

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 σ (рис. 1), покрытую веществом, полностью поглощающим падающее излучение (скажем, сажей). По нагреванию пластины можно судить о перехваченной ей за некоторое время Δt энергии E^1 . Если разделить эту энергию на время, то получим *поток лучистой энергии*, переносимой волной через данную площадку σ



Рис. 1

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

Величина эта измеряется в ваттах и представляет собой, очевидно, мощность излучения, проходящего через σ .

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-

¹ 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 $\Delta E = Q_{0,ж} = I^2 R \Delta t$.

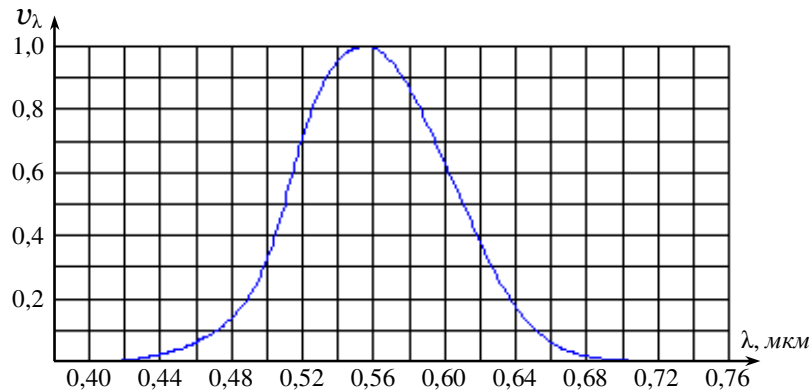


Рис. 2

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 λ , 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 λ и λ_0 , вызывающие *одинаковые зрительные ощущения*. Длина $\lambda_0 = 0,555$ 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 большая 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 просто¹, 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 цветов².

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-

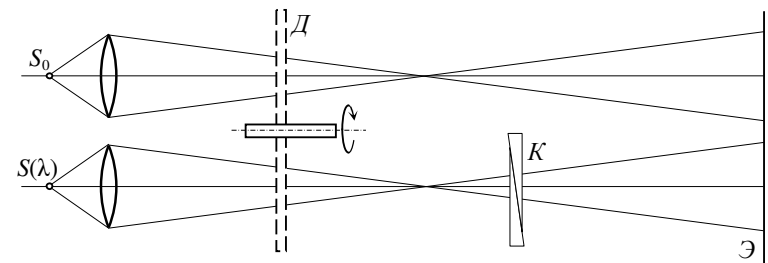


Рис. 3

¹ 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.

² 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_λ . 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)¹.

§ 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 Φ 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:

¹ Важно понимать, что описанная методика измерения v_λ 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* (кд); $1\text{кд} = 1 \frac{\text{лм}}{\text{ср}}$ ¹.

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 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*² и оказывается равным

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

Тогда, очевидно, световой поток, испускаемый *монохроматическим* источником с длиной волны λ ,

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

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

¹ 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.

² 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 источником¹¹.

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 ($\alpha \rightarrow \pi/2$) $E \rightarrow 0$.

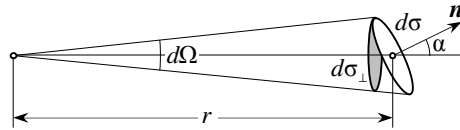


Рис. 4

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

СКОРОСТЬ СВЕТА