

Змістовий модуль № 4. Природа світла. Спектри. Фотометрія
Тема 4.3 «Фотометрія»
Лекція № 12

План лекції

1. Потік енергії випромінювання. Світловий потік
2. Сила світла
3. Освітленість
4. Яскравість
5. Закони освітленості

1. Потік енергії випромінювання. Світловий потік

Електромагнітне випромінювання, як і будь-які хвилі, при своєму поширенні в якому-небудь середовищі переносить енергію від точки до точки. Якщо на деякій відстані від джерела електромагнітних хвиль подумки виділити поверхню так, щоб крізь неї проходили хвилі, то енергію W , що переноситься цими хвилями через поверхню за одиницю часу t , називають потоком випромінювання або променистим потоком через виділену поверхню. Потік випромінювання має розмірність потужності й вимірюється у ватах.

$$\Phi_{\text{випр.}} = \frac{W}{t}.$$

Коли відстань від джерела електромагнітного випромінювання до виділеної поверхні велика в порівнянні з розмірами самого джерела, його можна назвати точковим. Часто умовно вважають, що випромінювання точкового джерела не залежить від напрямку, тобто відбувається рівномірно в усі боки.

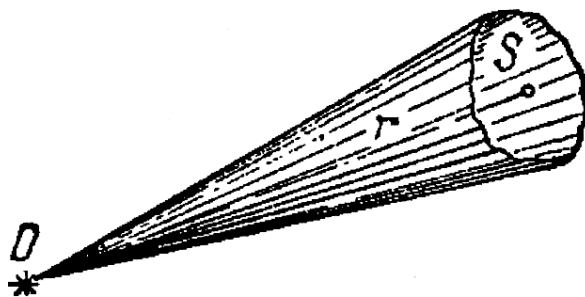
Потік випромінювання, що падає на яку-небудь поверхню, залежить від площі цієї поверхні S , від її положення в просторі й від відстані до джерела випромінювання.

У більшості випадків доводиться розглядати потік випромінювання, що поширюється в обмеженій частині простору. Наприклад, якщо джерело випромінювання O , лінійні розміри якого малі в порівнянні з r (мал. 4.2), посилає випромінювання на майданчик S , перпендикулярний до напрямку поширення випромінювання, то на нього попадає тільки випромінювання, обмежене заштрихованою кінечною поверхнею з вершиною в точці O .

Частину простору, обмежену кінечною поверхнею, називають тілесним кутом Ω . Точку O на мал. 4.2 називають вершиною тілесного кута. Коли вершина тілесного кута перебуває в центрі кулі, кут називають центральним.

Стерадіаном (ср) називають центральний тілесний кут, який вирізує на поверхні кулі площу, рівну квадрату радіуса цієї кулі.

Світлове відчуття в людини створює електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі у вакуумі в діапазоні приблизно від 400 до 760 нм, причому кожній довжині хвилі в цьому діапазоні відповідає певне колірне відчуття.



Мал. 4.2. Тілесний кут

Досліди показали, що променисті потоки, однакові за потужністю, але різної довжини хвилі, спричиняють неоднакове подразнення закінчень світлочутливого нерву на сітківці ока й тому створюють світлові відчуття, що відрізняються не тільки по кольору, але й по інтенсивності. Найбільш чутливе наше око до випромінювання з довжиною хвилі 555 нм (зелений колір). Однакові променисті потоки з довжиною хвилі, більшою або меншою 555 нм, створюють більш слабе світлове відчуття.

Променистий потік, що створює в людей світлове відчуття, виражати у ватах дуже незручно. Тому для оцінки дії випромінювання на око користуються світловим потоком Φ . Світловим потоком називають ту частину потоку випромінювання, яка викликає в оці відчуття світла й оцінюється за світловим відчуттям.

Розділ оптики, що займається вимірами світлового потоку, вивченням характеристик джерел світла й освітленостей предметів, називають фотометрією (від греч. «фотоз» - світло).

2. Сила світла

Світловий потік Φ завжди створюється яким-небудь джерелом світла. Реальні джерела світла випромінюють світловий потік по різних напрямках нерівномірно.

Величина, яка характеризує залежність світлового потоку, що випускається джерелом світла, від напрямку випромінювання, називається силою світла J . Сила світла джерела малих розмірів виміряється світловим потоком, що випускається цим джерелом усередину одиничного тілесного кута в заданому напрямку:

$$J = \frac{d\Phi}{d\Omega} . \quad (4.6)$$

Для реального джерела світла при визначенні сили світла в якому-небудь напрямку вимірюють світловий потік $d\Phi$ у малому куті $d\Omega$ й потім знаходять

J за формулою (4.6). Якщо ж сила світла джерела слабо залежить від напрямку, то формула (4.6) буде слушна й для великих кутів:

$$J = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (4.7)$$

Надалі ми будемо вважати силу світла точкового джерела в усіх напрямках однаковою.

У СІ одиниця сили світла кандела (від лат. «кандела» - свіча) є шостою основною одиницею. Канделою (кд) називають $1/60$ сили світла, створюваної 1 см^2 плоскої поверхні платини при температурі її затвердіння (2046 К) по напрямкові перпендикуляра до цієї поверхні.

Виведемо одиницю світлового потоку в СІ:

$$\Phi = J\Omega. \quad (4.8)$$

Повний світловий потік (по всіх напрямках всередині тілесного кута 4π)

$$\Phi = 4\pi J. \quad (4.9)$$

У СІ за одиницю світлового потоку прийнятий люмен (лм). Люменом називають світловий потік, що випускається точковим джерелом світла в 1 кд усередину тілесного кута в 1 ср : $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \times 1 \text{ ср}$.

У застосуванні до електричних ламп кількість люменів світлового потоку Φ , яке припадає на один ват потужності P електричного струму в лампі, називають світловою віддачею лампи:

$$\psi = \frac{\Phi}{P}. \quad (4.10)$$

Наприклад, лампа розжарювання потужністю 100 Вт має середню сферичну силу світла близько 100 кд . Повний світловий потік такої лампи, підрахований по формулі (4.9), становить $\Phi_p = 4 \times 3,14 \times 100 \text{ кд} = 1256 \text{ лм}$, а світлова віддача рівна $12,6 \text{ лм/Вт}$. Світлова віддача ламп денного світла і особливо світлодіодних ламп в кілька разів вище, чим у ламп розжарювання.

3. Освітленість

Темною ніччю або в печері навколишні тіла невидимі. Однак палаючий сірник у цих випадках буде ясно видний, як і близькі до нього предмети. Це пояснюється тим, що від джерела світла, у цьому випадку від сірника, поширюється світловий потік. Частина світлового потоку, який падає на інші тіла, відбивається й, потрапляючи в око людини, дозволяє їй бачити їх. Чим більший світловий потік упаде на розглядувані тіла, тим більше буде й відбитий світловий потік і людина чіткіше зможе бачити ці тіла.

Величину E , що характеризує різну видимість окремих тіл і обумовлену величиною падаючого на них світлового потоку, називають освітленістю. Освітленість визначається світловим потоком, що припадає на одиницю площі цієї поверхні, тобто

$$E = \frac{d\Phi}{dS} . \quad (4.11)$$

При рівномірному розподілі падаючого на поверхню світлового потоку її освітленість вимірюється світловим потоком, що приходяться на одиницю площі цієї поверхні, тобто

$$E = \frac{\Phi}{S} . \quad (4.12)$$

Коли формулою (4.12) користуються при нерівномірному розподілі потоку Φ на площу S , то одержують середню освітленість цієї поверхні.

Виведемо одиницю освітленості E в СИ:

$$E = 1 \text{ лм} / 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ лм} / \text{м}^2 = 1 \text{ лк} .$$

У СИ за одиницю освітленості ухвалюється люкс (лк) (від лат. «люкс» - світло). Люксом називають освітленість такої поверхні, на кожний квадратний метр якої рівномірно падає світловий потік в один люмен.

Приведемо кілька прикладів. Сонячні промені опівдні (на середніх широтах) створюють освітленість порядку 100 000 лк, а повний Місяць - близько 0,2 лк. Лампа розжарювання потужністю 100 Вт, що висить на висоті 1 м над столом, створює на поверхні стола (під лампою) освітленість 100 лк.

4. Яскравість

Читаючи книгу, ми чітко бачимо букви на білім тлі аркуша, хоча його освітленість можна вважати скрізь однаковою. Пояснюється це тим, що білий аркуш і букви по-різному відбивають падаючий на них світловий потік.

Оскільки від аркуша паперу поширюється світловий потік, то аркуш можна вважати джерелом світла. Зауважимо, що від аркуша поширюється не його власне світло, а відбите, тому аркуш зручно назвати вторинним джерелом світла. Величина світлового потоку, що поширюється як від первинного, так і від вторинного джерела світла, загалом кажучи, залежить від напрямку. Це означає, що, подібно первинним джерелам світла, вторинні джерела можна характеризувати силою світла. Біла поверхня аркуша видасться нам значно яскравіше, чим літери на ній, тому сила світла з одиниці площі в першому випадку більше, чим у другому.

Отже, різні області поверхонь реальних джерел світла (первинних і вторинних), розглянуті по певному напрямкові, можуть значно відрізнятись

своєю яскравістю, наприклад, одні витки спирали включеного в мережу електричного нагрівача видадуться світліше, чим інші.

Величину B , що характеризує різну видимість окремих ділянок поверхні в заданому напрямку, обумовлену світловим потоком, що поширюються від цієї поверхні, називають яскравістю. При рівномірнім поширенні світлового потоку від усіх ділянок поверхні в обраному напрямку яскравість вимірюють силою світла з одиниці площі цієї поверхні. Якщо сила світла визначається по напрямковій перпендикуляра до поверхні, то яскравість останньої знаходиться по формулі

$$B = \frac{J}{S} . \quad (4.13)$$

У загальному випадку яскравість поверхні B являє собою відношення сили світла в даному напрямку до площі проекції світної поверхні на площину, перпендикулярну заданому напрямку:

$$B = \frac{dJ_{\alpha}}{dS \cos \alpha} . \quad (4.14)$$

За одиницю яскравості в СІ приймають $\text{кд}/\text{м}^2$ - яскравість такої плоскої поверхні, що рівномірно світиться, з кожного квадратного метра якої в перпендикулярному до неї напрямку виходить сила світла в 1 кд.

Зауважимо, що найменша яскравість, на яку реагує око людини, становить близько $10^{-6} \text{кд}/\text{м}^2$, а яскравість більш $10^5 \text{кд}/\text{м}^2$ викликає хворобливе відчуття в оці й може зашкодити зір. Яскравість поверхні Сонця становить $1,5 \cdot 10^9 \text{кд}/\text{м}^2$, а поверхні Місяця - $2,5 \cdot 10^3 \text{кд}/\text{м}^2$. Яскравість волоска лампи розжарювання - $(1,5-2) \cdot 10^6 \text{кд}/\text{м}^2$.

5. Закони освітленості

Освітленість, створювана точковим джерелом світла, залежить від сили світла J і відстані від джерела до поверхні r .

Опишемо радіусом r сферичну поверхню навколо точкового джерела із силою світла J . Тоді освітленість внутрішньої сторони цієї поверхні буде скрізь однаковою й промені будуть іти по радіусах, тобто перпендикулярно до поверхні сфери. Отже, кут падіння світлових променів на поверхню буде дорівнює нулю. Якщо освітленість внутрішньої поверхні сфери в цих умовах позначити E_0 , площа всієї внутрішньої поверхні S_{III} й повний світловий потік джерела Φ_{II} , то з (4.9) та (4.12) одержимо

$$E_0 = \frac{\Phi_{II}}{S_{III}} = \frac{4\pi J}{4\pi r^2} = \frac{J}{r^2} . \quad (4.15)$$

Це співвідношення є математичним вираженням першого закону освітленості: при перпендикулярній падінні променів освітленість, створювана точковим джерелом світла, прямо пропорційна його силі світла й обернено пропорційна квадрату відстані від джерела до освітлюваної поверхні.

Розглянемо тепер, як залежить освітленість від кута падіння променів. Нехай на плоску поверхню $ABCD$ падають паралельні світлові промені під кутом i (мал. 4.3). Освітленість E на цій поверхні визначається формулою

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{AB \cdot AD}, \quad (4.16)$$

де Φ – світловий потік, що падає на поверхню $ABCD$.

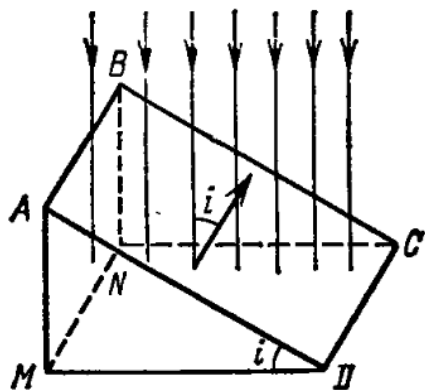


Рис. 4.3.

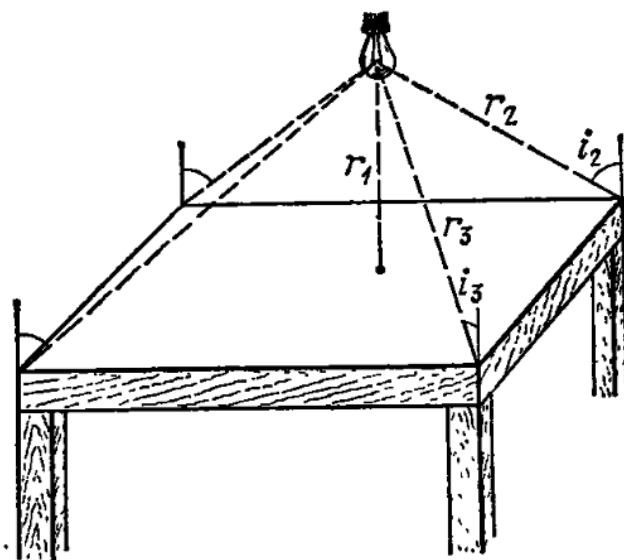


Рис. 4.4.

Якщо поверхню $ABCD$ прибрати, то світловий потік потрапить на поверхню $MNCD$. Нехай ця поверхня розташована так, що кут падіння променів на неї дорівнює нулю. Тоді кут між поверхнями $ABCD$ й $MNCD$ буде рівний i . Позначимо освітленість на поверхні $MNCD$ через E_0 ; тоді

$$E_0 = \frac{\Phi}{MN \cdot MD}. \text{ Знайдемо відношення освітленостей } E \text{ и } E_0:$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi / AB \cdot AD}{\Phi / MN \cdot MD}. \quad (4.17)$$

Оскільки $AB = MN$, те $\frac{E}{E_0} = \frac{MD}{AD} = \cos i$. Таким чином,

$$E = E_0 \cos i. \quad (4.18)$$

Це співвідношення є математичним вираженням другого закону освітленості: освітленість поверхні, створювана паралельними променями, прямо пропорційна косинусу кута падіння променів на цю поверхню.

Із другого закону освітленості випливає, що при збільшенні кута падіння освітленість поверхні повинна зменшуватися. Зміна пір року на Землі пояснюється саме зміною кута падіння сонячних променів на її поверхню. У північній півкулі найменший кут падіння променів на поверхню Землі утворюється улітку наприкінці червня, а найбільший кут - узимку наприкінці грудня.

Для точкового джерела світла E_0 у формулі (4.18) можна замінити його значенням з (4.15), тоді одержимо узагальнену формулу для обчислення освітленості:

$$E = \frac{J}{r^2} \cos i. \quad (4.19)$$

По цій формулі можна обчислювати освітленість різних ділянок поверхні (наприклад, різних точок столу), створювану електричною лампою (мал. 4.4). При розрахунках потрібно пам'ятати, що освітленість, створювана декількома джерелами світла в якій-небудь точці поверхні, дорівнює сумі освітленостей, створених кожним джерелом окремо.

Питання для самоконтролю

1. Що вивчає фотометрія?
2. Що називають силою світла, світловим потоком, освітленістю? Які їх одиниці (дайте визначення).
3. Яке джерело світла можна вважати точковим? Наведіть приклади.
4. Як залежить освітленість поверхні від відстані до джерела і від кута падіння світлового променя на цю поверхню?
5. Сформулюйте і поясніть закони освітленості.

Список літератури

1. Фирсов А.В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / А.В.Фирсов; под ред. Т.И.Трофимовой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 176, 177).
2. Жданов Л.С. Физика для средних специальных учебных заведений: Учеб. / Л.С.Жданов, Г.Л.Жданов – 5-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 512 с. (§§ 33.1 – 33.6).