

§ 52. Световые величины и их измерения

Основных величин для световых измерений пять.

1. Световой поток F , характеризующий суммарное световое излучение по всем направлениям, оцениваемое по производимому им световому ощущению. Световой поток выражается через распределение энергии в спектре источника и коэффициент видности так:

$$F = \mathcal{E}_{(\lambda)} V_{(\lambda)},$$

где $\mathcal{E}_{(\lambda)}$ — мощность излучения в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ и $V_{(\lambda)}$ — коэффициент видности для лучей с длиной волны λ . Таким образом, световой поток представляет собой суммарную мощность излучения, ослабленную при различных длинах волн пропорционально коэффициенту видности.

Тем самым определение светового потока тесно связано со свойствами глаза как приемника лучистой энергии. Для других избирательных приемников можно вести аналогичные величины, тогда $V_{(\lambda)}$ характеризовало бы чувствительность этих приемников к отдельным длинам волн, а F — суммарное действие излучения на приемник (например, фототок).

Количество света определяется как световой поток, умноженный на время, за которое определяется данное количество света.

2. Сила света I характеризует излучение источника в данном направлении. Сила света определяется как световой поток, приходящийся на единицу телесного угла. Если источник излучает в данном направлении поток F в пределах телесного угла ω , то сила света будет

$$I = \frac{F}{\omega}.$$

3. Яркость B равна силе света с 1 см^2 проекции поверхности MN источника (рис. 193) на плоскость AB , перпендикулярную к лучу зрения.

Если источник с поверхностью, имеющей проекцию $\sigma \text{ см}^2$, излучает силу света I , то яркость будет

$$B = \frac{I}{\sigma}.$$

Особое значение имеют источники, у которых яркость постоянна по всем направлениям, — *ламбертовы излучатели*.

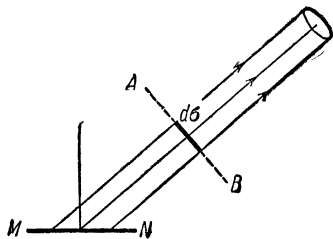


Рис. 193. К определению понятия яркости.

4. Светимость S определяется как световой поток, испускаемый квадратным сантиметром поверхности источника.

Очевидно, если F — поток, излучаемый равномерно светящимся источником, имеющим поверхность σ см², то светимость будет $S = \frac{F}{\sigma}$.

Перечисленные четыре величины характеризуют источник излучения.

5. Для определения плотности светового потока в данном месте пространства служит освещенность E , являющаяся поверхностной плотностью светового потока. Поток F , падающий на поверхность σ , создает на ней освещенность $E = \frac{F}{\sigma}$.

Источник света, имеющий силу света I , создает на поверхности, находящейся на расстоянии r , освещенность

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2},$$

где α — угол между перпендикуляром к поверхности и направлением на источник. Последняя формула справедлива только в том случае, когда размеры источника света малы по сравнению с расстоянием r .

Яркостью источника света или освещенного предмета определяется освещенность, создаваемая хрусталиком на сетчатке или объективом фотоаппарата на пластинке. Зрительное ощущение и почернение фотопластинки зависят, таким образом, только от яркости объектов (и, конечно, от диаметра зрачка или светосилы объектива). Нужно помнить, что фотографическая яркость (*актиничность*) не совпадает с зрительной ввиду разницы кривых спектральной чувствительности. Пока глаз различает размеры светящегося предмета, *видимая яркость такого предмета не зависит от расстояния*. С увеличением расстояния уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния освещенность зрачка глаза, но вместе с тем в этой же пропорции уменьшается и площадь изображения предмета, даваемого хрусталиком на сетчатке глаза. В результате количество света, падающего на единицу поверхности (освещенность сетчатки), остается постоянным. То же справедливо и для фотоаппаратов, начиная с расстояний, при которых уже практически почти не изменяется фокусировка. Почернение не зависит от расстояния до предмета. Наоборот, для предметов, размер которых лежит за пределами разрешающей способности глаза или объектива, видимая яркость или почернение уже возрастают по мере приближения предмета. Объясняется это тем, что размеры изображения в данном случае не зависят от расстояния, следовательно, на одну и ту же площадь попадает все больший и больший световой поток.

