

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

**Кафедра інформаційних технологій факультету №4**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни Фізика обов'язкової компоненти  
освітньої програми першого рівня вищої освіти

125 Кібербезпека (безпека інформаційних та комунікаційних систем)

**за темою** – (Фізична оптика)

**Харків 2018**

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

## **СХВАЛЕНО**

Вченою радою факультету № 4  
Протокол від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

## **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Розглянуто на засіданні кафедри інформаційних технологій  
протокол від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

### **Розробники:**

1. доцент кафедри, кандидат технічних наук Світличний В.А.

### **Рецензенти:**

1. доцент кафедри кібербезпеки факультету №4 ХНУВС, к.т.н., доцент Носов В.В.,
2. професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів ХНУРЕ, к.т.н., доцент Хорошайло Ю.С.

### План лекції:

1. Вступ. Предмет вивчення оптики.
2. Поняття оптики: світло, світловий промінь, електромагнітна хвиля, фотони. Корпускулярно-хвильовий дуалізм.
3. Поширення в просторі електромагнітної хвилі за Максвеллом. Шкала електромагнітних хвиль.
4. Фотометрія. Енергетичні характеристики випромінювання: потік, інтенсивність, об'ємна густина енергії. Світлові характеристики випромінювання: потік, сила світла, яскравість, світність. Освітленість поверхні. Фотометри.
5. Висновки.

### Основна література:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том. 4. Оптика – М.: Высшая школа, 1979, 768 с.
2. Бланк А.Я. Физика. – Харьков, "Каравелла", 1996.
3. Лопатинський Є.І., Зачек І.Р., Ільчук Г.А., Романишин Б.М. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2005. 394 с.

### Додаткова література:

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики \в 3-х томах\ - Киев, "Дніпро", 1994.
2. Айзензон А.Е. Курс физики – Москва, "Высшая школа", 1996.
3. Офир Дж. Физика в 2-х томах. – М: Мир, 1981.
4. Детлаф А.А., Яворський В.М. Курс общей физики \в 3-х томах\ – М.: Высшая школа, 1983.

### Текст лекції.

#### 1. Вступ.

**Оптика** – це розділ фізики, в якому вивчаються властивості, фізична природа світла та його взаємодія з речовиною. Під **світлом** розуміють електромагнітні хвилі таких довжин, які сприймаються оком людини. Ці хвилі мають довжину від  $3,8 \cdot 10^{-7}$  м до  $7,6 \cdot 10^{-7}$  м. Такий діапазон хвиль називають **видимим діапазоном**. Поняття „світло” охоплює не тільки видиме світло, але й прилеглі до нього інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Сучасна оптика вивчає електромагнітні хвилі від м'якого рентгенівського випромінювання ( $\lambda \sim 10^{-9}$  м) до радіохвиль міліметрового діапазону ( $\lambda \sim 10^{-4}$  м). Це можна показати за допомогою **шкали електромагнітних хвиль** (рис. 1):

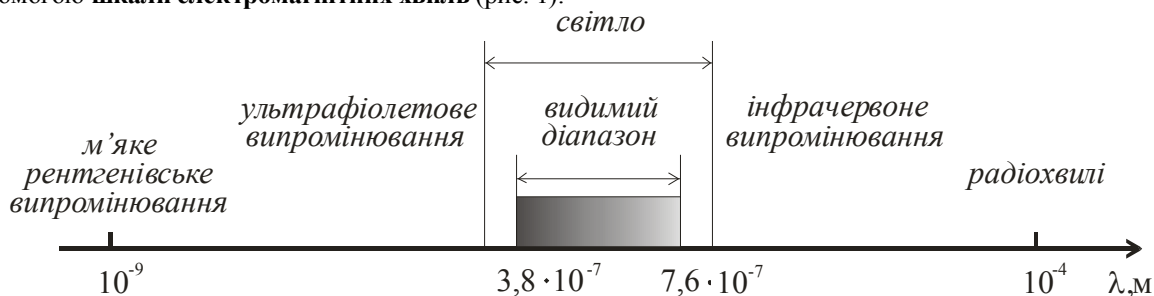


Рис. 1. Шкала електромагнітних хвиль

Оптику поділяють на геометричну та фізичну. **Геометрична оптика** – це розділ оптики, в якому вивчаються закони поширення світла на основі уявлень про світлові промені. Під **світловим променем** розуміють не вузький світловий пучок, а геометричну лінію, що вказує напрям переносу енергії світлової хвилі. Звичайно, чим більш вузьким є світловий пучок, тим легше за його допомогою встановити напрям поширення світла, тобто визначити світловий промінь. Проте реально нескінченно вузький світловий пучок створити неможливо, бо цьому заважає дифракція світла. Отже, світловий промінь не є фізичним образом, а є геометричним поняттям, тобто математичною абстракцією. Геометрична оптика являє собою засіб розв'язання більш простих задач оптики, коли метод променів дає задовільні результати. Особливо це стосується побудови зображень в оптичних системах.

