

Зміст

§1. Фотометричні величини

1. Поширення випромінювання точкового джерела. Тілесний кут
2. Характеристики випромінювальної здатності джерела. Світловий потік. Сила світла
3. Характеристики опроміненості поверхні. Освітленість. Закон освітленості
4. Співвідношення між енергетичними та візуальними характеристиками випромінювання
5. Яскравість і енергетична променистість
6. Світність
7. Фотометричні характеристики в діяльності людини
8. Приклади

§1. Фотометричні величини

1. Поширення випромінювання точкового джерела. Тілесний кут

Якщо розглядати *точкове ізотропне джерело*, тобто джерело у вигляді матеріальної точки, яке випромінює однаково в усіх напрямках, то можна відзначити, що випромінювання в даному напрямку поширюється всередині конічної поверхні.

Напрямок поширення світла служить вісь цієї поверхні.

Частина простору, обмежена конічною поверхнею зі замкненою направляючою, називається *тілесним кутом*.

Відношенню площі поверхні, вирізаної з довільної сфери даним тілесним кутом з вершиною в центрі цієї сфери, до квадрата її радіуса, є сталим і служить мірою тілесного кута та приймається за його величину

$$\Omega = \frac{S_n}{r^2}.$$

Одиницею тілесного кута є *стерадіан* (позначається *ср*) – центральний тілесний кут який вирізає зі сфери поверхню площею рівною квадрату радіуса цієї сфери.

Максимальний тілесний кут, рівний кутові огляду всієї сфери з її центру, становитиме

$$\Omega_m = \frac{S_m}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ ср}.$$

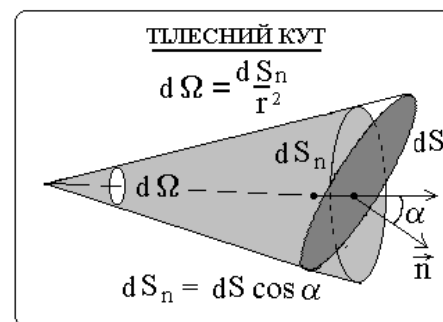
Доцільно знайти *елементарний тілесний кут*, тобто такий, під яким з деякої точки видно елементарну поверхню площею *dS* на відстані *r*. Для цього слід виразити площу цієї поверхні через площу поверхні нормальної до осі кута

$$dS_n = dS \cos \alpha,$$

тоді

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{r^2}.$$

2. Характеристики випромінювальної здатності джерела. Світловий потік. Сила світла



Плющай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Розрізняють *енергетичні (радіаційні)* характеристики випромінювання, які є об'єктивними і визначаються фізичною дією (за вимірювальними приладами) та *зорові (візуальні)*, які носять суб'єктивний характер і визначаються за зоровими відчуттями (як кажуть, «на око»).

Саме останні найчастіше вживаються в побуті та на виробництві.

*Потужність випромінювання, що поширюється всередині деякого тілесного кута, визначена за зоровими відчуттями називається **світловим потоком (Φ)**.*

Якщо W^l — енергія, P^l — потужність випромінювання визначені за зоровими відчуттями (візуально), то

$$\Phi = \frac{W^l}{t} = P^l.$$

Одиниця вимірювання світлового потоку в системі СІ є похідною від одиниці сили світла.

Силою світла ізотропного джерела називається відношення світлового потоку (Φ) до величини тілесного кута (Ω), в якому поширюється цей потік

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

Також

$$I = \frac{\Phi_m}{\Omega_m} = \frac{\Phi_m}{4\pi}.$$

Для довільного (неізотропного) джерела

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$

У випадку визначення сили світла протяжного джерела, розглядається потік $d\Phi$, випромінюваний елементом поверхні ds в межах тілесного кута $d\Omega$.

