

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ФОТОМЕТРИИ

Методические указания
к лабораторной работе
для студентов строительных специальностей

М и н с к 2 0 0 4

В методических указаниях рассматриваются основные понятия фотометрии. Излагается способ проверки двух законов освещенности.

Составители:

А.А.Баранов, П.Г.Кужир, И.А.Климович,
В.В.Павлюченко, В.А.Самойлюкович

Рецензенты:

В.И.Кудин, И.А.Сатиков

© Баранов А.А., Кужир П.Г.,
Климович И.А. и др.,
составление, 2004

Цель работы: изучить и проверить первый и второй законы освещенности в фотометрии.

ФОТОМЕТРИЯ

Электромагнитное излучение – электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве.

Оптическое излучение – электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне

$$5 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-3} \text{ м.}$$

Видимое излучение или свет – излучение с длинами волн 400...760 нм.

Фотометрией называют раздел оптики, занимающейся измерением энергии, переносимой электромагнитными волнами оптического диапазона спектра.

Для прикладной светотехники существенна не только объективная энергетическая характеристика света, но и мера воздействия света на глаз наблюдателя. Так, например, тело, нагретое до 400°С, является довольно интенсивным источником инфракрасных лучей, но эти лучи невидимы, т.е. зрительно не воспринимаются. Поэтому в фотометрии приходится вводить двойные единицы измерения: энергетические, оцениваемые объективно, и визуальные, оцениваемые по воздействию на глаз.

1. Энергетические характеристики

1.1. Поток излучения

Всякая электромагнитная волна, в том числе и световая, при распространении переносит определенную энергию. Пусть через площадку ΔS за время Δt световыми волнами перенесена энергия ΔW .

Физическая величина Φ_3 , численно равная отношению этой энергии ко времени Δt , называется потоком излучения:

$$\Phi_3 = \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

Если поток стационарный, т.е. не изменяется с течением времени, то поток излучения Φ_3 через площадку ΔS численно равен энергии переносимой световыми волнами через данную площадку в единицу времени.

Единица измерения потока излучения – Вт.

$$[\Phi_3] = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} = 1 \text{ Вт}.$$

Световая энергия переносится волнами различных длин, заключенными в определенном интервале спектра. Распределение энергии по длинам волн неоднородно и может быть охарактеризовано функцией распределения $\varphi(\lambda)$:

$$\varphi(\lambda) = \frac{d\Phi_3(\lambda)}{d\lambda},$$

где $d\Phi_3(\lambda)$ – поток энергии, переносимой волнами с длинами в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$.

Полный поток излучения Φ_3 , переносимый волнами, заключенными в конечном интервале от λ_1 до λ_2 , определяется путем интегрирования функции $\varphi(\lambda)$:

$$\Phi_3(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda.$$

Из закона сохранения энергии следует, что полный поток излучения, испускаемый источником, нельзя увеличить никакими оптическими системами. Действия таких систем сводятся лишь к перераспределению этого потока, т.е. к увеличению его в одном направлении за счет уменьшения в других направлениях. Так, например, с помощью параболических зеркал в проекторах поток излучения в одном направлении увеличивается в тысячи раз, за счет других направлений. С целью перераспределения излучения в осветительных приборах применяют абажуры ламп и другие приспособления.

1.2. Сила излучения

Понятие силы излучения как физической величины наиболее доступно воспринимается на примере точечного источника света.

Точечным называется источник, размеры которого значительно меньше расстояния от источника до точки наблюдения, т.е. приемника света.

В однородной и изотропной среде волна, излучаемая точечным источником, будет сферической.

Сила излучения – это физическая величина, численно равная потоку излучения точечного источника, приходящегося на единицу телесного угла.

Единица измерения телесного угла – стерадиан – одна из двух дополнительных единиц в СИ.

Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равновеликой радиусу сферы.

Полный телесный угол, охватывающий все пространство вокруг точечного источника света, равен 4π , ибо площадь поверхности сферы радиуса r равна $4\pi r^2$. Если сила излучения I ,

не зависит от направления излучения, то такой источник излучения называется изотропным.

Для точечного изотропного источника сила излучения численно равна полному потоку Φ_3 источника, деленному на 4π :

$$I_3 = \frac{\Phi_3}{4\pi} \quad (1)$$

Если сила света зависит от направления излучения – источник не изотропный. В случае не изотропного источника (1) определяют среднее значение силы света источника.

Для определения силы излучения света не изотропного источника в заданном направлении необходимо выделить достаточно малый телесный угол $d\Omega$ и измерить поток $d\Phi_3$, приходящийся на этот телесный угол (рис. 1).

