

## Работа 4-10

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ СВЕТА, СВЕТОВОЙ ОТДАЧИ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА МОЩНОСТИ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

**Цель работы:** Изучение законов фотометрии, визуального способа определения силы света лампы накаливания по эталонному источнику, а также световой отдачи и удельного расхода мощности.

**Оборудование:** Оптическая скамья, лампа с известной силой света, фотометрический кубик Луммера-Бродхуна, изучаемая лампа накаливания, вольтметр, амперметр, реостат.

### Теория

Свет, или иначе видимое оптическое излучение, представляет собой электромагнитные волны с длинами волн от 380 нм до 760 нм, несущие определенное количество энергии. Эта электромагнитная энергия может быть измерена с помощью приборов. Раздел оптики, изучающий измерения интенсивности света и его источников, называется *фотометрией*. В оптике принято различать *две системы единиц: энергетическую и визуальную*. В энергетической системе определяется общее количество энергии электромагнитного излучения, приходящееся на все длины волн, включая инфракрасные и ультрафиолетовые, т.е. те, которые не различаются человеческим глазом. В этой системе фотометрические единицы измеряются в Дж, Вт, Вт/м<sup>2</sup> и т.д.

В большинстве оптических измерений приемники излучений: глаз человека, фотоэлемент, фотоэмульсия и т.д. обладают различной чувствительностью к лучистой энергии различных длин волн и являются избирательными приемниками света. Указанные особенности зрительного восприятия приводят к тому, что субъективная оценка интенсивности света отличается от объективной энергетической оценки.

Поэтому для характеристики фотометрических величин наряду с энергетическими единицами введены специальные визуальные единицы измерений, пригодные лишь для видимого света.

Основными фотометрическими понятиями в этой системе являются следующие:

1. **Поток лучистой энергии  $\Phi$  (световой поток)**. Это понятие является основным, определяющим количество световой энергии, падающей на площадку площадью  $S$  за единицу времени. Из определения

$$d\Phi = \frac{dQ}{t}. \quad (1)$$

Здесь  $dQ$  - количество энергии,  $t$  - время.

Полный поток лучистой энергии, идущий от источника по всем направлениям, равен:

$$\Phi = \int_{\Omega} d\Phi. \quad (2)$$

Интегрирование ведется по телесному углу  $\Omega$ .

Единицей потока лучистой энергии является 1 люмен (лм), определение которого будет дано несколько позже.

2. **Сила света  $I$** . Силой света называется физическая величина, измеряемая световым потоком, приходящимся на единицу телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (3)$$

В общем случае величина силы света зависит от направления излучения. При этом источники называются анизотропными. Если же сила света по всем направлениям одинакова, источник света называется изотропным. Для таких источников сила света равна:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  - полный световой поток, излучаемый источником по всем направлениям, а  $4\pi$  - полный телесный угол.

*Единицей силы света является 1 кандела (кд)*. В системе СИ это основная световая единица, через которую определяются все остальные световые единицы.

В соответствии с международной договоренностью, за *1 канделу* принимается сила света, испускаемая с площади  $1/600000 \text{ м}^2$  специального платинового излучателя (абсолютно черное тело) в направлении нормали к излучающей поверхности при температуре затвердевания платины ( $2042 \text{ К}$ ) и нормальном атмосферном давлении.

С введением единицы силы света, единица светового потока *1 люмен* на основании ф. (3) определится как световой поток, который излучается точечным источником света в 1 канделу внутри телесного угла в 1 стерадиан

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср.}$$

**3. Освещенность E.** Освещенностью называется физическая величина, измеряемая световым потоком, приходящимся на единицу площади освещаемой поверхности, т.е.

$$E = \frac{d\Phi}{ds}. \quad (5)$$

Пользуясь ф. (3), для освещенности находим выражение

$$E = \frac{Id\Omega}{ds}, \quad (6)$$

а так как элемент телесного угла  $d\Omega = \frac{ds \cos i}{R^2}$ , то

$$E = \frac{I \cos i}{R^2}, \quad (7)$$

где  $i$  - угол падения, а  $R$  - расстояние от источника до освещаемой поверхности.

Последняя формула получила название *закона обратных квадратов*.

Единицей освещенности является *1 люкс (лк)*. Из ф. (5) 1 люкс - есть освещенность, создаваемая световым потоком в 1 люмен, равномерно распределенным на площади в  $1 \text{ м}^2$ .

