

Лекция 23

Часть V. ОПТИКА

Что такое свет? Как он появляется и исчезает? Каковы законы его распространения? На эти и другие вопросы отвечает оптика — наука о свете. Мы начнём изучение оптики со знакомства с её простейшим разделом — геометрической оптикой.

Глава 14. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

В настоящее время твёрдо установлено, что свет представляет собой электромагнитные волны очень малой длины. Однако в рамках геометрической оптики волновая структура света никак не проявляется и многие его свойства (распространение, энергетические характеристики, воздействие на глаз человека и т. п.) могут быть объяснены на основе ряда простых феноменологических законов. Центральным понятием в них является понятие *светового луча*.

§ 14.1. Световые лучи. Принцип зрительного восприятия

1. Основные законы геометрической оптики. *Световой луч* — это направленная линия, вдоль которой распространяется световая энергия. Световой луч — геометрическое понятие. Из опыта известны четыре закона геометрической оптики.

1. Закон прямолинейного распространения света: *в однородных средах световые лучи суть прямые линии.*

2. Закон независимости световых лучей: *световые лучи, пересекаясь, не влияют друг на друга.*

3. Закон отражения.

4. Закон преломления.

Два последних закона будут рассмотрены отдельно.

2. Механизм видения. *Световой пучок, все лучи которого* (возможно, при продолжении в ту или другую сторону) *пересекаются в одной точке, называется гомоцентрическим, а эта точка — его центром.* Гомоцентрические пучки бывают двух видов — расходящиеся и сходящиеся. Параллельный пучок можно рассматривать как частный случай любого из указанных видов пучков при удалении центра пучка в бесконечность.

Глаз человека устроен таким образом (об этом речь впереди), что может «осмысленно» воспринимать только расходящиеся гомоцентрические пучки. Каждая точка (малый участок) светящегося или освещённого предмета испускает расходящийся гомоцентрический пучок. Глаз, вос-

принимая этот пучок, видит светящуюся точку в его центре, таким способом формируя в сознании образ рассматриваемого предмета. Поскольку зрение бинокулярно, человек, рефлекторно наводя оба глаза на рассматриваемый объект, всегда немного «косит», причём тем больше, чем ближе объект. По величине этого сведения глаз человеческий мозг более или менее точно определяет расстояние до рассматриваемого предмета.

Описанный механизм видения позволяет легко «обмануть» глаз. Действительно, если каким-либо способом изменить направление лучей гомоцентрического пучка, сохранив его гомоцентричность, то глаз, продлив перехваченные расходящиеся лучи до точки их пересечения, увидит светящуюся точку S не там, где она находится, а в другом месте (рис. 1). В таком случае говорят, что глаз видит *изображение* S' точки S .

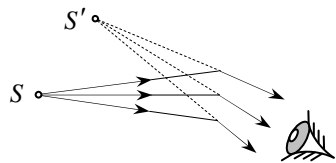


Рис. 1

§ 14.2. Закон отражения. Плоское зеркало

Отражением света от какой-либо непрозрачной поверхности называют изменение направления распространения падающего на эту поверхность светового луча. Различают два крайних случая отражения — зеркальное и диффузное (рассеянное). Первое имеет место, когда размеры неровностей¹ много меньше длины световой волны, второе — когда по порядку величины они сравнимы. При зеркальном отражении падающий луч, в

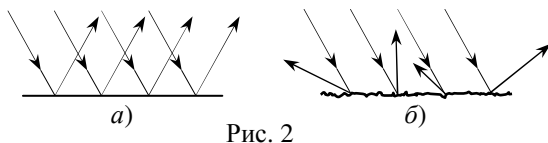


Рис. 2

какое место поверхности он бы ни попал, отражается всё время в одном и том же направлении (рис. 2 *a*), при диффузном — в различных, меняющихся совершенно случайно (рис. 2 *b*). На практике всегда одновременно присутствуют (в разной степени) оба вида отражения, причём, чем более косо к поверхности идут лучи, тем ббльшая доля падающего света отражается зеркально. Именно благодаря диффузному отражению каждый малый элемент освещённой поверхности становится центром гомоцентрического расходящегося пучка, что и даёт возможность глазу её увидеть.