Так как действие любой оптической системы, вооружающей глаз, можно свести к изменению расстояния до предметов, то приме-

нение этих систем не может изменить видимую яркость предметов. Только благодаря потерям на отражение и поглощение яркость может несколько уменьшиться. На первый взгляд кажется, что, получив при помощи линзы уменьшенное изображение (рис. 194), мы должны увидеть его более ярким, чем сам предмет. Но при этом забывают, что получение уменьшенного изображения связано с соответствующим увеличением телесного угла ω_1 , в котором заключен световой поток. Поэтому яркость, обратно пропорциональная телесному углу, остается постоянной. Для предметов с размерами, лежащими за пределами разрешающей способности, это несправедливо по причине, указанной выше. Этим и объясняется увеличение видимой яркости звезд при наблюдении их в телескоп. Возрастание яркости равно здесь примерно отношению площади объектива телескопа к площади зрачка глаза и достигает колоссальных величин.

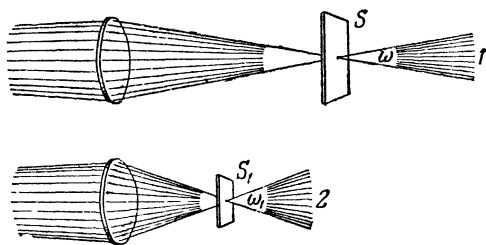


Рис. 194. Телесные углы при увеличенном (1) и уменьшенном (2) изображениях.

Абсолютные измерения энергии излучения связаны с весьма большими трудностями. Вследствие этого и в силу исторических причин практические методы световых измерений исходят из некоторой единицы, принятой за эталон. Тем самым все измерения являются относительными. Так как наиболее удобной для измерения единицей является *сила света*, то эталонированной величиной была выбрана именно она.

В системе единиц СИ принято следующее определение свечи как единицы силы света (ГОСТ 9867—61): свеча—это такая сила света, при которой яркость полного (абсолютно черного) излучателя при температуре затвердевания платины равна 60 свечам на один квадратный сантиметр. Температура затвердевания платины в ГОСТе 9867—61 не указана, но по современным данным примерно равна 1769°C .

Практической единицей светового потока является такой поток, который излучается равномерно светящимся источником, имеющим силу света, равную 1 свече, в телесном угле 1стерадиан ($\frac{1}{4\pi}$ часть сферы). Эта единица названа 1 люменом (лм).

Единица яркости в системе СИ—1 нит (нт)—есть яркость такой светящейся поверхности, каждый квадратный сантиметр проекции которой посылает в данном направлении свет силой в 1 свечу. Старая единица яркости стильб (сб) равна 10^4 нт.

Единица светимости равна светимости площадки, излучающей с каждого квадратного сантиметра поверхности световой поток, равный 1 люмену.

Единицей освещенности является плотность светового потока 1 лм/м^2 , называемая люксом (лк). Один люкс равен освещенности площади в 1 м^2 , когда на нее падает световой поток 1 лм или, что то же, представляющем освещенность нормально расположенной площадки, находящейся на расстоянии 1 м от малого источника с силой света в 1 свече.

Иногда применяют единицу освещенности 1 фот:

$1 \text{ люкс} = 10^{-4} \text{ фот}$ и $1 \text{ миллифот} = 10 \text{ люксам}$.