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

4. **Яркость источника В.** Если размерами источника пренебречь нельзя, то пользуются понятием поверхностной яркости источника или просто яркостью. Яркостью источника в данном направлении называется физическая величина, измеряемая световым потоком, посылаемым в данном направлении единицей видимой поверхности  $s \cdot \cos i$  внутрь единичного телесного угла. Из определения

$$B_i = \frac{d\Phi}{s \cos i d\Omega} = \frac{I}{s \cos i}. \quad (8)$$

Единицей яркости, не имеющей специального названия, является величина  $\frac{1 \text{кд}}{1 \text{м}^2}$ , или  $\frac{1 \text{лм}}{1 \text{м}^2 \text{ср}}$ .

5. **Светимость S.** Эта величина представляет собой суммарный поток, посылаемый единицей площади светящейся поверхности наружу по всем направлениям, т.е. внутрь телесного угла  $2\pi$ . Таким образом,

$$S = \frac{\Phi}{s}, \quad (9)$$

где  $\Phi$  – полный световой поток, посылаемый светящейся площадью  $s$  во всех направлениях.

Светимость также как и освещенность, в соответствии с формулой (9) имеет единицу измерения  $1 \frac{\text{лм}}{1 \text{м}^2} = 1 \text{люкс}$ . Следует не путать того, что понятие освещенности относится к поверхности, освещаемой внешним источником, а понятие светимости характеризует поверхность, излучающую свет.

Среди современных источников широкое применение получили электрические лампы накаливания. Техническими величинами, характеризующими эти источники, являются: сила света, световая отдача и удельный расход электрической мощности.

Один из методов измерения силы света источников основан на сравнении освещенности двух соприкасающихся световых полей, создаваемой двумя различными источниками, для одного из которых сила света известна, а для второго требуется определить эту величину.

Приборы, позволяющие одновременно наблюдать освещенности, создаваемые сравниваемыми источниками, называются фотометрами. Сравнимые источники располагают на оптической скамье, и между ними устанавливается фотометр. Пусть *эталонный источник с силой света*  $I$  (21 кд) создает на наблюдаемой половине поля экрана фотометра освещенность

$$E_1 = \frac{I}{r_1^2} \cos i,$$

где  $r_1$  - расстояние от эталонной лампы до экрана, а измеряемый источник на другой половине экрана создает освещенность

$$E_2 = \frac{I_x \cos i}{r_2^2},$$

где  $r_2$  - расстояние от второй лампы до экрана. При этом  $\cos i = 1$  вследствие нормального падения лучей на экран, что предусматривается конструкцией фотометра. Меняя расстояние  $r_1$  и  $r_2$  передвижением фотометра или одной из ламп, добиваются равенства освещенностей обеих половин экрана  $E_1 = E_2$ . В этом случае

$$\frac{I}{r_1^2} = \frac{I_x}{r_2^2} \quad \text{и} \quad I_x = I \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (10)$$

$\Phi$ . (10) и пользуются для определения силы света неизвестного источника света.

*Световой отдачей лампы накаливания называют отношение излучаемого источником светового потока к потребляемой лампой мощности электрической энергии, т.е.*

$$Z = \frac{\Phi}{W} \left( \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \right). \quad (11)$$

*Удельным расходом мощности называется физическая величина, измеряемая количеством электрической энергии, затрачиваемой в единицу времени (мощность), для получения силы света, равной единице, т.е. 1 кд:*

$$\eta = \frac{W}{I} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кд}} \right). \quad (12)$$

Световая отдача и удельный расход мощности являются показателями экономичности источников света.

## Описание установки

Схема установки приведена на рис.1. На концах оптической скамьи установлены два фонаря с лампами накаливания. Слева эталонная лампа(1) с известной силой света, справа изучаемая лампа(2). Между лампами располагается фотометр Луммера-Бродхуна (3), который можно свободно перемещать по оптической скамье вдоль измерительной шкалы (4).

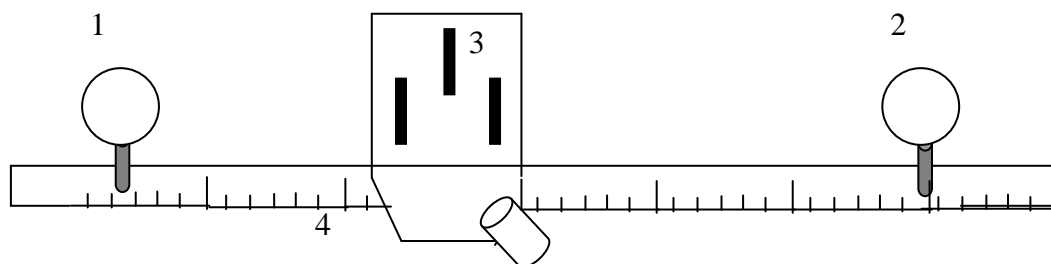


Рис. 1.