Закон отражения, относящийся, очевидно, к случаю зеркального отражения, включает в себя два утверждения и гласит:

1) *луч падающий, луч отражённый и нормаль к поверхности, восстав-*

¹ Мы специально не даём точного определения понятия «размеры неровностей», ограничиваясь интуитивно-обыденным представлением о нём и отсылая педантичного читателя, скажем, к ГОСТам с требованиями к качеству обработки поверхностей перед окрашиванием.

ленная в точке падения, лежат в одной плоскости (рис. 3);

2) угол отражения β (между отражённым лучом и нормалью) равен углу падения α (между падающим лучом и нормалью).

В законе, очевидно, заложена так называемая обратимость лучей: если изменить направления каждого луча на противоположные, то отражённый луч станет падающим, а падающий — отражённым, но утверждения закона останутся в силе.

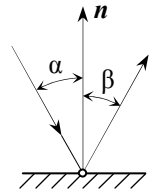


Рис. 3

Плоским зеркалом называется участок плоскости, зеркально отражающий свет. Рассмотрим точечный источник (т. е. такой, размеры которого много меньше расстояний, на которых мы интересуемся его действием), расположенный со стороны рабочей поверхности зеркала.

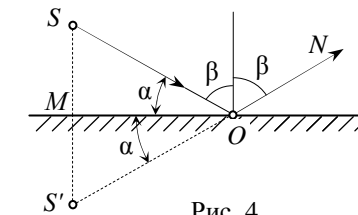


Рис. 4

Построим какой-либо луч, испущенный источником и упавший на зеркало в некоторой точке O под углом β . Отразившись под тем же углом, он пойдёт в направлении ON (рис. 4). Построим теперь точку S' , симметричную точке S относительно зеркала, и соединим точки S' и O . Получим ломаную $S'ON$, которая, как нетрудно видеть, является прямой. Действительно, из рисунка $\alpha + \beta = \pi/2$ и, значит, $\angle S'ON = 2\alpha + 2\beta = \pi$, т. е. развёрнутый. Стало быть, для построения отражённого луча достаточно соединить прямой линией симметричную источнику точку S' и точку падения луча на зеркало. Поскольку проведённые построения справедливы для произвольного луча, любой отражённый луч оказывается как бы испущенным не источником, а его зеркальным отражением. Таким образом, гомоцентрический расходящийся пучок с центром S преобразуется зеркалом в такой же пучок, но с центром S' , т. е. зеркало даёт изображение S' точки S .

А если зеркало имеет небольшие размеры и источник расположен не над ним (рис. 5), будет ли в этом случае изображение? Конечно, причём там же, где и в случае большого зеркала. Размеры зеркала влияют не на положение изображения, а на границы той области пространства, откуда в зеркале можно увидеть источник (на рисунке зашита).

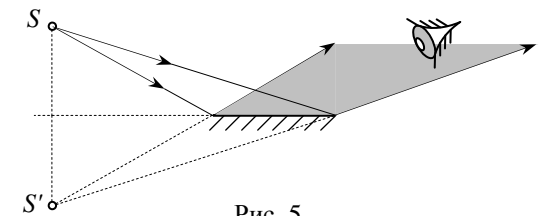


Рис. 5

§ 14.3. Сферическое зеркало

Сферическим зеркалом называется поверхность сферического сегмента, зеркально отражающая свет. Сферические зеркала существуют двух типов — вогнутые и выпуклые. Плоское зеркало можно рассматривать как предельный случай любого из этих типов при бесконечно большом радиусе кривизны.

Центр O и радиус R сферы, частью которой является данный сегмент, называются соответственно *оптическим центром* и *радиусом* зеркала, а вершина сегмента P — его *полюсом*. Любая прямая, проходящая через оптический центр зеркала, называется *оптической осью*. Ось OP , проходящая через полюс, называется *главной оптической осью*, все остальные (OM) — *побочными*. Главная ось отличается от побочных только своим симметричным расположением относительно краёв зеркала¹.