Відповідна енергетична характеристика називається *силою випромінювання (J)*, або *енергетичною силою світла* і визначається у випадку ізотропного джерела формулою

$$J = \frac{P}{\Omega},$$

неізотропного

$$J = \frac{dP}{d\Omega}.$$

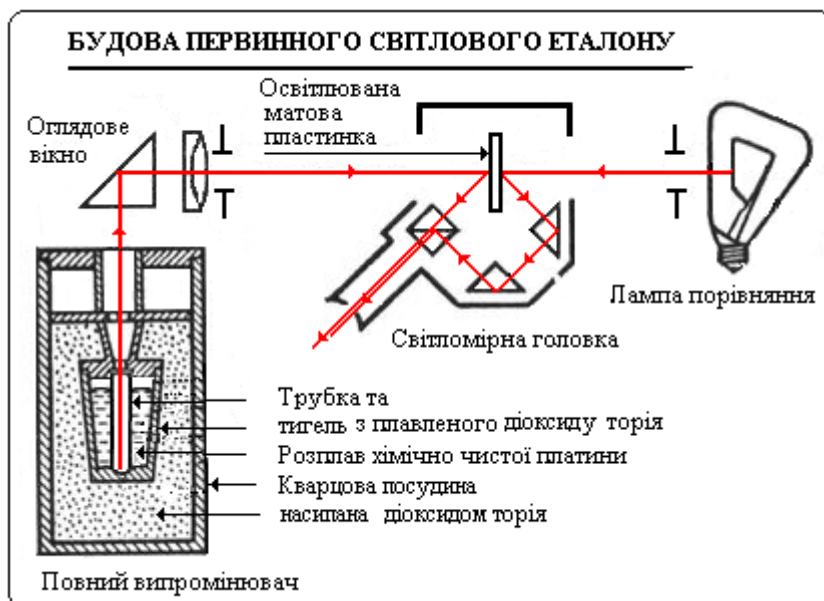
Вимірюється у Вт/ср.

За одиницю сили світла, яка в системі СІ належить до основних, приймається *кандела*

(позначається кд) — сила світла еталонного джерела в певному напрямку.

Точніше можна сказати, що *кандела* — це сила світла, яка випромінюється з поверхні площею $1/60 \text{ см}^2$ абсолютного випромінювача, який має енергетичною силу

випромінювання, в напрямку, перпендикулярному до поверхні, при частоті $5,4 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$



Плющай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

(довжині хвилі 0,555 мкм), рівну 1/683 Вт/ср при температурі тверднення платини (2042,5 К) і нормальному атмосферному тиску (101325 Па).

Еталон кандели був розроблений у США, прийнятий за міжнародною угодою 01.01.1948 р., реалізований у 8 національних лабораторіях і затверджений у 1967 році рішенням Генеральної конференції по мірам і вагам. Він складається зі закритої внизу керамічної трубки діаметром до 2 мм і довжиною 40 мм, яка поміщена у тигель, в якому розплавляється чиста платина. Для термоізоляції тигель поміщений у посудину зі порошком торію. Платина розплавляється індукційними струмами, які збуджуються змінним струмом, що протікає по обмотці. Випромінювання виходить через отвір у кришці посудини і спрямовується на фотометр для порівняння зі досліджуваним джерелом.

Світловий потік точкового ізотропного джерела можна виразити через силу світла.

$$\Phi = I\Omega.$$

Ця формула дозволяє виразити *одиночку світлового потоку* – люмен (позначається лм), через одиницю сили світла. Таким чином матимемо

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

Тобто, за один люмен приймається світловий потік точкового ізотропного джерела силою світла 1 кд в тілесному куті 1 ср.

Світловий потік точкового ізотропного джерела в усіх напрямках (Φ_m – максимальний, повний потік), який випромінюється в тілесному куті – 4π ср.

$$\Phi_m = I\Omega_m = 4\pi I.$$

3. Характеристики опроміненості поверхні. Освітленість. Закон освітленості

Підставивши в формулу сили світла

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

вираз для тілесного кута

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{r^2},$$

Матимемо

$$I = \frac{d\Phi r^2}{dS \cos \alpha} \quad (2.1).$$

З отриманої формули випливає доцільність розгляду відношення

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Таке відношення світлового потоку до площі поверхні, по якій розподіляється потік, називається **освітленістю** поверхні.

При рівномірному розподілі потоку

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Остання формула визначає також одиницю освітленості люкс (лк).

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}$$

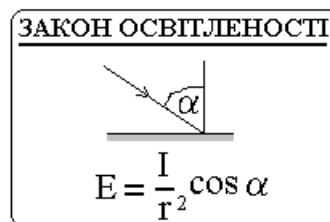
Люкс – це освітленість створювана потоком 1 лм рівномірно розподіленим по поверхні з площею 1 м².

Відповідна радіаційна характеристика називається *енергетичною освітленістю*, або *опроміненістю* і вимірюється у Вт / м².