Оптическая схема фотометра показана на рис.2. Через 2 окна фотометра, обращенных к 2 источникам  $L_1$  и  $L_2$ , свет попадает на меловую пластинку  $S$ , у которой обе стороны имеют одинаковые коэффициенты рассеяния. Рассеянный свет падает на два симметрично расположенных зеркала  $S_1$  и  $S_2$  и, отражаясь от них, на грани фотометрического кубика  $P_1P_2$ . Фотометрический кубик состоит из двух прямоугольных стеклянных призм, которые склеиваются по диагональным граням. Диагональная грань одной из призм сошлифовывается таким образом, чтобы в месте склеивания получился оптический контакт. Лучи света,

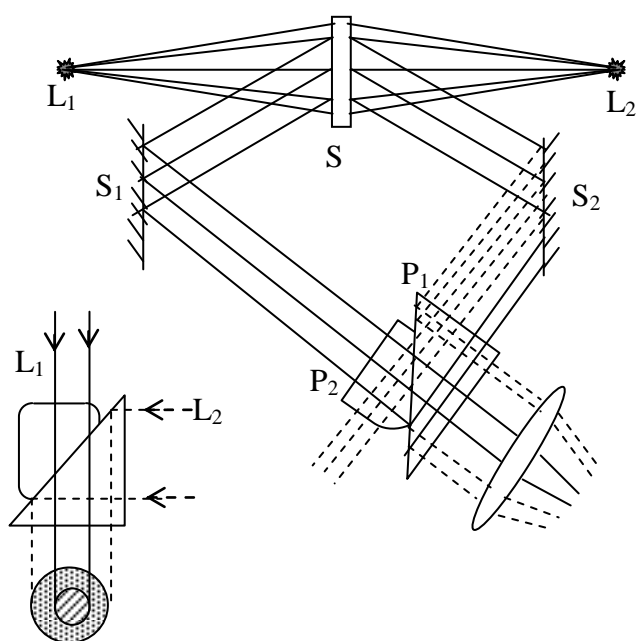


Рис. 2.

отраженные от левого зеркала, проходят в зрительную трубу через центр кубика, а лучи, отраженные от правого зеркала, вследствие полного внутреннего отражения, отражаются на периферийных частях правой призмы и также попадают в зрительную трубу. При неодинаковом

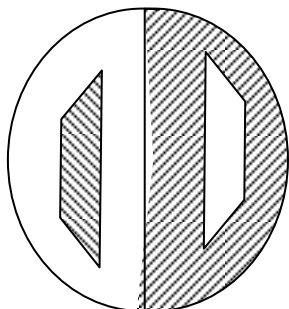


Рис. 3.

освещении граней меловой пластинки в поле зрения будет наблюдаться картина в виде круга и кругового кольца различной освещенности, как это показано в левой части рис.2. Если же в месте соединения призм  $P_1$  и  $P_2$  придать определенную форму соприкасающимся поверхностям, то в поле зрения будет наблюдаться сложная фигура, как это показано на рис. 3. Передвигая фотометр по оптической скамье, добиваются одинаковой освещенности меловой пластинки. При этом в поле зрения вместо изображения, показанного на рис.3, обе половины поля будут освещены одинаково, и рисунок исчезнет. В этом случае, измеряя расстояния от источников до фотометра и пользуясь ф. (10), находят силу света изучаемой лампы.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить описание работы и сдать теоретический материал преподавателю.
2. С разрешения преподавателя или инженера включить лампы тремя тумблерами источника питания, установленного в левой части установки.
3. Передвигая ползунок реостата, установленного в правой части установки добиться максимального свечения изучаемой лампы.
4. Определить падение напряжения и силу тока в исследуемой лампе, рассчитать мощность. Данные записать в таблицу 1. Передвигая фотометр по оптической скамье, установить равенство освещенностей.
5. Измерить расстояния  $r_1$  и  $r_2$ , записать эти значения в таблицу 2 и рассчитать по ф. (10) силу света изучаемой лампы.
6. Изменить положение фотометра и снова его передвижением установить равенство освещенностей. Повторить эту процедуру 5 раз. Данные записать в таблицу 2. Определить среднее значение силы света и это значение записать в таблицу 1.
7. Передвигая ползунок реостата, добиться минимального свечения лампы.
8. Для этого случая повторить пункты 4,5,6,7.

