

Лекция 25**ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОМЕТРИИ**

Фотометрией называется раздел оптики, изучающий энергетические характеристики светового излучения и его источников с точки зрения воздействия на человеческий глаз.

**§ 14.13. Кривая видности**

Любое действие световой волны на какой-либо объект связано с поглощением и (или) отражением части энергии волны данным объектом. Чем большую энергию переносит волна, тем эффективнее это действие. Энергию светового пучка можно измерить, например, поместив на его пути непрозрачную пластину  $\sigma$  (рис. 1), покрытую веществом, полностью поглощающим падающее излучение (скажем, сажей). По нагреванию пластины можно судить о перехваченной ей за некоторое время  $\Delta t$  энергии  $E^1$ . Если разделить эту энергию на время, то получим *поток лучистой энергии*, переносимой волной через данную площадку  $\sigma$

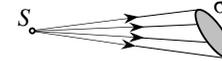


Рис. 1

$$P \equiv \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad (1)$$

Величина эта измеряется в ваттах и представляет собой, очевидно, мощность излучения, проходящего через  $\sigma$ .

Однако при анализе воздействия света на человеческий глаз подобный энергетический подход оказывается совершенно неприемлемым, ибо глаз обладает избирательной чувствительностью к воздействию электромагнитного излучения в зависимости от его частоты (которая глазом идентифицируется как *цвет*). Один и тот же поток лучистой энергии, поступающий в глаз на разных частотах, вызывает неодинаковые зрительные ощущения, а если этот поток лежит за пределами «полосы пропускания» глаза, то вообще им никак не фиксируется.

Отсюда становится понятной необходимость введения специальной, *фотометрической*, шкалы единиц, в основу которой должно быть поло-

<sup>1</sup> Пластины изготавливают из материала с хорошей теплопроводностью и с тыльной стороны снабжают нагревательной спиралью и миниатюрным полупроводниковым термометром. Облучая пластину, дожидаются установившегося режима, когда вся поглощаемая лучистая энергия отдаётся (в виде теплоты) за счёт перепада температур окружающей среде. Далее убирают излучение и по спирали пускают электрический ток, добиваясь такого же перепада температуры, т. е. такой же теплоотдачи. Стало быть, и поступающие теплоты в обоих случаях одинаковы и поглощённая лучистая энергия  $\Delta E = Q_{0,ж} = I^2 R \Delta t$ .

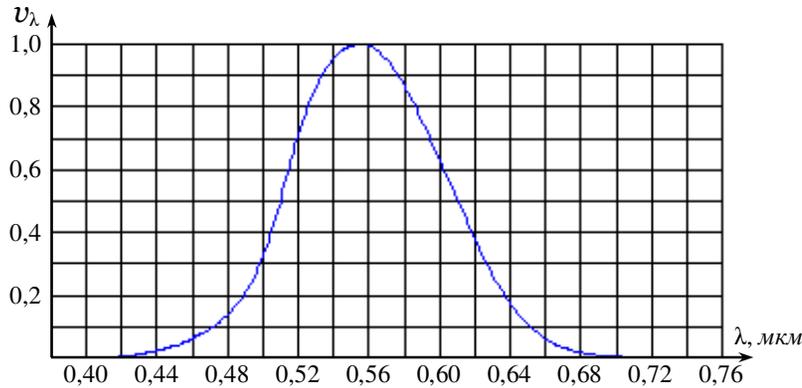


Рис. 2

жено именно зрительное ощущение. Переход от энергетических величин к фотометрическим, или световым, осуществляется с помощью так называемой *кривой видности*, представляющей собой зависимость *относительной чувствительности* человеческого глаза от длины волны падающего излучения (рис. 2).