Пов'яжемо освітленість з силою світла точкового джерела та відстанню точки спостереження до нього.

З формули (2.1)

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$



Отримана формула виражає **закон освітленості (закон Ламберта)**, за яким освітленість від точкового джерела даної точки поверхні прямо пропорційна силі світла джерела косинусові падіння променів і обернено пропорційна квадрату відстані до джерела.

Зауважимо, що кут падіння променів відраховується від нормалі до поверхні.

Історична довідка

Залежність освітленості від оберненого квадрата відстані була встановлена у 1604 році відомим німецьким астрономом Йоганном Кеплером. У 1729 році французький фізик П. Бугер запропонував візуальний метод порівняння джерел світла, який лежить в основі конструкції простіших фотометрів. Німецький фізик І. Ламберт у 1760 році розробив теоретичні засади фотометрії.

4. Співвідношення між енергетичними та візуальними характеристиками випромінювання

Візуальні характеристики звичайно є суб'єктивними і залежать від чутливості ока до випромінювання даної частоти, яка характеризується *функцією відносності (спектральної чутливості)*, що графічно задається *кривою відносної спектральної чутливості ока*.

З цієї кривої випливає, що максимальна чутливість ока припадає на випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_m = 0,555$ мкм, яка відповідає жовто-зеленому світлу.

Щоб випромінювання з довжиною хвилі 0.76 мкм (червоне світло) викликало таке ж відчуття яскравості, потужність його має бути збільшена в 20 000 разів.

Коефіцієнт відносності V_λ , або відносної спектральної чутливості, є відношенням потужностей випромінювання на довжині хвилі максимальної чутливості P_m та на даній довжині хвилі P_λ , які викликають однакову дію на око

$$V_\lambda = \frac{P_m}{P_\lambda}.$$

Візуальні характеристики пов'язуються з радіаційними через **коефіцієнт світлової**

ефективності η_λ , який переводить енергетичні (радіаційні) характеристики у візуальні і, наприклад, показує, скільки люменів відповідають одиниці потужності вату.

Для довжини світлової хвилі λ_m , максимально відчутної оком (0,555 мкм) потоку в 1 лм відповідає потужність випромінювання (потік енергії) 0,0016 Вт, тому коефіцієнт світлової ефективності для цієї довжини хвилі рівний 1/ 0,0016 лм / Вт, або

$$\eta_{\lambda m} = 625 \text{ лм/Вт.}$$

Коефіцієнт світлової ефективності для довільної довжини хвилі знаходиться множенням попереднього коефіцієнту на коефіцієнт відносної спектральної чутливості V_λ

$$\eta_\lambda = \eta_{\lambda m} V_\lambda.$$

Таким чином зв'язок потужності випромінювання з світловим потоком

$$\Phi = \eta_\lambda P = \eta_{\lambda m} V_\lambda P.$$

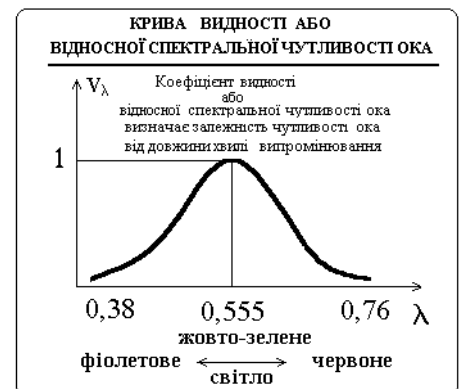
Обернений коефіцієнт k_λ (*енергетичний, або механічний еквівалент*) переводить зорові (візуальні) характеристики у енергетичні.

Для максимально відчутної довжини хвилі.

$$k_{\lambda m} = 1/ \eta_{\lambda m} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт / лм.}$$

Також

$$k_\lambda = 1/ \eta_\lambda = 1/ \eta_{\lambda m} V_{\lambda m}.$$



5. Яскравість і енергетична променистість

Візуальною характеристикою випромінювальної здатності протяжних джерел в даному напрямку є яскравість, яка позначається B_θ (Bright, англ. – яскравий), або L_θ , де кутовий індекс вказує на залежність яскравості елементарної площини від напрямку випромінювання).

