

## Тема: НЕДОЛІКИ (АБЕРАЦІЇ) ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Одержані основні залежності та описані властивості оптичних систем є цілком справедливі для параксіальних пучків та ідеальних оптичних систем. Крім того, було прийнято, що світло є монохроматичним, а показник заломлення середовища не залежить від довжин хвилі світла.

У реальних оптичних системах, що створюються у геодезичних приладах, все значно складніше. Надто вузький параксіальний пучок променів не завжди забезпечує достатню освітленість зображень, білий промінь світла може зазнати дисперсії. У геодезичних приладах застосовують оптичні системи, що мають доволі значні відносні отвори. Це може призвести до порушення гомоцентричності пучків у просторі зображень, а самі зображення можуть мати порушення подібності і недостатню чіткість, тобто проявляються недоліки або аберації оптичних систем. Знання фізичної сутності аберацій дає змогу розробити заходи для послаблення їхнього впливу у візуальних оптичних системах, для яких найнебезпечнішими є осьові аберації, що спотворюють зображення точок на оптичній осі. Такими є сферична і хроматична аберації.

### Сферична аберація

Промені, що йдуть від точки  $A$  або паралельно до оптичної осі потрапляють широким пучком на сферичну заломлювальну поверхню, наприклад, лінзи. Промені пучка, що віддаленіші від оптичної осі, мають властивість заломлюватися сильніше ніж промені, що мають невеликий кут з віссю, внаслідок цього всі заломлені лінзою промені не зберуться в одній точці. Властивість лінз порушувати стигматичність зображення називають *сферичною аберацією*.