Под относительной чувствительностью, соответствующей длине волны  $\lambda$ , понимается величина

$$v_\lambda \equiv \frac{P(\lambda_0)}{P(\lambda)}, \quad (2)$$

где  $P(\lambda)$  и  $P(\lambda_0)$  — мощности электромагнитных излучений с длиной волны соответственно  $\lambda$  и  $\lambda_0$ , вызывающие *одинаковые зрительные ощущения*. Длина  $\lambda_0 = 0,555 \text{ мкм}$  (зелёный цвет) соответствует максимальной чувствительности глаза  $v_{\lambda_0} = 1$ . При других длинах  $v_\lambda < 1$  и  $P(\lambda) > P(\lambda_0)$ , т. е. для получения того же ощущения требуется бóльшая мощность.

Кривая, изображённая на рис. 2, табулирована и утверждена Международной осветительной комиссией как кривая видности *нормального глаза*. Она является результатом усреднения многочисленных измерений (кстати, не сильно отличающихся друг от друга), проведённых на различных людях. Какова же методика проведения подобных измерений?

Прежде всего, необходимо создать и утвердить некий *эталонный источник света*, вызывающий у наблюдателя при заданных условиях определённое зрительное ощущение. А далее нужно договориться о правилах сравнения зрительных ощущений, вызванных эталонным и исследуемым источниками. Поскольку человеческий глаз практически не способен произвести *непосредственное сравнение* световых ощущений, полученных от разных источников, это сравнение заменяют заложенной в опреде-

лении (2) процедурой *фиксации равенства* таких ощущений. Однако если установить одинаковость ощущений, вызванных источниками *одной частоты*, довольно просто<sup>1</sup>, то констатировать с достаточной точностью равенство ощущений от воздействия волн *разных длин* (разных цветов) *напрямую* человеческий глаз оказывается не в состоянии. Необходимо привлекать какие-то *сопутствующие эффекты*, позволяющие *ввести критерии равенства* световых ощущений разных цветов<sup>2</sup>.

Простейшим таким эффектом является одинаковая *резкость видимости* деталей предмета. Два участка газетного текста освещаются разноцветными источниками. Количество света, падающего на текст от одного из них, может варьироваться (например, путём изменения расстояния до источника). Оказывается, что глаз *независимо от цвета* довольно уверенно устанавливает одинаковую чёткость восприятия газетного текста (удобство чтения), что может служить *определением* равенства световых ощущений.

Другой особенностью глаза, дающей возможность *приравнять по определению* разноцветные ощущения, может служить его «инерционность»: при рассматривании поля, освещаемого прерывистым светом, если его частота превосходит предельную, глаз перестаёт замечать мигания и воспринимает освещение как непрерывное. С ростом потока падающей лучистой энергии увеличивается и предельная частота миганий. *Совпадение предельных частот мигания* при облучении разноцветными источниками также может рассматриваться как *определение* тождественности световых ощущений.

Существуют и другие явления, которые могут быть положены в осно-

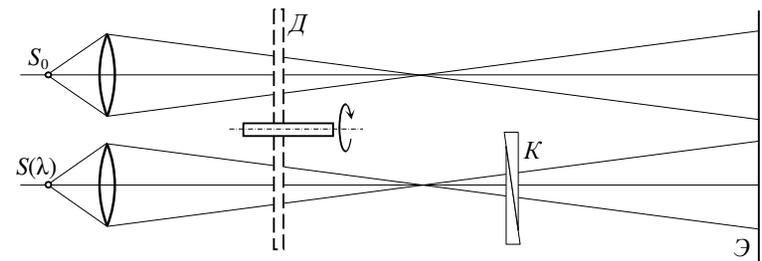


Рис. 3

<sup>1</sup> Два освещённых поля (каждое своим источником), расположенные вплотную друг к другу, соприкасаются вдоль некоторой границы и рассматриваются глазом. Если менять количество падающего света на одно из полей (например, приближая или удаляя соответствующий источник), то в определённый момент граница между полями исчезнет. Это и означает равенство ощущений.

<sup>2</sup> Эти эффекты являются предметом исследования так называемой *гетерохромной* фотометрии.