1. Формула зеркала. Рассмотрим точечный источник S , расположенный на главной оптической оси сферического зеркала (рис 7). Построим какой-либо луч, испущенный источником, который после отражения от зеркала пересечёт главную оптическую ось в точке S' . Если в точку падения луча M провести радиус зеркала OM , то получим два тупоугольных треугольника. По теореме о внешнем угле

$$\begin{cases} \alpha + \delta = \beta, \\ \gamma = \beta + \delta. \end{cases}$$

Рис. 7

Сложим эти равенства, исключив таким образом угол δ , не являющийся приосевым:

$$\alpha + \gamma = 2\beta. \quad (1)$$

Будем рассматривать только приосевые лучи, образующие малые углы с главной оптической осью. Тогда высота h окажется тоже весьма малой, точки N и P почти совпадут, а в выражении (1) сами углы можно с доста-

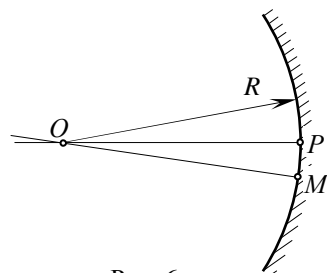
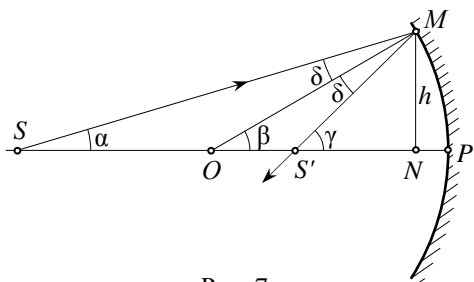


Рис. 6



¹ В более общем случае сферическим зеркалом называют участок зеркальной сферической поверхности не обязательно правильной формы (скажем, осколок ёлочного шара). В этой ситуации понятия полюса и главной оптической оси оказываются весьма условными. Впрочем, как явствует из нашего рассмотрения, эти понятия не являются принципиальными и вводятся лишь для удобства рассмотрения.

точной точностью заменить их тангенсами. В итоге получим

$$\frac{h}{d} + \frac{h}{f} = 2 \frac{h}{R},$$

где $d = SP \approx SN$ — расстояние от источника до зеркала, а $f = S'P \approx S'N$ — расстояние от зеркала до точки S' . Или, по сокращении на h ,

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

Высота h , характеризующая конкретный луч, выпала из полученного соотношения. Это означает, что *любой другой* (приосевой) луч, испущенный источником, соответствующий другой высоте h , после отражения пересечёт главную оптическую ось на том же расстоянии f , определяемом формулой (2), т. е. пройдёт через ту же точку S' . Другими словами, точка S' является *изображением* точки S , даваемым зеркалом.

Устремим теперь $d \rightarrow \infty$ (это соответствует параллельному падающему пучку). Из (2)

$$f \rightarrow \frac{R}{2}.$$

Точка, в которой пересекаются отражённые лучи (или их продолжения), при падении на зеркало параллельного пучка, идущего вдоль главной оптической оси, называется *главным фокусом зеркала*¹, а расстояние этой точки от зеркала — его *фокусным расстоянием*. И сам фокус, и фокусное расстояние мы будем обозначать одной буквой F . Как мы видели, $F = R/2$. Тогда формулу (2) можно переписать в виде

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \equiv D. \quad (3)$$

Это и есть формула сферического зеркала. Величину D , обратную фокусному расстоянию, называют *оптической силой* и измеряют в диоптриях. Очевидно,

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Все рассуждения, приведённые по отношению к главной оптической оси, будут, очевидно, справедливы и по отношению к любой побочной. В

¹ В силу обратимости, если в главном фокусе поместить точечный источник, то испускаемый им расходящийся пучок лучей после отражения становится параллельным, идущим вдоль главной оптической оси.

частности, побочным фокусом называется точка пересечения отражённых лучей после падения на зеркало наклонного параллельного пучка, идущего вдоль побочной оси. Совокупность всех фокусов представляет собой так называемую фокальную поверхность, являющуюся сферической

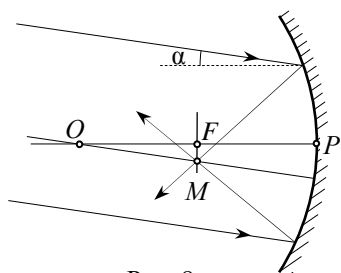


Рис. 8

поверхностью с радиусом $R/2$. Мы аппроксимируем эту поверхность плоскостью, перпендикулярной главной оптической оси, и назовём *фокальной плоскостью*. Таким образом, каждому углу α наклона параллельного пучка лучей соответствует определённая точка M фокальной плоскости (рис. 8).