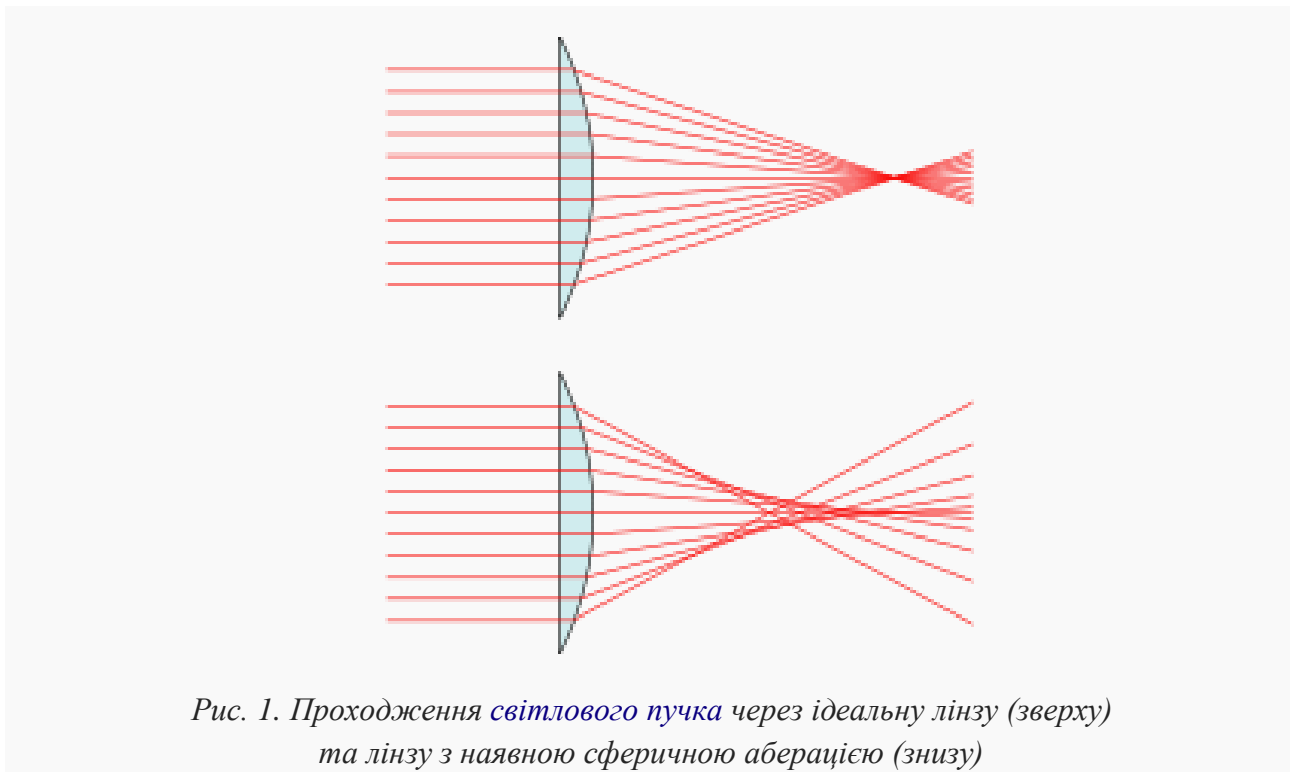


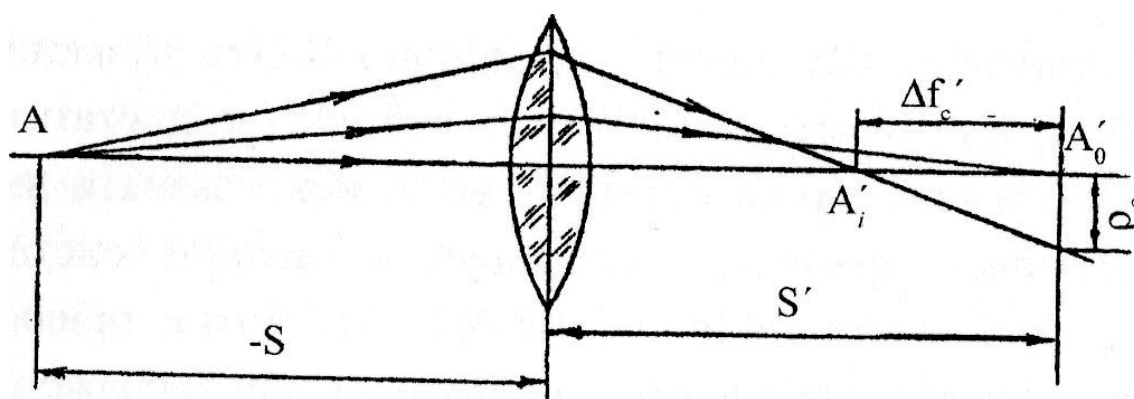
Рис. 1. Проходження світлового пучка через ідеальну лінзу (зверху) та лінзу з наявною сферичною аберацією (знизу)

Сферичну аберацію прийнято розглядати для пучка променів, що виходить з точки, розташованої на оптичній осі. Однак, сферична аберація має місце і для інших пучків променів, що виходять з точок предмета, віддалених від оптичної осі, але в таких випадках

вона розглядається як складова частина аберацій всього пучка променів. Причому, хоча ця аберація і називається сферичною, вона характерна не тільки для сферичних поверхонь.

В результаті сферичної аберації циліндричний пучок променів після заломлення лінзою (у просторі зображень) отримує вигляд не конуса, а деякої воронкоподібної фігури, зовнішня поверхня якої, поблизу вузького місця, називається *каустичною поверхнею*. При цьому зображення точки у фокусі має вигляд диска з неоднорідним розподілом освітленості, а форма каустичної кривої дозволяє судити про характер розподілу освітленості.

На *рис. 2* замість однієї точки  $A'_0$  у просторі зображень утворилась множина таких точок: від  $A'_0$  до  $A'_i$ . Якщо у точці  $A'_0$  встановити перпендикулярно до оптичної осі екран, на ньому вийде зображення нечіткої плями радіуса  $\rho_c$ . Щодо паралельного пучка променів, то параксіальні промені зберуться у задньому фокусі  $F'$ , а крайні – у точці  $F'_i$ , яка розташована ближче до лінзи. Величину  $\Delta f'_c = f'_i - f'$  називають *поздовжньою сферичною аберацією*, а  $\rho_c$  – *поперечною*.



*Рис. 2. Сферична аберація лінзи*

Для лінзи у першому наближенні поздовжню та поперечну сферичну аберацію можна обчислити згідно із залежностями

$$\Delta f'_c = \frac{Kr^2}{f'}, \quad (1)$$

$$\rho_c = \frac{Kr^3}{(f')^2}, \quad (2)$$

відповідно.