ву определения равенства ощущений. Все они приводят к результатам, удовлетворительно согласующимся друг с другом.

На рис. 3 представлена принципиальная схема, позволяющая, используя последний критерий, экспериментально, «по точкам», построить кривую  $v_\lambda$ . Эталонный  $S_0$  и исследуемый  $S(\lambda)$  источники освещают прерывистым светом экран  $\mathcal{E}$  (каждый своё поле). Мигание света осуществляется с помощью вращающегося диска  $D$  с прорезями. Увеличивая его угловую скорость, добиваются прекращения мигания эталонного источника. После этого с помощью поглощающего двойного клина  $K$  уменьшают падающую на экран мощность (при условии, что она достаточно велика) от источника  $S(\lambda)$ , пока не исчезнут и его мигания. Далее измеряют при этих условиях (используя пластину, покрытую сажой) поступающий на освещаемый источником  $S(\lambda)$  участок экрана поток лучистой энергии  $P(\lambda)$ .

Повторив этот эксперимент с различными излучателями  $S(\lambda_i)$ , выбирают среди них такой, которому соответствует наименьшая мощность  $P_{min}$ . Очевидно, при этом  $\lambda = \lambda_0$ . Вычисляя отношение  $P_{min}/P(\lambda_i)$ , получают зависимость (2)<sup>1</sup>.

## § 14.14. Фотометрические величины. Основной закон освещённости

**1. Основные фотометрические величины.** Используя критерии равенства световых ощущений разных цветов, нетрудно ввести фотометрическую, или световую, шкалу единиц, предварительно дав определения соответствующим фотометрическим величинам. Мы рассмотрим три такие величины.

*Световым потоком*  $\Phi$  называется поток лучистой энергии, *оцениваемый по зрительному ощущению*. Он измеряется в люменах (лм).

*Освещённостью*  $E$  какой-либо поверхности (точнее, малого её участка) называется отношение (малого) светового потока  $d\Phi$ , падающего на эту поверхность, к величине её площади  $d\sigma$ :

$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma}. \quad (3)$$

Единицей освещённости является люкс (лк);  $1 \text{ лк} = 1 \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ .

*Силой света*  $I$  точечного источника в данном направлении называется отношение (малого) светового потока  $d\Phi$  к (малому) телесному углу  $d\Omega$ , в котором он распространяется:

<sup>1</sup> Важно понимать, что описанная методика измерения  $v_\lambda$  не требует знания частотных и мощностных характеристик эталонного источника. В частности, эталонный источник вовсе не обязан быть монохроматическим, т. е. испускать волны какой-либо одной определённой длины.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (4)$$

Сила света измеряется в *канделах* ( $\text{кд}$ );  $1\text{кд} = 1 \frac{\text{лм}}{\text{ср}}$ <sup>1</sup>.

Последняя величина является основной в фотометрии. Международным соглашением утверждён эталонный источник, *сила света* которого *принимается* за единицу. Источник представляет собой специальный сосуд, изготовленный из тугоплавкого материала, в котором находится трубочка из того же материала, окружённая расплавленной платиной. Сила света, излучаемого при температуре затвердевания платины ( $t \approx 1770^\circ\text{C}$ ) торцом трубочки (площадью  $S = 1/60 \text{ см}^2$ ) в направлении её оси, считается равной 1  $\text{кд}$ .

После введения единицы силы света световой поток и освещённость оказываются производными величинами и определяются согласно выражениям (4) и (3).