Яскравість в даному напрямку B_θ – це відношення світлового потоку $d\Phi_\theta$ елемента поверхні ds в даному напрямку θ до геометричного фактора (добутку величини тілесного кута на видиму площу елемента випромінюючої поверхні – $d\Omega ds_\theta$) у відповідності до формули

$$B_\theta = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega ds_\theta} = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega ds \cos \theta},$$

яка при підстановці

$$I_\theta = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega}$$

переходить в

$$B_\theta = \frac{I_\theta}{ds \cos \theta}.$$

Можна також сказати, що **яскравість в даному напрямку** є відношенням сили світла в даному напрямку до видимої площі випромінюючої поверхні.

$$B_\theta = \frac{dI_\theta}{ds_\theta} = \frac{dI_\theta}{ds \cos \theta}.$$

Одиницею яскравості є кандела на квадратний метр.

Відповідна енергетична характеристика – енергетична яскравість вимірюється у Вт/м² ср.

Як приклад величини яскравості, можна зазначити, що яскравість поверхні Сонця становить $1,5 \cdot 10^9$ кд/м², вольфрамової нитки лампи розжарювання $4,5 \cdot 10^6$ кд/м².

Джерела з яскравістю більшою $1,6 \cdot 10^5$ кд/м² викликають у ока больові відчуття.

Джерело, що має однакову яскравість в усіх напрямках ($B_\theta = B = \text{const}$) називається ламбертовим, оскільки для цього джерела виконується **закон Ламберта**, який стверджує, що світловий потік елемента поверхні такого джерела, спостережуваного під кутом θ до його нормалі прямопропорційний косинусу вказаного кута.

Дійсно, з означення яскравості, матимемо

$$d\Phi_\theta = B_\theta d\Omega ds \cos \theta,$$

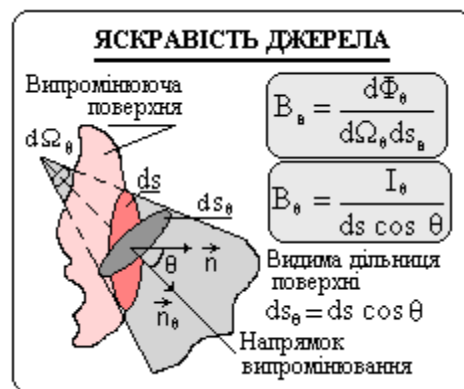
а при $B_\theta = B$

$$d\Phi_\theta = B d\Omega ds \cos \theta = I \cos \theta.$$

Прикладом ламбертових джерел можуть бути Сонце та освітлювана поверхня з матовим покриттям, які мають практично однакову яскравість в усіх напрямках.

6. Світність

Світність (M) характеризує поверхневу густину видимого випромінювання протяжного джерела і є відношенням світлового потоку ($d\Phi$), що випромінюється елементом поверхні в усіх напрямках (тобто всередині тілесного кута 2π ср) до площі (ds) елемента



$$M = \frac{\Phi_{2\pi}}{ds} \text{ (л м / м}^2\text{)}.$$

Відповідною енергетичною величиною є **енергетична світність L** , або поверхнева густина випромінювання, яка вимірюється у Вт/м².

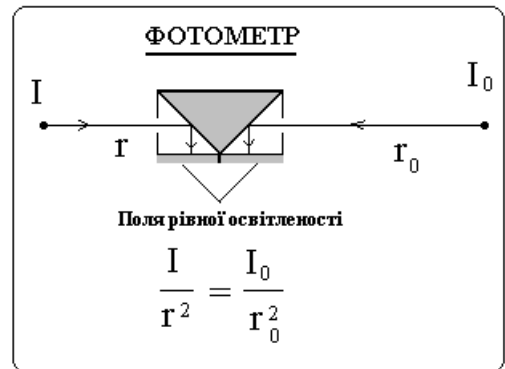
Для ламбертових джерел

$$M = \pi B$$

7. Фотометричні характеристики в діяльності людини

Прилади призначені для вимірювання характеристик випромінювання називаються **фотометрами**. За принципом реєстрації випромінювання фотометри поділяються на візуальні (суб'єктивні) та об'єктивні.

