

ГЛАВА II

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 4. Лучистый поток. Фотометрические величины и единицы их измерения

Свет материален и несет с собой определенный запас энергии. Поэтому интенсивность света характеризуют в первую очередь величиной переносимой энергии. Эта электромагнитная энергия может быть измерена по ее превращению в другие формы энергии (тепловую, химическую, электрическую) в различных приемниках. Раздел оптики, занимающийся измерением интенсивности света и его источников, называется фотометрией.

Для прикладной светотехники существенна не только объективная энергетическая характеристика интенсивности света, но и мера воздействия света на глаз наблюдателя. Так, например, тело, нагретое до 400°C , является довольно интенсивным источником инфракрасных (тепловых) лучей, но эти лучи невидимы и интенсивность их зрительного восприятия будет равна нулю. Благодаря этому в фотометрии приходится вводить двойные единицы измерения: энергетические (оцениваемые по объективным энергетическим характеристикам) и визуальные (оцениваемые по воздействию на глаз).

Будем называть источник света (излучатель) точечным, если размеры источника малы и излучение испускается равномерно во все стороны. Фронт световой волны, испускаемый таким точечным источником, будет сферическим. Как и в случае других точечных объектов (материальная точка, точечный заряд и т. д.), точечный источник света — полезная абстракция.

Во многих случаях мы воспринимаем свет не от самосветящихся источников, а от предметов, отражающих или рассеивающих свет постороннего самосветящегося источника. Подобные несамосветящиеся источники света обычно называются вторичными. Примером несамосветящегося источника является Луна, поверхность которой отражает к нам солнечные лучи. Если поверхность предмета отражает весь падающий на нее свет (коэффициент отражения

$\rho=1$), то такую поверхность называют **абсолютно белой**. Поверхность, полностью поглощающую падающий на нее свет ($\rho=0$), называют **абсолютно черной** (об абсолютно черном теле см. § 31).

Для пространственных задач распространения света существенно понятие о телесном угле. Мерой телесного угла является отношение площади dS_0 участка, вырезаемого конусом на поверхности сферы, к квадрату ее радиуса r , т. е.

$$d\omega = \frac{dS_0}{r^2}. \quad (4.1)$$

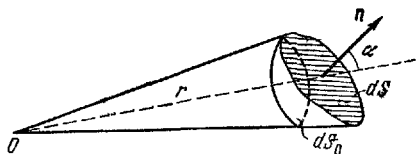


Рис. 1.8.

За единицу телесного угла принят телесный угол, опирающийся на участок поверхности сферы, площадь которого равна квадрату ее радиуса ($dS_0=r^2$). Эта единица называется **стерадиан** (*стер*). Наибольший телесный угол равен, очевидно, 4π *стер* (площадь всей поверхности сферы $4\pi r^2$), а безграничная плоскость видна из любой точки пространства под углом 2π *стер*. Как видно из рис. 1.8, площадку dS , нормаль к которой n составляет угол α

с радиусом r , проведенным из точки наблюдения O , видна из последней под телесным углом

$$d\omega = \frac{dS_0}{r^2} = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}. \quad (4.2)$$

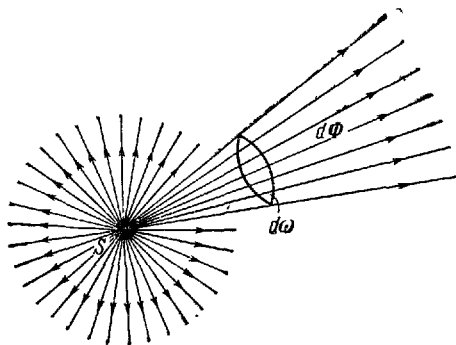


Рис. 1.9.

А. Энергетические единицы

Лучистый поток. Основной энергетической фотометрической величиной является **лучистый поток Φ** . Эта величина

характеризует энергию, проходящую через данную поверхность за единицу времени, и измеряется соответственно в единицах мощности (*вт, эрг/сек*).