9. Пользуясь реостатом, установить среднее положение между  $\max$  и  $\min$  свечения лампы.

10. Повторить пункты 4,5,6,7.

11. Пользуясь средними значениями силы света изучаемой лампы и пользуясь ф. (4), (11) и (12), определить световой поток  $\Phi$ , световую отдачу  $Z$  и удельный расход мощности  $\eta$ . Полученные значения занести в таблицу 1.

12. Построить графики зависимости силы света  $I_{\text{ср}}$ , световой отдачи  $Z$  и удельного расхода  $\eta$  от мощности  $W$ , потребляемой лампой.

Таблица 1

N, п/п	U,В	I,А	W,Вт	$I_{\text{х,сред}}$ , кд	$\Phi$ , лм	$Z$ ,лм/Вт	$\eta$ ,Вт/кд
1.							
2.							
3.							

Таблица 2

NN, п/п	$r_1$ , м	$r_1^2$ , м <sup>2</sup>	$r_2$ , м	$r_2^2$ , м <sup>2</sup>	$I_{\text{х}}$ , кд
1					
2					
3					
4					
5					
1					
2					
3					
4					
5					



## Определение ошибок измерений

Ошибка в измерении силы света вычисляется как косвенное определение из ф. (10):

$$\Delta I' = \left| \frac{\partial I_x}{\partial r_1} \right| \Delta r_1 + \left| \frac{\partial I_x}{\partial r_2} \right| \Delta r_2 = I \left( \frac{2r_2^2}{r_1^3} \Delta r_1 + \frac{2r_2}{r_1^2} \Delta r_2 \right) \quad (13)$$

Учитывая, что измерения  $r_1$  и  $r_2$  проводятся на одной и той же линейке с одинаковой точностью, последнюю формулу можно переписать так:

$$\Delta I'_x = \frac{2Ir_2\Delta r}{r_1^2} \left( \frac{r_2}{r_1} + 1 \right) \quad (14)$$

Определение ошибки  $\Delta I'_x$  проводится для любого одиночного измерения, а истинная величина ошибки  $\Delta I_x$  определяется с учетом коэффициентов Стьюдента, т.е.  $\Delta I_x = \Delta I'_x \cdot t_{ct}$ . При доверительной вероятности 0,95 и пяти измерениях величины  $I_x$ , коэффициент Стьюдента равен  $t_{ct} = 2,57$ , поэтому

$$\Delta I_x = 2,57 \Delta I'_x.$$

Относительная ошибка находится из общего выражения

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I_x}{I_x} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Результаты заносятся в таблицу 3.

Ошибка световой отдачи находится из ф. (11) с учетом того, что  $\Phi = 4\pi I$ , (ф. 4), т.е. из выражения:

$$Z = \frac{4\pi I}{W}. \quad (16)$$

Так как это тоже косвенные измерения, то

$$\Delta Z = 4\pi \left( \frac{\Delta I_x}{W} + \frac{I_x \Delta W}{W^2} \right), \quad (17)$$

$\Delta W$  - определяется из выражения  $\Delta W = i\Delta U + U\Delta i$ , где  $\Delta U$  и  $\Delta i$  находятся из класса точности используемых приборов вольтметра и амперметра. Определение ошибки проводится для тех же измерений, по которым определялась ошибка  $\Delta I_x$ . Относительная ошибка

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z} \cdot 100\% . \quad (18)$$

Результаты заносятся в ту же таблицу 3.

Наконец, ошибка удельного расхода мощности вычисляется из ф. (12):

$$\Delta\eta = \frac{w}{I_x^2} \Delta I_x + \frac{1}{I_x} \Delta w , \quad (19)$$

по тем же измерениям, по которым определялась ошибка  $\Delta I_x$ . Относительная ошибка

$$\varepsilon_\eta = \frac{\Delta\eta}{\eta} \cdot 100\% . \quad (20)$$

Результаты заносятся в таблицу 3.

Таблица 3

$\Delta I_x$	$\varepsilon_I$	$\Delta Z$	$\varepsilon_z$	$\Delta\eta$	$\varepsilon_\eta$

### Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика.– М.: Наука, 1976.
2. Уродов В.И, Стрижнев В.С. Практикум по физике.– Минск: Высшая школа, 1973.