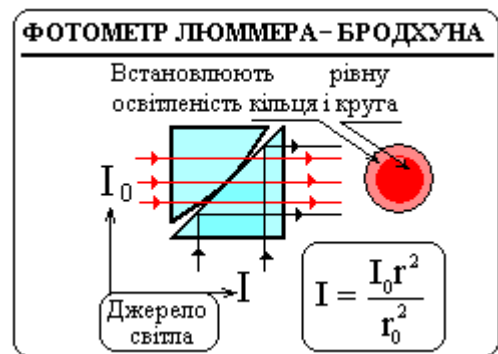
В основі дії поширених фотометрів лежить спосіб вирівнювання освітленості полів, на які падають промені від двох джерел, шляхом зміни відстані до джерел. За відомою силою світла одного джерела можна знайти силу світла іншого, вимірявши відстані від джерел до призми фотометра.



$$I = \frac{I_0 r^2}{r_0^2}$$

Існують також об'єктивні прилади для вимірювання освітленості, що використовують електричну дію світла та базуються на фотоелементах – фотометри та люксметри

Можливості розрізнення людиною різноманітних об'єктів залежать від рівня їх освітленості. Так освітленість на вулиці в сонячний день становить 10⁵ лк, хмари зменшують цю освітленість приблизно в сто разів. Повний Місяць дає 0,2 лк, молодий – соті долі, безхмарне зоряне небо вночі – тисячні долі люкса. Освітленість в десятитисячні долі люкса дозволяє з трудом орієнтуватись вночі. При одному люксі можна з напруженням читати, але задовільною є освітленість 50 лк, причому для тонких робіт потрібна вдвічі більша. В класних приміщеннях на столах учнів освітленість повинна складати 75 лк.



Реальна ефективність джерел світла визначається їх світловою віддачею по відношенню до потужності, яку вони споживають.

Джерелами світла в повсякденному житті служать, як правило різноманітного типу лампи, серед яких найчастіше використовується електрична лампа розжарювання винайдена в 1872 році російським вченим А. Н. Лодигіним і вдосконалена американським конструктором Т.А. Едісоном. В сучасних лампах такого типу випромінювачем є розжарена струмом до температури 2700 – 2800⁰С вольфрамова нитка, що знаходиться в скляному балоні в вакуумі, або в газі, який хімічно не взаємодіє з вольфрамом, і загальмовує його випаровування (азотом, аргонем). В газонаповнених лампах температура розжарювання вища, ніж в пустотних.

Плющай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Світлова віддача таких ламп в основному становить 10 лм/Вт, досягаючи в потужних, де застосовуються товщі нитки, вдвічі більшого значення.

ВІЗУАЛЬНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Візуальні характеристики	Позначення	Одиниці вимірювання	Енергетичні характеристики	Позначення	Одиниці вимірювання
Світловий потік	Φ	лм	Потужність випромінювання	P	Вт
Світлова енергія	W ¹	лм·сек	Енергія випромінювання	W	Дж
Сила світла джерела (в деякому напрямку)	I	кд	Сила випромінювання	I _e	Вт / ср
Освітленість (в точці поверхні)	E	лк	Опроміненість	E _e	Вт / м ²
Яскравість (в даній точці та в заданому напрямку)	L, B	кд / м ²	Енергетична яскравість	L _e	Вт / м ² ср
Світність (в точці поверхні випромінювача)	M	лм/м ²	Енергетична світність (Поверхнева густина випромінювання)	M _e	Вт / м ²

8. Приклади

1. Розрахуємо освітленість від електролампи потужністю 100 Вт на відстані 1м від неї.

Розв'язання. Повний світловий потік лампи при стандартній світловій віддачі $\eta=10$ лм/Вт становитиме $\Phi_m = \eta P = 10 \cdot 100 = 10^3$ лм.

$$\text{Сила світла лампи } I = \frac{\Phi_m}{4\pi} = \frac{10^3}{12,56} \approx 80 \text{ кд.}$$

Освітленість

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha = \frac{\Phi_m}{4\pi \cdot r^2} = \frac{10^3}{12,56 \cdot 1^2} \approx 80 \text{ лк.}$$

Щоправда більш точні розрахунки дають дещо меншу величину.

2. Оцінимо кількість стоватних ламп необхідних для освітлення аудиторії площею 65 м² при необхідній освітленості 75 лк.

Розв'язання. Необхідний потік на рівні робочих місць

$$\Phi = E S = 75 \cdot 65 = 4875 \text{ лм.}$$

Цей потік можуть створити лампи загальною потужністю

$$P = \Phi/\eta = 2 \cdot 0,1 \cdot 4875 = 9750 \text{ Вт.}$$

Множник 2 враховує втрати на поглинання стелею і стінами. Таку потужність можуть забезпечити 10 стоватних ламп.