Сила излучения. Рассмотрим точечный источник S и выделим телесный угол $d\omega$ с вершиной в точке S (рис. 1.9). Обозначим лучистый поток, заключенный в телесном угле $d\omega$, через $d\Phi$. Тогда отношение

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (4.3)$$

называется силой излучения (силой света)*) точечного источника в данном направлении. Из (4.3) следует, что сила излучения характеризуется величиной потока, заключенного в единице телесного угла, и измеряется соответственно в *вт/стер* или *эрг/сек·стер*.

Если поток, испускаемый точечным источником, равномерный во всех направлениях, то

$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4\pi} \quad \text{и} \quad \Phi = 4\pi I, \quad (4.4)$$

где Φ — полный лучистый поток, испускаемый источником во всем направлениям, т. е. во всем телесном угле $\omega = 4\pi$. Если же поток неравномерен, то формула (4.4) определяет среднюю силу излучения источника.

Величина Φ является для данного источника постоянной и не может быть увеличена с помощью оптических приборов. Оптические приборы (зеркала, линзы) позволяют лишь перераспределить полный лучистый поток по телесному углу с целью получения в некоторых направлениях большего потока на единицу телесного

угла, т. е. большей силы света. Так, например, применяя параболическое зеркало в прожекторах, удается увеличить силу света в одном определенном направлении в тысячи раз, за счет сильного ее уменьшения во всех других направлениях.

Лучистость. Интенсивность излучения протяженного источника характеризуется его лучистостью (яркостью) в данном направлении B_{φ} . Рассмотрим на поверхности источника около точки N

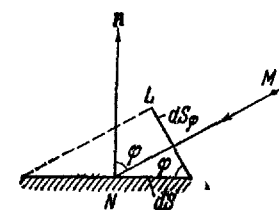


Рис. 1.10.

элементарную площадку dS с нормалью n (рис. 1.10). Величина проекции площадки dS на плоскость L , перпендикулярную к направлению наблюдения NM , будет равна $dS_{\varphi} = dS \cos \varphi$, где φ — угол между NM и нормалью к площади dS . Эту величину dS_{φ} называют видимой поверхностью элемента площади источника dS в данном направлении. Рассматривая светящуюся площадку как точечный источник, можно по соотношению (4.3) определить ее силу излучения в данном направлении dI_{φ} . Величина

$$B_{\varphi} = \frac{dI_{\varphi}}{dS_{\varphi}} = \frac{dI_{\varphi}}{dS \cos \varphi} \quad (4.5)$$

называется лучистостью поверхности источника в данном направлении. Она численно равна силе света в данном направлении, соз-

*) По ГОСТ введены новые обозначения для энергетических единиц. Старые названия приведены в скобках.

даваемой единицей площади видимой поверхности источника, и измеряется в $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{стер}$ или $\text{эрг}/\text{сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стер}$.

Лучистость протяженного источника может быть различной в разных направлениях. Однако для таких источников, как Солнце и освещаемая посторонним источником матовая поверхность, величина B_φ не зависит от направления наблюдения:

$$B_\varphi = \text{const} = B. \quad (4.6)$$

Из (4.5) и (4.6) тогда следует, что

$$dI_\varphi = B dS \cos \varphi = dI_0 \cos \varphi, \quad (4.7)$$

т. е. сила света такого источника пропорциональна косинусу угла с нормалью (закон Ламберта) и максимальна в направлении нормали (dI_0). Для создания таких одинаково ярких во всех направлениях источников технические светильники закрывают специальными молочными стеклами.

Плотность излучения. Светящаяся поверхность S (рис. 1.11) испускает лучистый поток Φ по всем направлениям (в телесном угле 2π). Лучистый поток, испускаемый единицей площади,

$$\frac{\Phi}{S} = R \quad (4.8)$$

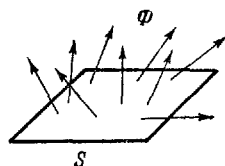


Рис. 1.11.