У залежностях (1) і (2):  $r$  – радіус вхідного отвору,  $f'$  – фокусна віддаль,  $K$  – коефіцієнт, що залежить від показника заломлення скла та радіусів кривини сферичних поверхонь. Відповідно до залежностей (1) і (2) поздовжня та поперечна сферична аберація зростають із збільшенням вхідного отвору, зменшенням  $f'$  або радіусів кривини поверхонь лінз.

Вплив сферичної аберації зменшують, застосовуючи діафрагми, наприклад, зменшення вхідного отвору вдвічі зменшує сферичну поперечну аберацію у вісім разів. Крім діафрагмування, застосовують комбінації із збирних та розсіювальних лінз різних радіусів кривини та з різних сортів та марок скла.

## Хроматична аберція

Сукупність променів, що поширюються в однорідному середовищі, справляє на око враження білого світла. Після переходу з одного прозорого оптичного середовища до іншого, яке має інший показник заломлення, промені світла не тільки заломлюються, а й розкладаються у спектр. Наприклад, звичайна лінза має меншу фокусну віддасть для синіх променів, ніж для червоних, внаслідок цього біле світло дасть розмазане, забарвлене на краях зображення. Таке явище називають *хроматичною аберцією*.

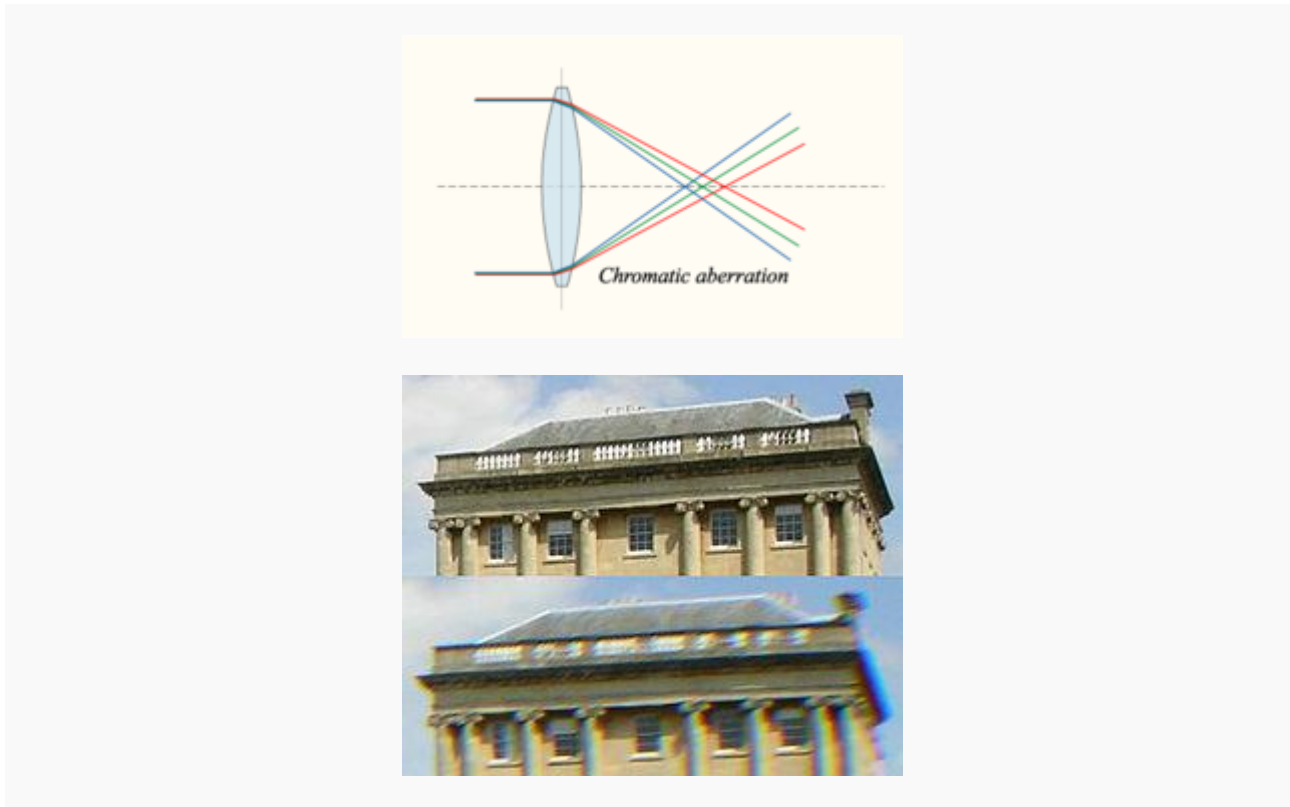


Рис. 3. Хроматична аберція

Хроматичні аберції зумовлені дисперсією світла в лінзах і призмах оптичної системи і виявляються в утворенні кольорової облямівки контрастних елементів зображення.

Розрізняють поздовжню (положення) та поперечну (збільшення) *хроматичну аберцію*. На *рис. 4* для променів світла, паралельних до оптичної осі, після заломлення будуть два фокуси  $F'_\phi$  і  $F'_\psi$  для фіолетових і червоних променів відповідно.

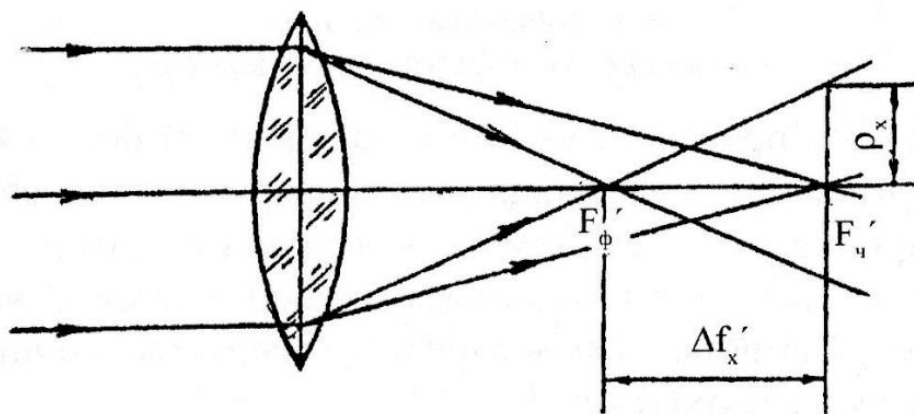
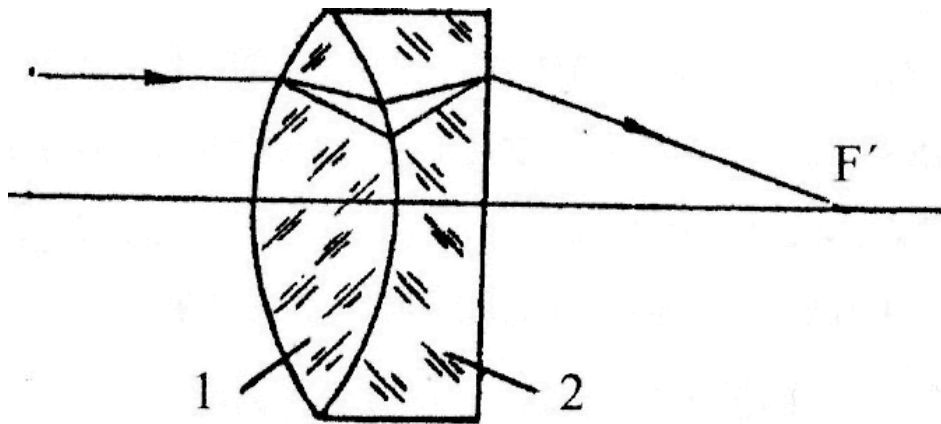


Рис. 4. Хроматична аберція

У будь-якій точці відрізка  $F'_\phi F'_q$  точка буде мати вигляд розманої кольорової плями. На екрані, встановленому у точці  $F'_\phi$  перпендикулярно до оптичної осі, у центрі буде фіолетова пляма з червоною облямівкою на краях, а у точці  $F'_q$  – червона пляма з фіолетовою облямівкою. Зазвичай зображення не тільки забарвлюється, а й втрачає контрастність, а сама хроматична аберация відчутніша від сферичної. Крім того, зображення, побудовані променями різних кольорів, будуть неоднакові за розмірами: *червоними* – збільшені, а *фіолетовими* – зменшені. Це наслідок поперечної хроматичної аберации.

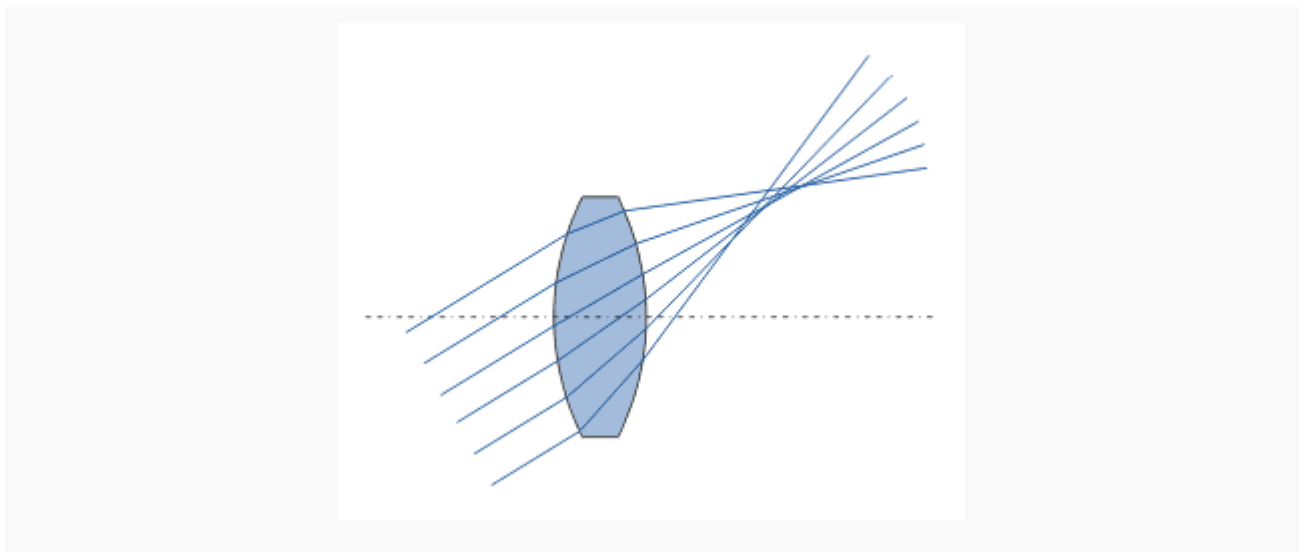
Зменшити вплив поздовжньої і поперечної хроматичної аберации можна, підбираючи сорти і марки скла, протилежних за дією лінз (збиральна-розсіювальна) та кривизни їх сферичних поверхонь. Принцип дії лінз, підібраних за наведеними вище умовами, показано на *рис. 5*. (передня лінза 1 з крона, а задня лінза 2 з флінта).



*Рис. 5. Система лінз, що послаблює хроматичну аберацию*

Промінь, пройшовши систему, вийде з неї білим. Системи лінз, що усувають аберацию для двох кольорів спектра, називають *ахроматичними*, а ті, що усувають вторинний спектр, *апохроматичними*. Далі йдуть *надапохроматичні* системи, які дуже дорогі та трудомісткі. Зорові труби сучасних геодезичних приладів зазвичай апохроматичні.

## Кома



*Рис. 6. Кома. Схема утворення коми: промені, які приходять під кутом до оптичної осі збираються не в одній точці*

*Коматична аберація* або *Кома* проявляється в тому, що кожна ділянка оптичної системи, віддалена від її осі на відстань  $d$  (кільцева зона), дає зображення світної точки у вигляді кільця, радіус якого тим більше, чим більше  $d$ ; може розглядатися як сферична аберація променів, що проходять не через оптичну вісь системи. Центри кілець не збігаються, в результаті їх накладення – тобто зображення точки, що утворюється системою в цілому, приймає вигляд несиметричної плями розсіювання. Розміри цієї плями пропорційні квадрату кутової апертури системи і віддалі точки-об'єкта від осі оптичної системи.