Световые величины

Наименование	Обозначение	Практическая единица	Размерность
Световой поток . . .	F	люмен (лм)	вт
Сила света	I	международная свеча (св)	вт/стерад
Яркость	B	нит, стильб (нт , сб)	$\text{вт/стерад} \cdot \text{см}^2$
Светимость	S	без названия	вт/см^2
Освещенность	E	люкс, фот (лк , ф)	вт/см^2

Все световые измерения, производимые при помощи обычных *фотометров*, относительны. Если в фотометрическом измерении участвует глаз, то фотометрирование сводится к сравнению яркостей. Обычно на практике сравнивают яркости площадок, сделанных из одного материала и освещенных под одинаковыми углами, вследствие чего равенство яркостей служит признаком равенства освещенностей. Если известна освещенность E в люксах, расстояние источника света r в метрах и угол падения света α , то можно найти силу света $I = \frac{Er^2}{\cos \alpha}$ свечей. Измерив силу света источника по разным направлениям $I_{(\alpha)}$, можно определить величину полного излучаемого им светового потока в люменах:

$$F = \int I_{(\alpha)} d\omega = 2\pi \int I_{(\alpha)} \sin \alpha d\alpha.$$

Таким образом, оказывается возможным находить все световые величины, сравнивая яркости.

Для измерения освещенностей и сил света часто пользуются *фотометрической скамьей* (рис. 195). Между эталонной лампой S_1 и измеряемым источником S_2 на рельсах перемещается двусторон-

ный белый клин — фотометр P . Добиваются такого положения последнего, при котором яркости (а следовательно, и освещенности) обеих сторон клина P равны. Тогда можно написать соотношение $\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$, где I_1 — сила света эталона, I_2 — неизвестная сила света измеряемого источника, а r_1 и r_2 — расстояния от фотометра до S_1 и S_2 . Из написанного соотношения находят $I_2 = I_1 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$. Фотометр

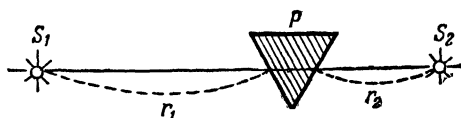


Рис. 195. Фотометрическая скамья.

делают при этом с таким расчетом, чтобы можно было одновременно наблюдать обе стороны пластинки P .

Следует отметить, что формула $E = \frac{I}{r^2}$ справедлива только при расстояниях r , достаточно больших по сравнению с размерами источника света. Когда r больше десятикратных размеров источника, освещенность E , вычисленная по формуле $E = \frac{I}{r^2}$, отличается от истинной меньше чем на 1%.

Весьма часто применяют фотометр с кубиком Люммера — Бродхуна. Кубик этот представляет собой две треугольные гипотенузы и притшлифованные «на оптический контакт» на протяжении лишь части поверхности. На рис. 196 представлен кубик Люммера — Бродхуна с притшлифованной средней частью ab . Как видно из чертежа, глаз, помещенный в O , увидит отражение белой пластинки P_1 только в части кубика Aa и bB , где свет испытывает полное внутреннее отражение. Свет от пластинки P_1 пройдет сквозь центральную часть ab , так как в этом месте осуществлен оптический контакт. В то же время пластинка P_2 будет видна только через центральную часть кубика, так как в этом месте полное внутреннее отражение не будет отклонять лучей света.

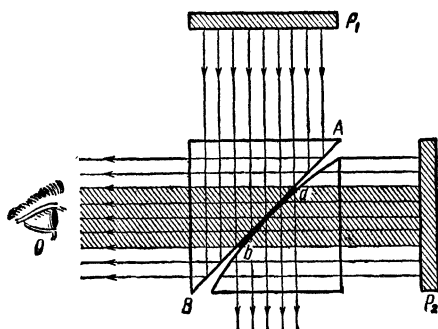


Рис. 196. Кубик Люммера — Бродхуна.

В результате фотометрическое поле будет иметь вид, изображенный на рис. 197. Яркости центрального круга и внешнего кольца поля равны соответственно яркости пластинок P_2 и P_1 . При равенстве яркостей круглая граница между полями исчезает. Часто в кубике

Люммера — Бродхуна пришлифованную часть делают сложной формы, чтобы создать переплетенные поля. Такое поле изображено на рис. 198, где заштрихованы горизонтально части поля, сквозь которые видна пластинка P_1 .