характеризует плотность излучения (светность) источника и измеряется в $\text{вт}/\text{м}^2$ или $\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. Светность является интегральной величиной и для источников, у которых яркость по всем направлениям одинакова, связана с последней соотношением

$$R = \pi B. \quad (4.9)$$

Из (4.3), (4.5) и (4.6)

$$\Phi = \int_{\omega} BS \cos \varphi d\omega =$$

$$= BS \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi 2\pi \sin \varphi d\varphi,$$

так как элемент телесного угла $d\omega = 2\pi \sin \varphi d\varphi$ (рис. 1.12). Отсюда

$$R = \frac{\Phi}{S} = B\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin \varphi \cos \varphi d\varphi = B\pi \sin^2 \varphi \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = B\pi.$$

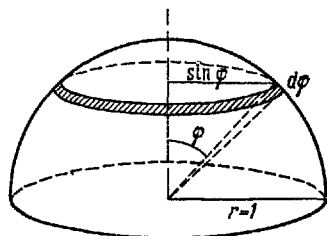


Рис. 1.12.

Облученность. Понятие облученности (освещенности) E относится уже не к источникам света, а характеризует интенсивность лучистой энергии, падающей на освещаемую поверхность. Величина E численно равна величине потока, падающего на единицу освещаемой поверхности (рис. 1.13), т. е.

$$E = \frac{d\Phi_{\text{пад}}}{dS} \quad (4.10)$$

и измеряется в $\text{вт}/\text{м}^2$ или $\text{эрг}/\text{сек} \cdot \text{см}^2$.

Если произвольно ориентированная в пространстве площадка dS освещается точечным источником O (рис. 1.8), то согласно (4.2):

$$dS = \frac{r^2}{\cos \alpha} d\omega,$$

где r — расстояние от источника до площадки, α — угол между направлением лучей и нормалью к площадке, а $d\omega$ — телесный угол, под которым видна площадка dS из точечного источника O . Освещенность этой поверхности

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi \cos \alpha}{d\omega \frac{r^2}{\cos \alpha}} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}, \quad (4.11)$$

так как согласно (4.3) отношение $\frac{d\Phi}{d\omega}$ есть сила света источника I .

Формула (4.11) выражает два так называемых закона освещенности:

1. Освещенность площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного источника (закон обратных квадратов).
2. Освещенность площадки прямо пропорциональна косинусу угла между направлением лучистого потока и нормалью к площадке (закон косинуса).

При наличии нескольких источников света освещенность поверхности равна сумме освещенностей, создаваемых каждым из этих источников в отдельности. При наличии большого протяженного источника для расчета создаваемой им освещенности необходимо разбить его мысленно на достаточно малые участки с силой света dI и проинтегрировать выражение (4.11) по всей поверхности источника.

От абсолютно белой поверхности ($\rho = 1$), освещаемой посторонним источником, отражается весь падающий поток $d\Phi_{\text{пад}}$. Рассматривая эту поверхность как вторичный источник света, можно на основании определений (4.8) и (4.10) сказать, что ее светность равна освещенности

$$R = E.$$

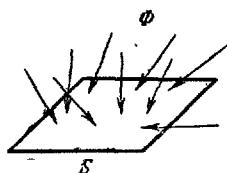


Рис. 1.13

Если эта поверхность идеально рассеивающая и для нее выполняется закон Ламберта, то на основании (4.9)

$$B = \frac{R}{\pi} = \frac{E}{\pi}. \quad (4.12)$$

Для небелых отражающих поверхностей коэффициент отражения

$$\rho = \frac{d\Phi_{\text{отр}}}{d\Phi_{\text{пад}}}$$

меньше единицы и их яркость равна

$$B = \frac{\rho}{\pi} E. \quad (4.13)$$

Перечисленные фотометрические величины (Φ , I , B , R , E) дают объективную характеристику энергии света. Количественное определение этих величин может быть выполнено при применении такого приемника, который одинаково бы воспринимал лучистую энергию при различных длинах волн падающего света. Таким приемником является термоэлемент, превращающий всю падающую на него энергию света в тепловую и количественно измеряющий последнюю.

