

## Тема: ВІДОМОСТІ З ГЕОМЕТРИЧНОЇ ОПТИКИ

### 1. Загальні відомості з геометричної оптики

Геодезичні прилади мають у своєму складі досконалі оптичні системи, теорія яких ґрунтується на використанні різноманітних властивостей світла. В основу теорії покладено закони та положення геометричної оптики. Правильно експлуатувати ці складні оптично-механічні прилади може спеціаліст, який має достатні знання з геометричної оптики.

*Оптика* – наука про світло, в якій прийнято за основу поширення світла як електромагнітних хвиль. Вона вивчає різноманітні явища, що виникають під час перенесення енергії світла, а саме: дифракція, інтерференція, поляризація тощо. Проте численні оптичні явища можна розглядати, уявляючи, що оптичне випромінювання поширюється вздовж нормалей до поверхні хвиль, які називають променями. Розділ оптики, в основу якого покладено такі уявлення, називають геометричною або променевою оптикою. У геометричній оптиці прийнято, що джерелом світла є точка, від якої енергія світла поширюється променями в усі боки. *Промінь світла* – це пряма, що є нормаллю до фронту хвилі світла.

Таке уявлення про випромінювання світла є дещо спрощеним, проте воно дає можливість значно простіше, але з достатньою точністю та строгістю подати принципи дії оптичних систем на основі законів геометричної оптики. Геометрична оптика вивчає проходження променів світла оптичними системами, тому вона має велике значення для розуміння та засвоєння будови та дії цих систем у геодезичних приладах.

Промені світла, що розходяться в усі боки від джерела світла – *точки*, утворюють необмежений пучок, який можна обмежити, якщо на шляху променів встановити непрозору платівку з отвором. Пучок, промені якого перетинаються в одній точці, називають *гомоцентричним*, а точку перетину – *центром пучка*. Розрізняють *збіжні* та *розбіжні* гомоцентричні пучки. Якщо джерело світла віддалене у нескінченність, промені, що виходять з нього вузьким пучком, вважають паралельними.

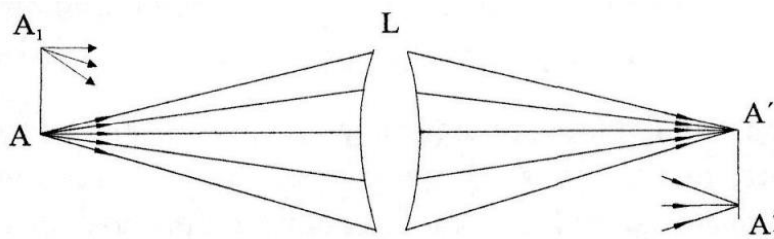


Рис. 1. Гомоцентричний пучок променів.  
Дійсне стигматичне зображення

Завдання будь-якої оптичної системи  $L$  (рис. 1) полягає у перетворенні одного гомоцентричного пучка в інший. Наприклад, промені, що виходять з центра  $A$  гомоцентричного пучка, збігаються у центрі  $A'$  іншого гомоцентричного пучка. Центр пучка  $A$  називають *предметом*, центр пучка  $A'$  – його *зображенням*, а простір, у якому розташовано предмет, тобто ліворуч від оптичної системи  $L$  – *простором предметів*, а простір, у якому знаходиться його зображення, тобто праворуч від оптичної системи  $L$  – *простором зображень* відповідно. Зокрема, відрізок  $AA_1$  та його зображення  $A'A_1$  необхідно розглядати як сукупність окремих точок. Якщо б джерелом світла була точка  $A'$ , то точка  $A$  була б її зображенням. Такі дві точки ( $A$  і  $A'$  або  $A'_1$  і  $A_1$ ) називають *спряженими* відносно оптичної системи. Кожному променю, що спрямовується до оптичної системи з простору предметів, відповідає його продовження у вигляді заломленого променя у просторі зображень. Як і точки, промені називають *спряженими*. Якщо гомоцентричний пучок променів світла після проходження оптичної системи зберігає гомоцентричність, то зображення центра пучка називають *точковим*, або *стигматичним*. У геометричній оптиці і в оптичних системах геодезичних приладів найчастіше враховують промені, що проходять поблизу головної оптичної осі системи, паралельно до осі або під малими кутами до неї. Такі промені та їхні пучки називають *параксіальними*, а саму оптичну систему *параксіальною*.

## 2. Закони геометричної оптики

З дослідження оптичних явищ у природі та досвіду встановлені закони, на які спирається теорія геометричної оптики, а саме:

- закон прямолінійного поширення світла в однорідному середовищі;
- закон незалежного поширення пучків світла;
- закон відбиття світла;
- закон заломлення світла на межі двох прозорих середовищ.