Из сказанного ясно, что для экспериментального определения световых характеристик какого-либо источника, не обязательно сравнивать его с эталоном. Можно измерить испускаемый им *поток лучистой энергии*  $P$  (распространяющийся внутри известного телесного угла или проходящий через заданную площадку) и использовать «коэффициент пересчёта», связывающий его «световую мощность» (выраженную в люменах) с «физической» (выраженной в ваттах). Коэффициент этот (благодаря избирательной чувствительности глаза он будет зависеть от частоты излучателя) при  $\lambda = \lambda_0$  называется *световым эквивалентом мощности излучения*<sup>2</sup> и оказывается равным

$$\alpha \approx 680 \text{ лм/Вт}. \quad (5)$$

Тогда, очевидно, световой поток, испускаемый *монохроматическим* источником с длиной волны  $\lambda$ ,

$$\Phi(\lambda) [\text{лм}] = \alpha \left[ \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right] v_\lambda P [\text{Вт}]. \quad (6)$$

Для *немонохроматического* источника, *спектр* (набор длин или частот излучаемых волн) которого известен, световой поток определяется суммированием выражений (6) для всех  $\lambda_i$ :

<sup>1</sup> Поскольку стерадиан — безразмерная величина, люмен и кандела фактически оказываются *одной* единицей. Тем не менее, используются они обе, чтобы по единице измерения можно было судить, идёт ли речь о потоке через какую-либо поверхность, или о потоке в единичном телесном угле.

<sup>2</sup> Он представляет собой, очевидно, число люменов излучения *зелёного цвета*, содержащихся в одном ватте этого излучения.

$$\Phi = \alpha \sum_i v_{\lambda i} P_i . \quad (7)$$

Процедуры, описываемые выражениями (6) и (7) выполняются «автоматически» так называемыми *объективными фотометрами* — вакуумными или полупроводниковыми приборами, реагирующими на *мощность* падающего на них излучения. Откликом в этих приборах служит измеряемый входящим в их состав гальванометром ток, пропорциональный поступающему на вход *потоку лучистой энергии* (коэффициент этой пропорциональности зависит от частоты). Подбором соответствующих материалов, из которых изготовлен чувствительный элемент фотометра, а также различных светофильтров, регулирующих надлежащим образом спектральный состав падающего на этот элемент излучения, удаётся получить частотную характеристику прибора, практически совпадающую с кривой (2). Поэтому ток, измеряемый гальванометром, оказывается пропорциональным *световому потоку* и фотометр может быть проградуирован сразу в каких-нибудь световых единицах, скажем, в *люксах*.

**2. Основной закон освещённости.** Рассмотрим малую площадку  $d\sigma$ , освещаемую точечным источником  $S$ . Пусть площадка эта настолько мала, что её можно считать плоской, а все её точки — находящимися от источника на одном и том же расстоянии  $r$  (рис. 4). Тогда телесный угол, под которым видна эта площадка из точки источника, будет, очевидно, равен

$$d\Omega = \frac{d\sigma_{\perp}}{r^2},$$

где  $d\sigma_{\perp}$  — площадь проекции  $d\sigma$  на плоскость, перпендикулярную к направлению на источник. Освещённость площадки согласно (3) и (4)

$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma} = \frac{I d\Omega}{d\sigma} = \frac{I d\sigma_{\perp}}{r^2 d\sigma} = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (8)$$

ибо  $\frac{d\sigma_{\perp}}{d\sigma} = \cos \alpha$ , где  $\alpha \leq \frac{\pi}{2}$  — угол между нормалью к поверхности  $d\sigma$  и прямой, соединяющей  $d\sigma$  с источником<sup>11</sup>.

Выражение (8) носит название *основного закона освещённости*. Освещённость падает при удалении от источника (как  $1/r^2$ ) и увеличении угла падения лучей. При скользящем падении ( $\alpha \rightarrow \pi/2$ )  $E \rightarrow 0$ .

<sup>11</sup> Поверхность  $d\sigma$  не ориентирована, и всегда можно выбрать нормаль так, чтобы  $\alpha \leq \pi/2$ .

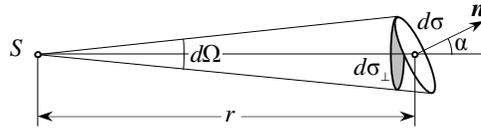


Рис. 4

## **СКОРОСТЬ СВЕТА**