

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕТАЛЕЙ І ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою  
«Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладач: В. І. Микитенко

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент *Котовський В. Й.*, докт. тех. наук, проф., завідувач кафедрою загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського  
*Положенцев В. В.*, перший заступник директора НДІ «Квант»  
*Русняк І. М.*, к.т.н., головний науковий співробітник НДІ «Квант»

Відповідальний редактор *Чиж І. Г.*, докт. тех. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 1 від 02.09.2022 р.)  
за поданням Вченої ради приладобудівного факультету  
(протокол № 9/22 від 29.08.2022 р.)*

Навчальний посібник присвячено експериментальним методам геометричних вимірювань параметрів деталей і типових оптичних систем. У вигляді лабораторних робіт викладено методики виконання прямих вимірювань товщин, кутів, радіусів, а також обчислень похідних характеристик – пірамідальності призм, показника заломлення, фокусних відстаней, фокальних відрізків і робочих відстаней фокусуємих оптичних систем. Також приділено увагу визначенню основних параметрів телескопічних систем і мікроскопів. Студенти вчаться користуватись найбільш розповсюдженими оптичними засобами вимірювань – гоніометрами, сферометрами, оптиметрами, теодолітами, мікроскопами.

Посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», що навчаються за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології». Також буде корисним фахівцям виробничих підприємств приладобудівної галузі.

Реєстр. № НП 22/23-058. Обсяг 5,1 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.І. Микитенко  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

## З М І С Т

Вступ.....	4
Правила техніки безпеки при проведенні лабораторних робіт.....	5
Способи обробки результатів вимірювань .....	6
Лабораторна робота №1. Атестація оптичних деталей на гоніометрі ГС-5.....	11
Лабораторна робота №2. Вимірювання радіусів кривизни сферичних деталей .....	23
Лабораторна робота №3. Вимірювання товщини оптичних деталей на оптиметрі.....	33
Лабораторна робота №4. Вимірювання фокусних відстаней, фокальних відрізків і робочих відстаней оптичних систем .....	40
Лабораторна робота №5. Вимірювання характеристик телескопічних систем.....	57
Лабораторна робота №6. Вимірювання характеристик мікроскопу .....	74
Перелік використаних джерел .....	85
Додаток 1. Інструкція з електробезпеки при виконанні лабораторних робіт .....	86

## ВСТУП

Програмою курсу «Оптичні вимірювання» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» передбачено виконання комплексу лабораторних робіт. Даний навчальний посібник базується на циклі лабораторних робіт, які були розроблені на кафедрі оптичних приладів Київського політехнічного інституту М.О. Денисовим та Л.А. Міхеєнком [1, 2].

В ході виконання лабораторних робіт студенти отримують практичні навички, поглиблюють і конкретизують знання щодо розділів «Основи теорії вимірювання», «Геометричні вимірювання» лекційного курсу.

При підготовці до лабораторних робіт студенти мають вивчити рекомендовану літературу за списком до кожної роботи та знати відповіді на контрольні запитання.

На першому лабораторному занятті викладач знайомить студентів з правилами поведінки в лабораторії та проводить інструктаж з техніки безпеки.

Перед початком кожної лабораторної роботи студенти проходять перевірку знань і мають показати розуміння мети роботи, теоретичні знання за темою роботи, знання методів вимірювання, котрі використані в даній роботі.

Після виконання роботи проводиться статистична обробка одержаних результатів за рекомендованою формою.

**Студенти, що не пройшли інструктаж та не розписалися в журналі з техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.**

## **ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

1. В ході виконання лабораторних робіт всі студенти проводять самостійну роботу тільки під наглядом викладача.
2. Всі студенти мають дотримуватись правил електробезпеки (Додаток 1).
3. Забороняється без дозволу викладача вмикати або вимикати обладнання, розподільний електричний щиток.

## **ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛІВ**

Протокол лабораторної роботи складається студентами індивідуально відповідно до діючих стандартів і оформлюється на аркушах паперу формату А4. Схеми та графіки виконуються на міліметровому папері того ж формату. Всі фізичні величини, що зустрічаються в роботі, повинні бути виражені в міжнародній системі одиниць СІ.

У кожному протоколі обов'язково повинні міститись такі дані:

1. Назва лабораторної роботи.
2. Прізвище, ім'я, по батькові, факультет та група студента.
3. Мета роботи.
4. Схема вимірювального стенду, прилади та обладнання, що використовуються.
5. Стислий опис методики проведення вимірювань.
6. Таблиці із заголовками, в яких подаються виміряні або обчислені величини та їх розмірності.
7. Описання методів розрахунку, формули та результати розрахунків.
8. Графіки із зазначенням на координатних осях розмірностей вимірюваних величин.
9. Висновки по проведеній роботі.

# СПОСОБИ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

## Оцінка точності результату прямих вимірювань

Нехай справжнє значення деякої вимірюваної величини  $A_0$ . Внаслідок наявності неминучих похибок при кожному вимірюванні отримано значення цієї величини  $A_i$ , відмінне від  $A_0$ . Тому для підвищення точності вимірювання  $A_0$ , проводять декілька ( $n$ ) незалежних вимірювань.

У математичній статистиці доводиться, що як оцінка істинного значення вимірюваної величини  $A_0$ , можна прийняти за середнє арифметичне

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (1)$$

тобто допустити

$$A_0 = \bar{A}. \quad (2)$$

Рівність (2) є тим точнішою, чим більшою є кількість вимірювань  $n$ .

Середнє квадратичне відхилення похибок вимірювань обчислюється за формулою, що дає незміщене значення його оцінки [3]

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (3)$$

де  $\Delta_i = a_i - \bar{A}$  - значення похибки вимірювання в  $i$ -тому вимірюванні величини  $A$ .

Величина  $\sigma_a$  характеризує випадкові похибки вимірювання, тобто точність окремих вимірювань значень  $a_i$  (точність приладу, методу тощо).

У відповідності з правилом "3 $\sigma$ " для нормального розподілу похибка вимірювання  $\Delta$  величини  $A$  при окремих вимірюваннях з ймовірністю 0,997 не перевищує  $\pm 3\sigma$ . Це значення похибки приймається як максимальне

$$\Delta_{max}^A = \pm 3\sigma_A. \quad (4)$$

Практично всі результати окремих вимірювань величини  $A$  (99,7%) перебувають у межах

$$(\bar{A} - 3\sigma_A) < A_i < (\bar{A} + 3\sigma_A). \quad (5)$$

Ті вимірювання  $a_i$ , похибка яких за абсолютним значенням перевищує  $3\sigma_A$

$$|\Delta_i| = |A_i - \bar{A}| > 3\sigma_A \quad (6)$$

відкидаються як так звані "викиди".

Оскільки кількість вимірювань  $n$  зазвичай буває обмеженою, рівність (2) не виконується точно, тому що при цьому середньоарифметичне значення  $\bar{A}$  саме є випадковою величиною з характеристиками

$$m_a = A_0; \sigma_a = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_A, \quad (7)$$

де  $m_a$  - математичне очікування середнього арифметичного;

$\sigma_a$  - середнє квадратичне відхилення значення середнього арифметичного  $\bar{A}$ .

Для оцінки абсолютної похибки  $\varepsilon = |\bar{A} - A_0|$  користуються довірчими інтервалами та довірчими ймовірностями.

Довірчим інтервалом  $I_\beta(A)$ , що відповідає довірчій ймовірності  $\beta$ , називається інтервал довжиною  $2\varepsilon_\beta$ , центром якого є чисельне значення середнього арифметичного  $\bar{A}$  і всередині якого з ймовірністю  $\beta$  знаходиться справжнє значення вимірюваної величини  $A_0$

$$I_\beta(a) = (\bar{a} - \varepsilon_\beta < a_0 < \bar{a} + \varepsilon_\beta). \quad (8)$$

Ймовірність того, що абсолютна похибка  $|\bar{a} - a_0|$  не перевищить  $\varepsilon_\beta$ , дорівнює довірчій ймовірності  $\beta$ .

У лабораторній практиці залежно від важливості вимірювань, що проводяться, довірна ймовірність  $\beta$  приймається рівною 0,5; 0,6; 0,7.

Абсолютну похибку зазвичай виражають через відносну довжину довірчого інтервалу  $t_\beta$

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \sigma_a = t_\beta \frac{\sigma_a}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

При обмеженій кількості вимірювань ( $n < 10$ ) для певного значення  $t_\beta$ , що задовольняє задану довірчу ймовірності  $\beta$ , користуються законом розподілу Стюдента

$$T = \frac{\bar{a} - a_0}{\sigma_a} \sqrt{n}. \quad (10)$$

Для цього закону розраховано таблицю ймовірності (табл. 1) з двома входами:  $\beta$  і  $(n - 1)$ , за якою за заданою довірчою ймовірністю та відомою кількістю вимірювань визначають величину  $t_{\beta}$ .

Таблиця 1

**Відносна довжина довірчого інтервалу**

$n-1$	$\beta$						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
<b>1</b>	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963
<b>2</b>	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,336
<b>3</b>	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,256
<b>4</b>	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190
<b>5</b>	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156
<b>6</b>	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134
<b>7</b>	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119
<b>8</b>	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108
<b>9</b>	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100
<b>10</b>	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093

В інженерній практиці найчастіше для означення точності вимірювання будь-якої величини  $A$  замість довірчого інтервалу застосовують запис виду

$$A_0 = \bar{A} \pm \varepsilon, \quad (11)$$

при цьому під  $\varepsilon$  розуміють максимальну похибку  $3\sigma_{\bar{a}}$ .

Рекомендується наступний порядок обробки результатів прямих вимірювань.

1. За формулою (1) визначають середньоарифметичне значення вимірюваної величини за результатами окремих вимірювань  $\bar{A}$ .

2. Визначають похибку окремих вимірювань

$$\Delta_i = A_i - \bar{A}.$$

3. Визначають квадрат величини похибки окремих вимірювань  $\Delta_i^2$ .
4. За формулою (3) знаходять середнє квадратичне відхилення похибок вимірювання  $\sigma_a$ .
5. Максимальну похибку  $\Delta_{max}^a$  розраховують за формулою (4).
6. За формулою (6) визначають та виключають "викиди".
7. Знаходять похибку визначення середнього значення вимірюваної величини  $\sigma_{\bar{a}}$  за формулою (7).
8. За довірчою ймовірністю  $\beta$ , заданою викладачем, та за кількістю проведених дослідів  $n$  із використанням даних табл. 1 знаходять відносну довжину довірчого інтервалу  $t_\beta$ .
9. Абсолютну похибку  $\varepsilon_\beta$  обчислюють за формулою (9).
10. Записують значення вимірюваної величини із зазначенням похибки вимірювань як

$$a_0 = \bar{a} \pm \varepsilon_\beta, \beta = \dots$$

або

$$a_0 = \bar{a} \pm 3\sigma_{\bar{a}},$$

якщо довірна ймовірність не задана викладачем.

### Оцінка точності результату непрямих вимірювань

В деяких випадках характеристики оптичних деталей або систем не можуть бути виміряні безпосередньо. Наприклад, фокусну відстань оптичної системи безпосередньо виміряти не можна. Її визначають опосередковано з використанням результатів прямих вимірювань відрізків, величини яких входять у формулу для розрахунку фокусної відстані.

Щоб оцінити точність вимірювання параметра  $P = P(a, b, c)$ , який є функцією декількох аргументів -  $a, b, c$ , виміряних безпосередньо, необхідно обчислити:

1. Середнє арифметичне параметрів  $a, b, c$  тобто, знайти  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  за формулою (1).
2. Середнє арифметичне значення параметра  $P$  шляхом підстановки у формулу для розрахунку  $P$  середніх арифметичних  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ .

3. Середньоквадратичні відхилення результатів вимірювання параметрів  $a, b, c$ , тобто. знайти  $\sigma_{\bar{a}}, \sigma_{\bar{b}}, \sigma_{\bar{c}}$  за формулами (3) та (7).
4. Коефіцієнти впливу параметрів  $a, b, c$ , тобто значення часткових похідних при значенні параметрів  $a, b, c$ , рівних їх середнім арифметичним:

$$\begin{array}{ccc}
 k_a = \frac{\partial P(a, b, c)}{\partial a} & k_b = \frac{\partial P(a, b, c)}{\partial b} & k_c = \frac{\partial P(a, b, c)}{\partial c} \\
 a = \bar{a} & a = \bar{a} & a = \bar{a} \\
 b = \bar{b} & b = \bar{b} & b = \bar{b} \\
 c = \bar{c} & c = \bar{c} & c = \bar{c}
 \end{array} \quad . \quad (12)$$

5. Середнє квадратичне відхилення результату непрямого вимірювання параметра  $\sigma_{\bar{p}}$

$$\sigma_{\bar{p}} = \sqrt{(k_a \sigma_a)^2 + (k_b \sigma_b)^2 + (k_c \sigma_c)^2}. \quad (13)$$

6. Відносну довжину довірчого інтервалу

$$\varepsilon_{\beta} = \sigma_{\bar{p}} t_{\beta}. \quad (14)$$

Довірчу ймовірність  $\beta$  задає викладач, який проводить лабораторне заняття.

7. Точність вимірювання параметра

$$P = \bar{P} + \varepsilon_{\beta}, \quad \beta = \dots,$$

з якої випливає, що справжнє значення результату непрямого вимірювання параметра  $P$  знаходиться у вказаному інтервалі з ймовірністю  $\beta$ .

## **Лабораторна робота №1**

### **АТЕСТАЦІЯ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ГОНІОМЕТРІ ГС-5**

Мета роботи - вивчити методи прямого вимірювання двогранних кутів між плоскими полірованими поверхнями, обчислення пірамідальності призм та клиновидності плоскопаралельних пластин. Придбати навички вимірювання кутів на гоніометрі ГС-5.

#### **Завдання**

1. Повторити теоретичний матеріал щодо атестації оптичних деталей на гоніометрах.
2. Ознайомитись з конструкцією та правилами експлуатації гоніометра ГС-5.
3. Вивчити метод вимірювання заломлюючих кутів і пірамідальності призм, клиноподібності плоскопаралельних пластин.
4. Виміряти кути між гранями призми, обрахувати пірамідальність призми та клиноподібність плоскопаралельної пластини.
5. Здійснити оцінку точності виконаних вимірювань.

#### **Загальні положення**

Для вимірювання та контролю двогранних кутів призм, пірамідальності призм та клиновидності плоскопаралельних пластин, а також для визначення показника заломлення та дисперсії призм в оптичних вимірювальних лабораторіях часто застосовуються гоніометри [4].

Гоніометри відносяться до точних оптико-механічних приладів, вимірювання кутів на яких здійснюється абсолютним методом шляхом порівняння з точно градуйованим лімбом (круговою шкалою),

Оптичною промисловістю СРСР згідно з ГОСТ 10021-74 випускались гоніометри типів ГС-30, ГС-10, ГС-6, ГС-2, ГС-1 та їх різні модифікації. Числа в позначеннях показують допустиму похибку вимірювання кутів у секундах.