Замечание. Формула зеркала была нами получена для источника, находящегося на главной оптической оси системы. Если точка находится сбоку от этой оси, то расстояния, фигурирующие в формуле зеркала, следует откладывать, очевидно, вдоль побочной оси, проведённой через данную точку. Если спроектировать эти расстояния на главную ось, то получатся, вообще говоря, несколько другие величины. Однако в рамках нашего рассмотрения (приосевые пучки) этими различиями вполне можно пренебречь и всегда отсчитывать расстояния от точки и её изображения до зеркала вдоль *главной оптической оси*. Отсюда следует, что перпендикулярный этой оси отрезок (все точки которого находятся на одном и том же расстоянии от зеркала) преобразуется также в перпендикулярный отрезок.

2. Правило знаков. Изображения точки, даваемые плоским (рис. 5) и вогнутым (рис. 8) зеркалами, качественно различаются. В самом деле, в случае плоского зеркала отражённый гомоцентрический пучок является расходящимся, а в случае вогнутого зеркала — сходящимся. Эти различия отражаются принятой в оптике терминологической классификацией гомоцентрических пучков на входе и выходе оптического прибора.

Вообще *источником* (точечным) называется *центр пучка, падающего на вход прибора, а изображением — центр пучка, выходящего из прибора*. Если падающий на вход пучок — расходящийся, его центр называется *действительным источником*, а если сходящийся — *мнимым*. Наоборот, *центр сходящегося пучка на выходе называется действительным изображением, а центр расходящегося — мнимым*. Таким образом, изображения на рисунках 5 и 8 отличаются тем, что первое является мнимым, а второе действительным. Все присутствующие на рассмотренных выше рисунках источники являются действительными, ибо любая светящаяся точка всегда даёт *расходящийся* пучок. Мнимый источник может быть реализован с помощью какого-либо фокусирующего устройства (например вогнутого зеркала), которое перехватывает расходящийся пучок, испущенный реальным источником, и делает его сходящимся, причём этот

пучок должен быть перехвачен прибором, по отношению к которому рассматриваемый источник оказывается мнимым, до того, как его лучи сойдутся (рис.9). Если сильно сдвинуть зеркало 3 на рис. 9 вправо, то сходящийся пучок, пройдя точку S , станет расходящимся, а сама эта точка превратится из мнимого источника (по отношению к зеркалу 3) в действительный.

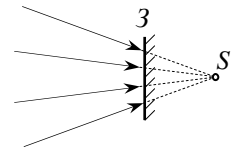


Рис. 9

Введённые понятия позволяют обобщить полученную формулу зеркала на самый общий случай любых источников, изображений и сферических зеркал (т. е. выпуклых тоже). При этом, как нетрудно видеть (предоставляем читателю убедиться в этом самостоятельно), оказывается справедливым так называемое правило знаков: все величины в формуле (3) являются алгебраическими, причём действительным источнику и изображению соответствуют положительные d и f , мнимым — отрицательные. Для вогнутого зеркала величины R , F и D положительные, для выпуклого — отрицательные¹.

Пример. На расстоянии $d = 3\text{ см}$ от поверхности глянцевого ёлочного шара радиусом $R = 6\text{ см}$ расположен светодиод (точечный источник) ёлочной гирлянды. Где находится изображение этого источника, даваемое шаром? Мысленно соединим источник с центром шара, проведя, таким образом, главную оптическую ось, и запишем для неё формулу зеркала²:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = -\frac{2}{R}.$$

Зеркало выпуклое, так что в правой части стоит знак «минус». Источник действительный, стало быть, первый член положительный. Знак второго слагаемого мы не знаем — он «сидит» внутри f . Решая, находим

$$f = -\frac{dR}{2d + R} = -\frac{R}{4} = -1,5\text{ см}.$$

Таким образом, изображение мнимое, оно находится внутри шара (в «зазеркалье») на расстоянии $R/4$ от его поверхности.

¹ Это правило почти очевидно. Действительно, на рис. 7, использованном при выводе формулы зеркала, фигурируют действительные источник и изображение. Если изображение будет мнимым, т. е. образовано расходящимся пучком, то его центр окажется по другую сторону от зеркала (в «зазеркалье»), т. е. f сменит знак. То же самое произойдёт и с d , если мнимым окажется источник, т. е. падающий пучок будет сходящимся: его центр сразу переместится в «зазеркалье». Аналогично при замене зеркала на выпуклое, очевидно, сменит знак и его радиус, ибо будет «откладываться» в другую сторону от полюса.

² При практическом использовании формулы зеркала задача оказывается определённой, когда известны знаки лишь двух членов, входящих в формулу. Знак третьего знать не обязательно: он определяется самой формулой.

3. Базовые лучи. Линейное увеличение. Базовыми мы будем называть падающие на зеркало лучи, дальнейший ход которых (после отражения) известен. Их всего четыре.

1. Луч, проходящий через оптический центр зеркала. После отражения идёт строго в обратном направлении.

2. Луч, параллельный главной оптической оси зеркала. После отражения луч (или его продолжение) проходит через главный фокус.

3. Луч, идущий через фокус. После отражения идёт параллельно главной оптической оси зеркала.

4. Луч, попадающий в полюс. Симметрично отражается относительно главной оптической оси зеркала.

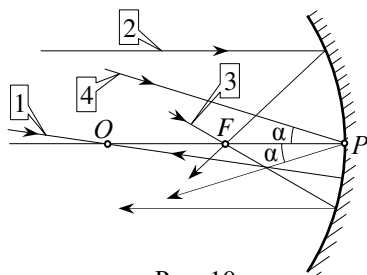


Рис. 10

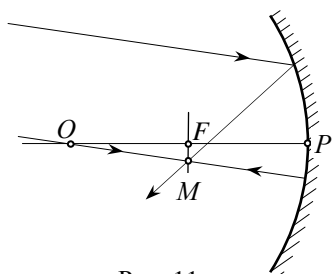


Рис. 11

Использование базовых лучей позволяет решать многие задачи на построение. Пусть, например, нам нужно найти ход после отражения произвольного луча, падающего на зеркало (рис. 11). Нанесём на рисунок дополнительно какой-либо из базовых лучей, параллельный данному, скажем, луч, идущий через оптический центр. Получим параллельный пучок, который после отражения должен собраться в какой-то точке фокальной плоскости. Но ход отражённого базового луча нам известен. Находим точку M его пересечения с фокальной плоскостью и проводим через неё искомый отражённый луч.

Линейным увеличением Γ зеркала называется отношение какого-либо размера изображения к соответствующему размеру предмета. Если этот предмет — вектор, перпендикулярный главной оптической оси, то изображение, как мы видели, — тоже перпендикулярный этой оси вектор. Если, кроме того, начало вектора лежит на главной оптической оси, то и начало изображения расположится на этой оси и, стало быть, для построения всего изображения достаточно найти положение его конца (а затем опустить перпендикуляр на главную оптическую ось). Итак, проводим из вершины стрелки базовый луч через полюс. Вершина изображения, очевидно, будет лежать на симметрично отражённом луче (рис. 12). Из подобия соответствующих треуголь-

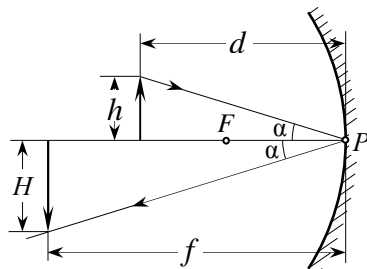


Рис. 12

ников находим линейное увеличение

$$\Gamma \equiv \frac{H}{h} = \left| \frac{f}{d} \right| \quad (4)$$

(в правой части взят модуль, ибо в общем случае величины f и d — алгебраические). Нетрудно видеть, что эта формула остаётся справедливой для любых источников, изображений и зеркал.

§ 14.4. Закон преломления. Полное отражение

Преломлением света на границе двух прозрачных сред называется изменение направления распространения луча при его переходе из первой среды во вторую. Преломление всегда сопровождается отражением: часть света отражается от границы назад в первую среду. Если граница раздела сред гладкая, направление отражённого луча подчиняется рассмотренному выше закону отражения от непрозрачных поверхностей.

Закон преломления (на гладкой границе) устанавливает связь между направлениями падающего и преломлённого лучей и содержит три утверждения:

- 1) луч падающий, луч преломлённый и нормаль к границе, восставленная в точке падения луча, лежат в одной плоскости;
- 2) падающий и преломлённый лучи лежат по разные стороны от нормали¹;
- 3) отношение синусов соответствующих углов есть величина постоянная, характерная для данной пары граничащих сред (рис.13):

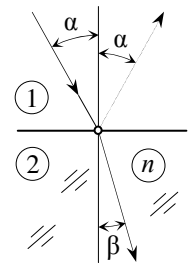


Рис. 13

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \equiv \frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (5)$$

где n — относительный показатель (коэффициент) преломления второй среды относительно первой, равный отношению абсолютных показателей преломления данных сред. Под абсолютным показателем понимается «коэффициент замедления» света в данной среде, т. е. отношение скорости света c в вакууме к скорости света v в среде. Чем больше абсолютный показатель преломления, тем оптически более плотной считается среда.

¹ Существуют искусственно созданные в конце 90-х так называемые «левые» среды, в которых векторы \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{s} электромагнитной волны образуют не право- (как в обычных, «правых», средах), а левовинтовую тройку. На границе «правой» и «левой» сред преломление происходит аномально: падающий и преломлённый лучи лежат по одну сторону от нормали. Мы, однако, такие ситуации как узко специфические сразу исключим из рассмотрения.

Из сказанного следует, что явление преломления (как и отражения) обратимо: если изменить направления обеих лучей на противоположные, т. е., преломлённый луч сделать падающим, а падающий преломлённым, все утверждения закона останутся в силе. Стало быть, если свет идёт из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (снизу вверх на рис 13), то угол преломления α будет больше угла падения β . При увеличении β угол α будет расти быстрее и при некотором $\beta = \beta_{пред}$ α достигнет значения $\pi/2$, так что преломлённый луч станет «скользящим». Что произойдёт, если продолжать увеличивать β ? При $\beta \geq \beta_{пред}$ преломлённый луч исчезает, остаются только падающий и отражённый лучи (рис. 14). Описанное явление называется полным отражением света (иногда его называют «полным внутренним отражением»), а угол $\beta_{пред}$ — предельным или наименьшим углом полного отражения. Из (5)

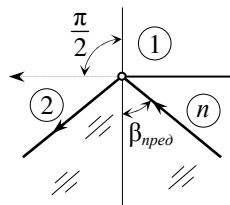


Рис. 14

$$\beta_{пред} = \frac{\sin \pi/2}{n} = \frac{1}{n}. \quad (6)$$

Например, для воды ($n=1,33$) $\beta_{пред} \approx 48,6^\circ$, для стекла ($n=1,5$) $\beta_{пред} \approx 41,8^\circ$, для алмаза ($n=2,4$) $\beta_{пред} \approx 24,6^\circ$.

Замечание. Не следует думать, что при достижении углом β величины $\beta_{пред}$ в наблюдаемом явлении происходят какие-то скачкообразные изменения. По мере роста β меняется распределение энергии падающего луча между преломлённым и отражённым: доля первого *монотонно* падает, а второго растёт. При $\alpha \rightarrow \pi/2$ энергия преломлённого луча уменьшается до нуля и он плавно исчезает.

На явлении полного отражения основан принцип действия, например, таких широко распространённых современных устройств, как световоды (рис. 15). Прозрачный твёрдый стержень заданной формы с гладкой боковой поверхностью или гибкая нить из стекловолокна освещается с одного из торцов световыми лучами, образующими малые углы с продольной осью системы. При каждом «касании» луча с боковой поверхностью он испытывает полное отражение, пока не дойдет до второго торца и не выйдет наружу. Таким образом осуществляется передача на расстояние световой энергии с весьма малыми потерями, что позволяет, скажем, освещать или рассматривать какие-либо труднодоступные места (например внутренние органы



Рис. 15

с помощью вводимого пациенту медицинского зонда). Стекловолокно используется также при изготовлении различных датчиков, в волоконно-оптической связи, рекламе и т. п.