Б. Визуальные единицы

В большинстве оптических измерений приемником энергии света является человеческий глаз, а также фоточувствительные слои и фотоэлементы. Все эти приемники не обладают одинаковой чувствительностью к лучистой энергии различных длин волн и являются селективными (избирательными) приемниками света. Каждый такой

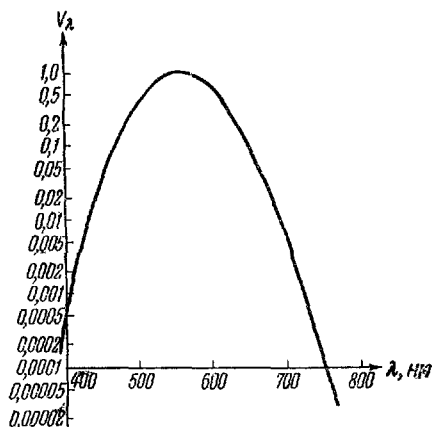


Рис. 1.14

приемник характеризуется своей кривой чувствительности к свету различных длин волн. На рис. 1.14 изображена кривая спектральной чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении, которая в этом случае называется кривой видности. По оси ординат в логарифмическом масштабе отложен коэффициент видности, условно принятый за единицу при длине волны $0,555 \text{ мк} = 555 \text{ нм}$ (желто-зеленая часть видимого спектра), наиболее эффективно воспринимаемой глазом. Энергия света

с длиной волны 510 нм или 610 нм должна быть в два раза больше, чем энергия света с $\lambda = 555$ нм, чтобы зрительные ощущения были одинаковыми. При $\lambda < 380$ нм и $\lambda > 780$ нм коэффициент видности равен нулю.

Указанные особенности зрительного восприятия приводят к тому, что субъективная оценка интенсивности света отличается от объективной энергетической. В соответствии с этим для характеристики фотометрических величин необходимо вводить специальные визуальные единицы измерения, пригодные лишь для видимого света. Введенные выше соотношения между фотометрическими величинами остаются в силе и необходимо лишь ввести эталон измерения для какой-нибудь одной из них.

Световой поток и сила света. Первоначально по международному соглашению в качестве основного был выбран эталон силы света — международная свеча. Этот условный эталон выполняется обычно в виде лампочки накаливания с определенным размером нити при определенной величине накаливающего ее тока.

За единицу светового потока был принят люмен:

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ св} \cdot 1 \text{ стер.}$$

Таким образом, люмен является производной единицей и представляет собой световой поток, создаваемый равномерным точечным источником с силой света в 1 международную свечу в единице телесного угла (1 стерадиане). Так, например, полный световой поток (во всем телесном угле 4π), создаваемый 15-ваттной лампой накаливания с вольфрамовой нитью при напряжении 220 в, равен 101 лм.

Как мы видели при анализе энергетических величин, основной световой величиной является световой поток, а все другие фотометрические величины определяются через этот поток Φ . Поэтому уже давно назрела необходимость перехода к такому световому эталону, который был бы легко и точно воспроизводим и являлся бы эталоном непосредственно светового потока, а не силы света (свеча) или другой производной световой величины.

Такой государственный световой эталон СССР был создан в 1948 г. П. М. Тиходеевым с сотрудниками. Схема устройства этого эталона изображена на рис. 1.15. Трубочка из плавленной

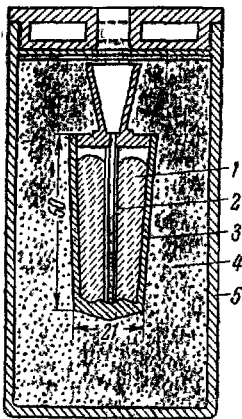


Рис. 1.15.

окси́и тория 2 помещена в обогреваемый сосуд 3 из того же материала, заполненный ~ 190 г платины 1. Пространство между этим сосудом и внешним кварцевым сосудом 5 заполнено насадкой 4 также из окиси тория. Сосуд 3 нагревается до температуры затвердевания платины ($2042,5^\circ\text{K}$) и расплавленная платина поддерживает постоянную температуру излучателя — трубки 2. Излучающая трубка и внутренний сосуд изготовлены из окиси тория, поскольку последняя достаточно тугоплавка и не загрязняет расплавленную платину. Чистота платины проверяется по температурному коэффициенту электрического сопротивления R .

Отношение $\frac{R_{100^\circ}}{R_{0^\circ}}$ должно быть не ниже 1,390. Световой поток, испускаемый внутренней полостью трубки 2, выходит через верхнее отверстие и используется как эталон для сравнения. Единица этого потока — люмен — определяется как световой поток, излучаемый при этих условиях с площади $5205 \times 10^{-10} \text{ м}^2$.