Основні характеристики гоніометрів наведено у табл. 1.1.

У цій роботі вимірювання проводяться гоніометром ГС-5 - одним із найпоширеніших оптичних приладів для прецизійного вимірювання кутів безконтактним методом.

Таблиця 1.1

### Основні характеристики гоніометрів

Параметри	ГС-30	ГС-10	ГС-5	ГС-1М
Збільшення труби с основним окуляром	25 <sup>x</sup>	25 <sup>x</sup>	41 <sup>x</sup>	69 <sup>x</sup>
Фокусна відстань, мм				
- об'єктива	250	250	400	674
- основного окуляра	9,8	9,8	9,8	9,8
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	40	50	70
Роздільна здатність в центрі поля зору	4'	4'	3'	-
Поле зору труби, кут.мін.	-	-	50	-
Ціна поділки:				
- лімба, кут.мін.	60	20	20	10
- шкали оптичного мікрометра	-	1'	1'	0,5'
- шкали мікроскопа, кут.мін.	1	-	-	-
Збільшення мікроскопа	75x	46x	53x	-
Похибка вимірювання	±30'	±10'	±5'	-

### Конструкція гоніометра ГС-5

Основними частинами гоніометра є: зорова труба (із звичайним або автоколімаційним окуляром), коліматор, лімб і відліковий мікроскоп. Коліматор 1 гоніометра (рис. 1.1, а) встановлено на колонці 2, яка є нерухомо з'єднаною з основою 3 приладу. На основі 3 розташована осьова система з лімбом 4, алідадою 5 і столиком 6. Алідада 5 несе на собі колонку з зоровою трубою 7 і може обертатися як від руки, так і за допомогою мікрометричного механізму. Конструкцією передбачено обертання лімба 4 з алідадою 5, лімба 4 без алідади 5, лімба 4 разом зі столиком 6 при нерухомій зоровій трубці 7, столика 6 спільно з лімбом 4 та зоровою трубою 7 та одного столика. Столик 6 може нахилитися у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Коліматор 1 і зорова труба 7 можуть нахилитися на невеликі кути навколо осі зорової. Для виключення похибки ексцентриситету лімба в гоніометрі використано принцип суміщеного відліку,

коли зображення двох діаметрально протилежних ділянок лімба 4 проєктуються в поле зору одного мікроскопа відлікового 8 (рис, 1.1, б).

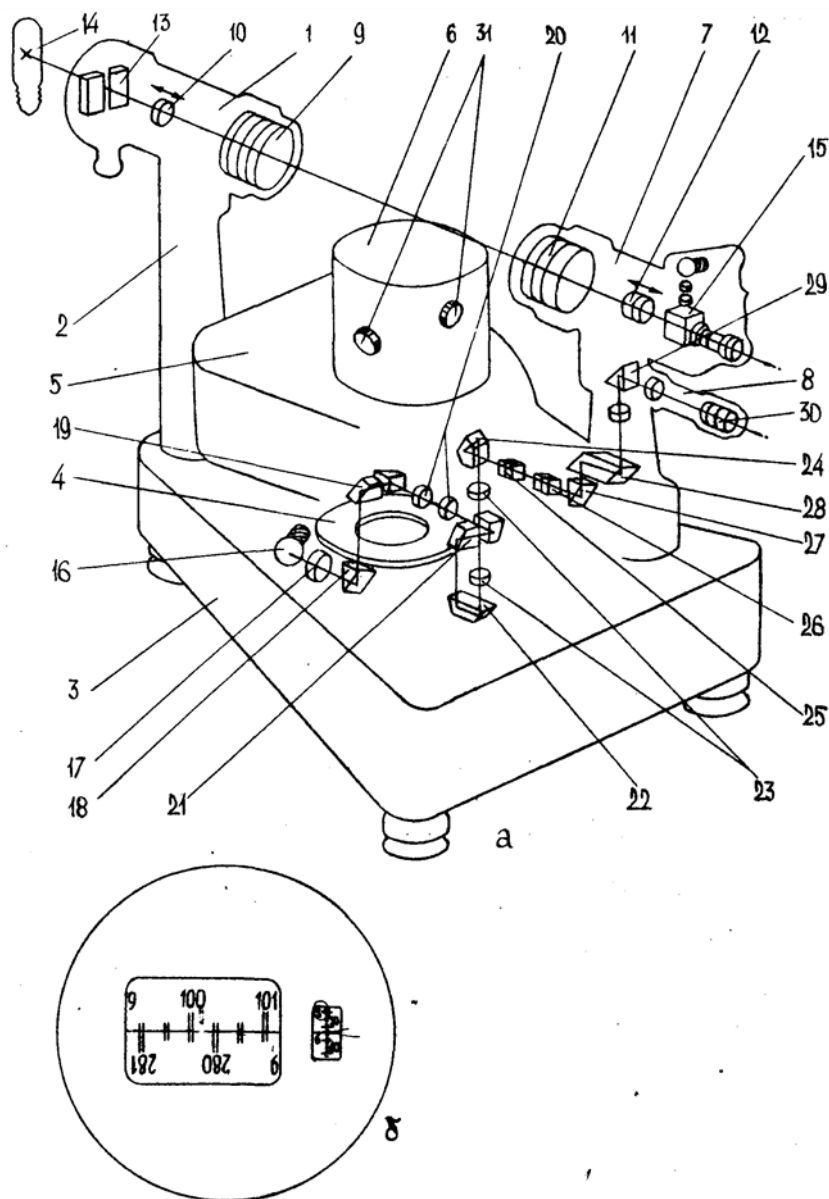


Рис. 1.1. Конструкція гоніометра ГС-5

Коліматор 1 і зорова труба 7 мають однакові телеоб'єктиви 9, 10 та 11, 12, фокусування яких здійснюється переміщенням від'ємних компонентів 10 та 12.

У фокальній площині об'єктива коліматора 1 встановлена регульована щілина 13, що освітлюється монохроматичним світлом від джерела випромінювання 14. Автоколімаційний окуляр 15 зорової труби 7 є змінним.

В якості автоколімаційного окуляра коліматора та зорової труби використовується окуляр із кубом-призмою та двома сітками (рис. 1.2, а) та окуляр Аббе (рис. 1.3, а) відповідно.

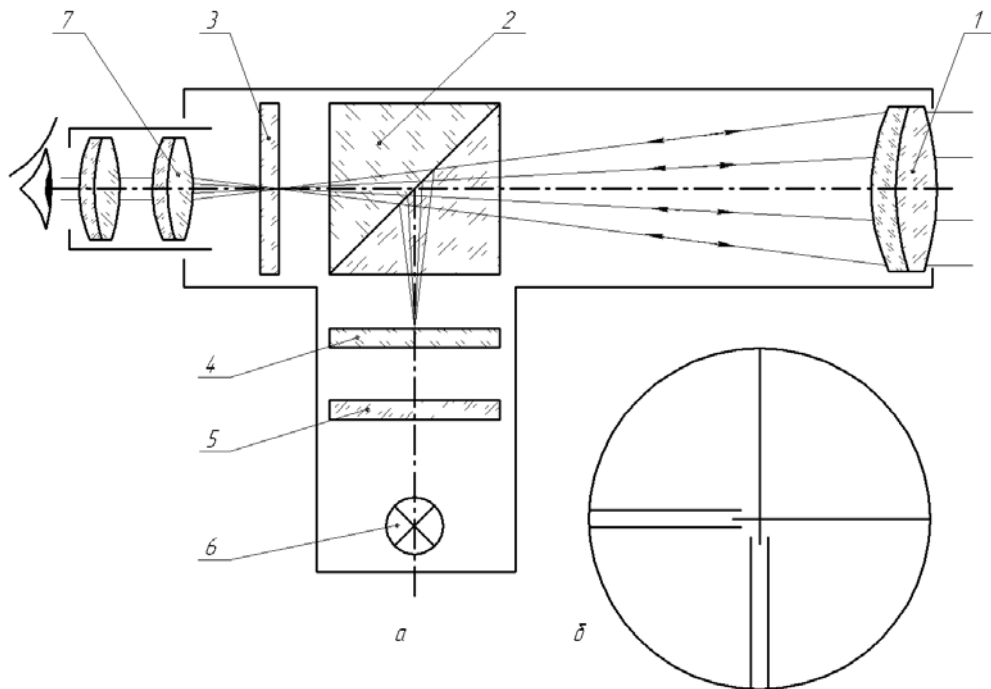


Рис. 1.2. Конструкція автоколімаційного окуляра коліматора

Відлікова система приладу складається з освітлювальної та проекційної частин. Лампа 16 через світлофільтр 17 і призму 18 освітлює ділянку лімба 4. Освітлені штрихи лімба проєктуються об'єктивом 20 через призми 19 і 21 на діаметрально протилежну ділянку лімба 4 у перевернутому вигляді. Об'єktiv 23 через призми 22, 24, 26 створює зображення розташованих поряд штрихів обох ділянок лімба в площині польової діафрагми, яку нанесено на вихідній грані призми 27. Через призми 28 і 29 це зображення розглядається у відліковий мікроскоп 8. Між призмами 24 і 27 розміщено дві пари клинів 25 (нерухомих) і 26 (рухомих) оптичного компенсатора. При русі рухомих клинів у напрямку ходу променів останні зміщуються назустріч один одному, що дозволяє поєднати або розвести зображення штрихів діаметрально протилежних ділянок лімба. В окулярі 30 відлікового мікроскопа 8 розглядається одночасно зображення штрихів лімба і шкали мікрометра що жорстко з'єднана з рухомими клинами.

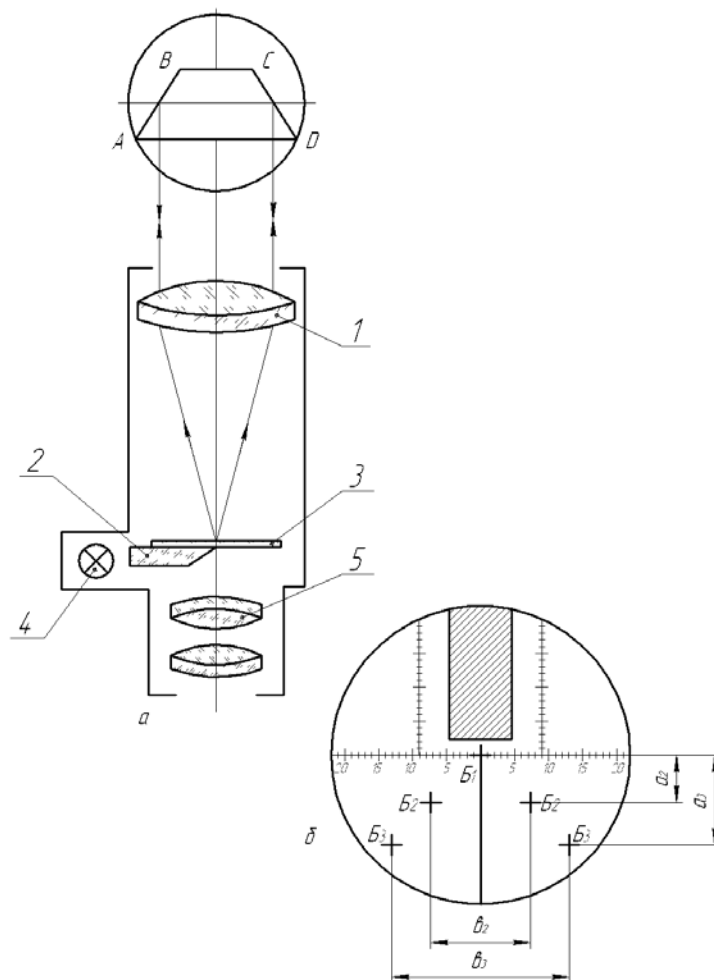


Рис. 1.3. Конструкція автоколімаційного окуляра зорової труби

Шкала розрахована таким чином, що переміщення її на 600 поділок зміщує верхнє зображення штрихів лімба щодо нижнього на  $10'$ . Кожна поділка шкали відповідає  $1/600$  від  $10$ , тобто одній кутовій секунді. Вигляд поля зору відлікового мікроскопа зображено на рис. 1.1, б.

### Автоколімаційні зорові труби

Автоколімаційна зорова труба - це поєднання зорової труби та коліматора. У коліматорі встановлюється один з автоколімаційних окулярів (Аббе, Гаусса, з кубиком та двома сітками, з кубиком та однією сіткою тощо).

Оптична схемою автоколіматора з окуляром-кубом (рис. 1.2, а) включає об'єktiv 1, у фокальній площині якого розташовані сітки 3 і 4. Сітки оптично пов'язані світлоподільним кубиком 2. Сітка 4 підсвічується від джерела світла 6 через світлофільтр 5. Поле зору показано на рис. 1.2,б. Відмінною особливістю автоколімаційного окуляра Аббе (рис. 1.3,а) є прямокутна призма 2 для

підсвічування сітки 3 від джерела світла 4. Втрати світла в окулярі не перевищують 15%. Недоліком такого окуляра є те, що призма займає частину поля зору (рис. 1.3, б). Окуляр Аббе має спеціальну кутову вимірювальну сітку, проградуйовану в кутових секундах.

### Приведення гоніометра ГС-5 у робочий стан

Для приведення гоніометра у робоче положення необхідно:

1. Встановити алідаду 5 приладу за допомогою підйомних гвинтів та рівня в горизонтальне положення;
2. Вертикальну вісь обертання столика 6 привести в перпендикулярне положення по відношенню до візирної осі 7 автоколіматора;
3. Візирні осі коліматора 1 і автоколіматора 7 встановити паралельно.

Для виконання першої умови потрібно обертанням трьох підйомних гвинтів основи привести в центр повітряну бульбашку круглого рівня, укріпленого на корпусі алідади.

Другу умову перевіряють за збігом автоколімаційного зображення перехрестя, відбитого від поверхні плоскопаралельної пластинки, встановленої на столику, з перехрестям сітки. Обертанням окуляра досягають різкого зображення штрихів сітки. Фокусуючий маховик труби встановлюють за шкалою на позначку  $\infty$ , потім, приклавши плоскопаралельну пластинку впритул до оправы об'єктива, спостерігають автоколімаційне зображення перехрестя. Якщо зображення є недостатньо різким та нерівномірно освітленим, необхідно перефокусувати трубу та правильно розташувати джерело світла в автоколімаційному окулярі.

Плоскопаралельну пластинку встановлюють робочою (полірованою) гранню на столику так, щоб її поверхня, що відбиває, була приблизно перпендикулярною одному з підйомних гвинтів 31 столика 6 і оптичній осі труби 7 автоколіматора. Спостерігаючи в окуляр, одночасно нахиляючи за допомогою підйомного гвинта столик і обертаючи його навколо вертикальної осі в невеликих межах  $\pm (10...20)^\circ$ , знаходять автоколімаційне зображення перехрестя і нахилом столика поєднують його з основним хрестиком. Повертають столик на  $180^\circ$  і поєднують відбите зображення перехрестя з сіткою. Для цього користуються гвинтом столика та юстирувальним гвинтом нахилу труби. Знову повертають столик у початкове положення та контролюють положення перехрестя. Послідовним юстуванням домагаються поєднання

зображень при двох положеннях плоскопаралельної пластинки. Потім пластинку повертають на столику на  $90^\circ$  перпендикулярно до другого підйомного гвинта столика, знаходять автоколімаційне зображення і поєднують його з перехрестям шляхом нахилу цього гвинта. Таким чином досягається перпендикулярність вертикальної осі обертання та візирної осі автоколімаційної труби.