У складних оптичних системах кому зазвичай виправляють спільно зі сферичною аберацією підбором лінз. Оптичні системи з виправленими коматичною і сферичною аберацією називаються *апланатами*. Якщо при виготовленні системи допущена децентровка однієї з поверхонь, то кома спотворює зображення і тих точок, які розташовані на осі оптичної системи.

### Астигматизм

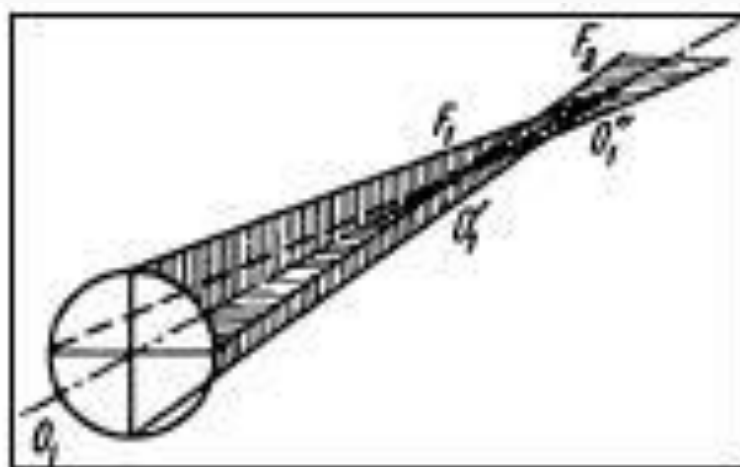


Рис. 7. Зображення точки оптичною системою з астигматизмом:  
 $Q'1$  – меридіональними променями;  $Q'2$  – широтними променями

*Астигматизм* монохроматична польова аберація оптичних систем, яка полягає в тому, що зображення однієї і тієї ж точки предмета нескінченно тонкими пучками променів, розташованими у взаємно перпендикулярних площинах (меридіональній і широтній), має вигляд двох точок, що не збігаються з площиною зображення цієї точки паралельними променями. У телескопічних системах астигматизм виражається в діоптріях; у зорових трубах значення астигматизму допускається не більше 3-х діоптрій.

*Вузькі пучки променів, що поширюються від точок, які не розташовані на оптичній осі, після заломлення зазвичай відображаються астигматично, оскільки промені проходять заломлювальну сферичну поверхню оптичної системи за різних умов. У меридіональній площині промені заломлюються сильніше ніж у перпендикулярній до неї сигітальній площині. Внаслідок цього точки з меридіональної площини у сигітальній площині будуть зображатися лініями або витягнутими еліпсами. Точки сигітальної площини аналогічно відображаються у меридіональній площині.*

Зовнішній ефект астигматизму – перекручування зображення оптичною системою, пов'язане з тим, що заломлення (або відбиття) променів у різних частинах системи неоднакове. Внаслідок астигматизму зображення предмета стає нерізким. Кожна точка предмета

зображується розмитим еліпсом. Астигматизм ока усувається за допомогою окулярів з циліндричним склом, контактних лінз.

Астигматизм – один із недоліків оптичного зображення. Якщо сферична хвиля, що йде від точкового джерела, після проходження оптичної системи залишається сферичною і промені хвилі дають точкове зображення, то пучок таких променів називають стигматичним. Якщо ж ця хвиля оптичною системою деформується так, що її промені перетинаються у двох взаємно перпендикулярних відрізках, розташованих на деякій відстані один від одного, то такий пучок називають астигматичним (зображення не точкове). Внаслідок астигматизму точки, розміщені на взаємно перпендикулярних лініях (в сигітальному і меридіональному перерізах), зображаються не однаково чітко.