Сопоставление этой новой единицы со «старым» люменом (определенным через международную свечу) показало, что 1 старый лм = 1,005 нового лм. При таком определении эталона единицы силы света будет

$$1 \text{ св} = 1 \text{ лм/стер}$$

в соответствии с определением (4.3) соответствующей энергетической единицы.

Яркость. Световая единица яркости в системе СИ **н и т** (*нт*) представляет собой яркость поверхности источника, дающего с 1 м^2 площади в направлении нормали силу света в 1 международную свечу.

В соответствии с (4.5)

$$1 \text{ нт} = \frac{1 \text{ св}}{1 \text{ м}^2}.$$

В системе СГС в качестве основной единицы яркости принят **стильб** (*сб*); $1 \text{ сб} = \frac{1 \text{ св}}{1 \text{ см}^2}$ и, следовательно, $1 \text{ сб} = 10^4 \text{ нт}$. Яркость пламени стеариновой свечи составляет примерно 0,5 сб, металлического волоска лампы накаливания — $150 \div 200$ сб, а яркость поверхности Солнца — около 150 000 сб.

В системе СИ основной визуальной единицей является **свеча**. Учитывая приведенные выше соотношения между величинами, формулу (4.12) и схему светового эталона, можно дать окончательное определение этой единицы: **Свеча** — это такая сила света, при которой яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины равна 60 свечам на 1 квадратный сантиметр.

Светность и освещенность. Из (4.8) и (4.10) следует, что светность R и освещенность E имеют одинаковые размерности. Поэтому для их измерения можно применять одинаковые визуальные единицы — люкс или фот. Если на 1 м^2 поверхности падает равномерно распределенный по ней световой поток в 1 люмен, то освещенность поверхности равна 1 люксу (лк):

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}.$$

Другим определением люкса может служить равномерная освещенность сферы радиусом в 1 м ($S=4\pi \text{ м}^2$), в центре которой помещен точечный источник света в 1 международную свечу ($\Phi=4\pi \text{ лм}$). Поэтому люкс называют также метросвечой.

Для различения обозначений по ГОСТ принято измерять освещенность в лк, а светность — в лм/м².

Применяется также единица фот, измеряемый потоком в 1 лм, распределенным равномерно по площади в 1 см²:

$$1 \text{ ф} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ см}^2}.$$

Очевидно, что $1 \text{ лк} = 10^{-4} \text{ ф}$. Для нормальной работы действующими нормами СНИП установлены величины необходимой освещенности рабочих помещений и мест. Так, на столах в учебных помещениях освещенность должна быть не ниже 150 лк, в чертежных — 200 лк, в коридорах — 20—30 лк, на улицах — 2—4 лк.

Кривая видности позволяет установить соотношения между энергетическими и визуальными единицами измерения для каждой данной длины волны света. Так, для длины волны $\lambda=555 \text{ нм}$, соответствующей наибольшей чувствительности глаза, механический эквивалент света равен

$$A_{555} = 0,0015 \text{ вт/лм},$$

а обратная ему величина в и д н о с т и (или световой отдачи)

$$V = \frac{1}{A} = 683 \text{ лм/вт}.$$

Для $\lambda = 510 \text{ нм}$ величина видности в 2 раза меньше, а механический эквивалент света в 2 раза больше:

$$A_{510} = 0,003 \text{ вт/лм}.$$

Приборы, применяемые для фотометрических измерений и служащие для сравнения источников света, называются фотометрами. В визуальных фотометрах учитывается особенность глаза, обусловленная тем, что он позволяет достаточно точно установить равенство освещенностей (точнее — яркостей) двух срав-

ниваемых поверхностей и не может дать количественной оценки соотношения освещенностей, если они различны. Наиболее благоприятное условие для установления равенства освещенностей двух поверхностей будет в том случае, когда эти поверхности соприкасаются и для глаза кажутся лежащими в одной плоскости.