Для виконання третьої умови включають вузол підсвітки коліматора. Фокусуєчий компонент коліматора встановлюють за шкалою на відмітку  $\infty$ . Обертають автоколіматор доти, доки у полі зору з'явиться зображення сітки коліматора. У разі нерізкого зображення сітки фокусують об'єктив коліматора. Якщо горизонтальні нитки сіток у полі зору не збігаються, необхідно поєднати їх юстирувальним гвинтом нахилу труби коліматора. Візирні осі коліматора та автоколіматора при цьому будуть паралельні одна одній. Гоніометр приведено в робоче положення.

### **Методика зняття відліку за вимірюванняювальним мікроскопом гоніометра ГС-5**

Для зняття відліку необхідно:

1. Повернути маховичок відлікового мікроскопа до поєднання верхніх та нижніх штрихів лімба.

2. Число десятків кутових мінут дорівнює кількості інтервалів, укладених між верхнім штрихом, який відповідає відрахованому числу градусів і нижнім оцифрованим штрихом, що відрізняються від верхнього на  $180^\circ$  (рис. 1.4).

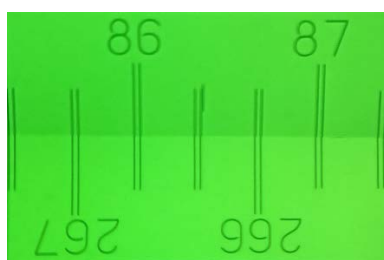


Рис. 1.4. Суміщення зображень лімба

3. Число одиниць кутових мінут відраховується за шкалою мікрметра у правому вікні по лівому ряду чисел.

4. Число десятків кутових секунд відраховується у тому ж вікні мікрметра по правому ряду чисел.

5. Число одиниць кутових секунд дорівнює числу поділок між штрихами, що відповідають відліку десятків кутових секунд, і нерухомим горизонтальним індексом.

Зображення поля зору на рис. 1.1,б відповідає відліку  $100^{\circ} 15'57''$ .

### Вимірювання заломлюючого кута призми автоколімаційним методом

Досліджувану призму встановлюють на столику так, щоб одна з граней, наприклад **AB** (рис. 1.5), розташовувалась перпендикулярно до одного з гвинтів 31 (рис. 1.1, а) нахилу столика. Повертаючи зорову трубу в горизонтальній площині та користуючись гвинтом столика 31, знаходять автоколімаційне зображення перехрестя. За допомогою гвинтів 31 зображення поєднують з перехрестям сітки труби.

Поворотом у горизонтальній площині труби або столика із призмою на величину  $\beta$  знаходять автоколімаційне зображення перехрестя від другої грані призми **AC** та поєднують його з перехрестям сітки. При зворотному повороті труби, як правило, автоколімаційне зображення не збігається з перехрестям сітки. Тому знову за допомогою гвинтів 31 грань призми виставляють перпендикулярно до осі труби і повертають трубу на кут  $\beta$  де також поєднують зображення і перехрестя. Таку установку роблять доти, доки зображення і перехрестя сітки не будуть точно поєднуватися в обох положеннях труби. Без такої установки вимірювання будуть хибними.

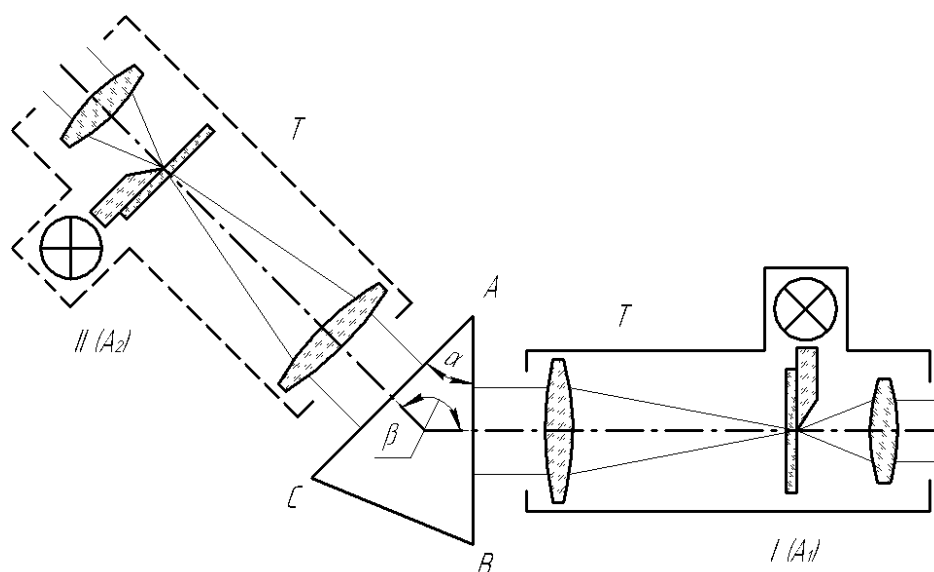


Рис. 1.5. Вимірювання кутів призми автоколімаційним методом

Після правильної установки призми проводять вимірювання у такому порядку.

1. В одному положенні труби I (рис. 1.5) знімають відлік по лімбу  $A_1$ .
2. Повернувши трубу або столик з лімбом до отримання поєднань перехрестя при спостереженні другої грані (положення труби II), знімають другий відлік  $A_2$ .
3. Кут призми визначається як різниця

$$\alpha = (180 - |A_1 - A_2|). \quad (1.1)$$

### **Вимірювання заломлюючого кута призми методом відбиття**

Вимірювану призму встановлюють на столик. Між коліматором та трубою встановлюють кут  $(30 - 60)^\circ$ .

Спостерігаючи в трубу і повертаючи столик спочатку рукою, а потім мікрометричним гвинтом (рис. 1.1,а), поєднують зображення перехрестя коліматора, отримане від першої грані призми  $AB$  з відповідною лінією перехрестя сітки труби (рис. 1.6). Закріпивши столик у цьому положенні, знімають відлік  $B_1$ . Повернувши столик до поєднання перехрестя коліматора, отриманого від другої грані  $AC$ , з ниткою перехрестя сітки труби, знімають відлік  $B_2$ . Кут призми визначається як різниця

$$\alpha = (180 - |B_1 - B_2|). \quad (1.2)$$

### **Вимірювання кута пірамідальності призми та кута клиноподібності плоскопаралельної пластини**

У загальному випадку при виготовленні призм виникає як помилка гострих кутів, так і непаралельність ребер призми. Пірамідальність призми можна характеризувати кутом  $\varepsilon$  між ребром прямого кута і гіпотенузною гранню.

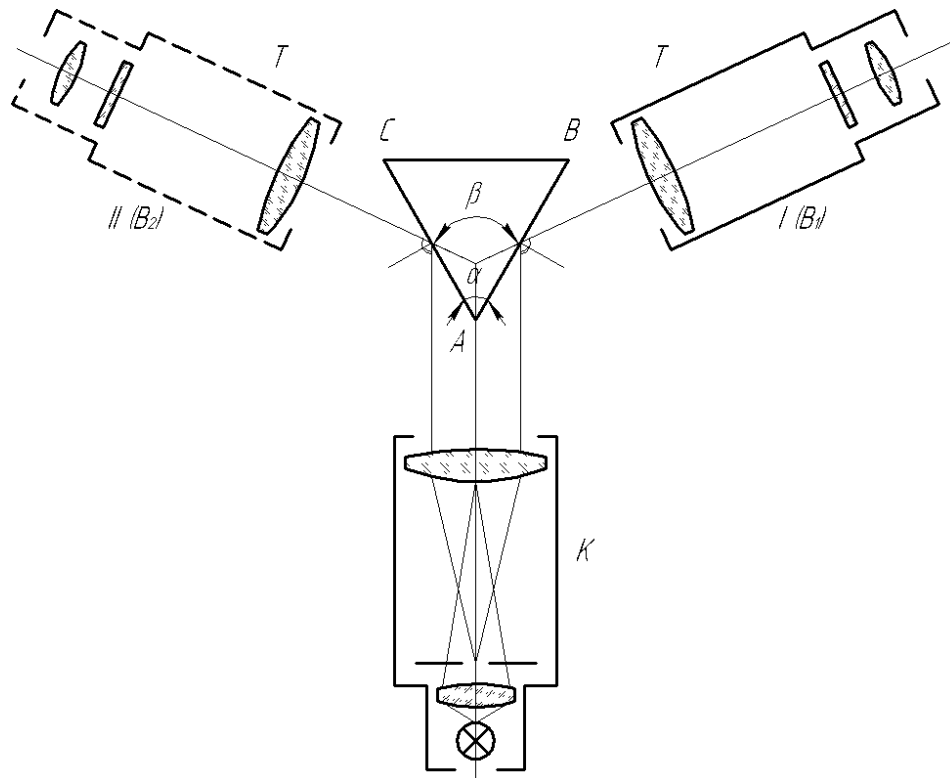


Рис. 1.6. Схема вимірювання кутів з використанням коліматора

Контроль пірамідальності прямокутних призм, а також призм Дове можна виконати за допомогою автоколімаційної зорової труби (рис. 1.3,а), встановленої перпендикулярно до гіпотенузної грані **AD**. У загальному випадку в полі зору спостерігаються п'ять відблисків. Центральний відблиск  $B_1$ , виникає при відбитті променів від гіпотенузної грані **AD**. Блики  $B_2$  виникають від правого та лівого пучків променів, що увійшли в призму, двічі відбитих від граней **AB** і **CD** та один раз від грані **AD**. Блики  $B_3$  утворені при п'ятикратному відбитті променів (рис. 1.3,б).

Якщо призма не має пірамідальності, то всі відблиски розташовуються на одній прямій, причому кутові відстані між відблисками  $B_2 - B_2$ , і  $B_3 - B_3$  відповідно дорівнюють  $b_2 = 4n\gamma$  і  $b_3 = 8n\gamma$  де  $\gamma$  - помилка прямого кута призми,  $n$  - показник заломлення матеріалу призми. Якщо призма має пірамідальність  $\epsilon$ , то кутова величина зміщення ліній  $B_2 - B_2$ , і  $B_3 - B_3$  відносно відблиску  $B_1$  відповідно дорівнює  $a_2 = 2n\epsilon$  і  $a_3 = 4n\epsilon$ .

Пірамідальність призми можна визначити також іншим способом, який придатний для призм будь-якого типу. Отримують автоколімаційні зображення від однієї і другої граней призми. Гвинтами 31 (рис. 1.1,а) поєднують зображення

зі шкалою сітки окуляра доти, доки автоколімаційне зображення (хрестик) не буде знаходитись на горизонтальній шкалі сітки при наведенні на першу та другу грані.

Величина зміщення  $\beta_1$ , хрестика в одиницях окулярної шкали (кутових секундах) дає подвоєний кут пірамідальності

$$\beta_1 = 2\varepsilon. \quad (1.3)$$

Клиновидність плоскопаралельної пластинки обумовлена непаралельністю її граней і характеризується кутами  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  у двох взаємно перпендикулярних площинах. Кутові відстані відблиску  $B_2$  від тильної грані пластини відносно центрального відблиску  $B_1$  лицьової грані в двох площинах відповідно дорівнюють

$$C_1 = 2n\varepsilon_1, C_2 = 2n\varepsilon_2. \quad (1.4)$$

### Порядок виконання роботи

1. Встановити досліджувану призму на столик гоніометра і виставити стіл відповідно методики ст. 14-15.
2. Зняти відліки  $A_1$  і  $A_2$  відповідно до методики вимірювання заломлюючого кута призми автоколімаційним способом). Повторити вимірювання 6 разів. Дані занести до табл. 1.2.
3. Зняти відліки,  $B_1$  і  $B_2$ , користуючись методикою вимірювання заломлюючого кута методом відбиття (ст. 17-18). Вимірювання повторити 6 разів. Дані також занести до табл. 1.2.
4. Здійснити статистичну обробку результатів вимірювань.
5. Вибрати метод вимірювання пірамідальності призми залежно від типу призми.
6. Зняти відліки  $b_1$ , або  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  відповідно до методик, викладених на ст. 18-19. Результати вимірювань занести до табл. 1.3.

Таблиця 1.2

### Вимірювання заломлюючого кута призми

Номер і тип призми:						
Вимірювана величина	Номер вимірювання					
	1	2	3	4	5	6
$A_1$						
$A_2$						
$\alpha = (180^\circ -  A_1 - A_2 )$						
$B_1$						
$B_2$						
$\alpha = (180^\circ -  B_1 - B_2 )$						

7. Встановити на столик гоніометра замість призми, виданої викладачем, плоскопаралельну пластинку.
8. Зняти відліки  $C_1$  та  $C_2$  відповідно до методики, викладеної в п. 1.7.3. Результати вимірювань занести до табл. 1.3.

Таблиця 1.3

### Вимірювання кута пірамідальності призми та кута клиновидості пластинки

Номер і тип призми, n=				Номер пластини, n=	
Вимірювана величина	Значення	Порахована величина	Значення	Величина	Значення
$b_1$		$\varepsilon$		$C_1$	
$b_2$		$\gamma$		$\varepsilon_1$	
$a_2$		$\varepsilon$		$C_2$	
$b_3$		$\gamma$		$\varepsilon_2$	
$a_3$		$\varepsilon$			

9. Здійснити статистичну обробку отриманих результатів.

## **Лабораторна робота №2**

### **ВИМІРЮВАННЯ РАДІУСІВ КРИВИЗНИ СФЕРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Мета роботи - вивчити контактні та безконтактні методи вимірювання радіусів кривизни сферичних поверхонь. Придбати навички вимірювання радіусів кривизни оптичних деталей на сферометрі ИЗС-8.

#### **Завдання**

1. Вивчити методи вимірювання радіусів кривизни сферичних поверхонь контактним і безконтактними способами.
2. Вивчити конструкцію та технічні характеристики сферометра ИЗС-8.
3. Виміряти висоту кульового сегмента опуклої та увігнутої сферичних поверхонь.
4. Обчислити радіуси кривизни опуклої та увігнутої сферичних поверхонь.
5. Здійснити оцінку точності виконаних вимірювань.

#### **Загальні положення**

Радіуси кривизни вимірюються як у процесі виготовлення, так і при остаточній обробці оптичних деталей із сферичними поверхнями. Методи вимірювання радіусів кривизни розділяють на механічні та оптичні (відповідно – контактні та безконтактні). Вибір методу залежить від величини вимірюваного радіусу кривизни, необхідної точності та зручності виконання вимірювання. На практиці використовують гвинтові мікрометри для малих радіусів, сферометри – для середніх і великих радіусів. Вимірювання регламентуються ДСТУ «ГОСТ 8.089:2008. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Сферометри. Методи і засоби перевірки». Для радіусів кривизни більше одного метра використовують оптичні методи - автоколімації з центру кривизни, метод кілець Ньютона.

Для контактного вимірювання висоти кульового сегмента опуклої або увігнутої сферичної поверхні і визначення радіусів кривизни використовують сферометри.

Широкого поширення у вимірювальних лабораторіях набули сферометри ИЗС-7 та ИЗС-8. Ці прилади відрізняються діапазоном вимірюваних радіусів:

сферометр ИЗС-7 вимірює невеликі радіуси кривизни деталей, які можна встановити на вимірювальному кільці, а накладний сферометр ИЗС-8 використовують для великогабаритних деталей. Технічні характеристики цих сферометрів наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Технічні характеристики сферометрів**

Характеристика / модель	ИЗС-7	ИЗС-8
Межі вимірювання радіусів кривизни, мм		
пар пробного скла	37,5 - 750	-
окремих сферичних поверхонь	10 - 1000	80 - 40000
Межі вимірювання стрілки прогину, мм	± 15	± 15
Ціна поділки відлікового пристрою, мм	0,001	0,001
Гранична похибка результату вимірювання радіусів кривизни окремих сферичних поверхонь, %, в діапазоні, мм		
10 - 37,5	±0,07	-
37,5 - 1000	±0,04	-
80 - 750	-	±0,04
750 - 1000	-	±0,05
1000 - 5000	-	±0,15
5000 - 40000	-	±0,5
при вимірюванні радіусів кривизни пар пробного скла	±0,02	-
Габаритні розміри, мм	80x240x210	320x320x180
Маса, кг	9,5	2,4

**Конструкція сферометра ИЗС-8**

Основними функціональними частинами сферометра є корпус, усередині якого розташований рухомий вимірювальний стрижень з міліметровою шкалою, відліковий мікроскоп зі спіральним окуляр-мікрометром, змінні вимірювальні кільця, освітлювач.

Сферометр забезпечено чотирма змінними опорними кільцями різного діаметру. Кожне кільце має три сталеві опорні кульки, якими сферометр встановлюється на вимірювальну поверхню. Кульки розташовані одна відносно одної під кутом 120°. Кільце надягають на відповідну посадкову поверхню, яка розташована в нижній частині корпусу.

Для вимірювання стрілки  $h$  кульового сегмента необхідно залежно від

радіусу кривизни сферичної поверхні та діаметра деталі вибрати таке опорне кільце, при вимірюванні з яким похибка буде найменшою. Величини радіусів опорного кільця та опорних кульок наведені в табл. 2.2. Величини похибок показань залежно від радіусу  $r$  опорного кільця показано в табл. 2.3.

Таблиця 2.2

### Радіуси опорних кілець та кульок

Номер кільця (вказано на зовнішній стороні кільця)	Радіус, мм	
	кільця	кульки
1	$r_1 = 45,0190$	$\rho_1 = 3,1060$
2	$r_2 = 74,9500$	$\rho_2 = 3,1100$
3	$r_3 = 109,967$	$\rho_3 = 3,1110$
4	$r_4 = 119,824$	$\rho_4 = 3,1120$

Таблиця 2.3

### Похибка вимірювань

Радіус кривизни сферичної поверхні $R$ , мм	Похибка показань в залежності від радіуса опорного кільця, %			
	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
80	0,04	-	-	-
750	0,07	0,04	0,06	0,04
1000	0,10	0,05	0,07	0,05
5000	0,50	0,25	0,20	0,15
40000	0,50	1,70	0,80	0,50

Конструкцію сферометра ИЗС-8 показано на рис. 2.1. Всередині масивного корпусу по точним направляючим 3 переміщається вимірювальний стрижень 1, на якому жорстко закріплено міліметрову шкалу 2. Гідравлічна протизвага 4 забезпечує плавне зіткнення кульки вимірювального стрижня з поверхнею вимірюваної деталі 5. Шкала 2 (рис. 2.1, б) освітлюється джерелом 6. Об'єктивом 7 відлікового мікроскопа зображення шкали 2 за допомогою прямокутної призми 8 та напівпентапризми 9 проєктується в передню фокальну площину

окуляра 12. Збільшення об'єктива становить  $5^x$ , а збільшення окуляра  $12,5^x$ . Для зручності спостереження оптичну вісь окулярної частини відлікового мікроскопа нахилено на кут  $45^\circ$ . Відліковим пристроєм мікроскопа є спіральний окулярний мікрометр ОМС. На нерухомій окулярній сітці 10 нанесено лінійну шкалу із 10 поділок та індекс (рис. 2.1, в). На сітці 11, яка що може повертатись під дією маховичка 13, нанесено одинадцять витків подвійної спіралі Архімеда і кругова шкала. Кругову шкалу розділено на 100 частин. Вид поля зору окуляра показано на рис, 2.1, г. Кінцеве зображення є результатом накладення зображень трьох шкал: міліметрової (б) шкали, шкали десятих часток міліметра (в) і шкали сотих та тисячних часток міліметра.

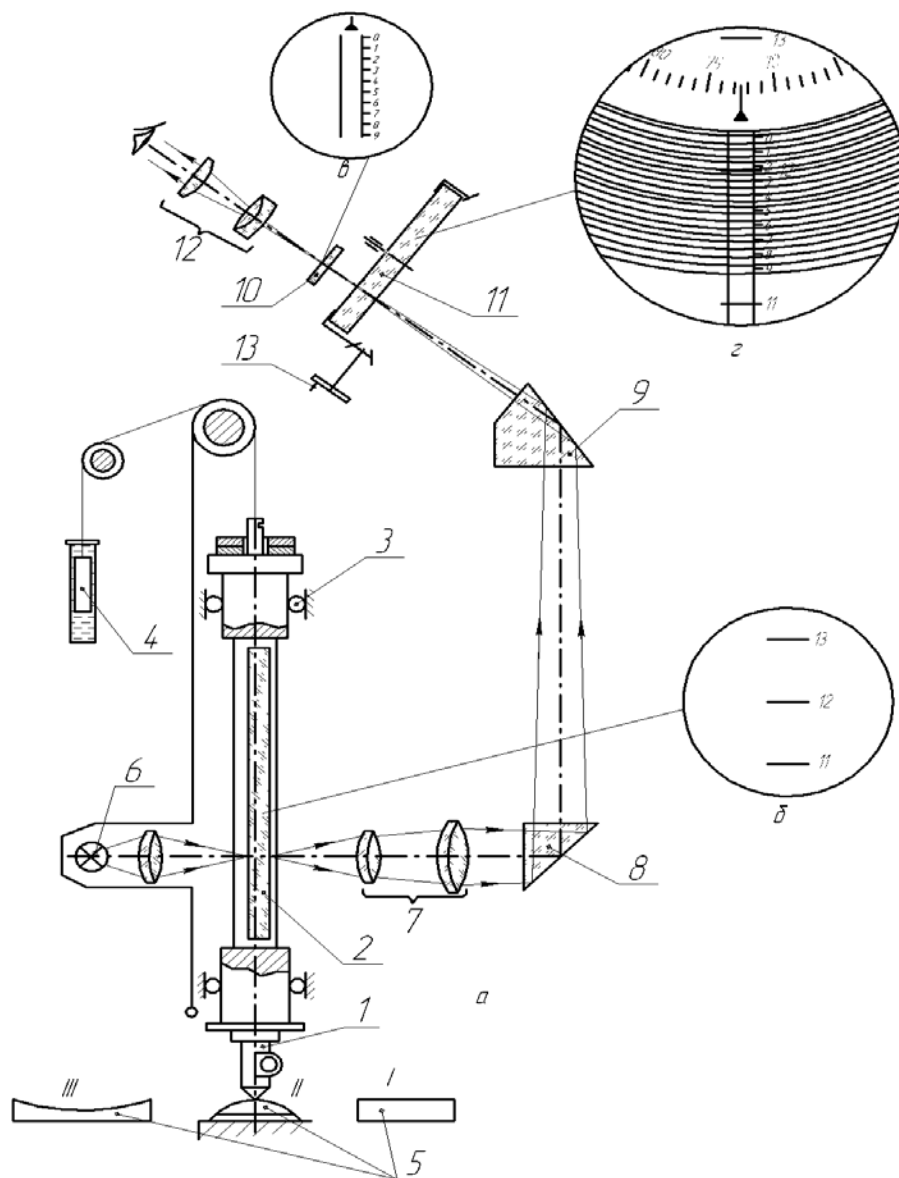


Рис. 2.1. Конструкція сферометра ИЗС-8

Для виконання вимірювання необхідно поворотом маховичка встановити шкалу 2 так, щоб штрих міліметрової шкали, що знаходиться в зоні витків, виявився точно посередині між лініями найближчого до нього витка спіралі. Індексом для відліку міліметрів є нульовий штрих нерухомої шкали. На рис. 2.1, г штрих "12" пройшов нульовий штрих шкали десятих часток, а штрих "13" ще не дійшов до нього. Відлік становить 12 мм плюс відрізок від штриха "12" до нульового штриха. У даному випадку число десятих у цьому відрізку дорівнює двом. Соті та тисячні частки міліметра відраховуються за круговою шкалою. Остаточний відлік становить 12,2725 мм.

### Методи вимірювання радіусів кривизни сферичних поверхонь.

#### Метод сферометра

При роботі із сферометром ИЗС-8 розрахунок радіусів кривизни сферичних поверхонь ( $R$ ) виконується з урахуванням радіуса вимірювального кільця ( $r$ ) та радіусу кульок  $\rho$  (рис. 2.2) за формулою

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \pm \rho, \quad (2.1)$$

де  $h$  – висота шарового сегменту (стрілка прогину), мм.

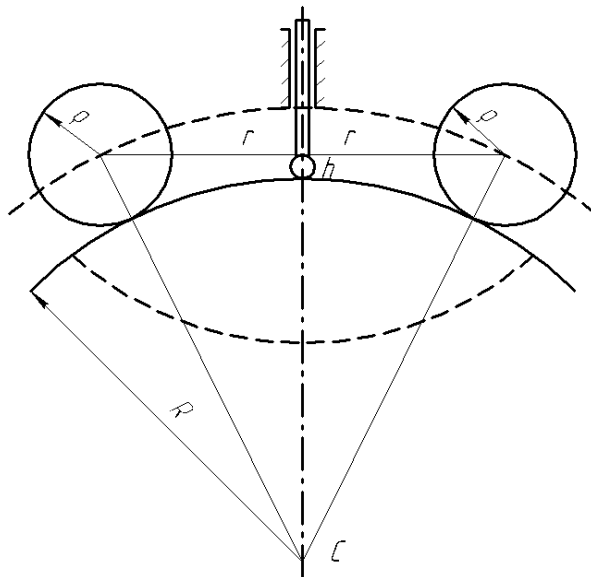


Рис. 2.2. Розрахунок радіусів кривизни

Для ввігнутої поверхні величину потрібно брати зі знаком «+», а для випуклої зі знаком «-».

## Метод кілець Ньютона

Цей метод дозволяє вимірювати стрілку прогину сферичної поверхні з точністю до 0,03 мкм. Він має перевагу перед сферометром у тих випадках, коли радіус кривизни поверхні є дуже великим.

Для виконання вимірювань зручно використовувати мікроскоп типу УІМ-21 (рис. 2.3) з освітлювальним пристроєм, що складається з монохроматичного джерела світла 1 (наприклад, натрієва лампа ДНаС-18), діафрагми 2, лінзи 3 і напівпрозорої пластинки 4. Промені, що виходять з освітлювальної системи, утворюють паралельний пучок, що падає нормально на плоскопаралельну пластинку 5, нижня поверхня якої є еталоном площини. Фокусна відстань лінзи 3 вибирається в залежності від мінімального діаметра діафрагми 2, кутовий розмір якої становить  $(15 - 20)'$ . Зручно використовувати лінзу 3 з фокусною відстанню (150 - 200) мм у поєднанні з діафрагмою діаметром до 1 мм.

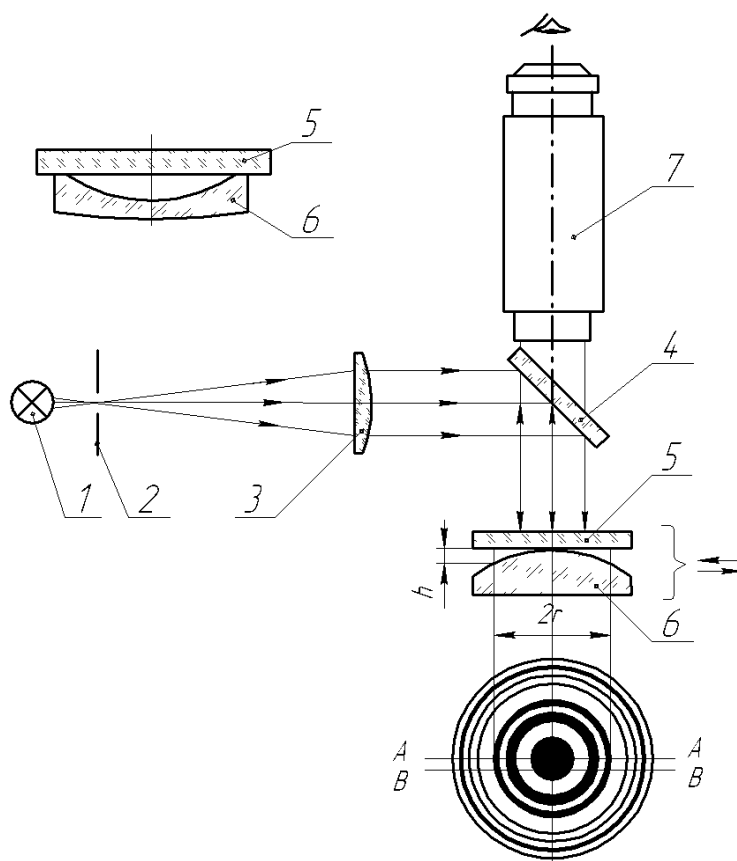


Рис. 2.3. Вимірювання радіуса кривизни методом кілець Ньютона

Для отримання кілець Ньютона на контрольну лінзу накладають пластинку 5. Кільця спостерігаються за допомогою мікроскопа 7 в повітряному шарі

навколо точки контакту. Вигляд поля зору показаний у нижній частині рис. 2.3. Система інтерференційних кілець має темний центр.

Очевидно, що різниця ходу  $\sigma$  між інтерферуючими променями дорівнює подвійній величині повітряного шару  $h$  між плоскою і сферичною поверхнями.

При цьому радіус сферичної поверхні

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h}, \quad (2.2)$$

де  $r$  - радіус сегмента сфери, що відповідає стрілці прогину  $h$ , дорівнює радіусу інтерференційного кільця, що відповідає різниці ходу  $2h$  між інтерферуючими променями.

При накладенні плоскопаралельної пластинки на лінзу в точці контакту відбувається помітна деформація поверхонь, що призводить до несиметричного розподілу освітленості в інтерференційних кільцях, розташованих близько до контактної точки. Тому на практиці вимірювання діаметрів кілець починають з 4 - 6-го кільця, а для обчислення  $R$  використовують еквівалентну формулу

$$R = \frac{D_2^2 - D_1^2}{4\lambda(m_2 - m_1)}, \quad (2.3)$$

де  $D_1$  і  $D_2$  - діаметри кілець відповідно з номерами  $m_1$  і  $m_2$ .

З формули (2.3) випливає, що власні номери кілець  $m_1$  і  $m_2$  можуть залишатися невідомими. Для обчислення радіуса  $R$  необхідно знати лише кількість вимірюваних кілець, тобто різницю  $m_2 - m_1$ .

Потрібно сказати, що центрування лінзи відносно оптичної осі мікроскопа не має суттєвого значення, так як обчислення  $R$  за формулою (2.3), виконуються за результатами вимірювань уздовж ліній А-А і В-В (рис. 2.3) і теоретично точно дають однакові результати.

Аналогічним чином визначають великий радіус кривизни для увігнутої сферичної поверхні. Взаємне розташування пластинки 5 та лінзи 6 показано у верхній частині рис. 2.3.

#### Автоколімаційний метод

Практично цей метод здійснюється за допомогою автоколімаційних мікроскопів і зорових труб. Основна перевага методу полягає в тому, що він є безконтактним.

Вимірювання великих радіусів кривизни сферичних поверхонь можуть бути виконані за допомогою автоколімаційної зорової труби **T** (рис. 2.4), окуляр якої має відліковий пристрій для вимірювання переміщень вздовж осі. Зорова труба попередньо повинна бути вивірена на нескінченність за допомогою коліматора або автоколімаційним методом.

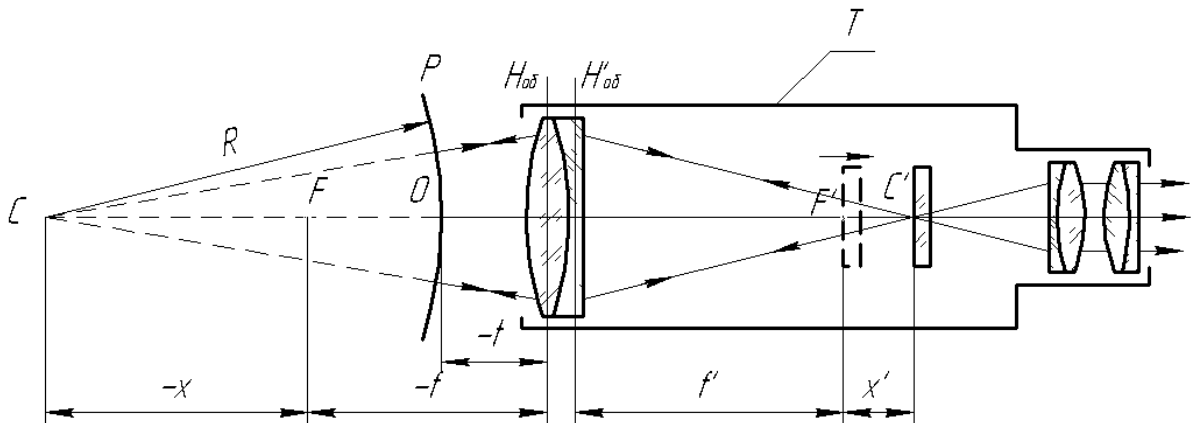


Рис. 2.4. Вимірювання радіусів кривизни автоколімаційним методом

Сферичну поверхню **P** з радіусом кривизни **R** встановлюють перед об'єктивом зорової труби. Окуляр переміщують уздовж осі від об'єктиву (або до об'єктиву, якщо поверхня **P** є увігнутою) до отримання різкого автоколімаційного зображення перехрестя. З ходу променів ясно, що центр кривизни сферичної поверхні **C** і точка **C'**, що збігається з перехрестям окуляра, є оптично пов'язаними.

Із рисунку 2.4 видно, що

$$-x - F = -R + t. \quad (2.4)$$

Враховуючи, що  $-f = f'$ , и використовуючи форму Ньютона, отримуємо

$$-R = \frac{f'^2}{x'} + f' - t. \quad (2.5)$$

Аналогічно для увігнутої сферичної поверхні маємо

$$R = \frac{f'^2}{x'} - f' + t. \quad (2.6)$$

На практиці такий спосіб зазвичай застосовують для вимірювання великих радіусів кривизни, коли зміщення  $x'$  окуляра є малим. Фокусна відстань  $f'$  об'єктива зорової труби є відомою. Величину відрізка  $t$  визначають непрямым

способом за положенням передньої головної площини  $H$  об'єктива і відстанню між вершиною  $O$  поверхні  $P$  і першою поверхнею лінзи об'єктива. При вимірюваннях великих  $R$  (понад 2000 мм) поверхню  $P$  встановлюють поблизу об'єктива. Тоді величиною відрізка  $t$  можна знехтувати. Для великих радіусів ( $R > 2$  м) похибка вимірювань може становити до 0,1%.

### Прядок виконання роботи

1. Підняти вимірювальний стрижень маховичком (на приладі є відповідний надпис) і закріпити стрижень у верхньому положенні гвинтом.
2. Встановити прилад на еталонну площину I (рис. 2.1) і відкрити гвинт. Обертаючи маховик проти годинникової стрілки, обережно опустити вимірювальний стрижень до контакту з цією площиною.
3. Зняти відлік за допомогою мікроскопа зі спіральним окулярним мікрометром.
4. Повторити вимірювання не менше 6 разів, щоразу піднімаючи стрижень і зсуваючи прилад на еталонній пластині. Результати вимірювань занести до табл. 2.3.
5. Перенести прилад на вимірювану деталь II (рис.2.1) і аналогічним чином зробити не менше шести вимірювань. Результати вимірювань занести до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

### Вимірювання висоти шарового сегмента

$r =$		$\rho =$		$\beta =$	
Номер вимірювання	Деталь №	Деталь №	Деталь №	Деталь №	Деталь №
1					
2					
3					
4					
5					
6					

6. Перенести сферометр на другу вимірювану деталь III (рис. 2.1) і повторити вимірювання по п.5 не менше 6 разів. Дані занести до табл. 2.3.
7. Здійснити необхідні обчислення для визначення радіусів кривизни сферичних поверхонь.
8. Провести статистичну обробку результатів вимірювань.

## **Лабораторна робота №3**

### **ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОПТИМЕТРІ**

Мета роботи - вивчити оптичну схему та принцип роботи оптиметра та ультраоптиметра, набути практичних навичок точного вимірювання товщини оптичних деталей.

#### **Завдання**

1. Вивчити оптичну схему, ознайомитися з конструкцією горизонтального оптиметра.
2. Оволодіти методами вимірювання товщин оптичних деталей на оптиметрі.
3. Здійснити вимірювання товщин оптичних деталей методом порівняння з еталонними мірами.
4. Оцінити точність виконаних вимірювань.

#### **Загальні положення Оптиметри**

Оптиметри використовуються для визначення малих відхилень розміру деталі, що вимірюється, від розміру кінцевої міри або еталонної деталі. Залежно від розташування лінії вимірювання оптиметри поділяються на вертикальні та горизонтальні [5]. Конструкція вимірювальних пристроїв горизонтальних і вертикальних оптиметрів однакові. Залежно від конструкції оптиметра шкала та вказівник можуть спостерігатися оператором через окуляр або на проекційному екрані.

Принцип функціонування оптиметрів ґрунтується на поєднанні оптичного та механічного важелів. Основною частиною оптиметра є вимірювальний пристрій чи трубка. Її оптична система містить автоколіматор з окуляром Аббе і дзеркало, що є механічно пов'язаним з вимірювальним стрижнем і може обертатись навколо горизонтальної осі (рис. 3.1). Для зручності візуального спостереження між об'єктивом і окуляром встановлено призму БР-90. Денне світло або світло від джерела підсвічування направляється шарнірно закріпленим дзеркалом 1 і прямокутною призмою підсвічування 2 на ліву (з боку спостерігача) частину сітки 3. На сітці 3 нанесено шкалу А з поділками і

цифрами. Шкала розташована у фокальній площині об'єктива 4, тому її автоколімаційне зображення після відбиття променів від дзеркала 5 формується в цій же площині, але із зміщенням в праву частину сітки. Вимірювальний стрижень 6 правим кінцем знаходиться у контакті з вимірюваною деталлю 7. Лівий кінець стрижня контактує із дзеркалом 5 і нахиляє його на кут, величина якого залежить від повздовжнього зміщення стрижня.

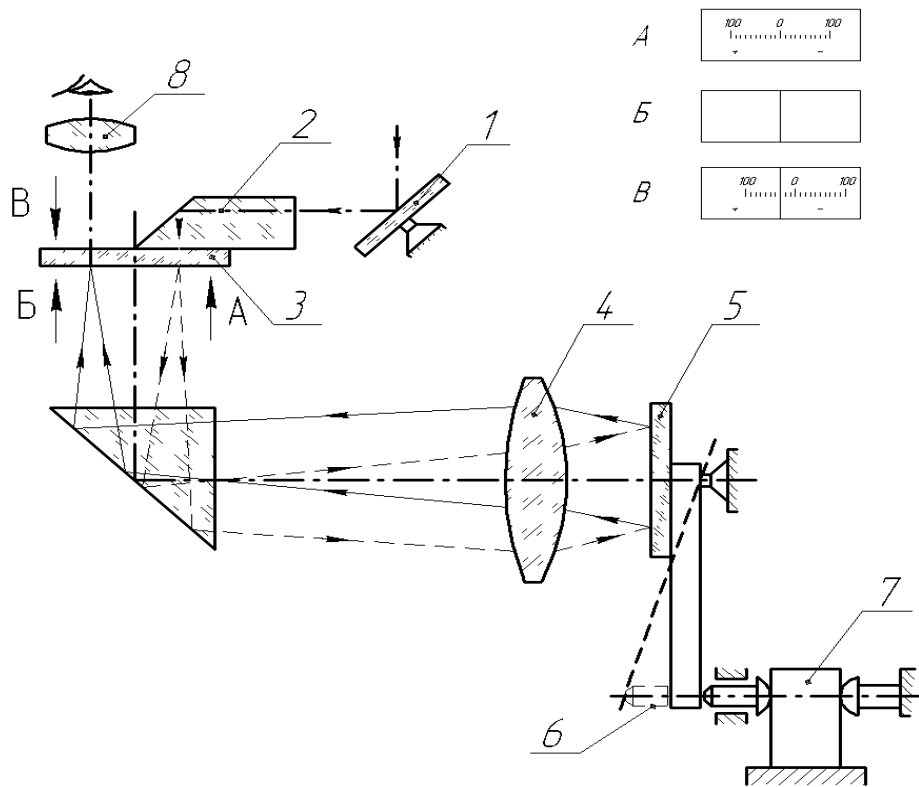


Рис. 3.1. Конструкція оптиметра

Поворот дзеркала 5 призводить до зміщення автоколімаційного зображення шкали, яке спостерігається в окуляр 8. Величина зміщення визначається по нерухомій мітці **Б**, нанесеній на сітці 3. В окуляр спостерігається сумарне зображення **В** (рис. 3.2).

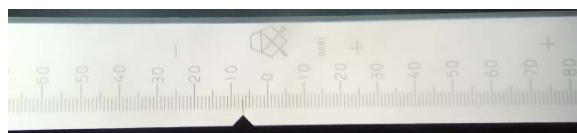


Рис. 3.2. Вид поля зору оптиметра

Нехай вісь вимірювального стрижня 6 знаходиться відносно осі обертання дзеркала 5 на відстані  $l$  (рис. 3.3). Зміщення стрижня на величину  $\Delta$  приведе до

повороту дзеркала на кут  $\alpha$  і до нахилу відбитого пучка променів на кут  $2\alpha$ . Внаслідок цього автоколімаційне зображення шкали зміститься на величину  $y$ .

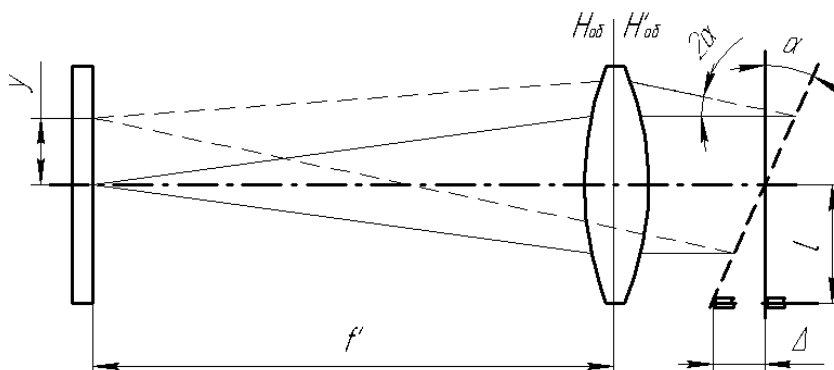


Рис. 3.3. Схема формування вимірювальної інформації

Передаточне відношення оптиметра, тобто відношення зміщення зображення шкали  $z$  до зміщення вимірювального стрижня дорівнює

$$i = \frac{y}{\Delta} = \frac{f' \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{l \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{2f'}{l} \frac{1}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (3.1)$$

де  $f'$  - фокусна відстань об'єктива автоколіматора.

Якщо  $\alpha = 0$ , то маємо розрахункове передаточне відношення

$$i_p = \frac{2f'}{l} \quad (3.2)$$

В даній лабораторній роботі використовується оптиметр з такими параметрами:  $f' = 200$  мм і  $l = 5$  мм. Тоді  $i_p = 80$ . Знаючи ціну поділки  $C = 0,001$  мм і передаточне відношення, знаходимо інтервал шкали

$$a = C * i_p = 0,08 \text{ мм.}$$

Для спостереження шкали використовується окуляр із збільшенням  $12\times$ . Тому видимий інтервал шкали дорівнює  $0,08 \cdot 12 = 0,96$  мм, що відповідає умовам оптимального спостереження штрихів.

Заміна дійсного змінного передаточного відношення  $i$  на постійне розрахункове відношення  $i_p$  спрощує прилад, але призводить до появи систематичної похибки вимірювання. Переміщення вимірювального стрижня з нульового положення на величину  $\Delta$  викликає зміщення шкали на величину  $\Delta_i$ .

Але шкала градуйована за розрахунковим передаточним відношенням  $i$  тому переміщенню  $\Delta$  відповідає точка шкали  $\Delta_{ip}$ . Різниця  $(\Delta_i - \Delta_{ip})$ , поділена на передаточне відношення  $i$ , визначає систематичну похибку схеми приладу

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta_{ip}}{i} = l * \operatorname{tg}^3 \alpha \approx l\alpha^3. \quad (3.3)$$

Максимальний кут  $\alpha$  нахилу дзеркала 5 визначається відношенням половини ширини шкали до довжини малого важеля  $l$

$$\alpha = \pm \frac{0.1}{5} = \pm 0,02 \text{ рад.}$$

Тоді максимальна похибка схеми оптиметра становить

$$\varepsilon_{\Delta_{max}} = \pm 5 - 0,02^3 = \pm 0,04 \text{ мкм.}$$

Це в 25 раз менше ціни поділки приладу.