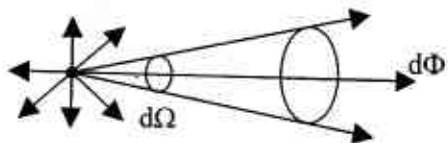


Рис. 1

Сила излучения в заданном направлении будет численно равна отношению $d\Phi_3$ к $d\Omega$ (рис. 2):

$$I_3(\varphi) = \frac{d\Phi_3}{d\Omega} \quad (2)$$

Сила излучения I_3 измеряется в $\text{Вт}\cdot\text{ср}^{-1}$.

$$[I_3] = 1 \text{ Вт} / 1 \text{ ср} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{ср}^{-1}$$

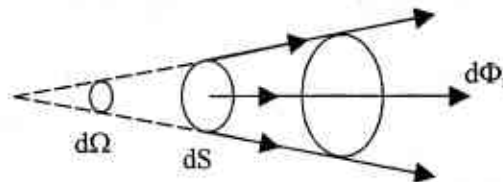


Рис. 2

Если источник протяженный, то можно говорить о силе излучения элемента его поверхности dS . Тогда в (2) под $d\Phi_3$ следует понимать световой поток, излучаемый элементом поверхности dS в пределах телесного угла $d\Omega$.

1.3. Энергетическая светимость

Протяженный источник света можно охарактеризовать светимостью R_3 различных участков его поверхности.

Энергетическая светимость – физическая величина, численно равная отношению потока излучения, испускаемого площадкой поверхности dS по всем направлениям в пределах телесного угла 2π (полусфера), к величине этой площадки:

$$R_3 = \frac{d\Phi_3^{\text{исп}}}{dS} \quad (3)$$

Единица измерения светимости – $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$.

$$R_3 = 1 \text{ Вт} / 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$$

Светиться поверхность может также за счет отраженного ею света. Тогда в (3) потоком излучения следует понимать поток $\Phi_3^{\text{отр}}$, отраженный элементом поверхности.

1.4. Энергетическая яркость

Если светимость R , характеризует излучение или отражение света элементом поверхности dS по всем направлениям, то яркость служит для характеристики излучения (отражения) в заданном направлении.

Энергетической яркостью $B_s(\varphi)$ называется поверхностная плотность силы излучения в заданном направлении. Яркость численно равна отношению излучения $I_s(\varphi)$ элемента поверхности dS в заданном направлении к проекции dS_{\perp} этого элемента поверхности на плоскость, перпендикулярную к заданному направлению:

$$B_s(\varphi) = \frac{I_s(\varphi)}{dS \cos \varphi}.$$

Сила излучения в заданном направлении

$$I_s(\varphi) = \frac{d\Phi_s(\varphi)}{d\Omega}.$$

Следовательно, яркость

$$B_s(\varphi) = \frac{d\Phi_s(\varphi)}{d\Omega dS \cos \varphi},$$

где $d\Omega$ – достаточно малый телесный угол вокруг заданного направления;

φ – угол между нормалью к элементу поверхности dS и заданным направлением;

$dS_{\perp} = dS \cos \alpha$ – проекция площадки dS на плоскость, перпендикулярную заданному направлению, называемая **видимой поверхностью**.

Единица яркости – $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$.

$$B_s(\varphi) = 1 \text{ Вт} / 1 \text{ м}^2 \text{ ср} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Как и светимость, яркость может быть использована для характеристики отражающей поверхности при освещении ее светом.

В общем случае яркость различна для разных направлений. Однако существуют источники, яркость которых не зависит от направления:

$$B_{\varphi} = B = \text{const}.$$

Такие источники называются источниками, подчиняющимися закону Ламберта. Строго ламбертовскими источниками являются абсолютно черное тело и поверхности или среды, равномерно рассеивающие свет по всем направлениям (идеальные рассеиватели). Освещенная поверхность, покрытая окисью магния, или колпак из хорошего молочного стекла, освещенный изнутри, – пример источников достаточно близких к ламбертовским.

1.5. Энергетическая освещенность

Понятие освещенности E относится уже не к источнику света, а характеризует энергию излучения, падающего на поверхность.

Энергетическая освещенность E_s – физическая величина, численно равная отношению потока световой энергии $d\Phi_s^{\text{пад}}$, падающего на площадку dS , к величине этой площадки:

$$E_s = \frac{d\Phi_s^{\text{пад}}}{dS}.$$

Измеряется в $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$.

В случае точечного изотропного источника света легко установить связь между освещенностью E_3 и силой излучения.