**Закон прямолінійного поширення світла** формулюють так: *в однорідному середовищі світло поширюється прямолінійно, тобто в однорідному та ізотропному середовищі світло між двома точками поширюється по прямій, що з'єднує ці точки*. На основі закону прямолінійного поширення світла пояснюють явища тіні та півтіні, затемнення Сонця та Місяця; виконують всі високоточні астрономо-геодезичні спостереження. Винятком із закону є дифракція, тобто обминання світлом малих отворів, щілин та малих перешкод. Явище дифракції досліджує, як вказано вище, оптика, що розглядає світло як поширення електромагнітних хвиль.

Землю оточує неоднорідна за густиною атмосфера, у приземному прошарку якої виконують до 90 % всіх геодезичних вимірювань. Внаслідок неоднорідності

атмосфери за густиною, в результаті зміни її показника заломлення на шляху променя світла у зв'язку із зміною температури, тиску, вологості, світло в атмосфері поширюється просторовими кривими. Викривлення променів світла у атмосфері називають атмосферною рефракцією. Врахування впливу рефракції на геодезичні вимірювання є складним завданням фізики та геодезії.

**Закон незалежного поширення пучків світла** у геометричній оптиці говорить, що *у потоці світла або пучку окремі пучки або промені відповідно не впливають один на одного і поширюються незалежно так, ніби інших пучків або променів не існує*. Дія пучків, що збігаються в одній точці, складається. Коли два пучки мають одне джерело випромінювання, але проходять різні шляхи, тобто доходять певної точки у різних фазах, їхня незалежність порушується. Тоді спостерігають явище інтерференції світла.

**Закон відбиття світла** стверджує: *коли пучок променів падає на поверхню, що є межею поділу двох середовищ, одна частина світла відбивається від цієї поверхні, а інша частина заломлюється і проходить в інше середовище*. Якщо відбивна поверхня шорстка, відбиття називають *дифузним або розсіяним*, а відбиті промені поширюються в усіх напрямках. Якщо відбивна поверхня рівна, гладка, полірована, відбиття називають *дзеркальним*, а відбиті промені мають певний напрямок (рис. 2).

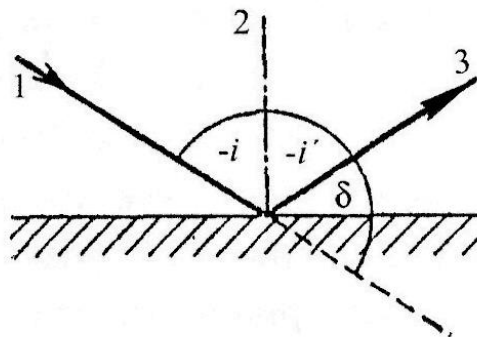


Рис. 2. Відбиття променя світла дзеркальною поверхнею:

1 – промінь, що падає; 2 – перпендикуляр до відбивної поверхні у точці падіння променя; 3 – відбитий промінь

Закон відбиття стосується дзеркальних поверхонь. Його записують так: промінь, що падає (1), відбитий промінь (3) та нормаль (2) до відбивної поверхні у точці падіння променя розміщені в одній площині; кути падіння  $-i$  та відбиття  $i'$  дорівнюють один одному за абсолютним значенням ( $|i| = |i'|$ ), але мають різні знаки. Додатним вважають кут, якщо поворот нормалі до променя виконують за напрямком руху стрілки годинника (2-3 – кут  $i'$ ). Якщо цей поворот виконують проти напрямку руху стрілки годинника, кут вважають від'ємним (2-1 – кут  $-i$ ).

Закон заломлення світла на межі двох прозорих середовищ стосується тієї частини світла, що падає на поверхню, яка долає її та проникає з одного середовища в інше. Після переходу в інше середовище, наприклад, з повітря у скло (рис. 3, а), або із скла у повітря (рис. 3, б) промінь змінює початковий напрямок, тобто заломлюється. Зміна напрямку променів не залежить від того, йдуть вони "прямо", чи "зворотно" – в обох випадках хід променів буде таким самим. Після переходу з оптичного середовища, що має меншу густину, зокрема, повітря, до оптичного середовища, що має більшу густину – скла (рис. 3, а) промінь після заломлення наближається до напрямку нормалі у точку падіння променя, а після переходу променя із середовища з більшою густиною – скла – до середовища із меншою густиною – повітря він (рис. 1.3, б) відхиляється від напрямку нормалі. У першому випадку ( $|i'| > |i|$ ), а в другому – ( $|i'| < |i|$ ).