§ 14.5. Преломление на сферической поверхности

Пусть теперь границей раздела двух прозрачных сред является сфера радиусом R , причём с её *вогнутой* стороны находится среда с относительным показателем преломления n (рис. 16). Рассмотрим точечный источник S , расположенный с *выпуклой* стороны сферы. Соединим точки S и центр O сферы, проведя таким образом *главную оптическую ось* системы. Пусть под малым углом α к этой оси какой-либо луч, падающий от источника на сферу. Преломившись на её поверхности в точке M , луч пересечёт главную оптическую ось в некоторой другой точке S' . Считая все углы, изображённые на рис. 16 малыми, в законе преломления, написанном для точки M , синусы углов можно заменить самими углами (что уже отражено на рисунке). Применяя к треугольникам SMO и OMS' теорему о внешнем угле, запишем

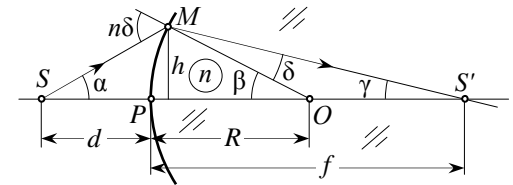


Рис. 16

$$\begin{cases} \alpha + \beta = n\delta, \\ \delta + \gamma = \beta. \end{cases}$$

Домножая второе равенство на n и складывая с первым, снова исключим «неприосевой» угол δ . Получим

$$\alpha + \beta + n\gamma = n\beta,$$

или

$$\alpha + n\gamma = (n-1)\beta.$$

Заменим в этом соотношении все углы их тангенсами, считая при этом точку P практически совпадающей с основанием высоты h :

$$\frac{h}{d} + n\frac{h}{f} = (n-1)\frac{h}{R},$$

или, по сокращении на h ,

$$\frac{1}{d} + \frac{n}{f} = \frac{(n-1)}{R}. \quad (7)$$

Как и в формуле зеркала, высота h выпала из конечного соотношения, откуда следует, что все (приосевые) лучи, испущенные S , сойдутся в точке S' , т. е. последняя является *изображением* источника. Выражение (7) называется *формулой преломления на сферической поверхности*.

Нетрудно убедиться, что и по отношению к этой формуле оказывается справедливым правило знаков, позволяющее использовать её в форме (7) в самом общем случае любых источников и изображений, а также границ раздела, выпуклых в любую сторону. Это правило, однако, имеет два формальных отличия от аналогичного правила для зеркала. Во-первых, поскольку данная система контактирующих сред работает «на просвет» а не на отражение, как зеркало, положительными считаются d и f , отложенные в *разные* стороны от сферической поверхности. И, во-вторых, как это следует из самого вывода формулы, $R > 0$ здесь соответствует не вогнутой поверхности, как у зеркала, а выпуклой, т. е. *обращённой своей выпуклостью навстречу падающему лучу*. Отметим ещё раз, что n — это показатель преломления *второй* среды (в которую луч проникает) относительно *первой* (из которой он идёт).

Контрольные вопросы и задания

1. Дать определение светового луча. Сформулировать основные законы геометрической оптики.
2. Что такое гомоцентрический световой пучок? Где глаз видит светящуюся или освещенную точку?
3. Сформулировать условия зеркального и диффузного отражений света.
4. Сформулировать закон отражения.
5. Где находится изображение точечного источника, даваемое плоским зеркалом? Ответ обосновать геометрическими построениями.
6. Что называется сферическим зеркалом? Что такое оптический центр, полюс, главная и побочная оптические оси зеркала?
7. Получить формулу сферического зеркала. Дать определения главного и побочного фокусов, фокальной плоскости, оптической силы зеркала.
8. Показать, что изображение зеркалом перпендикулярного главной оптической оси отрезка является также перпендикулярным этой оси отрезком
9. Изобразить гомоцентрические пучки, соответствующие:
 - а) действительному и мнимому изображениям;
 - б) действительному и мнимому источникам.

10. Сформулировать правило знаков для формулы сферического зеркала.
11. Изобразить базовые лучи.
12. Получить формулу линейного увеличения зеркала.
13. Сформулировать закон преломления. Что такое абсолютный и относительный показатели преломления?
14. В чём состоит явление полного отражения? Сформулировать условия полного отражения.
15. Получить формулу преломления на сферической поверхности. Сформулировать правило знаков.