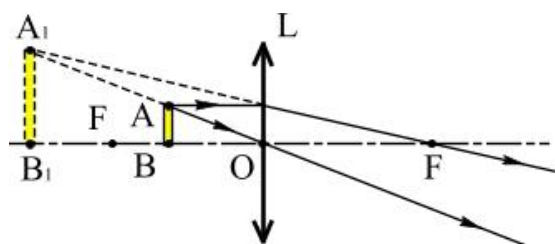


Как и в глазу, в фотоаппарате получается действительное, перевернутое, уменьшенное изображение. Основное отличие заключается в том, что фокусное расстояние зрачка меняется (аккомодация), а у фотоаппарата меняется расстояние от линзы (объектив) до изображения (пленка).

Проекционный аппарат предназначен для получения крупномасштабных изображений. Объектив О проектора фокусирует изображение плоского предмета (диапозитив D) на удаленном экране Э. Система линз К, называемая конденсором, предназначена для того, чтобы сконцентрировать свет источника S на диапозитиве. На экране Э создается действительное увеличенное перевернутое изображение. Увеличение проекционного аппарата можно менять, приближая или удаляя экран Э с одновременным изменением расстояния между диапозитивом D и объективом О.



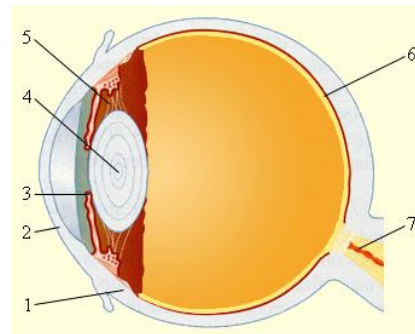
Увеличить угол зрения можно, используя *лупу* - собирающую линзу с малым фокусным расстоянием ($F \approx 10$ см), предназначенную для рассматривания увеличенных изображений малых объектов. Линзу подносят к самому глазу, а предмет помещают между линзой и главным фокусом. Глаз увидит мнимое и увеличенное изображение предмета:



ГЛАЗ

Глаз человека представляет собой сложную оптическую систему, которая по своему действию аналогична оптической системе фотоаппарата. Глаз — это система линз. Диаметр глаза ≈ 23 мм. Через глаза мы получаем до 90% информации.

Снаружи он покрыт защитной оболочкой 1 белого цвета — *склерой*. Передняя прозрачная часть 2 склеры называется *роговицей*. На некотором расстоянии от нее расположена *радужная оболочка* 3, окрашенная пигментом. Отверстие в радужной оболочке представляет собой *зрачок*. В зависимости от интенсивности падающего света зрачок рефлекторно изменяет свой диаметр приблизительно от 2 до 8 мм, т.е. действует подобно диафрагме фотоаппарата. Между роговицей и радужной оболочкой находится прозрачная жидкость. За зрачком находится *хрусталик* 4 — эластичное линзоподобное тело ($n=1,44$). Особая мышца 5 может изменять в некоторых пределах форму хрусталика, изменяя тем самым его оптическую силу. Остальная часть глаза заполнена *стекловидным телом*. Задняя часть глаза — *глазное дно*, оно покрыто *сетчатой оболочкой* 6, представляющей собой сложное разветвление зрительного нерва 7 с нервными окончаниями — палочками и колбочками (7 млн. колбочек, 130 млн. палочек, которые реагируют на свет разной частоты неодинаково), которые являются светочувствительными элементами.



Лучи света от предмета, преломляясь на границе воздух–роговица, проходят далее через хрусталик (линзу с изменяющейся оптической силой) и создают изображение на сетчатке. Роговица, прозрачная жидкость, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, оптический центр которой расположен на расстоянии около 5 мм от роговицы. При расслабленной глазной мышце оптическая сила глаза приблизительно равна 59 дптр, при максимальном напряжении мышцы — 70 дптр.

Основные свойства и оптические характеристики глаза:

Аккомодация—свойство глаза, которое заключается в способности рефлекторно изменять оптическую силу глазной оптики в зависимости от положения предмета, обеспечивающее четкое восприятие разноудаленных предметов. Изменяется главный фокус глаза от 16 до 13 мм.

Адаптация—приспособляемость к различным условиям освещенности: диаметр зрачка меняется от 2 до 8 мм.
Поле зрения: по оси ОХ 150°, по оси ОУ 125°. Спектральная чувствительность от 380 до 760 нм. Самая большая чувствительность 555 нм (зеленый цвет).

Острота зрения — свойство глаза различать две близкие точки.

Расстояние наилучшего зрения $d_0=250$ мм. Дальние предметы глаз видит без напряжения (рис. а справа).

Дефекты зрения (глаз не может создать резкое изображение на сетчатке): дальнозоркость и близорукость.

Близорукость (рис. б справа) — дефект зрения, при котором глаз в ненапряженном состоянии создает изображение удаленного предмета не на сетчатке, а перед ней, т. е. не может видеть удаленные предметы. Корректируется ношением очков с рассеивающими линзами.

Дальнозоркость (рис. с справа) — дефект зрения, состоящий в том, что изображение предмета в ненапряженном состоянии глаза получается за сетчаткой. При рассматривании близких предметов предел аккомодации исчерпывается при расстояниях больше 25 см. Корректируется ношением очков с собирающими линзами.

Близорукость и дальнозоркость могут быть исправлены с помощью современной хирургии по изменению формы роговицы или хрусталика, а также подбором контактных линз.

На рисунке, представленном ниже, показан подбор очков для чтения для дальнозоркого (а) и близорукого (б) глаза. Предмет А располагается на расстоянии $d = d_0 = 25$ см наилучшего зрения нормального глаза. Мнимое изображение А' располагается на расстоянии f , равном расстоянию наилучшего зрения данного глаза.