Коли промені світла переходять із одного середовища в інше, їхня швидкість змінюється. Після переходу із середовища з меншою густиною до середовища з більшою густиною швидкість поширення світла зменшується (рис. 1.3, а) і навпаки, коли світло після середовища з більшою густиною потрапляє у середовище з меншою густиною (рис. 1.3, б), швидкість його збільшується. У геодезії для розрахунків приймають, що швидкість поширення світла у вакуумі  $c = 299792,5 \text{ км/с}$ .

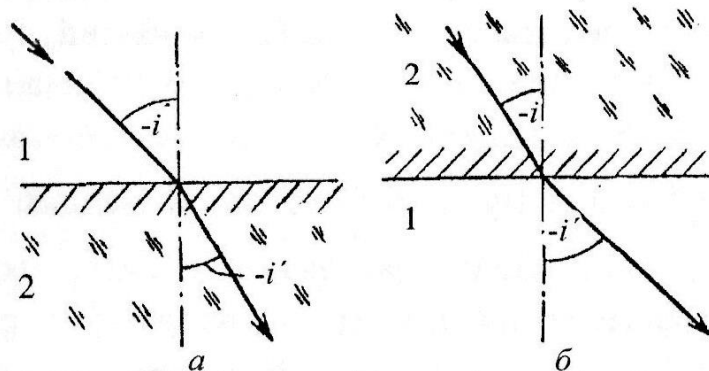


Рис. 3. Заломлення променя світла: а – промінь переходить з повітря до скла; б – промінь переходить із скла до повітря; 1 – повітря; 2 – скло; 3 – перпендикуляр до поверхні поділу середовищ у точці падіння променя

Відношення швидкості поширення світла у вакуумі  $c$  до швидкості поширення  $v$  його у будь-якому середовищі називають показником заломлення, або абсолютним показником заломлення

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Цей самий вираз можна записати

$$n = \frac{\sin i_0}{\sin i} \quad (2)$$

тобто показник заломлення для деякого середовища, наприклад, повітря дорівнює відношенню синуса кута падіння променя світла у вакуумі  $i_0$  до синуса кута заломлення його у повітрі  $i$ .

Для іншого середовища із показником заломлення  $n'$ , наприклад, скла, залежність (2) набере вигляду

$$n' = \frac{\sin i_0}{\sin i'} \quad (3)$$

де  $i'$  – кут заломлення променю світла у склі.

Коли поділити почлено залежність (3) на залежність (2), одержимо

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{n'}{n} \quad (4)$$

Або

$$n \cdot \sin i = n' \cdot \sin i' \quad (5)$$

Вирази (4) та (5) описують **закон заломлення світла**, який формулюють так: *промінь світла, що падає, нормаль до поверхні поділу двох середовищ у точці падіння променя та заломлений промінь розташовані в одній площині, а добуток показника заломлення середовища, з якого падає промінь, на синус кута його падіння дорівнює добуткові показника заломлення середовища, в якому промінь заломився, на синус кута заломлення променя.*

Для параксіальної оптики вираз (5) можна записати так

$$ni = n'i'. \quad (6)$$

Показник заломлення повітря за температури  $t = +20^\circ \text{C}$  дорівнює  $n_{\text{П}}=1,000274$ . Зазвичай приймають  $n_{\text{П}}=1,0003$ , а для розрахунків оптичних систем вважають  $n_{\text{П}}=1$ . Показник заломлення оптичного скла має граничні межі 1,47... 1,92.

### **3. Повне внутрішнє відбиття**

Відповідно до закону заломлення, згідно із залежністю (1.4), значення виразів  $\sin i \frac{n}{n'}$  та  $\sin i' \frac{n'}{n}$  не можуть бути більшими від 1, оскільки  $\sin i'$  та  $\sin i$  не перебільшують 1.