**Фізична оптика** поділяється на *хвильову* та *квантову*. У **хвильовій оптиці** розглядаються явища, в яких проявляється хвильова природа світла (*інтерференція, дифракція*). Основним поняттям хвильової оптики є поняття електромагнітної хвилі.

Виникнення електричного поля внаслідок зміни магнітного поля було відкрито Фарадеєм у 1831 р. Обернене явище – виникнення магнітного поля під час будь-якої зміни електричного поля було теоретично передбачене іншим видатним англійським фізиком Максвеллом. Розвиваючи уявлення Фарадея про взаємозв'язок електричних та магнітних явищ, Максвелл прийшов до відкриття

електромагнітного поля. Одним з висновків теорії електромагнітного поля, розробленої Максвеллом у 1860-1865 роках, є те, що у вакуумі або в повітрі можуть поширюватися електромагнітні хвилі, швидкість яких дорівнює  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Таку швидкість ще називають *швидкістю світла*.

Через 23 роки (1888 р.) німецький фізик Герц експериментально дістав електромагнітні хвилі у вільному просторі, а російський фізик Попов використав ці хвилі для здійснення бездротового телеграфу.

Згідно теорії Максвелла, якщо в просторі змінюється електричне поле, то в цій області простору воно викликає змінне магнітне поле. Змінне магнітне поле, в свою чергу, породжує змінне електричне поле, причому це електричне поле повинно бути вихровим, тобто лінії напруженості електричного поля є замкненими і охоплюють лінії індукції магнітного поля. Сукупність таких змінних електричних та магнітних полів утворює електромагнітне поле. Виникнувши в певному місці простору, змінне електромагнітне поле передається від однієї точки простору до іншої зі швидкістю світла (рис. 2). Цей процес поширення змінного електромагнітного поля в просторі й являє собою **електромагнітну хвилю**.

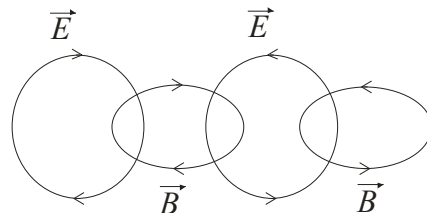


Рис.2. Модель поширення електромагнітного поля в просторі

З теорії Максвелла випливає, що напрям вектора напруженості електричного поля, вектора індукції магнітного поля, а також напрям поширення електромагнітної хвилі є взаємно перпендикулярними, тому електромагнітні хвилі називають ще *поперечними* (рис. 3). Поперечність світлових хвиль на момент створення теорії електромагнітного поля була доведена експериментально.

У **квантовій оптиці** розглядаються явища, в яких вивчається квантова природа світла (квант – порція енергії). З точки зору квантової оптики світло є потоком фотонів з енергією  $\varepsilon = h\nu$  та імпульсом

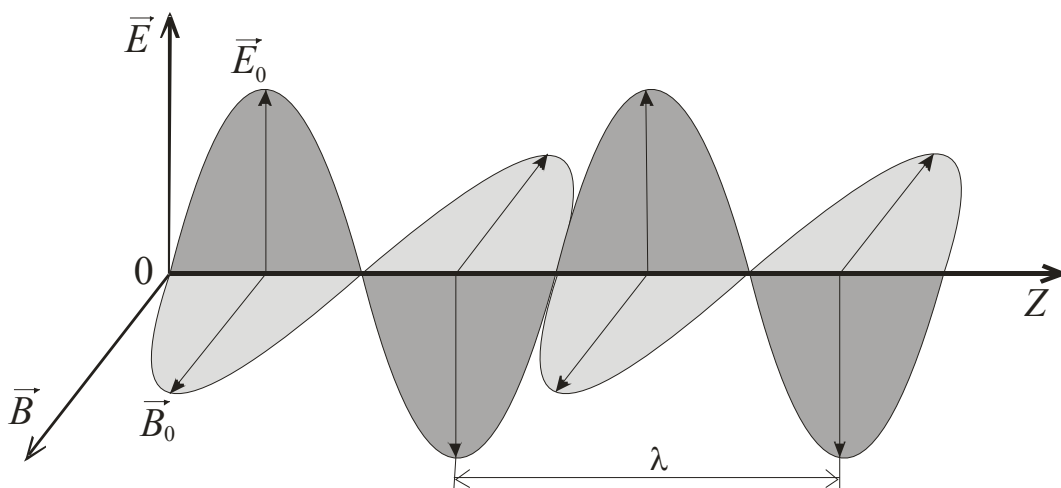


Рис. 3. Модель поширення електромагнітної хвилі в просторі

$P = \frac{h\nu}{c}$ , де  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с - стала Планка,  $\nu$  - частота світла,  $c$  – швидкість світла у вакуумі. До

таких явищ відносять *теплове випромінювання, фотоелектричний ефект, ефект Комптона* тощо. Основним поняттям квантової оптики є поняття фотона. **Фотон** – це окрема назва світлового кванта електромагнітного поля, тому що він під час випромінювання, поширення в просторі, а також в момент взаємодії з речовиною поводить себе так, як класична елементарна частинка. Але фотон – це особлива частинка, яка істотно відрізняється від таких частинок, як електрон, протон, нейтрон, що мають відмінну від нуля масу спокою. Фотон не має маси спокою й може існувати тільки в русі зі швидкістю світла. Він не має електричного заряду, магнітного моменту, його час життя є безмежним. Це свідчить про те, що фотон є стійкою частинкою, для якої самовільного розпаду не відбувається. Фотон достатньої енергії, проходячи повз важке атомне ядро, може перетворюватися на пару елементарних частинок електрон – позитрон. Відбувається також зворотній процес: електрон і позитрон можуть перетворюватися на гама-фотон.

Кожний з перелічених розділів оптики має своє застосування: геометрична оптика – це проєкційні прилади, мікроскопи, телескопи, окуляри; хвильова оптика – інтерферометри, дифракційні спектрографи, поляриметри; квантова оптика – пірометри, спектрографи, фотоелементи, лазери.

Хвильова і квантова точки зору на природу світла взаємно виключають одна одну, тому що багато ознак хвилі й частинки є протилежними. Фізична гіпотеза про те, що світло має одночасно хвильові та квантові (корпускулярні) властивості називається **корпускулярно-хвильовим дуалізмом**. Таким чином, під світлом слід розуміти потік електромагнітних хвиль і разом з тим потік фотонів.

У прояві суперечливих властивостей світла є закономірність: у довгохвильового випромінювання (наприклад, інфрачервоного) квантові властивості проявляються менше, але більш чіткішими стають хвильові властивості. Із зменшенням довжини хвилі хвильові властивості послаблюються, але більш чіткішими стають квантові властивості. Єдність цих протилежностей виражає складність природи світла.

#### 4. Фотометрія

Основною величиною, що характеризує випромінювання, є його енергія. Розділ фізичної оптики, який розглядає енергетичні характеристики оптичного випромінювання і способи їх вимірювання називається **фотометрією**.

**Енергетичним потоком (потужністю)** випромінювання називають енергію випромінювання, яка переноситься променями за одиницю часу в тілесному куті  $d\Omega$  через елементарну поверхню  $d\sigma$ , нормаль до якої співпадає з напрямком поширення променів:

$$d\Phi_e = I_e d\sigma d\Omega,$$

де величина  $I_e$  чисельно дорівнює енергетичному потоку випромінювання, що поширюється в одиничному тілесному куті через одиничну поверхню в нормальному до неї напрямі. Цю величину називають **енергетичною інтенсивністю** випромінювання. Енергія, що припадає на одиницю об'єму простору, в якому поширюється випромінювання, називається **об'ємною густиною енергії**:

$$\rho_e = \frac{d\Phi_e}{dV}.$$

Енергетичний потік, енергетична інтенсивність і об'ємна густина енергії являють собою *енергетичні характеристики випромінювання* і в системі СІ вимірюються відповідно ватами ( $Вт$ ), ватами на стерadian і

на квадратний метр ( $\frac{Вт}{ср \cdot м^2}$ ) і джоулями на кубічний метр ( $\frac{Дж}{м^3}$ ).

У видимому діапазоні випромінювання характеризується цими самими величинами, але, коли приймачем є око людини, вони повинні враховувати зорові відчуття ока. Такі величини мають значний елемент суб'єктивності тому, що чутливість ока людини залежить від спектрального складу світла, й називаються *світловими*. Найбільш чутливе людське око до світла зеленого кольору, якому відповідає довжина хвилі  $\lambda = 555$  нм. Щоб врахувати цей фактор, вводиться *коефіцієнт видності (функція видності)*, який дорівнює відношенню потужності  $P_m$  монохроматичного випромінювання ( $\lambda = 555$  нм) до потужності монохроматичного випромінювання  $P_\lambda$  певної довжини хвилі  $\lambda$ , яке викликає таку саму дію на око:

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

Значення коефіцієнтів видності обернено пропорційні величинам енергетичних потоків, які викликають зорові відчуття:

$$\frac{V(\lambda_1)}{V(\lambda_2)} = \frac{(d\Phi_e)_2}{(d\Phi_e)_1}.$$

Однією з основних світлових величин є **світловий потік**. Це поняття аналогічне до поняття енергетичного потоку випромінювання. Світловий потік виражається як добуток коефіцієнта видності на енергетичний потік випромінювання:

$$\Phi_\lambda = V_\lambda \Phi_e.$$

Введемо поняття *точкового джерела світла*. Під ним розуміють джерело, розмірами якого можна нехтувати порівняно з відстанню від нього до приймача енергії. Світлова енергія в цьому випадку поширюється від джерела вздовж прямих ліній, що виходять із точкового джерела, а хвильовий фронт для ізотропного середовища буде сферичним.

Для характеристики точкового джерела вводиться поняття сили світла. Під **силою світла** розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює світловому потоку, що випромінюється точковим джерелом світла через одиничний тілесний кут. Якщо через тілесний кут  $d\Omega$  випромінюється світловий потік  $d\Phi_\lambda$ , то сила світла в даному напрямі дорівнює:

$$I = \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega}.$$

Сила світла може залежати або не залежати від напрямку його поширення. Джерела, сила світла яких не залежить від напрямку поширення, називають *ізотропними* і їхня сила світла дорівнює:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}.$$

Відповідно до закону збереження енергії, оптичні системи не можуть збільшувати світловий потік джерела світла, але з їхньою допомогою можна перерозподіляти світлові потоки в різних напрямках і цим самим збільшувати силу світла в певному напрямі. Прикладом є прожектор, в якому використання сферичних дзеркал значно збільшує силу світла в напрямі осі прожектора і зводить до нуля в інших напрямках.

Одиницею сили світла джерела в системі СІ є *кандела* ( $\text{кд}$ ). Кандела дорівнює силі світла в заданому напрямі джерела, що дає монохроматичне випромінювання частотою  $540 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$ , енергетична

сила світла якого в цьому напрямі складає  $\frac{1}{683} \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ . Це основна фотометрична одиниця. Вона реалізується за допомогою світлового еталону.

Одиницею світлового потоку є *люмен* ( $\text{лм}$ ). Один люмен – це фізична величина, яка чисельно дорівнює світловому потоку, що випромінюється ізотропним джерелом із силою світла в одну канделу всередині тілесного кута в один стерadian.

Для джерел скінченних розмірів сила світла є недостатньою характеристикою, оскільки кожний елемент  $d\sigma$  поверхні джерела випромінює світловий потік  $d\Phi$  у межах тілесного кута  $d\Omega$ . Тоді з двох джерел, які випромінюють світло однакової сили, але мають різні розміри, джерело менших розмірів здається яскравішим, оскільки воно забезпечує більшу силу світла з одиниці площі. Тому для таких джерел світла вводиться додаткова характеристика, яка називається **яскравістю**. **Яскравістю** поверхні джерела в деякому напрямі називають величину, що дорівнює відношенню сили світла елемента поверхні джерела до площі проекції цього елемента на вибраний напрям випромінювання (рис. 4):

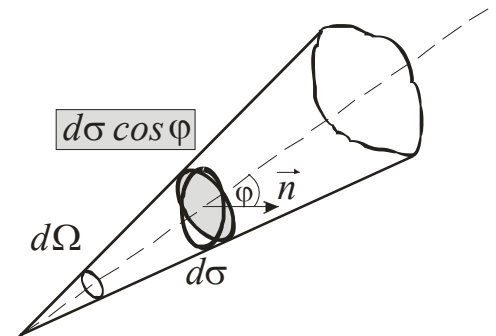
$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega d\sigma \cos \varphi} = \frac{I}{d\sigma \cos \varphi},$$

де  $d\Phi$  – світловий потік, що випромінює елемент  $d\sigma$  поверхні джерела всередині тілесного кута  $d\Omega$ ;  $d\sigma \cos \varphi$  – проекція елемента  $d\sigma$  на напрям випромінювання;  $I$  – сила світла від елемента  $d\sigma$  поверхні джерела;  $\varphi$  – кут між нормаллю  $\vec{n}$  до елемента  $d\sigma$  й напрямом випромінювання.

У загальному випадку яскравість залежить від напрямку поширення світла. Проте існують джерела світла, для яких яскравість не залежить від напрямку поширення світла, тобто яскравість таких джерел є сталою величиною. Такі джерела називають *ламбертовими*, оскільки для них виконується *закон Ламберта*: сила світла  $I_\varphi$  пропорційна косинусу кута  $\varphi$  між нормаллю та певним напрямом і найбільша в напрямі нормалі до поверхні:

$$I_\varphi = I_0 \cos \varphi,$$

де  $I_0$  – сила світла в напрямі нормалі до поверхні. До ламбертових джерел належать Сонце, абсолютно чорне тіло, матове скло.



Мал. 4. Елемент поверхні джерела світла

Одиницею яскравості в системі СІ є кандела на квадратний метр ( $\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ ). Це яскравість плоскої поверхні джерела, сила світла якої в нормальному напрямі дорівнює одній канделі з квадратного метра. Людське око здатне реагувати на дуже малу яскравість близько  $10^{-6} \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$  (яскравість Сонця в безхмарний день дорівнює  $1,5 \cdot 10^9 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$ ).

Джерела світла скінчених розмірів характеризуються, крім яскравості, ще й величиною, яку називають світністю. **Світністю** джерела називають фізичну величину, яка визначається відношенням світлового потоку  $d\Phi$  від елемента поверхні джерела до площі цього елемента  $d\sigma$ :

$$M = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Одиницею світності в системі СІ є люмен на квадратний метр ( $\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$ ). Оскільки мова йде про світну поверхню і одиниця світності характеризує світловий потік, що випромінюється елементом цієї поверхні, то люмен на квадратний метр слід розуміти як люмен з квадратного метра. Отже, сила світла, яскравість та світність є характеристиками джерела світла.

Для кількісної оцінки освітлення поверхні, на яку падає світловий потік, вводиться поняття освітленості. **Освітленість** – це фізична величина, яка чисельно дорівнює світловому потоку, що падає на одиницю площі поверхні:

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

Освітленість поверхні, на яку падає світловий потік від точкового джерела світла, можна знайти за формулою:

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

де  $I$  – сила світла джерела;  $r$  – відстань від джерела до поверхні;  $\varphi$  – кут між зовнішньою нормаллю до освітлюваної поверхні і напрямом світлового потоку (кут падіння), що визначається віссю конуса, в межах якого поширюється світловий потік.

Освітленість являє собою фотометричну величину, яка характеризує тільки освітлювальну поверхню, тобто вона не є характеристикою джерела світла. Одиницею освітленості в системі СІ є *люкс (лк)*. Освітленість в один люкс – це освітленість, що створена світловим потоком в один люмен, який рівномірно розподілений на площі в один квадратний метр. У студентських аудиторіях на столах і чорних дошках освітленість має бути не менше за 75 лк. Під прямими променями Сонця в середніх широтах освітленість досягає  $10^5$  лк, а в похмурий день на відкритому місці – 1000 лк. У приміщенні в похмурий день освітленість біля вікна дорівнює 60-100 лк. Повний Місяць створює освітленість на відкритому місці 0,2 лк, а зоряне небо (без Місяця) – 0,0003 лк.

Світлові величини вимірюються спеціальними оптичними приладами, які називаються **фотометрами**. За принципом реєстрування випромінювання вони поділяються на *візуальні (суб'єктивні)* і *об'єктивні*. У візуальних фотометрах використовується здатність ока порівнювати яскравість двох сусідніх поверхонь. Світлові промені, що випромінюються двома різними джерелами світла однакового спектрального складу, викликають в оці однакові відчуття яскравості тоді, коли в око від цих джерел переноситься однакова енергія. Саме цей факт лежить в основі дії так званих візуальних фотометрів однакової яскравості.

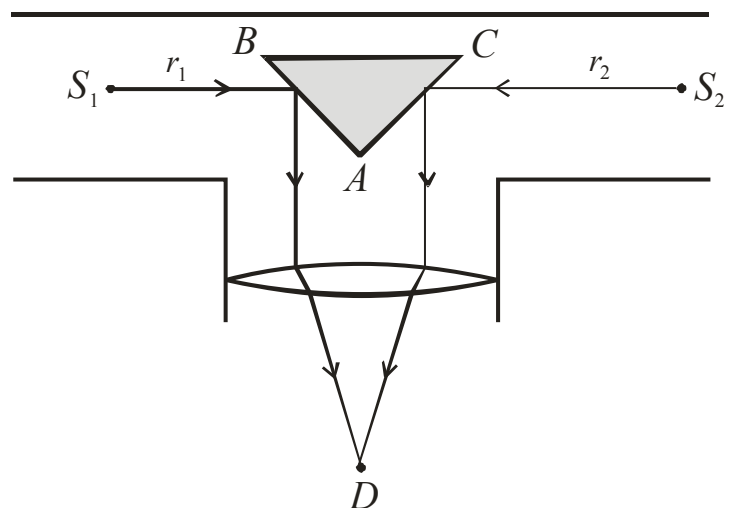


Рис.5. Будова візуального фотометра

Розглянемо принцип дії найпростішого візуального фотометра (рис. 5.). Еталонне джерело світла  $S_1$ , сила світла  $I_1$  якого є відомою, розташоване на відстані  $r_1$  від грані  $AB$  відбиваючої тригранної призми  $ABC$ . Джерело світла  $S_2$ , силу світла якого треба визначити, переміщують по відношенню до грані  $AC$  призми, наближаючи або віддаляючи від неї. Уся система знаходиться всередині  $T$  – подібного корпусу. Око спостерігача фіксує освітленість граней  $AB$  і  $AC$  в точці  $D$ . Якщо освітленість обох поверхонь стає однаковою, тобто кожне із джерел посилає на одиницю площі граней однакові світлові потоки, фіксують відстань  $r_2$ . На основі рівності освітленостей  $E_{AB} = E_{AC}$  і закону освітленості записують співвідношення:

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2},$$

з якого для відомих  $I_1$ ,  $r_1$  і  $r_2$  знаходять шукану силу світла  $I_2$  джерела.

В об'єктивних фотометрах приймачем випромінювання є фотоелементи, фотопомножувачі, термоелементи. Їх поділяють на прилади для вимірювань у білому світлі і в монохроматичному. Прилади для вимірювань у монохроматичному світлі називають *спектрофотометрами*. В об'єктивній фотометрії використовують також фотографічні методи, суть яких полягає в тому, що почорніння фото чутливого шару пропорційне величині енергії випромінювання, що падає на фотопластинку. Об'єктивні фотометри дають змогу вимірювати інтенсивність випромінювання за межами видимого діапазону.

Для вимірювань освітленості застосовують об'єктивні фотометри з фотоелементом, які градуують за допомогою еталонних ламп. Основною частиною цих приладів є фотоелементи, які з'єднані з чутливими гальванометрами магнітоелектричної системи. Такі прилади називають *люксметрами*.

**5. Висновки.** В даній лекції розглянуті питання пов'язані з фізикою хвиль, а саме з визначенням хвильових процесів і рухів, інтерференції і дифракції світла, елементи фізичної оптики (геометрична і хвильова оптика), проведений аналіз оптичних систем. Засвоєння цих фізичних явищ і законів, методів фізичного дослідження, є базою при подальшому вивченні спеціалізованих дисциплін. Формування правильного розуміння границь застосовності фізичних понять, законів, теорій дозволить оцінювати ступінь вірогідності результатів, отриманих за допомогою експериментальних методів дослідження. Навчання побудові математичних моделей фізичних явищ, а також їхнього аналізу на основі аналітичних рішень і чисельного експерименту дозволить курсантам набути стійких навичок роботи за фахом.