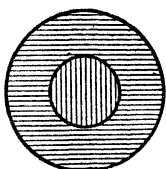


Рис. 197. Фотометрическое поле.

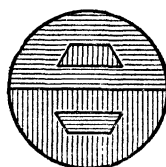


Рис. 198. Переплетенное фотометрическое поле кубика Люммера — Бродхуна.

Схема фотометра с кубиком Люммера — Бродхуна представлена на рис. 199. Молочное стекло P_2 освещают измеряемым источником света. Другое стекло P_1 освещается небольшой эталонной лампой L . Стекло P_1 может быть установлено на любом расстоянии от лампы L , измеряемом при помощи шкалы S . Фотометрическое поле кубика C наблюдают через окуляр O .

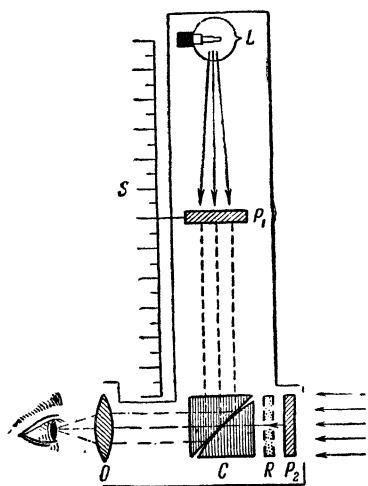


Рис. 199. Тубус-фотометр.

Для увеличения диапазона измеряемых освещенностей после молочного стекла P_2 можно вставлять одно или несколько темных стекол R , ослабляющих яркость в известное число раз. Для установки фотометрических полей на равенство яркостей вместо перемещения стекла P_1 часто пользуются фотометрическими клиньями, прозрачность которых плавно меняется от одного конца к другому, или поляризационными приборами, когда ослабление полей достигается поворотом призмы Николя.

Непосредственное измерение светового потока производят в шаровом фотометре (рис. 200). Измеряемый источник света L помещают внутрь выбеленного шара S , в котором сделано отверстие, закрытое рассеивающим стеклом M . Внутри шара помещают экран E , не дающий попадать прямым лучам лампы L на стекло M . Освещенность последнего измеряют фотометром Φ .

Эта освещенность будет, очевидно, пропорциональна световому потоку источника света. При помощи шара можно определить

отношение светового потока исследуемого источника к световому потоку эталона.

С. И. Вавилов использовал наличие у глаза порога чувствительности и разработал метод абсолютного фотометрирования без эталонного источника света — *метод гашения*, при котором свет от исследуемого источника гасится поглощающим клином до исчезновения. Видимое исчезновение источника света соответствует, очевидно, порогу чувствительности глаза. Зная пропускание клина, можно определить абсолютную яркость источника. Методом гашения были проведены все первые количественные исследования эффекта Вавилова — Черенкова. Этот метод удобен при исследовании очень слабых источников света, но требует принятия мер предосторожности.

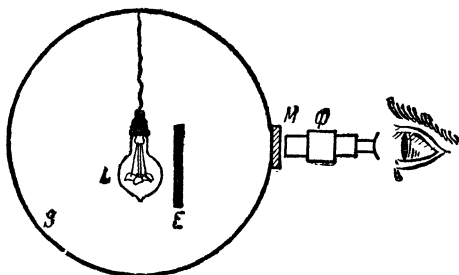


Рис. 200. Светомерный шар.

Для фотометрических измерений успешно применяют фотоэлементы. Последние для применения в фотометрии должны иметь спектральную чувствительность, одинаковую с глазом, что достигается применением специальных светофильтров. Существуют фотометры, состоящие только из меднозакисного фотоэлемента (купроксид) и микроамперметра, шкала которого проградуирована на люксы (рис. 201). Построены автоматизированные шары с фотоэлементами для контроля ламп накаливания. Лампы подаются конвейером, и фотоэлемент, соединенный с автоматом, выбирает из них дающие слишком маленький световой поток.