Під час переходу світлових променів з середовища із більшою оптичною густиною, наприклад, скла, до середовища з меншою густиною, наприклад, повітря, частина енергії світла розсіюється у повітрі (рис. 4, промінь  $E_1S'$ ), а решта відбивається поверхнею скла (рис. 4, промінь  $E_1S_1'$ ). Вище зазначалось, що після переходу із середовища з більшою густиною до середовища з меншою густиною заломлений промінь відхиляється від нормалі на більший кут, ніж той, що падає ( $|i'_1| = |i_1|$ ), тобто наближається до поверхні, що є межею поділу двох

середовищ. Якщо збільшувати кут падіння, зрештою настане такий момент, коли за деякого значення кута падіння  $i_2$  заломлений промінь не вийде до повітря, а пошириться поверхнею скла (рис. 4, промінь  $E_2S_2$ ). У такому разі кут заломлення  $i'_2 = 90^\circ$ , а  $\sin i'_2 = 1$ . Згідно із залежністю (4) синус цього граничного кута падіння дорівнює оберненому значенню показника заломлення, наприклад, скла, тобто  $\sin i_2 = \frac{1}{n}$ . Для різноманітних сортів скла, що мають показник заломлення від 1,47 до 1,92, кут  $i_2$  змінюється від  $43^\circ$  до  $31^\circ 30'$  відповідно. Кут  $i_2$  називають кутом повного внутрішнього відбиття.

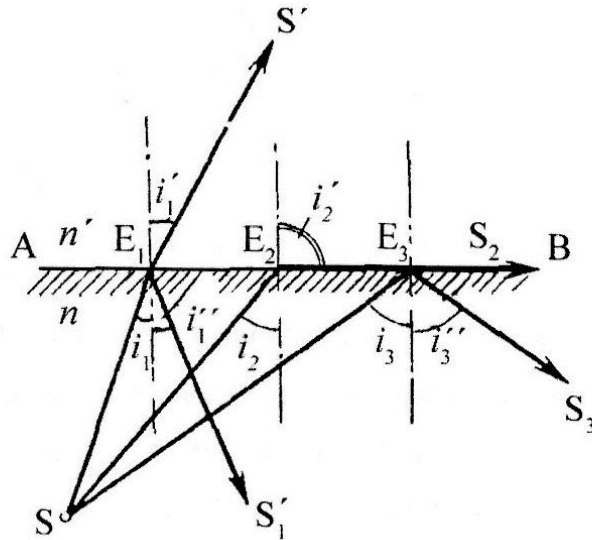


Рис. 4. Заломлення променів і явище повного внутрішнього відбиття

Якщо кут падіння є більшим від  $i_2$ , наприклад,  $i_3$ , світло взагалі не перейде зі скла у повітря, а відіб'ється від поверхні скла. Це явище називають *повним внутрішнім відбиттям*. Воно спостерігається тоді, коли промені світла, що проходять у середовищі із більшою оптичною густиною, потрапляють на поверхню поділу цього середовища із середовищем з меншою густиною, а кут падіння променів є більшим від кута повного внутрішнього відбиття.

#### 4. Оптичне скло

Основним матеріалом для оптичних деталей геодезичних приладів слугує некольорове оптичне скло. Від звичайного технічного скла воно відрізняється однорідністю, прозорістю, відсутністю бульбашок повітря, свілей тощо. Оптичне скло є ізотропним, тобто має однакові властивості в усіх напрямках, йому притаманна сталість оптичних констант у всій масі скла, зокрема показників заломлення для різних довжин хвиль та похідних від них.

У геодезичному приладобудуванні застосовують два основні види оптичного скла: крон і флінт. *Крон* – твердіше скло, що містить до 60 %  $SiO_2$  (пісок кварцу). Крон легший, має яскравий колір спектра і загалом менший

показник заломлення (1.47...1.66). *Флінт* – м'якше скло, що містить до 40 %  $SiO_2$ . Флінт – важке скло, має темніший колір спектра і загалом більший показник заломлення (1.63...1.76). Обидва види скла поділяють на типи, а типи – на марки, які відрізняються одна від одної хімічним складом, значенням показника заломлення та середньою дисперсією. Як основний показник заломлення для видимої частини спектра прийнято показник заломлення світла, що має довжину хвилі 546,07 Нм (Na), який позначають  $n_c$  – жовтий промінь. Різницю показників заломлення для лінії спектра  $F'$  і  $C'$  називають середньою дисперсією  $n_{F'}$  і  $n_{C'}$  відповідно.

Згідно з каталогами та стандартами випускають загалом більше від сотні марок некольорового оптичного скла. У геодезичному приладобудуванні найчастіше застосовують такі марки оптичного скла, наприклад, легкі крони: ЛК5, ЛК105, ЛК6, ЛК7; крони: К2, К8, К108, К19, К119; баритові крони БК6; важкі крони: ТК2, ТК14, ТК16, ТК20, ТК21, ТК23; надважкі крони; крон-флінти: КФ; КФ104; легкі флінти: ЛФ5, ЛФ105; флінти: Ф1, Ф4, Ф6; важкі флінти: ТФ1, ТФ3, ТФ5, ТФ7; надважкі флінти: НТФ; особливі флінти ОФ; важкі баритові флінти ТБФ.