Принципы конструктивного оформления, обеспечивающего выполнение этого условия, могут быть пояснены из анализа так называемого кубика Луммера —

Бродхуна, изображенного на рис. 1.16. Два сравниваемые источника S_1 и S_2 с силой света I_1 и I_2 располагаются по обе стороны непрозрачного экрана E , одинаково рассеивающего (матового) и отражающего (белого) с обеих сторон. Рассеянный экраном свет падает на две вспомогательные белые (иногда зеркальные) поверхности E_1 и E_2 , от которых отражается на кубик. Последний состоит из двух соприкасающихся прямоугольных призм A и B . Грань призмы A , соответствующая гипотенузе, имеет сферическую поверхность, частично сошлифованную на плоскость, соприкасающуюся с плоскостью призмы B . Тщательная шлифовка призм образует в этом месте так называемый оптический

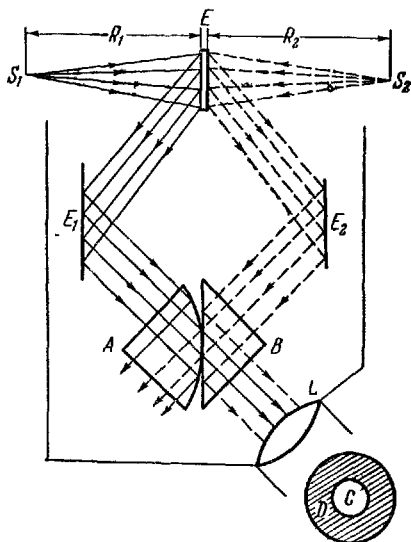


Рис. 1.16.

контакт, т. е. в этом месте призмы A и B представляют собой как бы один сплошной кусок стекла. Свет от поверхности E_1 , падая на призму A в месте оптического контакта, проходит без преломления в другую призму и далее через лупу L попадает в глаз, давая внутреннее поле сравнения в виде круга C . Остальные лучи испытывают полное внутреннее отражение от сферической грани и уходят в сторону.

Часть лучей от поверхности E_2 также проходит через оптический контакт и уходит в сторону. Другая часть лучей на плоскости гипотенузы призмы B испытывает полное внутреннее отражение и направляется через ту же лупу в глаз, давая внешнее поле сравнения в виде кольца D , окружающего внутреннее поле.

Таким образом, освещенности обеих сторон экрана E сравниваются глазом при помощи освещенных полей C и D , соприкасающихся друг с другом и лежащих в одной плоскости. Изменяя

расстояния R_1 и R_2 от источников S_1 и S_2 до экрана E , добиваются исчезновения различия яркости полей сравнения, а, следовательно, равенства освещенностей. Поскольку лучи от источников падают на экран E нормально ($\cos \alpha = 1$), то, согласно (4.11),

$$\frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2}. \quad (4.14)$$

Измеряя расстояния R_1 и R_2 и зная силу света эталонного источника I_1 , можно отсюда определить силу света испытуемого источника I_2 . Вследствие невозможности изменять расстояния R_1 и R_2 в очень широких пределах, в некоторых конструкциях фотометров применяют другие способы ослабления светового потока в известное число раз: сетки, вращающиеся диски с вырезами, светофильтры и пр.

Для измерения освещенности применяются приборы, называемые люксметрами. В настоящее время широкое применение (например, в фотографических экспонометрах) находят люксометры, снабженные фотоэлементами, благодаря чему исключаются субъективные особенности наблюдателя. Особенно широко применяются селеновые фотоэлементы, кривая спектральной чувствительности которых близка к кривой чувствительности глаза. Фотоэлемент соединяется с чувствительным гальванометром, показания которого могут быть непосредственно проградуированы в люксах.

§ 5. Распространение света в неоднородной среде. Полное внутреннее отражение

В однородной среде свет распространяется прямолинейно с постоянной скоростью. Если же среда неоднородна, то в разных областях скорость его распространения $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ различна и прямолинейность световых лучей нарушается.

Простейшей неоднородностью является плоская граница раздела двух безграничных однородных сред, в которых свет распространяется со скоростями, равными соответственно v_1 и v_2 . На рис. 1.17 показано, что луч I , падающий из первой среды под углом i к перпендикуляру, на границе раздела разделяется на отраженный луч II , идущий в первой среде с той же скоростью v_1 , и преломленный луч III , распространяющийся во второй среде под углом r к тому же перпендикуляру. Взаимное геометрическое расположение этих лучей определяется тремя законами Декарта: