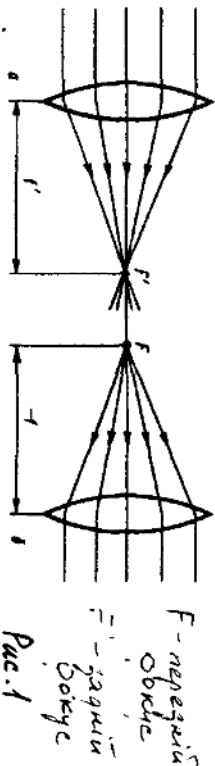


Кардинальні точки та кардинальні площини (метод Гауса)

Розрізняють 6 (три пари) кардинальних точок та 6 (три пари) кардинальних площин. Теорія Гауса (1841р.) встановлює кардинальні точки та кардинальні площини, введення яких повністю описує всі властивості оптичної системи і дозволяє користуватись нею, не розглядаючи реального ходу променів в самій системі.

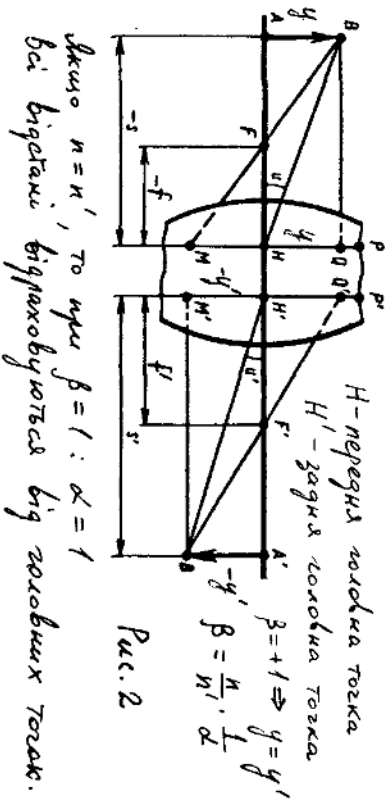
Фокальні точки (фокуси) та фокальні площини



Головні точки та головні площини

Спряжені площини з лінійними (поперечними) коефіцієнтом збільшення $\beta = +1$, називаються головними площинами. Точки перетину головних площин із оптичною віссю називаються головними точками.

Метод Гауса (метод головних і головних) має ту перевагу, що завжди є можливість знайти головні площини та головні точки для будь-якої системи. Така процедура виготовляється



Вузлові точки та вузлові площини

Дві спряжені точки на оптичній осі, для яких кутове збільшення $\alpha = +1$, називаються вузловими точкам N_1, N_2 , а площини, які проходять через такі точки перпендикулярно до головної оптичної осі, називаються вузловими площинами H_1, H_2 .

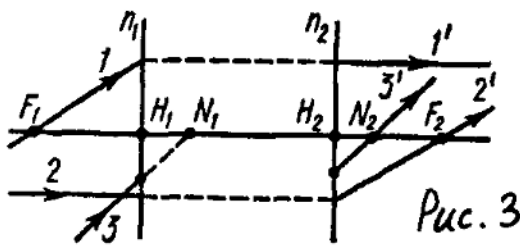
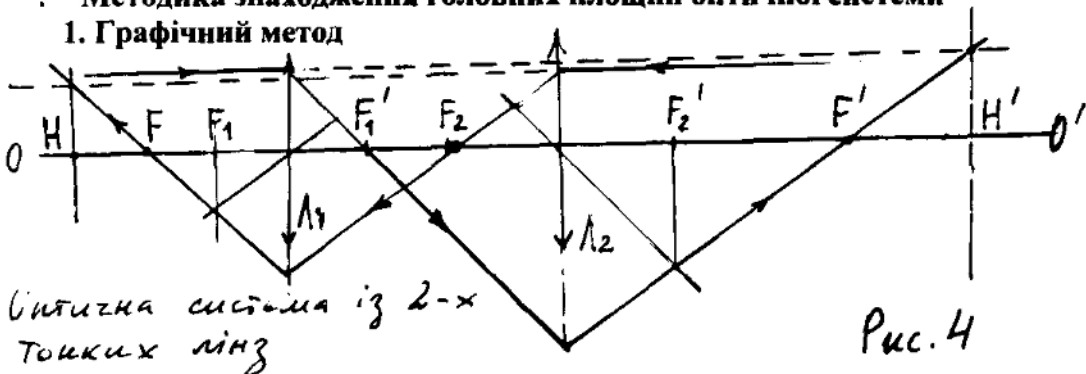


Рис. 3

Промінь (промінь 3 на рис.), що попадає в оптичну систему через вузлову точку (N_1), виходить з оптичної системи через другу вузлову N_2 точку (промінь 3' на рис.) паралельно початковому напрямку падіння

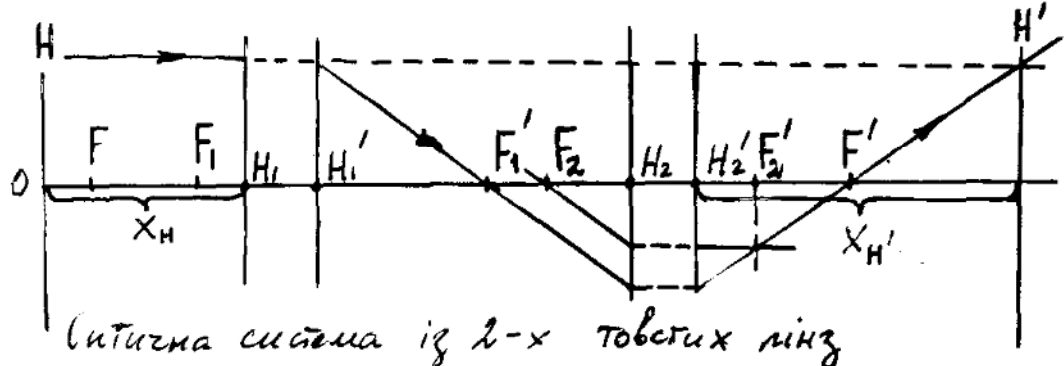
Методика знаходження головних площин оптичної системи

1. Графічний метод



Система з 2-х точкових лінз

Рис. 4



Система з 2-х товстих лінз

Рис. 5

2. Аналітичний метод

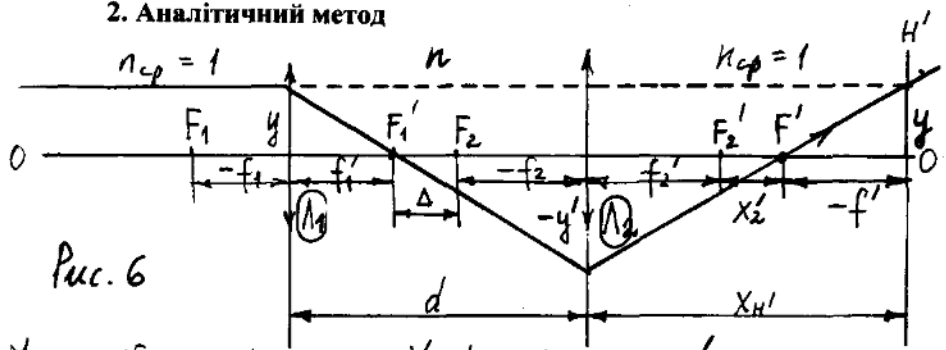


Рис. 6

З подібних трикутників із спільними вершинами F_1' та F' :

$$\frac{y}{f_1'} = \frac{-y'}{\Delta - f_2} ; \quad \frac{y}{-f_1'} = \frac{-y'}{f_2' + x_2'}$$

Звідси маємо:

$$\frac{f_1'}{\Delta - f_2} = \frac{-f_1'}{f_2' + x_2'} \Rightarrow f_1' = \frac{-f_1'(f_2' + x_2')}{\Delta - f_2} \quad (1)$$

Для $L_2 \rightarrow$ Застосуємо формулу Ньютона: $x_2' \cdot \Delta = -f_2 \cdot f_2' \Rightarrow$

$$x_2' = -\frac{f_2 \cdot f_2'}{\Delta} \quad (2); \quad (2) \rightarrow (1):$$

$$\boxed{f_1' = \frac{-f_1'(f_2' - \frac{f_2 \cdot f_2'}{\Delta})}{\Delta - f_2}} \equiv -\frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} \quad (3) \quad \text{Аналогічно:} \quad \boxed{f = \frac{f_1 \cdot f_2}{\Delta}}$$

З рис. видно, що $d = f_1' + \Delta - f_2$

$$\Delta = d - f_1' + f_2 \quad (4); \quad (4) \rightarrow (3):$$

$$\Phi = \frac{1}{f_1'} = \frac{-d + f_1' - f_2}{f_1' \cdot f_2'} \equiv -\frac{d}{f_1' f_2'} + \frac{1}{f_2'} - \frac{f_2}{f_1' \cdot f_2'} \quad (5)$$

$$\Phi_1 = \frac{n}{f_1'} = \frac{1}{-f_1} ; \quad \Phi_2 = \frac{1}{f_2'} = \frac{n}{-f_2} \quad (6)$$

$$(6) \rightarrow (5): \quad \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{d}{n} \Phi_1 \cdot \Phi_2$$

При $d=0$: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ - тонка лінза
3 рис. б'язку, що:

$$\begin{aligned} X_H' &= f_2' + X_2' - f_1' = \\ &= f_2' - \frac{f_2' \cdot f_2'}{\Delta} + \frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} = \frac{f_2'}{\Delta} (\Delta - f_2 + f_1') = \frac{d \cdot f_2'}{\Delta} = \\ &= \frac{d}{f_1'} \cdot \frac{f_1' \cdot f_2'}{\Delta} = -\frac{d}{f_2'} \cdot f_1' = -\frac{d}{n} \cdot \frac{\Phi_1}{\Phi} \end{aligned}$$

Для товстої лінзи і для оптич. системи із двох тонких лінз:

$$f' = \frac{1}{\Phi}$$

$$X_H' = -\frac{d}{n} \frac{\Phi_1}{\Phi}$$

Положення передньої головної пл.:

$$X_H = \frac{d}{n} \cdot \frac{\Phi_2}{\Phi}$$

Формула товстої лінзи

На рис. 2 із подібних трикутників з спільними вершинами F та F' :

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{-s+f}; \quad \frac{-y'}{y} = \frac{s'-f'}{f'} \quad (1)$$

$$\frac{f}{s-f} = \frac{s'-f'}{f'} \Rightarrow sf' + s'f = s \cdot s' \quad (2)$$

Поділимо ліву та праву частини (2) на $s \cdot s' \cdot f$:

Через те, що $f' = -f$, маємо

$$A) \quad \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}$$

Формула товстої лінзи

(A) має такий же вигляд, як і формула тонкої лінзи (але відстані відраховуються від H та H' , положення яких не співпадають ні між собою, ні з положенням загальною осі поверхонь лінзи).

Від формули лінзи можна легко одержати (отримати) формулу Гаусса:

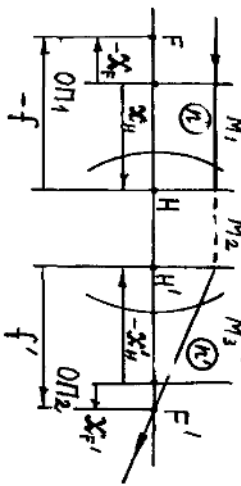
(A) \Rightarrow :

$$\frac{f'}{s'} - \frac{f'}{s} = 1$$

$$f = -f'$$

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad \text{- формула Гаусса}$$

3. Abstraktsiunai sistēma



$M = M_2 \cdot M_2' \cdot M_1'$
 B matrici M_2 :
 $\beta = 1$

OT1, Tā OT2 - cips-
 žēni mūsūnu

B matrici M: $A = \beta$; $B = 0$; $D = \frac{1}{A} = \frac{1}{\beta}$

$A \cdot D - B \cdot C = f \cdot D - 0 \cdot C = 1 \Rightarrow D = 1$

Šīs sistēmas: $C = \Phi = \frac{H'}{f'}$

Takus rādām: $M = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \frac{X_H'}{n'} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \parallel \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{X_H'}{n'} & 1 \end{vmatrix} \parallel \begin{vmatrix} 1 & -\frac{X_H'}{n'} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} =$

$= \begin{vmatrix} 1 + \frac{X_H'}{f'} & \frac{X_H'}{n'} \\ -\frac{H'}{f'} & 1 - \frac{X_H'}{f'} \cdot \frac{n'}{n} \end{vmatrix} \quad (A)$

3(A): $f' = \frac{n'}{C}$ $X_H' = \frac{A-1}{C} \cdot n'$ $X = \frac{1-D}{C} \cdot n$

Jā Tāko, uzo $\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'} \Rightarrow f = -\frac{n}{C}$

Jā Tāko, uzo $X_F = f - X_H$, a $X_{F'} = f' - X_H'$:

$X_F = -\frac{D}{C} \cdot n$ $X_{F'} = \frac{A}{C} \cdot n'$

X - bīgriāns bīg
 nūgūnā pō
 nēpēkūvōi rōn
 mūsūnu

X' - bīgriāns bīg
 gēfēktsēnu t
 pō jākūvōi
 kōnēkūvōi mūsū.

Положення головних площин для різних лінз

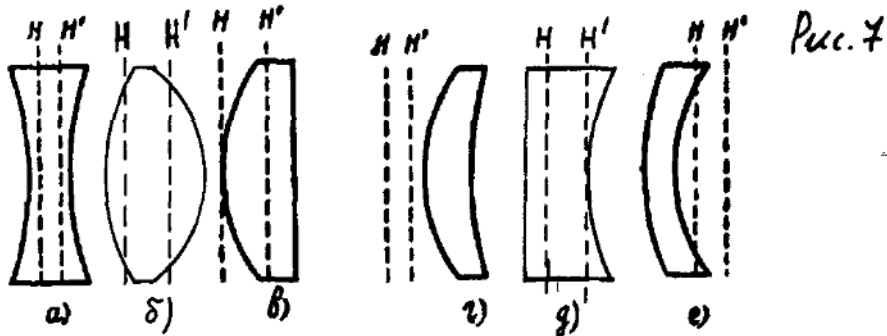
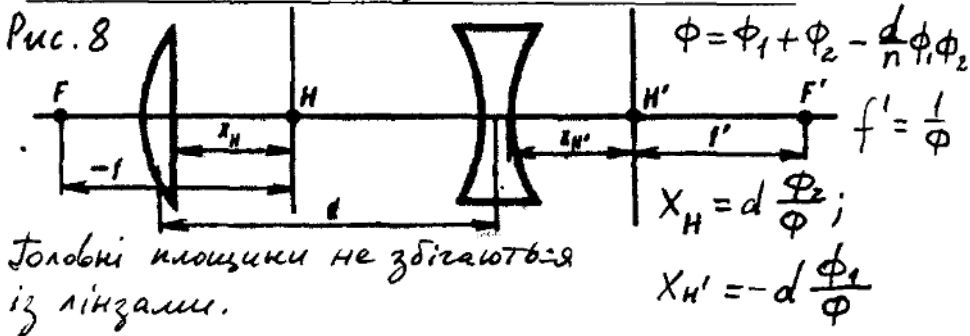
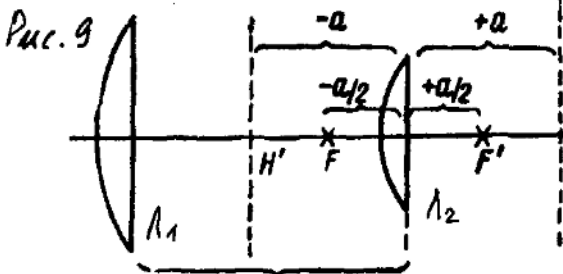


Рис. 7

Система із двох тонких лінз розглядається як товста лінза



Окуляр Гюйгенса



Дано: $d = 2a$
 $f' = a; f_1 = 3a$
Розв'язок:
 $\Phi_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{3a}$
 $\Phi_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{a}$

$f' = -f = \frac{3}{2} a$ $d = 2a$ $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 = \frac{2}{3a}$

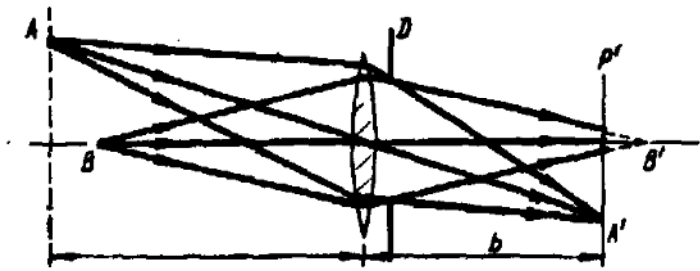
1. Головні площини H та H' помінялись місцями.
2. Пл. H лежить поза системою $X_H = d \frac{\Phi_2}{\Phi} = 2a \cdot \frac{3a}{2a} = 3a$.
3. Пл. H' лежить посереді між лінзами $X_{H'} = -a$.
4. Головні фокуси системи розташовані симетрично відносно L_2 на рівних відстанях $+\frac{a}{2}$ та $-\frac{a}{2}$ від неї.

Діафрагми оптичних систем

Діафрагма (Д) існує в будь-якій оптичній системі (роль Д. може грати оправа лінзи).

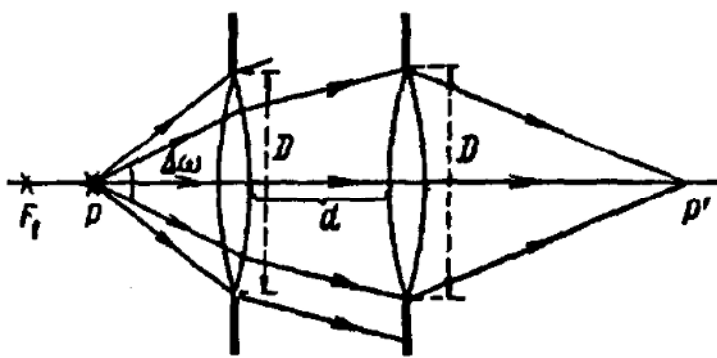
Від величини і положення Д. залежить:

- аберації (якість зображення);
- світлосила оптичної системи;
- поле зору оптичної системи;
- градієнт розподілу освітленості зображення, який сам предмет не має (вільєтування);
- чіткість зображення (глибина різкості та роздільна здатність).

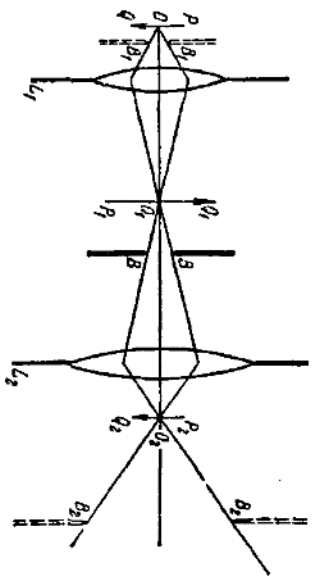


I. Обмеження променів від осьових точок предмета (осьових променів)

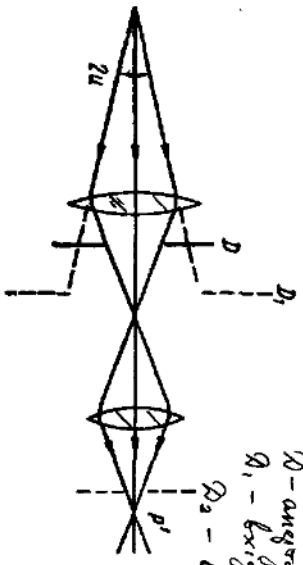
Апертурною (або - діючою) діафрагмою називається діафрагма, яка виконує максимальне обмеження світлового променя, який виходить із точки предмета, що розташована на оптичній осі системи.



$B_2 B_1$ - вхідна зрізка
 $B_2 B_2$ - вихідна зрізка
 D - апертура \mathcal{D} .

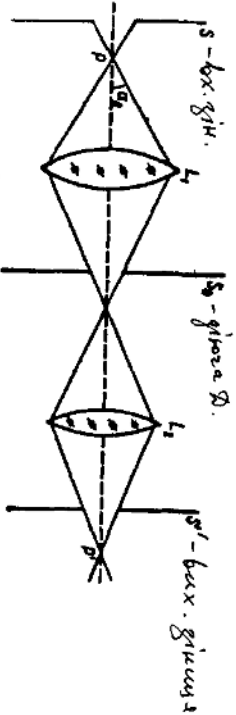


Вхідною зрізкою називається параксильне зображення апертурної діафрагми, яке здійснюється тією частиною оптичної системи, що знаходиться перед апертурною діафрагмою.



D_1 - апертура \mathcal{D}
 D_2 - вхідна зрізка
 D_2 - вихідна зрізка

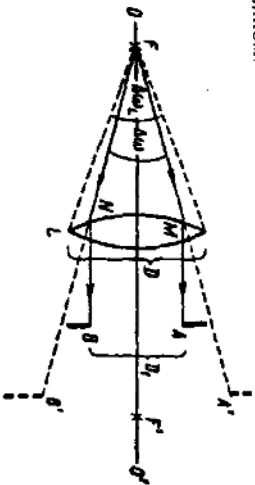
Вихідною зрізкою називається зображення апертурної діафрагми, яке здійснюється тією частиною оптичної системи, що знаходиться після апертурною діафрагмою.



Апертурний кут – кут, під яким із точки перетину оптичної осі із площинною предмету видно радіус вхідної зіниці

Завваження:

1. Вхідна зіниця є зображенням вихідної зіниці, що отримується за допомогою всієї оптичної системи.
2. Якщо апертура діафрагма знаходиться перед оптичною сіткою, то вона співпадає із вхідною зіницею.
3. Якщо апертура діафрагма знаходиться позаду оптичної сіткою, то вона співпадає із вихідною зіницею.
4. Якщо всередині оптичної системи знаходиться декілька діафрагм або оправ лінз, то апертурну діафрагму шукають (визначають) наступним чином:



Три суцільною ви-
користаючи кілька
оптичних систем
неодієково, щоб ви-
хідна зіниця в мене-
рвувалася з оптич.
зіницями із вхідною
зіницею наступної
опт. системи

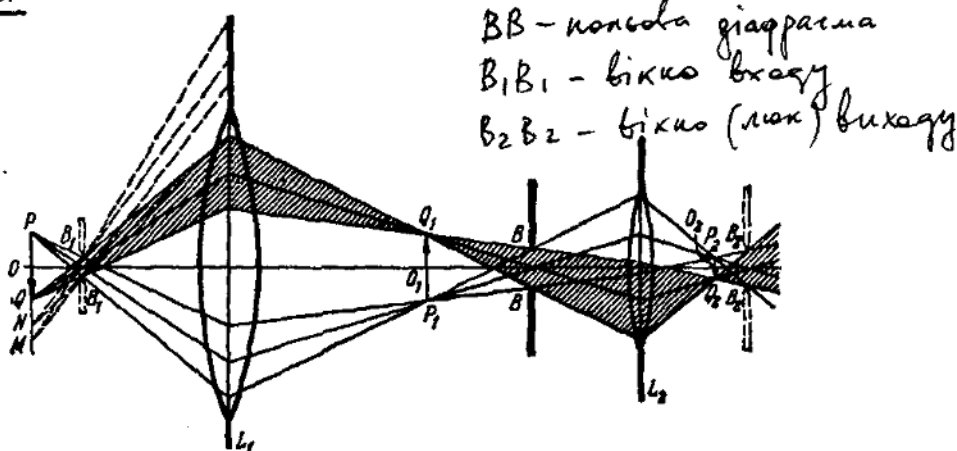
- слід отримати зображення всіх діафрагм (та оправ), які містять оптичну систему;
- апертурною діафрагмою буде та, зображення якої із місця розташування предмета на оптичній осі видно під меншим телесним кутом.
- 5. Для тонкої лінзи вхідна та вхідна зіниці співпадають із оправою самої лінзи.
- 6. Не слід плутати апертурний кут (апертуру) α із числовою апертурою $A = n \cdot \sin \alpha$, де n – показник заломлення.

II. Обмеження променів від несюбових точок предмета

Не від всіх точок предмету промені, що пройдуть вхідну зіницю, пройдуть через оптичну систему.

Полею зору називається найбільша область в площині предмета, точки якої відображаються оптичною системою без помітного послаблення.

Поле зору обмежується діафрагмою поля зору, або польовою діафрагмою.

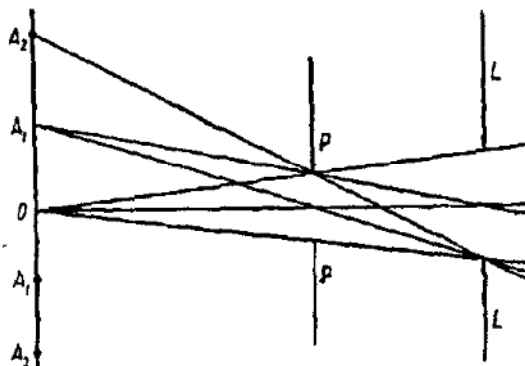


Діафрагма поля зору знаходиться шляхом побудови зображень кожної із діафрагм системи, яке здійснюється частиною оптичної системи, що знаходиться перед діафрагмою. Те із зображень діафрагм, яке із центра вхідної зіниці видно під найбільшим кутом (кутом зору) і буде діафрагмою поля зору, або польовою діафрагмою.

Зображення діафрагми поля зору в просторі предмета називається вікном (або - люком) входу, а в просторі зображень - вікном (люком) виходу.

Люк виходу є зображенням люку входу.

Віньсткування (градієнт розподілу освітленості зображення, який сам предмет не має) виникає в результаті того, що косі (неосьові) промені від предмета частково затемнюються діафрагмою поля зору.



Ступінь віньсткування залежить від відносного розташування люка і зіниці входу, а також площини предмета. В разі, коли площина люка входу збігається із площиною предмета, віньсткування зникає.

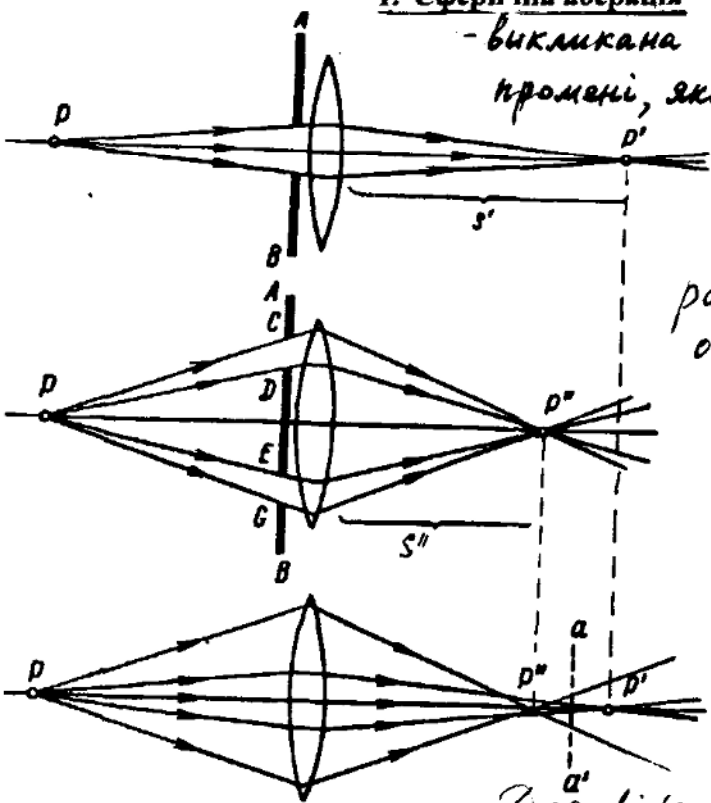
Аберации (викривлення, вади зображень)

Ідеалізації в геом. оптиці: 1) параксіальне наближення; 2) монохроматичність; 3) показник заломлення $n \neq n(\lambda)$; 4) не враховуються хвильові властивості світла (наприклад, дифракція).

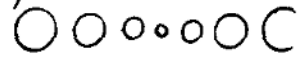
По ДСТУ розрізняють 7 видів абераций:

- 1) сферична (аберація широкого осевого променя); 2) хроматична аберація; 3) кома ; 4) астигматизм нахилених (неосьових) променів; 4) дисторсія; 5) кривина поля зображення; 6 та 7) аберации положення та збільшення (кривина поля зображення).

1. Сферична аберація



- викликана тим, що монохром. промені, які виходять під різними кутами з точки предмета, що розташована на оптичній осі, після заломлення в лінзі не перетинаються в одній точці.



Для додатних лінз $\delta S < 0$

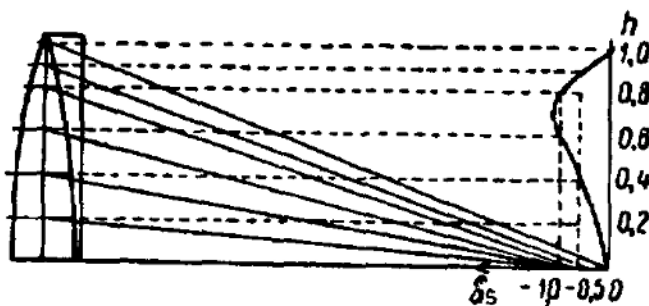
Для від'ємних лінз $\delta S > 0$

$\delta S = S'' - S'$ - поздовжня сферична аберація

Сферична аберація - результат ненапараксіальності променів.

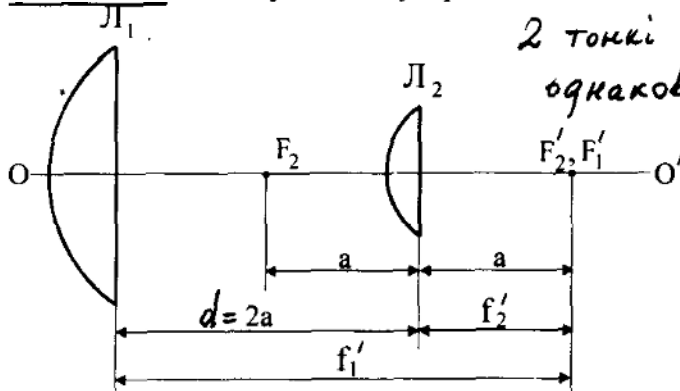
Виправлення сферичної аберції:

1-ий спосіб - застосування складених із різних типів (додатної і від'ємної лінз) оптичних систем. $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 > 0$, скло - однакове.



Завдяки тому, що лінзи мають поздовжні аберції різних знаків, для крайніх променів (див. рис.) аберція скомпенсована повністю.

2-ий спосіб - застосування окуляра Гюйгенса



2 точки збіраючі лінзи з однакового матеріалу.

Якщо $d = \frac{f_1 + f_2}{2}$,

то можна скомпенсувати сферичну аберцію

$f_2 : d : f_1 = 1 : 2 : 3$
або $2 : 3 : 4$

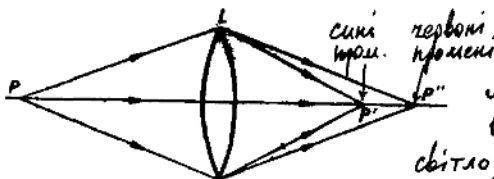
Характеристики ОГ:

$$f_2' = a; \quad f_1' = 3a; \quad d = 2a$$

$$\Phi_1 = \frac{1}{3a}; \quad \Phi_2 = \frac{1}{a}; \quad \Phi = \frac{2}{3a}$$

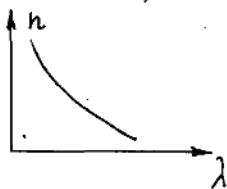
$$X_H = 3a; \quad X_{H'} = -a$$

2. Хроматична аберація

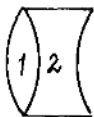


Якщо джерело випромінює біле світло, то зображення буде розмите та по краях зафарбоване.

$$n = n(\lambda); \quad n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \dots \Rightarrow \frac{dn}{d\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^3}$$



Хроматичну аберацію можна уникнути шляхом комбінації дводатної і від'ємної лінзи, зроблених із скла з різних сортів (з різними дисперсіями):



1 - крон (має меншу відносну дисп. $\frac{dn}{d\lambda}$)
 2 - флінт (має більшу величину $\frac{dn}{d\lambda}$).
 Така лінза називається ахроматом (хром. аберації компенсовані). Опт. сила $\Phi > 0$.

Якщо поміняти місцями крон і флінт, то $\Phi < 0$.

Умова ахроматизму:
 (не для обов'язкового вивчення),

Як змінюється фокусна відстань системи при малих змінках показника заломл. $n(\lambda)$?

$$\Phi = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{(n-1)f} \quad (1)$$

$$d\left(\frac{1}{f}\right) = \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \cdot dn \quad (2)$$

$$(1) \rightarrow (2): d\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{dn}{(n-1)f} \Rightarrow \Delta\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{\Delta n}{(n-1)f}$$

Δn береться для крайніх частин видимого спектру:

Для ліній Cd: $\lambda_F = 0.480 \text{ мкм}$; $\lambda_C = 0.644 \text{ мкм}$

Значення n та f беруться для λ із середньої частини спектру $\lambda_e = 0.546 \text{ мкм}$.

$$\Delta \left(\frac{1}{f} \right) = \frac{n_F - n_C}{(n_e - 1) f} \quad (A) \quad \tilde{\nu} = \frac{\Delta n}{n_e - 1} - \text{відносна дисперсія}$$

$(1/\tilde{\nu})$ - коеф. дисперсії (число Аббе).

Для оптичної системи із 2-х тонких лінз (додатної та від'ємної), що дотикаються:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (\Phi = \Phi_1 + \Phi_2)$$

Умова ахроматизації: (система не має хроматичної аберації \equiv опт. сила системи Φ не залежить від зміни f_1 та f_2 при зміні спектрального складу падаючого світла):

$$d \left(\frac{1}{F} \right) = d \left(\frac{1}{f_1} \right) + d \left(\frac{1}{f_2} \right) = 0$$

$$\Delta \left(\frac{1}{F} \right) = \Delta \left(\frac{1}{f_1} \right) + \Delta \left(\frac{1}{f_2} \right) = 0$$

З урахуванням (A):

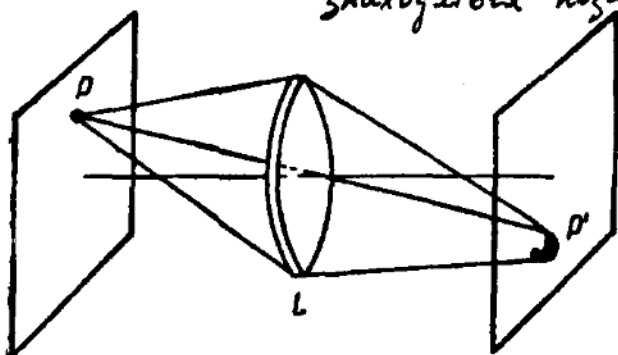
$$\frac{n_{F1} - n_{C1}}{(n_{e1} - 1) \cdot f_1} = \frac{n_{F2} - n_{C2}}{(n_{e2} - 1) \cdot f_2} = 0$$

$$(1) \begin{cases} \tilde{\nu}_1 \cdot \Phi_1(e) - \tilde{\nu}_2 \cdot \Phi_2(e) = 0 - \text{умова ахроматизму} \\ \Phi_1(e) + \Phi_2(e) = \Phi(e) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Така лінза має фокуси, що} \\ \text{для синіх і червоних променів} \\ \text{збігаються} \end{array}$$

$$\text{Уз (1): } \Phi_1 = \frac{\tilde{\nu}_2}{\tilde{\nu}_2 - \tilde{\nu}_1} \cdot \Phi; \quad \Phi_2 = -\frac{\tilde{\nu}_1}{\tilde{\nu}_2 - \tilde{\nu}_1} \cdot \Phi$$

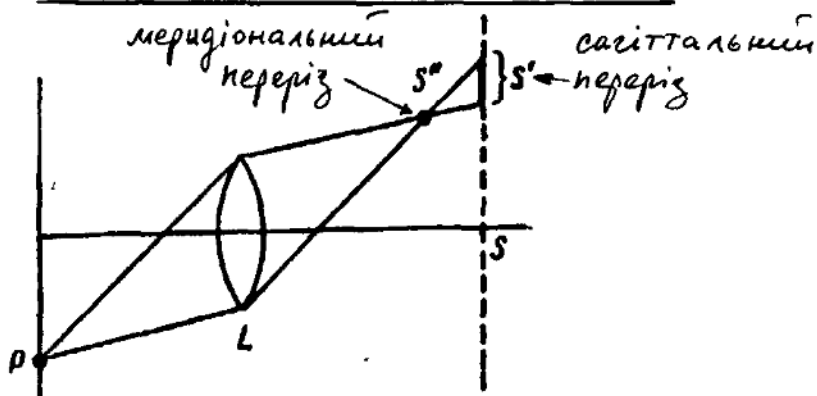
3. Кома

- виникає для точкових об'єктів, що знаходяться поза оптичної осі



(Раніше розглядали сферичну аберацію для осевих променів).

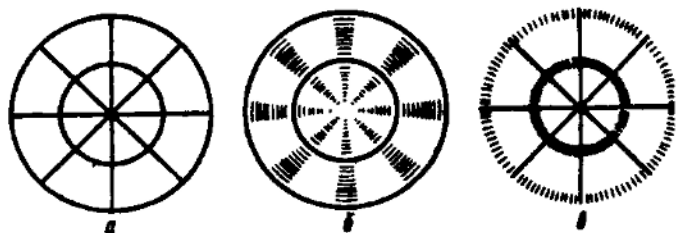
Кома у оптичній системі із виправленою сферичною аберацією відсутня, якщо виконується умова інваріанта Лагр.-Гельм.: $n \cdot y \cdot \sin u = n' \cdot y' \cdot \sin u'$

4. Астигматизм нахилених (неосьових) променів

Виправити цей вид аберації можна шляхом спеціального підбору радіусів кривини заломлюючих поверхонь (відмова від сферичної оптики!).

Система, виправлена на астигматизм, називається анастигматом.

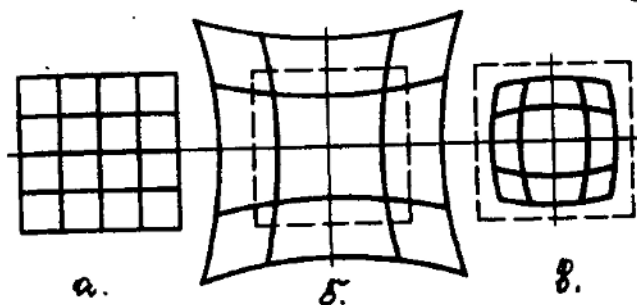
Викривлення зображення в результаті астигматизму:



а - невикривлене зображення (предмет).

δ - в фокусі ме-
ридіонального
перерізу;
 ϵ - в фокусі
сагітального
перерізу.

5. Дисторсія



- викликана неодна-
ковим лінійним
збільшенням в
межах поля зобра-
ження: $tq \neq \text{const}$

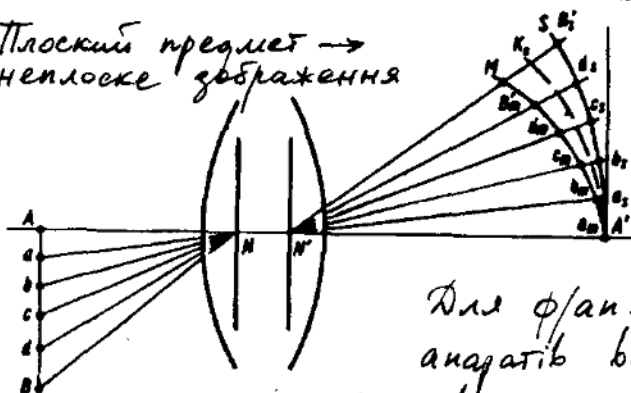
δ - при збільшенні, що зростає по мірі віддалення від оптичної осі;

ϵ - при лінійному збільшенні, що зменшується по мірі віддалення від оптичної осі.

При дисторсії створюється геометрична подібність між предметом (а) та його зображеннями (б, в).

6. Кривина поля зображення

Плоский предмет \rightarrow
неплоске зображення



-існує навіть в сис-
темах з виправле-
ним астигматизмом

Для ф/ан. та проєкційних
апаратів виправлення астиг-
матизму і кривини поля зобр. особливо важливо.
Виправлені об'єктиви - астигмати.

Зауваження: 1. Повне усунення всіх видів
аберацій на практиці неможливо.

2. Найшкідливішими з усіх видів аберацій є
сферична аберація та кома.

3. Послаблення прояву монохроматичних аберацій
досягається, в основному, добором різних лінз.

4. Навіть для непараксимальних променів в площин-
нах, для яких виконується умова синусів (інваріант)
Лагр.-Гельмг.: $y \cdot n \cdot \sin u = y' \cdot n' \cdot \sin u'$, відображен-
ня відбувається без злиганих аберацій.

Об'єктиви мікроскопів - аплакати: усунено
сферичну аберацію та виконані умови синусів.

§ 2.9. Око як оптична система

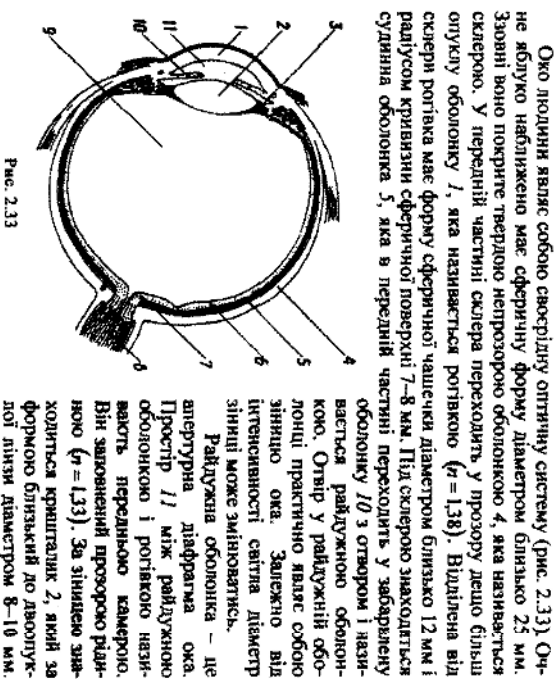


Рис. 2.33

Око людини являє собою своєрідну оптичну систему (рис. 2.33). Очне яблуко наближено має сферичну форму діаметром близько 25 мм. Зовні воно покрите твердюю непрозорою оболонкою 4, яка називається склерою. У передній частині склера переходить у прозору дещо більшу опуклу оболонку 1, яка називається рогівкою ($n = 1,38$). Відділена від склери рогівка має форму сферичної чашечки діаметром близько 12 мм і радіусом кривизни сферичної поверхні 7–8 мм. Під склерою знаходиться радужна оболонка 5, яка в передній частині переходить у зовбурену оболонку 10 з отвором і називається райдужною оболонкою. Отвір у райдужній оболонці практично являє собою змінно ока. Залежно від інтенсивності світла діаметр зіниці може змінюватись. Райдужна оболонка – це впертуна діафрагма ока. Простір 11 між райдужною оболонкою і рогівкою називають передньою камерою. Він заповнений прозорою рідиною ($n = 1,33$). За зіницею знаходиться кришталик 2, який за формою близький до дволуклої ділици діаметром 8–10 мм.

Він складається з шарів різної густини: для зовнішнього шару $n = 1,40$, а для внутрішнього – 1,44. За кришталиком очне яблуко заповнене пралистим склянидим тілом 9. Через задню стінку очного яблука входять зоровий нерв 8, який розгалужується на дні ока, утворюючи світлопучковий шар, що називається сітківкою 6. Світлопучковими елементами сітківки є палички і колбочки.

Оптичні елементи ока (рогівка, зіниця, кришталик) утворюють центровану оптичну систему. Прямка, на якій лежать їх центри, являє собою головну оптичну вісь. Із усіх заломлених середовищ найбільшу оптичну силу має рогівка (близько 40 дптр). Це зумовлено тим, що рогівка межує з повітрям. Оптична сила кришталика може змінюватись, завдяки чому зображення попадає на сітківку при різних відстанях предмета від ока. Якщо м'язи не напружені, то радіус кривизни передньої поверхні кришталика дорівнює 10 мм, а задньої – 6 мм. За цих параметрів фокус кришталика лежить на сітківці, а предмет – на нескінченності. Проте зображення повинно лежати на сітківці для будь-яких відстаней від предмета до ока. При цьому відстані від кришталика до сітківки залишається постійною. Це забезпечується тим, що м'язи з стискують кришталик, внаслідок чого зменшується радіус кривизни поверхонь і збільшується оптична сила. Зміна оптичної сили завдяки зміні радіусів кривизни поверхонь кришталика називається *аккомодацією* ока. Найбільшою оптичною силою є у випадку, коли радіуси кривизни обох поверхонь кришталика дорівнюють 5,5 мм. Тоді зображення попадуть на сітківку для відстані від предмета до ока близько 15 см. Ця відстань називається ближньою точкою. Для нормального зору існує відстань найкращого зору, яка дорівнює 25 см. Завдяки аккомодації оптична сила ока може змінюватись у межах від 58 до 74 дптр. На сітківці оптична система ока утворює дрібне зображення.

Для світлового подраження людського ока необхідно, щоб у нього потрапляв світловий потік $2,5 \cdot 10^{-10} - 4,2 \cdot 10^{-10}$ Дж/с, що еквівалентно падінню в око кількох десятків фотонів у секунду, яким відповидє довжина світлової хвилі $\lambda = 0,55$ мкм. Чутливість ока при зміні освітленості може змінюватись. Ця властивість ока називається *адаптацією*. Завдяки їй око здатне сприймати широкий інтервал освітленості, відношення між якою близько $1:10^6$.

Однією з важливих характеристик ока є пострапа зору, або роздільна здатність, під якою розуміють ту найменшу відстань між двома точками предмета, які воно здатне розрізняти окремо. Гострота зору виражається кутовою відстанню між цими точками і за одиницю виміру прийнято вважати кут в одну кутову мінуту.

Простір, який спостерігається нерухомими очом, називають полем зору, яке в горизонтальному напрямі має кутовий розмір близько 150° , а у вертикальному – 125° . Поле зору, що відповидє жовтій плямі 7, невелике. Воно дорівнює близько 6° уздовж горизонталі і близько 4° уздовж

вертикалі. Поле зору центральної змики ще менше і дорівнює близько 1° задовж горизонталі і вертикалі.

Зір об'єкта очима називають *біжувальними*. Він має ряд своєрідностей порівняно із зором одним оком. Особливо помітно це виявляється при об'єчному сприйнятті предметів, яке називається стереоскопічним баченням, або стереоскопізмом. Для ока притаманні всі аберації оптичних систем. Завдяки особливий його будові геометричні й хроматичні аберації майло помітні. Головними недоліками зору є: а) міопія, або короткозорість, за якої промені від нескінченно віддалених точок не джерел фокусуються перед сітчатстою оболонкою, вона коректується за допомогою розсіювальної лінзи; б) гіперметропія, або далекозорість, за якої промені від нескінченно віддалених точок не джерел фокусуються за сітчатстою оболонкою; вона коректується за допомогою збиральної лінзи; в) астигматизм, при якому заломлююча здатність ока різна в різних площинах, що проходить через його оптичну вісь. Цей дефект коректується за допомогою циліндричної або тороїдальної лінзи.

§ 2.10. Оптичні прилади

У наш час існує величезна кількість оптичних приладів. Їх можна поділити на групи за тими явищами, на яких основана їх дія. До них належать, наприклад, фотометри, інтерферометри, поляриметри, спектрометри, широметри, гоніометри та ін. Окрему групу становлять оптичні прилади, за допомогою яких одержують зображення предметів. До них відносяться прилади, що озброюють людське око (лупа, мікроскоп, зорова труба) та дають зображення на екрані (фотоапарат, проекційний апарат). Розглянемо останню групу приладів.

Лупа є найпростішим оптичним приладом, за допомогою якого розглядають дрібні предмети, і являє собою короткофокусну збиральну лінзу. Некий предмет *AB* розташований у передній фокальній площині лінзи (рис. 2.34, а). Оскільки точка *A* лежить на головній оптичній осі лінзи і ока, то її зображення *A'* буде лежати також на головній оптичній осі. Точка *B* знаходиться у фокальній площині лінзи, тому між лінзою і оком промені паралельні. Далі їх фокусує оптична система ока, утворюючи зображення *B'*. Кут $\angle O'B'V = \omega$ називають кутом зору. Легко побачити, що в даному випадку $\angle B'CA$ також дорівнює ω . Коли б розглядали безпосередньо предмет *AB*, то кут розгляду був би ω_0 . Під збільшенням кута зору Γ розуміють

$$\Gamma = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.67)$$

З ΔABC $\text{tg } \omega = AB/l$, з ΔABO (рис. 2.34, б) $\text{tg } \omega_0 = AB/l_0$.

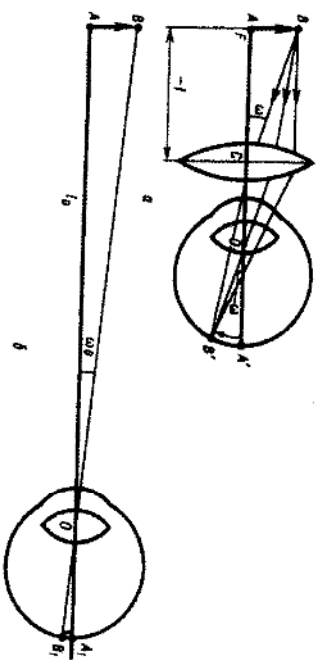


Рис. 2.34

де f — фокусна відстань лінзи. З виразу (2.68) видно, що із зменшенням фокусної відстані лінзи зростає її збільшення. Теоретично значення збільшення лупи нічим не обмежене. Проте їх виготовлення і користування ними складне. Тому на практиці лупи із збільшенням більше 40 не використовують. Для одержання великих збільшень застосовують мікроскоп.

$$\Gamma = l_0/f \quad (2.68)$$

Мікроскоп — це оптичний прилад, що дає можливість розглядати та фотографувати малі предмети, які можуть бути невидимі неозброєним оком. В оптичній системі мікроскопа можна виділити освітлювальну та проекційну частини. Освітлювальна система складається із дзеркала, плоского з одного боку і вгнутото з другого, та конденсора. Присоєднана мікрокопна складова являє собою складну оптичну систему, яка може містити більше десяти лінз. Проте основну роль у збільшенні відіграє перша плоско-опукла лінза, яка називається фронтальною. Інші лінзи визначають необхідну апертуру й уявляють сферичну та хроматичну аберації й астигматизм. Об'єкти виступають джерелом зображення предмета. Зображення об'єкта розглядається в окуляр як в лупу.

При розгляданні предмета неозброєним оком кут зору дорівнює ω_0 (рис. 2.34, б). При використанні мікроскопа предмет видно під кутом ω (рис. 2.35). Тоді збільшення кута зору, яке дає мікроскоп,

$$\Gamma = \frac{\omega}{\omega_0}$$



Рис. 2.35

Із трикутника $A'V'S$ маємо $\tan \omega_0 = A'V'/f_{oc}$, а з подібності трикутників ABD та $A'V'D - AV'/A'V' = s/s'$. Оскільки предмет розміщується близько до фокальної площини об'єктива, то приблизно $s \approx f_{ob}$. Визначивши відстані $A'V'$, маємо

$$\tan \omega_0 = \frac{ABs'}{f_{oc}}$$

Підставивши значення $\tan \omega_0$ і $\tan \omega_0$ у вираз для визначення збільшення кута зору мікроскопа, одержимо

$$\Gamma = \frac{f_{oc} s' f_{ob}}{f_{oc} f_{ob}}$$

Відстань від об'єктива до створеного ним зображення s' приблизно дорівнює довжині трубки мікроскопа Δ . Тоді

$$\Gamma = \frac{f_{ob} \Delta}{f_{ob} f_{oc}} = \frac{\Delta}{f_{oc}} \Gamma_{oc} \quad (2.69)$$

Отже, збільшення мікроскопа дорівнює добутку збільшення об'єктива на збільшення окуляра. Збільшення оптичного мікроскопа досягає величин, близьких 2000.

Для одержання мікропроєкцій та мікрофотографій окуляр піднімають так, щоб зображення $A'B'$ виявлялось перед перельні фокусом F_{oc} .

Окулярні складиють, як мінімум, із двох лінз. Лінза, що знаходиться ближче до об'єктива, називається колекційною, а та, що з боку ока, — очиною. Колекційна лінза виконує ту саму роль, що й конденсор у проєкційних апаратах: вона нахиляє до оптичної осі всі промені, які створюють зображення, і спрямовує їх у зінціло яка спостерігача.

Предмети, які розглядаємо через мікроскоп, несамоосвітні — їх треба освітлювати різними пристроями. Для розглядання простора предмета використовують конденсори, для освітлення непросторих або напівпросторих предметів — освітлювачі, які спрямовують світло зверху на предмет.

Для спостереження за великими і досить віддаленими предметами кінують спеціальні оптичні системи — телескопи. До них належать телескопи і

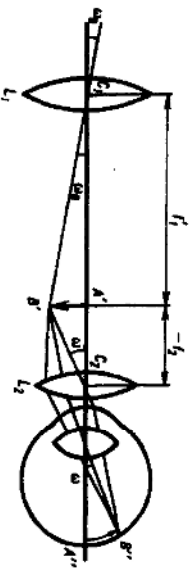


Рис. 2.36

астрономічні зорові труби, біноклі, стереоскопічні труби та ін. Характерним для цих систем є те, що в них входять паралельні промені предметів, які потім виходять також у вигляді паралельних пучків.

Оптична система зорової труби складається з об'єктива L_1 і окуляра L_2 (рис. 2.36), причому задній фокус об'єктива збігається з переднім фокусом окуляра. Така система називається телескопічною. Для одержання чіткого зображення відстань між об'єктивом і окуляром можна змінювати, у фокальній площині об'єктива утворюється дійсне зображення $A'B'$ віддаленого предмета AB .

Кут зору при спостереженні предмета неозбраними очима з великою точністю можна вважати таким, що дорівнює ω_0 . Кут $A'C_2B'$ як вертикальний також дорівнює ω_0 . Із трикутника $A'V'S_1$ можна записати $\tan \omega_0 = A'V'/f_1$. При зягосурванні зорової труби кут зору дорівнює ω . Із трикутника $A'V'S_2$ можна записати $\tan \omega = A'V'/f_2$.

Тоді збільшення кута зору телескопічної системи

$$\Gamma = \frac{\tan \omega}{\tan \omega_0} = \frac{f_1}{f_2} \quad (2.70)$$

Із виразу (2.70) видно, що збільшення телескопа знаходиться в прямій залежності від фокусної відстані об'єктива і в оберненій — від фокусної відстані окуляра. Зображення, яке дає об'єктив телескопа, знаходиться в задній фокальній площині, що означає, що перельною фокальною площиною окуляра. За такої умови зображення буде на нескінченності і для його спостереження око має бути accommodation на нескінченність.

Телескопічна система, яка складається з об'єктива і додатного окуляра (рис. 2.36), називається зоровою трубою Кеплера. Оскільки за її допомогою одержують перевернуте зображення предмета, то для розгляду невеликих предметів вона незручна. Тому в такому випадку часто використовують зоровою трубою Галілея, яка складається з додатного об'єктива та окуляра у вигляді простої двовипуклої лінзи (рис. 2.37).



Рис. 2.37

Незважаючи на те, що труба Галілея проста за своєю конструктивними даними (має малу зальну довжину і дає пряме зображення), вона має ряд недоліків. Зокрема, проміжне зображення є уявним, тому система не може бути оснащена візирною сіткою. Для спостереження прямих зображень із візирними сітками користуються так званими незвичними трубами. Вони являють собою трубу Кеплера з оптичними системами, залатаними поперезги зображення на 180° . До них належать польові біноклі, стереотруби та ін.

Поряд з опсередженими телескопами й зоровими трубами із заложеною чини оптичними системами, які ще називаються рефлекторами, існують телескопічні системи, побудовані з відбиваючих поверхонь (дзеркал) — рефлекторів. Вперше рефлектор побудував І. Ньютон. Завдяки відособу виведення променів із труби і розташування окуляра, через який розглядають зображення, рефлектори є різних систем: системи Ньютона, системи Гершеля — Ломоносова, системи Грегора, системи Кассіні та ін. Дзеркальні телескопи не мають хроматичної аберсації, але в них є сферична аберсація. Зменшити сферичну аберсацію можна заміною сферичних дзеркал гіперболічними або параболічними, виготовленими яких технічно значно складніше, ніж сферичних.

Досягти ефективного для одержання хороших в оптичному відношенні й порівняно недорогих систем вивалять ідея послідовна дзеркальної оптики з лінзкою, запропонована Д. Д. Максвеллом (1896—1964).

Фотосударівний апарат служить для одержання дієсних зображень предметів на світлочутливому шарі. Основним його оптичним елементом є об'єктив з іржосовою діафрагмою, яка плавно змінює відкритий отвір. Об'єктив умонтований у непрозору камеру, перед задньою стінкою якої розміщується фотографічна чи фотоплівчаника. Камера устаткована затвором, який регулює час проходження світла через об'єктив. Відстань від об'єктива до плівки можна змінювати певним пристроєм.

Оптична система фотосударівця певною мірою схожа з оптичною системою ока. Об'єктив аналогічний кришталику. Проте на відміну від кришталика об'єктив має сталу фокусну відстань. Іржосва діафрагма є

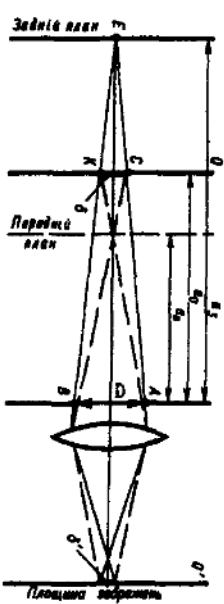


Рис. 2.38

апертурною і подібна до рейдужної оболонки ока. Роль сітківки відіграє фотоплівка. Особливостями ж фотосударця є те, що він повинен тривимірний простір у певних межах відображати на площині різко. Це можливо тому, що людина око може сприймати деяку плинну як точку, окрім його роздільна здатність дорівнює близько $1'$.

Визначимо глибину різкого зображення простору. Для цього припустимо, що апертура діафрагми діаметром D знаходиться біля точки лінзи, яка служить об'єктивом. Тоді отвір діафрагми буде визначати відображати в точки площини Q' (рис. 2.38). Відлічно на предметній площині крут діаметром b , зображення якого діаметром b' у площині зображення співвідноситься оком як точка. З подібності трикутників ABE і

$$D = \frac{a_2}{a_1 - a_0} \cdot \text{звідки } a_2 = a_0 \frac{D}{D - b}$$

Звідси видно, що із зменшенням діаметра отвору відкритої зіниці D задній план буде віддалятися і при $D \rightarrow b$ $a_2 \rightarrow \infty$. Це означає, що точки предметів до відстані a_0 будуть сприйматися оком різко. Тому, щоб збільшити глибину різкого зображення простору, діаметр діафрагми необхідно зменшувати.

Якщо взяти промені, які визначають передній план (на рис. 2.38 їх наведено штрихованими лініями), то різким зображення буде на відстані від a_0 до a_1 . Легко показати, що $a_1 = a_0 \frac{D + b}{D}$. При $D = b$ $a_1 = a_0 / 2$ і простір буде відображатися різко на відстані від $a_0/2$ до ∞ .

Проекційні трубки призначені для відтворення на екрані дієсних зображень у збільшеному вигляді із нестійкої, позитивної, меліоніка, креслення, текстів та ін. Оптична система будь-якого проекційного приладу складається

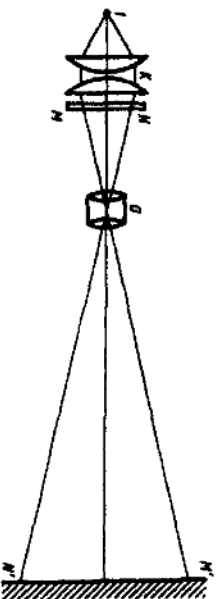


Рис. 2.39

з двох частин: освітлювальної і проєкційної. До освітлювальної частини входить джерело світла, конденсор і дзеркало. Проєкційна частина вихоче об'єктив, а також може мати систему плоских дзеркал.

Існує дві групи проєкційних приладів: дисконтині і епісконтині. Якщо проєкційний прилад називається дисконтині, то проєкційна частина проєкції називається дисконтині (рис. 2.39). Якщо предмет неперозорний, то його зображення утворюють промені світла, відбиті від предмета. Прилади, за допомогою яких одержують зображення таких предметів, називаються епісконтині (рис. 2.40). В обох випадках світло від сильного джерела L за допомогою системи збиральних лінз конденсора K спрямовується на предмет MN . У діапроекторі зображення діапозитива проєктується об'єктивом O

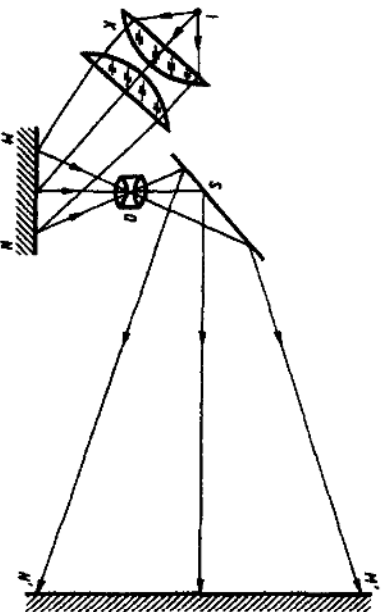


Рис. 2.40

на екран. В епіпроєкторі розсіяний світловий потік від предмета MN за допомогою об'єктива O і дзеркала S проєктується на екран. Часто ці прилади об'єднують в один, який називається епідіаскопом.

Для безперервної проєкції застосовують кінопроєкційні апарати.

Приклад 2.1. Показати, що необхідно підготувати для широкого користування оптичним мікроскопом із збільшенням більше 1500.

Розв'язання. Радіальна здатність ока дорівнює Γ . Щоб не було значних напругів ока, приймемо цей кут $\omega = 5 \cdot 10^{-3}$ рад. Із формули (2.69) збільшення мікроскопа

$$\Gamma = \frac{b \cdot \Delta}{1,6 \cdot f_{об}} \quad (1)$$

З рис. 2.35 маємо: $\Delta b' / f_{об} = 1,6 \omega \approx \omega$ та $\Delta b' / \Delta b = \Delta l / f_{об}$.

З цих рівностей випливає, що

$$\frac{\omega}{\Delta b} = \frac{\Delta}{1,6 \cdot f_{об}} \text{, звідси } \Delta = \frac{\omega \cdot 1,6 \cdot f_{об}}{\Delta b}$$

Підставивши Δ в формулу (1), одержимо

$$\Gamma = \frac{b \cdot \omega}{\Delta b}$$

З урахуванням радіальної здатності мікроскопа $\gamma = \Delta b = \lambda / 2$, маємо

$$\Gamma = \frac{2b \cdot \omega}{\lambda} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} = 1500$$