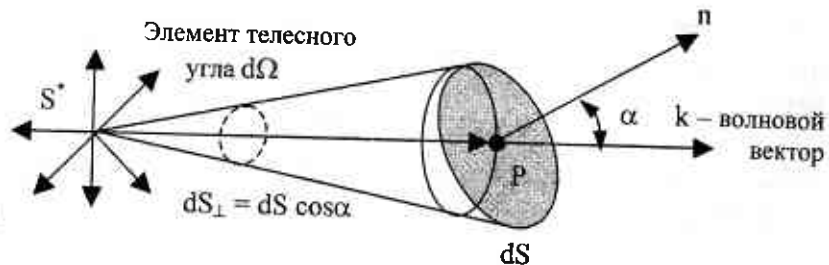


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что телесный угол

$$d\Omega = \frac{dS_{\perp}}{r^2} = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}.$$

Следовательно, падающий поток

$$d\Phi_3^{пад} = I_3 d\Omega = I_3 \frac{dS \cos \alpha}{r^2}.$$

И для освещенности получим следующее соотношение:

$$E_3 = \frac{I \cos \alpha}{r^2}, \quad (4)$$

где I – сила света точечного источника;

r – расстояние от источника до площадки;

α – угол между направлением лучей и нормалью к площадке.

Формула (4) выражает два закона освещенности:

1. Освещенность площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного источника.

2. Освещенность площадки прямо пропорциональна косинусу угла α между направлением лучистого потока и нормалью площадки (α – угол падения).

Рассмотренные фотометрические величины $\Phi_3, I_3, R_3, B_3(\varphi), E_3$ – дают объективные характеристики источников света и световой энергии. Они могут быть измерены специальными приборами, регистрирующими энергию всех длин волн, передаваемую им распространяющейся волной. Таким неселективным приемником, например, является болометр – тепловой неселективный приемник оптического излучения, основанный на измерении электрического сопротивления, термочувствительного сопротивления при его нагревании вследствие поглощения измеряемого потока излучения.

2. Световые характеристики источников света и их излучения

Для прикладной светотехники и в повседневном восприятии света исключительная роль принадлежит человеческому глазу в качестве приемника световых волн в диапазоне $\Delta\lambda = 400 \dots 760$ нм. Реакция глаза на свет зависит не только от мощности светового потока, но и от спектрального состава света.

Чувствительность глаза к свету различной длины волны можно охарактеризовать **кривой видности** (рис. 4), которая определяет относительную спектральную чувствительность глаза. Численные значения ординат этой кривой приведены в табл. 1.

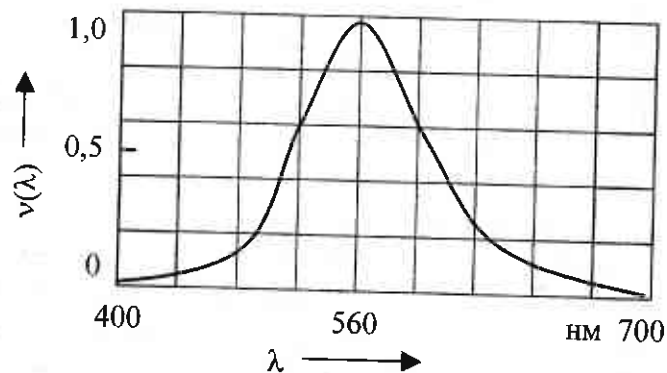


Рис. 4

Т а б л и ц а 1

$\lambda, \text{ нм}$	v_λ	$\lambda, \text{ нм}$	v_λ	$\lambda, \text{ нм}$	v_λ
400	0,0004	520	0,710	640	0,175
410	0,0012	530	0,862	650	0,107
420	0,0040	540	0,954	660	0,061
430	0,0116	550	0,995	670	0,032
440	0,023	560	0,995	680	0,017
450	0,038	570	0,952	690	0,0082
460	0,060	580	0,870	700	0,0041
470	0,091	590	0,757	710	0,0021
480	0,138	600	0,631	720	0,00105
490	0,208	610	0,503	730	0,00052
500	0,323	620	0,381	740	0,00025
510	0,503	630	0,265	750	0,00012

Абсциссами этой кривой служат длины волн, а ординатами – относительные чувствительности глаза $v(\lambda)$, т.е. величины обратно пропорциональные мощностям монохроматического излучения, дающие одинаковые зрительные ощущения. Вид кривой видности, характеризующий средний нормальный глаз, установлен на основании многочисленных измерений.

Максимальной чувствительностью $v(\lambda) = 1$ глаз человека обладает для длины волны зеленого цвета $\lambda = 555 \text{ нм}$.

С учетом избирательной чувствительности глаза вводится понятие светового потока Φ_c .

Элементарный световой поток $d\Phi_c(\lambda)$ для узкого спектрального интервала вблизи длины волны λ равен произведению потока световой энергии $d\Phi_e(\lambda)$ на соответствующее значение функции $v(\lambda)$ для этой же длины волны:

$$d\Phi_c(\lambda) = d\Phi_e(\lambda) v(\lambda).$$

Полный световой поток Φ_c будет равен

$$\Phi_c = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda.$$

Световой поток – это поток световой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению.