Крони відрізняються один від одного здебільшого вмістом окису барію, наприклад, у кроні (К) його 3 %, а у важкому кроні (ТК) більше за 30 %. Флінти відрізняють один від одного вмістом окису свинцю: у крон-флінті (КФ) його до 15 %, а у важкому флінті (ТФ) більше ніж 50 %.

Велика кількість марок оптичного скла дає можливість конструювати складні оптичні системи геодезичних приладів високої якості, які позбавлені недоліків та спотворень, притаманних оптичним системам.

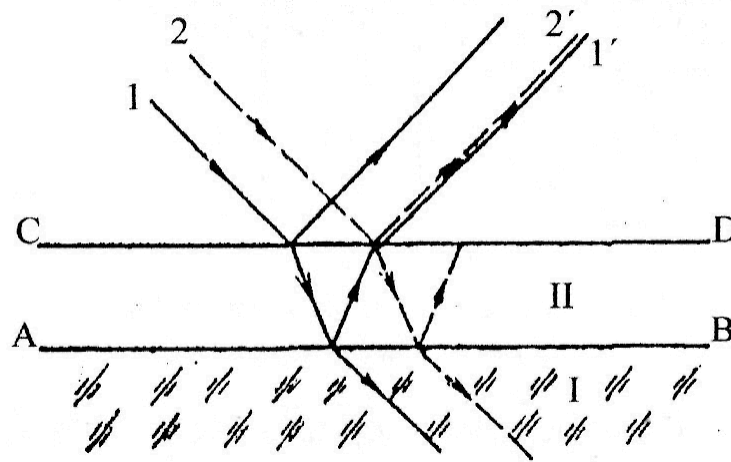
### ***5. Втрати світла в оптичній системі. Просвітлення оптики***

Енергія потоку світла, що проходить оптичною системою, частково поглинається нею, а частково відбивається. Встановлено, що під час додання світлом однієї заломлювальної поверхні скла відбивається, тобто втрачається, від 4,5 до 9 % енергії світла. Оптичні системи геодезичних приладів складаються звичайно з великої кількості оптичних деталей, тобто мають велику кількість заломлювальних поверхонь. Якщо прийняти, наприклад, що оптична система містить п'ять лінз, тобто має десять заломлювальних поверхонь, а на подолання однієї такої поверхні витрачається 5 % світлового потоку, то коефіцієнт проходження світла через зазначену систему становить  $0,95^{10} = 0,60$ , тобто 60 %. Загалом втрати енергії світла в оптичних системах геодезичних приладів можуть досягати 70 % і більше.

Щоб зменшити втрати енергії потоку світла, що проходить через оптичну систему, вдаються до так званого просвітлення оптики. Поверхні оптичних деталей вкривають тонким шаром двоокису титану або кремнезему. Показник

заломлення шару покриття  $n_{ш}$  менший від показника заломлення скла  $n$ , а саме  $n_{ш} = \sqrt{n}$ . Товщина шару покриття становить близько чверті довжини хвилі світла.

Фізична сутність просвітлення оптики полягає в інтерференції променів, відбитих від передньої та задньої поверхонь покриття, тобто інтерференції у тонких плівках. На *рис. 5*: *I* – скло, *II* – плівка шару покриття. Промінь *I* падає на поверхню плівки *CD*, проходить її, частково відбивається від поверхні скла *AB* і виходить у повітря як промінь *I'*, що збігається з напрямком променя, який частково відбивається від поверхні *CD*. У потоці світла, що падає на поверхню *CD*, завжди є промінь *2*, який частково відбивається від неї у напрямку відбитого променя *2'* (*I'*). Промені *2'* та *I'* інтерферують. Товщину шару покриття та його показник заломлення підбирають так, щоб різниця ходу променів *I'* і *2'* була такою, за якої вони згасять один одного. Сумарна інтенсивність відбитого світла буде близькою до нуля. Зменшення енергії відбитого світла призведе до збільшення енергії світла, що спрямовується у скло, тобто практично вся енергія світла буде проходити через його заломлювальну поверхню.



*Рис. 5. Інтерференція у тонких плівках просвітлення*

Просвітлення оптики зменшує втрати світла на поверхні заломлення до 0,1... 1 %. Для наведеного вище прикладу проходження світла оптичною системою з десятьма заломлювальними поверхнями після просвітлення її деталей вона пропустить не 60 %, а 90 % потоку світла. Всі оптичні деталі геодезичних приладів просвітлені, а їхні поверхні мають фіолетове забарвлення.