Следует отметить, что построение фотоэлектрической установки с чувствительностью, близкой к порогу чувствительности человеческого глаза, и сейчас представляют довольно трудную задачу. В коротковолновой части спектра применение счетчиков фотонов (§ 108) дает возможность значительно превзойти чувствительность глаза.

Как указывалось выше, условно считается, что вся мощность излучения при длине волны $\lambda=0,556 \text{ мк}$ воспринимается глазом в виде света. Для остальных длин волн приняты определенные коэффициенты видности (рис. 191) нормального, «среднего» глаза. Существование эталона позволяет установить соотношение между практической единицей светового потока и мощностью излучения. Именно *каждый ватт мощности радиации при $\lambda=0,556 \text{ мк}$ воспринимается как световой поток 620 лм*. Последняя величина носит название светового эквивалента мощности излучения. Для остальных длин волн этот эквивалент получится умножением 620 лм/вт на соответствующий коэффициент видности. Так, для $\lambda=0,500 \text{ мк}$ он получается равным $620 \cdot 0,323=200 \text{ лм/вт}$.

Как мы видели, максимальным световым действием обладает излучение при длине волны $\lambda=0,556 \text{ мк}$. Если бы излучение какого-либо источника было целиком сосредоточено в этом участке спектра, мы считали бы коэффициент полезного действия этого излучения равным единице. При этом световая отдача излучения, т. е. число люменов светового потока на каждый ватт излучаемой мощности, имела бы максимальное значение, равное 620 лм/вт . Для вся-

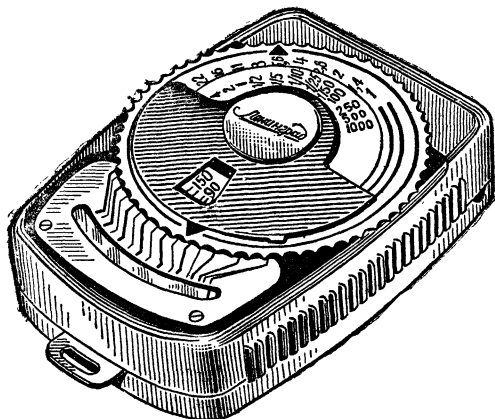


Рис. 201. Фотоэлектрический экспонометр.

кой другой волны к. п. д. излучения равен коэффициенту видности $V_{(\lambda)}$. В случае радиации, распределенной по всему спектру, к. п. д. излучения равен:

$$\eta = \frac{\sum \mathcal{E}_{(\lambda)} V_{(\lambda)}}{\sum \mathcal{E}_{(\lambda)}},$$

где $\mathcal{E}_{(\lambda)}$ и $V_{(\lambda)}$ имеют прежние значения.

При этом световая отдача излучения равна $620\eta \text{ лм/вт}$.

Световую отдачу излучения не следует смешивать со световой отдачей источника, равной числу люменов светового потока, получающегося на каждый ватт мощности, затраченной для получения излучения. Благодаря тому что во всех практических источниках света происходят потери энергии, вторая величина всегда меньше первой, так как не вся подводимая энергия превращается в излучение.

Световым к. п. д. источника света называют отношение его светотдачи к максимальной величине 620 лм/вт . Ясно, что световой к. п. д. обычно не равен энергетическому к. п. д. источника света, но растет с увеличением энергетического к. п. д.

§ 53. Температурные излучатели как источники света

На границу земной атмосферы падает в 1 мин около 2 кал на квадратный сантиметр лучистой энергии, испускаемой Солнцем. До поверхности Земли доходит заметно меньшее количество энергии: вследствие поглощения в атмосфере теряется около 25%.

На рис. 202 изображено распределение энергии в спектре Солнца на границе атмосферы и на поверхности Земли. Свойства человеческого глаза в результате естественного отбора в известной степени согласованы с этим распределением энергии. Человеческий