Все другие световые характеристики света и его источников определяются так же, как и энергетические. Они связаны аналогичными соотношениями, однако для них применяются специальные единицы.

В качестве основной единицы в СИ принята единица силы света – кандела.

Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683 \text{ Вт/ср}$.

Единица светового потока Φ_c – люмен (лм).

Люмен равен световому потоку, излучаемому изотропным точечным источником с силой в 1 канделу в пределах телесного угла 1 стерадиан.

Единицей освещенности E_c служит люкс (лк).

Люкс – освещенность, создаваемая световым потоком в один люмен, равномерно распределенным по площади в 1 м^2 :

$$E_c = \frac{d\Phi_c^{\text{пад}}}{dS}; \quad [E_c] = 1 \text{ лм} \cdot \text{м}^{-2} = 1 \text{ лк.}$$

Светимость измеряется в люменах на квадратный метр – т.е. это светимость такой поверхности, когда 1 м^2 поверхности излучает световой поток в один люмен, причем плотность светового потока одинакова по всей поверхности:

$$R_c = \frac{d\Phi^{\text{исп}}}{dS}; \quad [R_c] = 1 \text{ лм} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Яркость измеряется в канделах на метр квадратный:

$$B_c = \frac{d\Phi^{\text{исп}}}{dS \cdot \cos\Theta \cdot d\Omega}; \quad [B_c] = 1 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$$

3. Связь световых и энергетических характеристик

Один и тот же световой поток можно измерить в энергетических единицах – ваттах и в световых единицах – люменах и установить между ними соотношение.

Световая эффективность есть число люменов, соответствующее одному ватту.

Энергетическим эквивалентом света называется число ватт, соответствующее одному люмену.

Из-за различной чувствительности глаза к различным участкам спектра обе величины зависят от длины волны. Поэтому принято приводить их значения для $\lambda = 555 \text{ нм}$, где чувствительность глаза максимальна.

Для длины волны 555 нм световая эффективность $F = 683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$, а энергетический эквивалент света $A = 0,00146 \text{ Вт} \cdot \text{лм}^{-1}$.

Значение световой эффективности для любой длины волны равно значению световой эффективности для $\lambda = 555 \text{ нм}$, умноженному на ординату кривой видности, соответствующую данной длине волны:

$$F_\lambda = F v(\lambda).$$

Значения энергетического эквивалента света для любой длины волны равны значению энергетического эквивалента света для $\lambda = 555 \text{ нм}$, деленному на ординату кривой видности, соответствующую данной длине волны:

$$A_\lambda = \frac{A}{v(\lambda)}.$$

Для измерения световых величин применяются специальные приборы – фотометры. Фотометры делятся на два класса – субъективные (визуальные) и объективные, где свет падает на фотозаэлемент. Существуют несколько разновидностей фотометров, однако в основу работы всех их положен принцип сравнения измеряемого светового потока с эталонным.

В табл. 2 сопоставлены световые и энергетические единицы.

Т а б л и ц а 2

Единицы измерения энергетических и световых характеристик

Величины	Обозначения	Единица световая	Единица энергетическая
Световой поток	Ф	Люмен, лм	Ватт
Сила света	I	Кандела, кд	Ватт/стерадиан
Яркость	B	Кандела/м ² , кд/м ²	Ватт/(стерадиан м ²)
Светимость	R	Люмен/м ² , лм/м ²	Ватт/м ²
Освещенность	E	Люкс, лк	Ватт/м ²

В табл. 3 приведены данные по освещенности.

Т а б л и ц а 3

Источник	Освещенность, лк
Звездное, безлунное небо	0,001
Молодая Луна	0,01
Полная Луна	0,1
Чтение с трудом	1
Хорошее чтение	50
Освещенность аудиторий, классов	75
Тонкие работы (черчение)	200
Солнце на границе внеземной атмосферы	~ 10 ⁵

Контрольные вопросы

1. Что такое световой поток? Какова единица измерения светового потока?
2. Что такое сила света и в чем она измеряется?

3. Что такое освещенность и в каких единицах она измеряется?

4. Как сформулировать первый закон освещенности?
5. Как сформулировать второй закон освещенности?
6. Что такое 1 кандела, 1 люмен, 1 люкс, 1 стерадиан?
7. Что такое яркость и светимость?
8. Что такое кривая видности?

Л и т е р а т у р а

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1985.
2. Савельев Н.В. Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука, 1989. – Т. 3.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
4. Гуревич М.М. Фотометрия: теория, методы и приборы. – М.: Энергоиздат, 1983.