### Ультраоптиметри

Ультраоптиметрами називають оптиметри підвищеної точності. Вони мають велике передаточне відношення, яке досягається за рахунок використання оптичного помножувача (рис. 3.4).

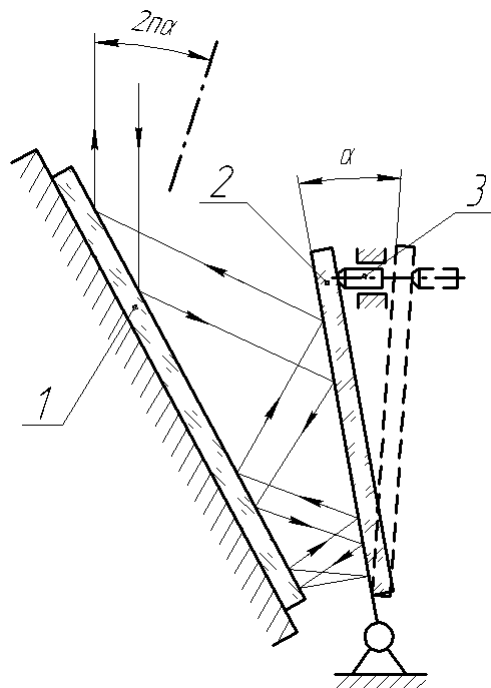


Рис. 3.4. Оптичний помножувач ультраоптиметра

Помножувач складається з двох дзеркал - нерухомого 1 і 2 рухомого. Рухоме дзеркало 2 через важіль з'єднано з вимірювальним стрижнем 3. В іншому схема ультраоптиметра мало відрізняється від схеми оптиметра. Пучок променів, вийшовши з об'єктива попадає в оптичний помножувач і після багаторазового відбиття від нерухомого та рухомого дзеркал повертається в об'єктив паралельним пучком. Поворот рухомого дзеркала на кут  $\alpha$  викликає відхилення пучка, що виходить із оптичного помножувача на кут  $2n\alpha$  де  $n$ - кількість відбиттів.

Ціна поділки шкали ультраоптиметра 0,0002 мм, межа вимірювань за шкалою  $\pm 0,025$  мм, похибка вимірювань не більше  $\pm 0,00007$  мм.

### Горизонтальний оптиметр ИКГ

В лабораторній роботі використовується горизонтальний оптиметр ИКГ. Його основні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

#### Основні характеристики оптиметра ИКГ

Ціна поділки, мм	0,001
Межі вимірювання за шкалою, мм	$\pm 0,1$
Вимірювальне зусилля, Н	2
Коливання вимірювального зусилля, Н, не більше	0,2
Похибка показань, на ділянці шкали від 0 до $\pm 0,06$ мм	$\pm 0,0002$ мм
Похибка показань, на ділянці шкали понад $\pm 0,06$ мм	$\pm 0,0003$ мм
Варіації показань	0,0001 мм

Конструктивно оптиметр складається з основи, столика, на якому розміщується вимірювана деталь, пінолі з лівим вимірювальним стрижнем і з відліковою системою, пов'язаною з правим вимірювальним стрижнем.

Піноль і вимірювальна трубка можуть переміщатися у горизонтальній площині при відпущених стопорних гвинтах. Таким чином здійснюється грубе встановлення вимірювальних стрижнів. Для точної установки вимірювальних стрижнів використовують мікрометричний гвинт, встановлений на пінолі. Повертаючи мікрометричний гвинт, домагаються контакту вимірювальних стрижнів із поверхнею деталі.

Контакт між вимірюваною деталлю та вимірювальними стрижнями повинен здійснюватися по найменшій поверхні, наближаючись до точки або лінії. Тому при вимірювання плоских деталей вимірювальні стрижні мають сферичні наконечники, а при вимірюванні циліндричних деталей - плоскі або ножові.

Процес вимірювання товщини деталі на оптиметрі зводиться до визначення відхилення  $\Delta$  розміру деталі  $d_d$ , від розміру еталона  $d_e$ , для якого зазвичай використовують набір кінцевих мір. Так як розмір еталона відомий з великою точністю, то розмір деталі визначається як

$$d_d = d_e \pm \Delta . \quad (3.4)$$

### Порядок виконання роботи

1. Користуючись опорними гвинтами основи, встановити оптиметр горизонтально за рівнем.
2. Підйомними і регулювальними гвинтами встановити столик у положення, що забезпечує контакт вимірювального стрижня з контрольованою поверхнею деталі в потрібній точці.
3. Виміряти мікрометром товщину контрольованої деталі. Підібрати набір кінцевих мір таким чином, щоб їх сумарна товщина  $d_e$  відрізнялася від вимірюваної товщини деталі  $d_d$  не більше ніж на 0,05 мм. Розмір  $d_e$  занести до табл. 3.2.
4. Встановити притертий набір кінцевих мір на стіл оптиметра. Спостерігаючи шкалу в окуляр, за допомогою мікрометричного гвинта пінолі привести вимірювальні стрижні в контакт із набором кінцевих мір. Гвинт пінолі обернути доти, доки показник "0" шкали не суміститься з індексом.
5. Легко відтиснувши рукою вимірювальний стрижень, пов'язаний з відліковою системою, зняти зі столика набір кінцевих мір і встановити його місце вимірювану деталь. Здійснити відлік за шкалою відхилень реального розміру деталі від зразка (набору кінцевих мір)  $\Delta$ . Величина цього відхилення має визначатись з врахуванням знаку. Дані занести в табл. 3.2. Зняти деталь зі столика та знову встановити її, як у попередньому випадку. Здійснити відлік  $\Delta$  і занести його в табл. 3.2. Повторити процедуру щонайменше 6 разів.

6. Для кожного вимірювання визначити розмір деталі за формулою (3.4). Провести статистичну обробку результатів вимірювань. Розмір довірчої ймовірності задається викладачем.
7. Аналогічно попереднім пунктам методики виміряти товщину інших деталей за вказівкою викладача.

Таблиця 3.2

### Вимірювання товщини деталей

Номер деталі _____ Товщина деталі по мікрометру _____		Сумарна товщина кінцевих мір $d_e$ , мм _____				
Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
Вимірюване відхилення $\pm \Delta$ , мм						
Вирахований розмір деталі $d_d$ , мм $d_d = d_e \pm \Delta$						

## Лабораторна робота № 4

### ВИМІРЮВАННЯ ФОКУСНИХ ВІДСТАНЕЙ, ФОКАЛЬНИХ ВІДРІЗКІВ І РОБОЧИХ ВІДСТАНЕЙ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Мета роботи - вивчити методи вимірювання фокусних відстаней, фокальних відрізків і робочих відстаней оптичних систем. Набути практичних навичок роботи з оптичною лавою.

#### Завдання

1. Повторити теоретичні положення про кардинальні елементи оптичних систем.
2. Вивчити методи вимірювання фокусних відстаней і фокальних відрізків.
3. Виміряти фокальний відрізок і робочу відстань об'єктива.
4. Виміряти різними методами фокусну відстань об'єктива, провести порівняльний аналіз методів.
5. Виміряти фокусну відстань плоскої пластини.
6. Виміряти фокусну відстань від'ємної лінзи.
7. Провести оцінку точності виконаних вимірювань.

#### Загальні положення.

##### Кардинальні елементи оптичної системи

У процесі виготовлення та контрольного приймання оптичного приладу вимірюють фокусні відстані  $f'$ , фокальні відрізки  $S'_F$ , і робочі відстані  $S_p$  окремих компонентів оптичної системи - лінз, дзеркал, об'єктивів, а також всієї системи в цілому.

Задньою фокусною відстанню  $f'$  називається відстань від задньої головної точки  $H'$  до заднього фокуса  $F'$ .

Заднім фокальним відрізком  $S'_F$ , називається відстань від вершини задньої поверхні оптичної системи до площини заднього фокуса  $F'$ .

Під робочою відстанню  $S_p$  розуміють відстань від опорного торця оправи системи до фокальної площини. Робочі відстані вимірюють в тих випадках, коли необхідно знати місцезнаходження фокуса об'єктива щодо його опорного торця для подальшого з'єднання випробуваної системи з якою-небудь іншою оптичною або механічною системою.

В процесі контролю виготовлення оптичних деталей необхідно порівнювати виміряні і розрахункові фокусні відстані та вершинні відрізки. У кресленнях зазвичай наводяться фокусні відстані і фокальні відрізки для параксіальних променів для монохроматичного світла для лінії натрію ( $\lambda=589,3$  нм). Тому при вимірюванні доцільно діафрагмувати контрольовані деталі, пропускаючи через них вузькі центральні пучки монохроматичного випромінювання, яке утворюється, наприклад, з використанням інтерференційних фільтрів. Це є особливо важливим при вимірюванні несклеєних деталей, у яких сферична і хроматична аберації є дуже великими.

При визначенні відповідних характеристик оптичних систем доцільно за місце розташування фокальної площини приймати площину, в якій формується найкраще зображення, що відповідає найкращому розподілу енергії в зображенні точки. Положення цієї площини залежить від залишкових аберацій системи і від застосовуваних при вимірюваннях джерел і приймачів випромінювання. Площина найкращого зображення зазвичай не збігається з Гаусовою площиною зображення, яка утворюється параксіальними променями. Ця площина також не збігається з площиною найменшого перетину геометричного пучка променів. Тому при подібних вимірюваннях, якщо це не обумовлено спеціальними вимогами, бажано контролювану систему не діафрагмувати. При цьому джерело і приймач випромінювання підбирають таким чином, щоб їх спектральні характеристики були близькі до тих, які мають місце в реальних умовах експлуатації.

### Вимірювання фокальних відрізків і робочих відстаней

Фокальні відрізки вимірюють на оптичних лавах типу ОСК-2 та ОСК-3 за схемою, зображеною на рис.4.1.

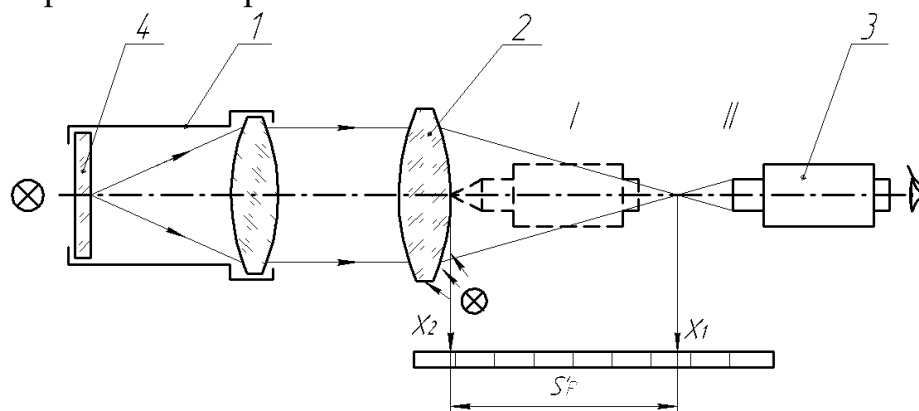


Рис.4.1. Типова схема вимірювання фокальних відрізків

Установка містить коліматор з вузлом підсвічування 1 та сіткою 4, випробувану систему 2 і вимірювальний мікроскоп 3. В якості сітки 4 коліматора використовують міру або перехрестя. Мікроскоп 3 може пересуватися уздовж оптичної осі, що контролюється за горизонтальною шкалою.

При вимірюванні  $S'_F$ , мікроскоп спочатку фокусує на зображення сітки коліматора, розташованої в фокальній площині його об'єктива ( $X_1$ ), а потім на задню поверхню контрольованої системи або деталі ( $X_2$ ). В обох положеннях мікроскопів знімають відліки за шкалою, закріпленої на оптичній лаві або на мікроскопі. Різниця відліків визначає фокальний відрізок  $S'_F$ .

Фокусування на поверхню лінзи здійснюють за наявними на ній мікроскопічними подряпинами. Для цього задню поверхню лінзи освітлюють боковим джерелом світла.

Аналогічно вимірюють робочі відстані (рис. 4.2). Відмінність полягає в тому, що в другому положенні вимірювальний мікроскоп фокусує не на поверхню випробуваної лінзи, а на торець оправы об'єктива.

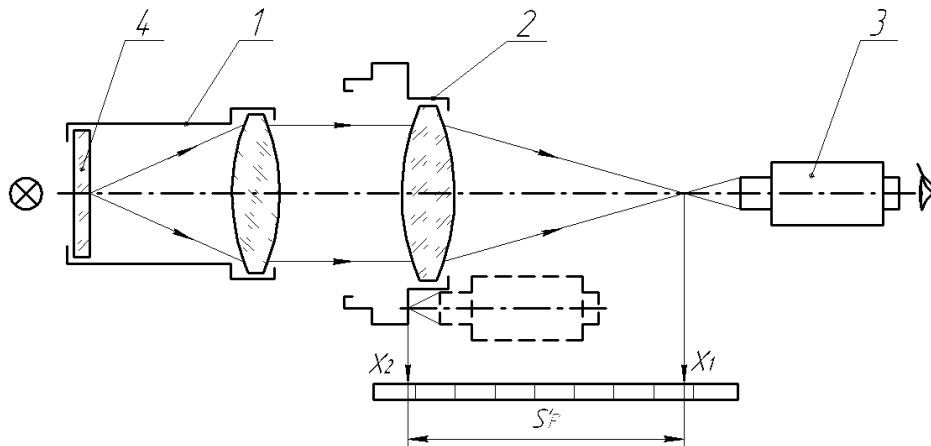


Рис. 4.2. Схема вимірювання робочих відстаней

### Вимірювання великих фокусних відстаней, порівнянних з довжиною оптичної лави

**Метод збільшення на коліматорі.** Візуальне визначення фокусних відстаней в цьому випадку виконують за схемою на рис. 4.3.

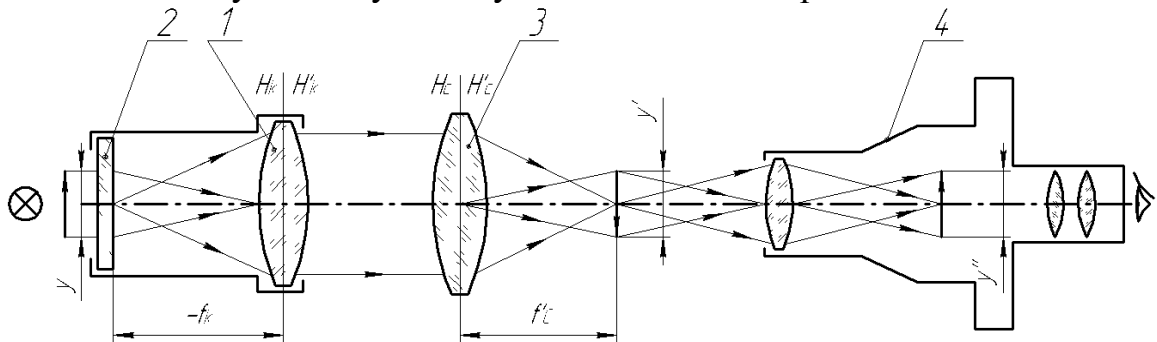


Рис. 4.3. Схема вимірювання фокусних відстаней методом збільшення

У фокальній площині коліматорного об'єктива 1 розташовано сітку 2 зі штрихами. Її зображення формується в фокальній площині випробуваного об'єктива 3. Це зображення розглядають за допомогою мікроскопа з окуляром-мікрометром 4.

Із рис. 4.3. видно, що

$$-\frac{y'}{y} = -\frac{f'}{f_k}.$$

Тоді розрахункова формула має вигляд

$$f' = \frac{y'}{y} f_k. \quad (4.1)$$

Вимірювання  $f'$  зводиться до визначення лінійного збільшення, яке має випробуваний об'єктив та обчисленню фокусної відстані за формулою (4.1). Величини  $f'_k$  і  $y$  є відомими і сталими для конкретної установки.

Відносна похибка метода збільшення при вимірюванні фокусної відстані становить (0,3 - 0,6)%.

**Фотографічне визначення фокусних відстаней.** Відрізняється від візуального тільки тим, що зображення сітки коліматора, сформоване в фокальній площині випробуваного об'єктива, фіксується фотографічним світлочутливим шаром, а потім вимірюється на компараторі.

Таким методом зазвичай визначають фокусні відстані фотографічних об'єктивів, причому фокусну відстань вимірюють одночасно з визначенням просторового розділення об'єктива.

**Метод збільшення при фіксованих відстанях між предметом і зображенням.** Цей метод виявився зручним для швидкої перевірки фокусних відстаней в умовах масового виробництва фотографічних об'єктивів. Принципова схема установки зображена на рис. 4.4.

В якості предмету використовують скляну лінійку 1 з двома штрихами, відстань між якими дорівнює  $y$ . Лінійку позиціонують на значній відстані від контрольованого об'єктива 2. Зображення штрихів лінійки формуються поблизу фокальної площини випробуваного об'єктива. Знаючи відстань  $l$  від площини лінійки до місця появи зображення і вимірявши відстань  $y'$  між зображеннями двох штрихів лінійки, можна розрахувати фокусну відстань випробуваного об'єктива.

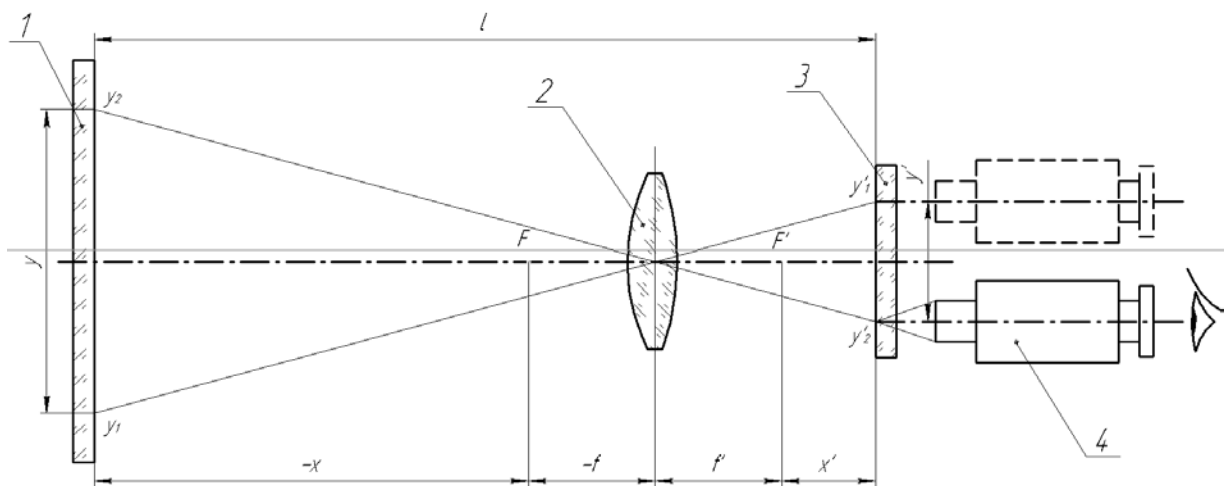


Рис. 4.4. Схема вимірювання фокусних відстаней методом збільшення на фіксованих відстанях

З рис. 1.4 витікає, що  $-x - f + f' + x' = l$ .

Так як  $\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = \frac{f'}{x'} = -\frac{f'}{x'}$ , то  $-\frac{f'}{\beta} + 2f' - \beta * f' = l$ .

Остаточно маємо

$$f' = -\frac{l\beta}{(1-\beta)^2}. \quad (4.2)$$

Величина  $y$  є постійною установки. Для вимірювання  $y$  застосовують спеціальну вимірювальну шкалу 3, розташовану в предметній площині мікроскопа 4. Ця шкала може бути відградуїрована безпосередньо в значеннях фокусних відстаней відповідно до (4.2). Вимірювальна шкала 3 так само, як і

мікроскоп 4, має можливість переміщення в горизонтальній площині. Перед вимірюванням спочатку суміщають нульову мітку вимірювальної шкали з зображенням одного з штрихів ( $y'_2$ ) лінійки 1 і з перехрестям мікроскопа. Потім переміщують спостережний мікроскоп 4 до співпадання його перехрестя з зображенням другого штриха лінійки ( $y'_1$ ). При цьому положенні перехрестя мікроскопа по вимірювальній шкалі 3 відраховують значення фокусної відстані контрольованого об'єктива.

У наведеній схемі вимірювання є похибки. Тому в результати вимірювань необхідно вводити поправки. Перша поправка пов'язана з тим, що при виведенні формули (4.2) не враховувалась відстань між головними площинами контрольованої системи. Друга поправка пов'язана з тим, що на контрольований об'єктив падають пучки променів під великим кутом нахилу до його осі. За таких умов на результати вимірювань впливатиме дисторсія контрольованого об'єктива.

Точність вимірювань методом складає (0,3 - 0,4)%.

**Геометричний метод.** Визначення фокусних відстаней за цим методом відрізняється високою точністю, проте процес вимірювання вимагає значного часу. Окрім того, сам метод придатний тільки для вимірювання фокусних відстаней додатних оптичних систем.

Принцип вимірювань полягає у визначенні кутового розміру певного відрізка шкали, розташованої в фокальній площині контрольованої системи. Знаючи лінійний розмір відрізка шкали  $y$  і визначивши кут  $\omega$ , під яким видно цей відрізок з головної точки об'єктива, можна знайти фокусну відстань об'єктива або системи за формулою

$$f' = y/tg\omega. \quad (4.3)$$

Існують два типи установок для вимірювання фокусних відстаней за цим методом. Схема першого варіанту установки показана на рис. 4.5,а.

Кутовий розмір відрізка  $y$ , тобто кут  $\omega$ , визначається за допомогою обертової зорової труби 3 при нерухомому положенні випробуваного об'єктива 2 і шкали 1. Причому зорова труба повинна обертатися навколо осі, що проходить через вхідну зіницю контрольованої системи.

Схема другого варіанту установки показана на рис.4.5,б. Тут контрольована система є жорстко пов'язаною зі шкалою, яка розташовується на обертовому столі, а зорова труба є нерухомою. Кутовий розмір  $\omega$ , визначають за допомогою обертового стола за різницею відліків при наведенні перехрестя зорової труби на різні краї відрізка  $y$ . Як і в першому випадку, вісь обертання столу повинна проходити через вхідну зіницю контрольованого об'єктива. В обох випадках вимірювання виконують для кількох відрізків  $y$ . За цими кількома значеннями  $f'$  визначають середню фокусну відстань.

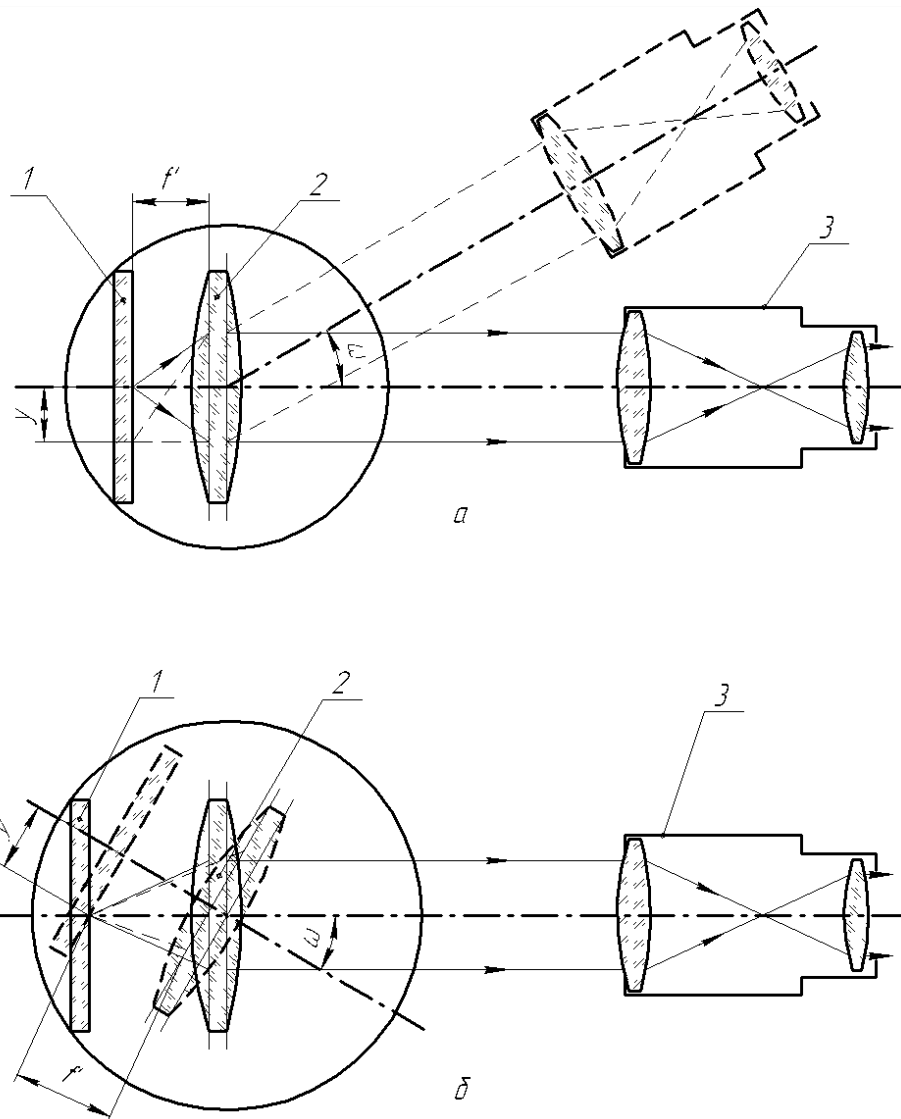


Рис. 4.5. Визначення фокусних відстаней геометричним методом

Крім помилок, пов'язаних з вимірюванням величини  $y$  і кута  $\omega$ , у сумарну похибку визначення фокусної відстані входить похибка установки шкали в фокальній площині контрольованої системи. Установку шкали здійснюють за допомогою зорової труби, що використовується для вимірювання кутів  $\omega$ . Зорову трубу заздалегідь фокусують на «нескінченність».

Точність вимірювань цим методом становить (0,15 - 0,20)%.

**Метод вузлової точки.** Цей метод дозволяє безпосередньо визначати фокусні відстані оптичних систем.

Принцип вимірювань за цим методом полягає в наступному. Контрольована система розміщується на поворотному крузі. Якщо задня вузлова точка системи проходить через вісь обертання поворотного круга, то при невеликих поворотах круга навколо своєї осі зображення віддаленої точки, утворене контрольованою системою в своїй фокальній площині, буде нерухомим. Якщо ж задня вузлова точка не проходить через вісь обертання круга, то при його поворотах зображення буде зміщуватися.

Таким чином, нерухомість зображення при повороті контрольованої системи на невеликі кути є критерієм збігу задньої вузлової точки з віссю обертання круга. Діапазон кутів, в якому можна повертати систему, визначається умовою невеликого значення її дисторсії.

Принципова схема вимірювальної установки показана на рис. 4.6.

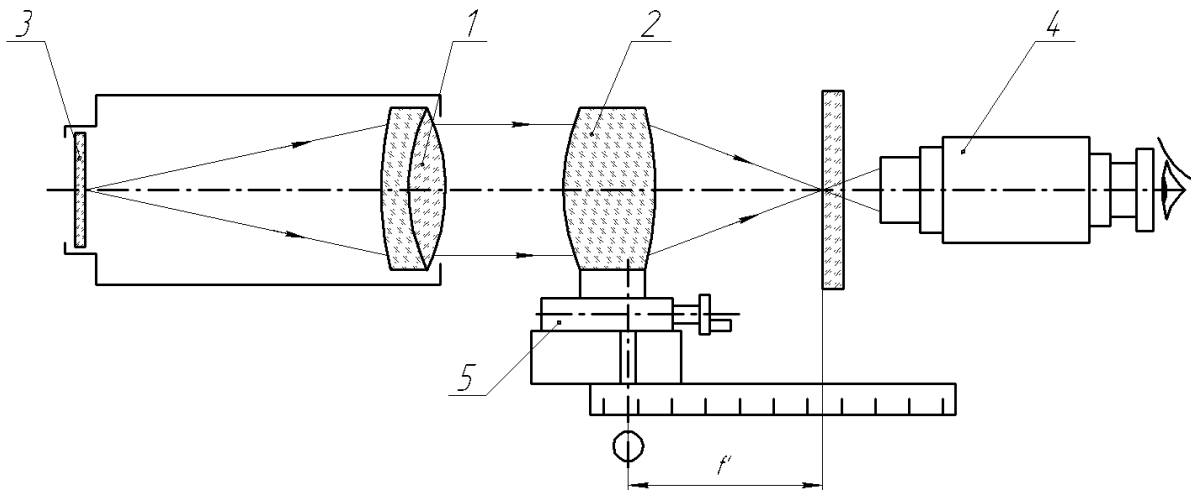


Рис. 4.6. Визначення фокусних відстаней методом вузлової точки

В передній фокальній площині об'єктива коліматора встановлено сітку 3. Паралельний пучок променів світла, що виходить з коліматора 1, проходить через контрольований об'єктив 2 і формує в його задній фокальній площині зображення штриха сітки 3. Це зображення розглядають в спостережний мікроскоп 4.