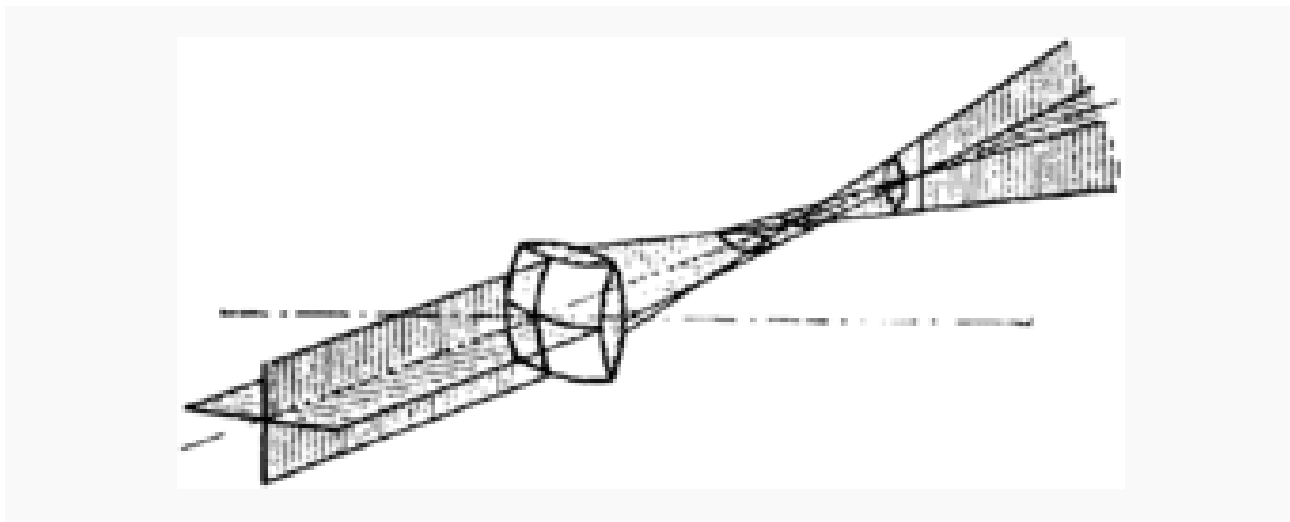


Рис. 8. Ілюстрація явища астигматизму

АСТИГМАТОР – оптична деталь, що викликає астигматизм; для перетворення зображення точки в пряму лінію, як астигматор використовують циліндричну лінзу.

Астигматизм виправляють, підбираючи радіуси кривини заломлювальних поверхонь, їхні фокусні віддалі та товщини лінз. Оптичні системи, в яких астигматизм усунений, називають анастигматами.

### Дисторсія

Порушення геометричної подібності зображення та предмета у спряжених площинах, перпендикулярних до оптичної осі, називають дисторсією. Причиною дисторсії є змінне поперечне збільшення  $\beta$  у полі зору оптичної системи. Внаслідок цього зображення квадрата буде за формою як подушка (рис. 9, б) або бочкоподібним (рис. 9, в). Зменшення дисторсії досягають встановленням діафрагм, підбором лінз різної товщини та радіусів.

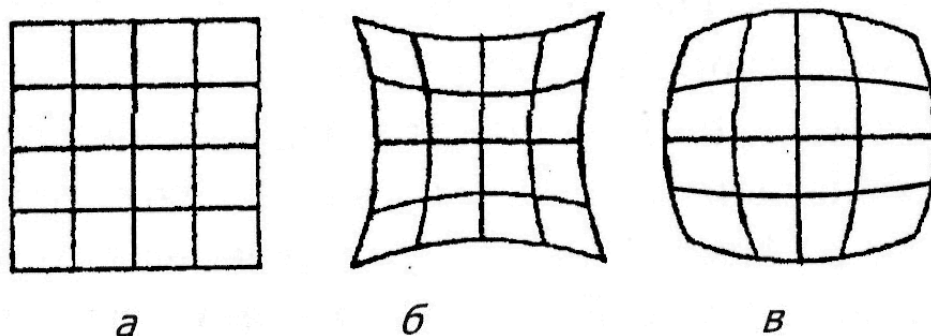


Рис. 9. Дисторсія: а – зображення, не спотворене дисторсією; б – додатна дисторсія; в – від'ємна дисторсія