Якщо обертати стіл 5, на якому встановлено контрольований об'єктив 2, навколо вертикальної осі на невеликі кути, то зображення штриха, який спостерігається в мікроскоп, буде зміщатися відносно перехрестя мікроскопа в тому випадку, коли задня вузлова точка об'єктива 2 не знаходиться на осі обертання столу 5.

Пересуваючи контрольований об'єктив уздовж його оптичної осі і одночасно повертаючи стіл навколо вертикальної осі на невеликі кути, домагаються нерухомості зображення штриха відносно перехрестя окулярної сітки мікроскопа. При переміщенні об'єктива необхідно кожен раз фокусувати мікроскоп на різке зображення штриха.

Відстань від осі обертання поворотного столу до предметної площини мікроскопа, сфокусованого на нерухоме зображення штриха коліматора, дорівнює фокусній відстані контрольованого об'єктива.

Сумарна похибка вимірювань за цим методом в залежності від оптичних характеристик і точності корекції контрольованої системи складає (0,2 - 0,4)%.

### Вимірювання великих фокусних відстаней

Деякі оптичні системи мають дуже великі фокусні відстані. Для фокусних відстаней в декілька десятків метрів усі звичайні методи вимірювання їх величини на оптичних лавах не можуть бути реалізовані на практиці. У таких випадках можна використовувати вимірювальні установки, побудовані за схемою на рис. 4.7.

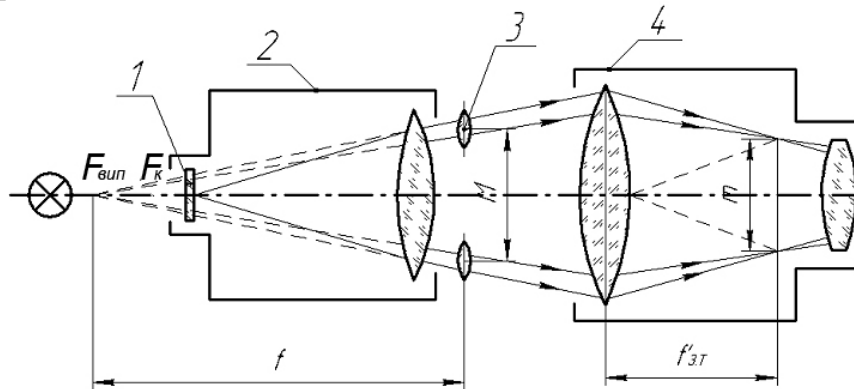


Рис. 4.7. Схема вимірювання великих фокусних відстаней

На оптичній лаві розташовують коліматор 2 і зорову трубу 4, встановлену на «нескінченність». Між об'єктивом коліматора 2 і його переднім фокусом поміщають скляну пластину 1 з перехрестям, освітлювану ззаду електричною лампою через матове або молочне скло. Контрольована система 3 встановлюється між коліматором 2 і зоровою трубою 4.

Об'єктив коліматора 2 і об'єктив зорової труби 4 необхідно підібрати таким чином, щоб їх діаметри були значно більше діаметра контрольованої системи.

Як видно з рис. 1.7, контрольовану систему встановлюють не на оптичній осі об'єктива коліматора 2, а ближче до його краю. Пучки світла з об'єктива коліматора 2 повинні проходити в зорову трубу тільки через контрольовану систему, всі інші промені діфрагмуються екраном (на рис. 1.7 не показаний).

Пересуваючи скляну пластинку 1 уздовж оптичної осі об'єктива коліматора 2 і спостерігаючи в зорову трубу 4, домагаються різкого зображення перехрестя пластинки 1. Це відбудеться тоді, коли зображення перехрестя, створене об'єктивом коліматора 2, збігається з передньою фокальною площиною контрольованої системи і в об'єктив зорової труби під деяким кутом до її осі надійдуть паралельні промені світла з випробуваної системи. Нахил падаючих променів залежить від відстані між оптичними осями об'єктива коліматора 2 і контрольованою системою 3.

Поєднавши перехрестя окуляра-мікрометра зорової труби із зображенням перехрестя скляної пластинки 1, пересувають контрольовану систему 3 перпендикулярно до оптичної осі об'єктива коліматора 2 в симетричне щодо цієї осі положення. При цьому зображення перехрестя в фокальній площині зорової труби також зміститься в поперечному напрямку. Це зміщення  $M$  вимірюють за допомогою окуляра-мікрометра.

На підставі подібності трикутників (рис. 4.7) можна отримати розрахункову формулу для визначення фокусної відстані випробуваної системи

$$f = f_{зт} M / m, \quad (4.4)$$

де  $f_{зт}$  - фокусна відстань об'єктива зорової труби;  $M$ ,  $m$  - зміщення відповідно контрольованої системи і зображення перехрестя скляної пластинки 1 в задній фокальній площині об'єктива зорової труби.

В залежності від якості контрольованої системи точність методу складає (0,6 - 0,7)% вимірюваної величини.

Іноді доводиться вимірювати фокусні відстані в декілька кілометрів, наприклад, при перевірці світлофільтрів, захисного скла, дзеркал тощо. В таких випадках можна користуватись методом зорової труби.

**Метод зорової труби.** Установка для вимірювання таких фокусних відстаней методом зорової труби складається з довгофокусного коліматора 1 і довгофокусної зорової труби 2 (рис. 4.8).

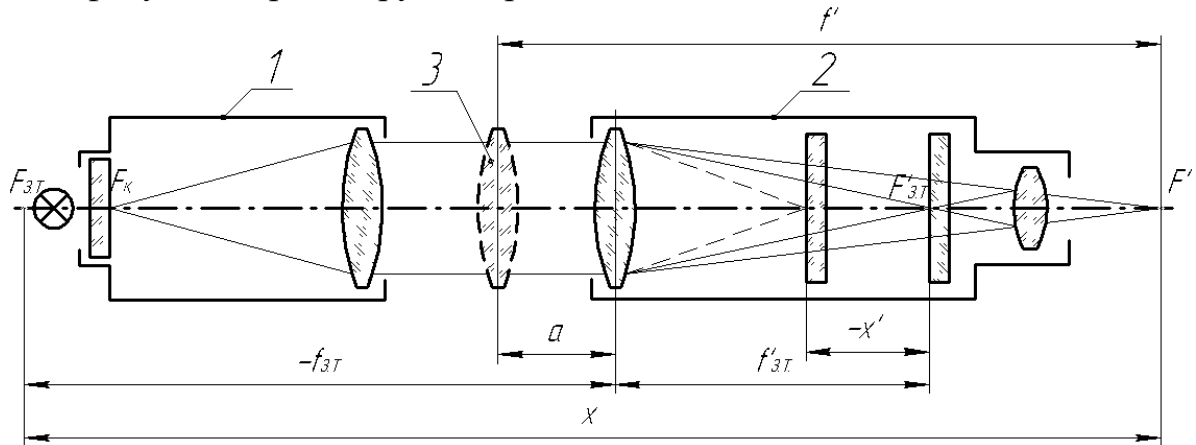


Рис. 4.8. Схема вимірювальної установки за методом зорової труби

У фокальній площині коліматора встановлюють міру або перехрестя. Перед вимірюванням зорову трубу фокусують по коліматору, задалегідь виставленому на «нескінченність». Потім між коліматором і зоровою трубою вводять контрольовану деталь 3. В результаті зображення міри або перехрестя розмивається.

Щоб отримати знову різке зображення міри або перехрестя, зорову трубу перефокусують. Нехай при цьому перехрестя зорової труби зміститься на значення  $x'$ , тоді

$$x = -\frac{f'_{зт}{}^2}{x'}; \quad f' = x - f'_{зт}{}^2 + a = -\left(\frac{f'_{зт}{}^2}{x'} + f'_{зт}{}^2 - a\right),$$

або

$$f' = -\left[\frac{f'_{зт}(f'_{зт} + x')}{x'} - a\right], \quad (4.5)$$

де  $f'$ ,  $f'_{зт}$  - фокусна відстань відповідно контрольованої деталі і об'єктива зорової труби;  $a$  - відстань між контрольованою деталлю і об'єктивом зорової труби.

Але так як  $a \gg x'$  і  $a \ll f'$ , то

$$f' \approx \frac{-f'_{3T}{}^2}{x'} \quad (4.6)$$

У розрахунках точності поздовжніх фокусувань слід виходити з поточного значення апертурного кута зорової труби. Збільшення тільки фокусної відстані об'єктива зорової труби не збільшує точності вимірювань, так як точність вимірювання визначається не фокусною відстанню, а діючою апертурою, при якій проводяться вимірювання.

Точність вимірювань цим методом складає (10 - 15)%.

**Автоколімаційний метод.** Якщо замість зорової труби використовувати довгофокусний автоколіматор, то в схемі (рис. (4.9)) для вимірювання великих фокусних відстаней можна обійтися без нього. Суть методу ясна з рис. (4.9).

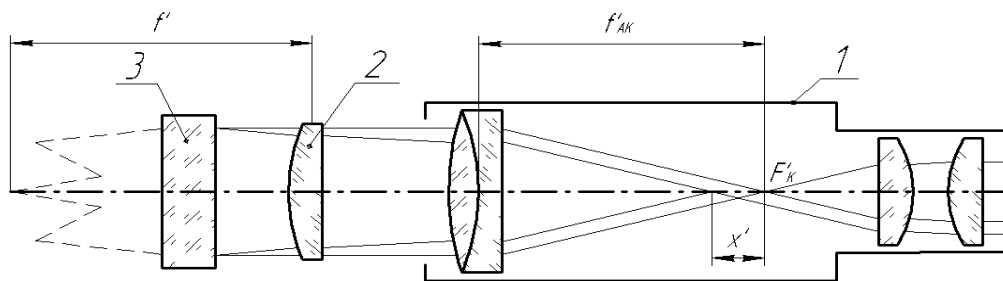


Рис. 4.9. Схема вимірювання великих фокусних відстаней автоколімаційним методом

Перед об'єктивом автоколіматора 1 встановлюється еталонне плоске дзеркало 3. Переміщенням окуляру автоколіматора, домагаються сполучення зображення сітки автоколіматора з самої сіткою. При цьому автоколіматор виставлено на «нескінченність». За шкалою переміщення окуляру знімають перший відлік. Потім між об'єктивом автоколіматора 1 і дзеркалом поміщають випробувану деталь 2 з великою фокусною відстанню. При цьому автоколімаційне зображення сітки зміщується і стає нерізким.

Переміщенням окуляру знову поєднують автоколімаційне зображення сітки з самої сіткою і беруть другий відлік по шкалі зміщення окуляра. За різницею відліків  $x'$  обчислюють фокусну відстань деталі

$$f' = -f'_{ак}{}^2/x', \quad (4.7)$$

де  $f'_{ак}$  - фокусна відстань об'єктива автоколіматора.

### Вимірювання фокусних відстаней від'ємних систем

Визначення фокусних відстаней від'ємних систем викликає в лабораторній практиці певні труднощі. Розглянуті вище методи вимірювання фокусних відстаней розраховані в основному для додатних систем.

Оптичну схему лабораторної установки для вимірювання широкого діапазону фокусних відстаней у від'ємних системах зображено на рис. 4.10. Шкала 1 розташована в фокальній площині об'єктива коліматора 2 і

зображується телескопічною системою галілеївського типу в фокальній площині об'єктива зорової труби 5, який попередньо виставлено «на нескінченність». Розмір зображення  $y'$  шкали вимірюють за допомогою окуляра-мікрометра.

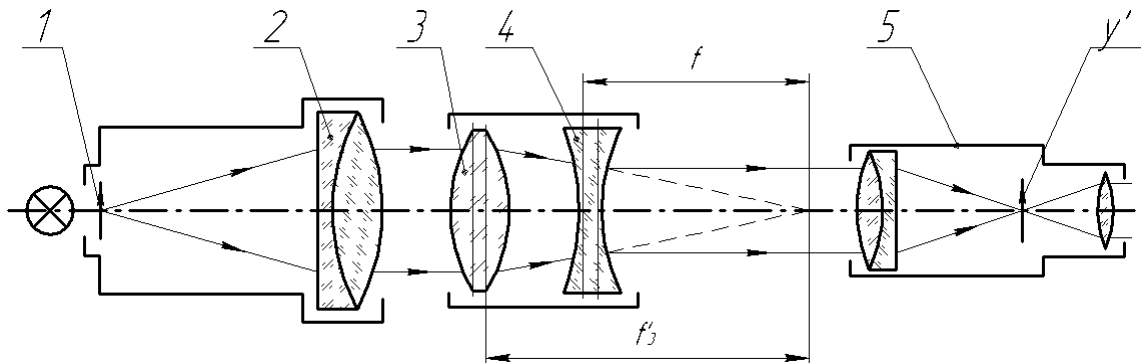


Рис. 4.10. Схема установки для вимірювання фокусних відстаней від'ємних систем

Галілеївська система складається з додатного об'єктива 3 і контрольованої від'ємної системи 4.

Зображення шкали 1 буде видно різким тільки тоді, коли задній фокус об'єктива 3 збігається з переднім фокусом системи 4. Позначимо  $y'$  величину зображення шкали 1 і  $y'_0$  - величину зображення цієї шкали 1 при відсутності галілеївської системи. Тоді

$$\beta = y' / y'_0, \quad (4.8)$$

де  $\beta$  - збільшення галілеївської системи.

Це збільшення можна визначити також як

$$\beta = f'_n / f, \quad (4.9)$$

де  $f'_n$ ,  $f$  - фокусна відстань відповідно додатньої оптичної системи 3 і контрольованої системи.

Звідси маємо

$$\frac{f'_n}{f} = \frac{y'}{y'_0} \text{ або } f = \frac{y'_0 f'_n}{y'}. \quad (4.10)$$

Загальна похибка вимірювання фокусної відстані становить (0,6 - 0,7)%.

### Лабораторна установка

Вимірювальна установка зібрана на базі оптичної лави ОСК-2. Основними елементами установки є

1. Вузол підсвічування сітки коліматора з лампою розжарювання;
2. Коліматор з фокусною відстанню об'єктива 800 мм. Сітка коліматора має вигляд, зображений на рис. 1.11;
3. Вимірювальний мікроскоп з гвинтовим окулярним мікрометром МОВ-1-15. Збільшення об'єктива мікроскопа  $\beta$  вказано на об'єктиві;
4. Автоколіматор - зорова труба з об'єктивом фокусною відстанню 400,6 мм.

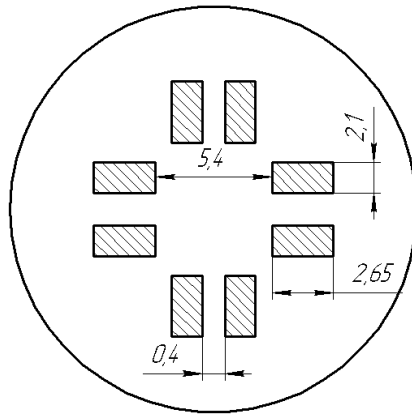


Рис. 4.11. Вид сітки коліматора

Оптичну схему вимірювального мікроскопа зображено на рис. 4.12,а, вид поля зору – на рис. 4.12,б.

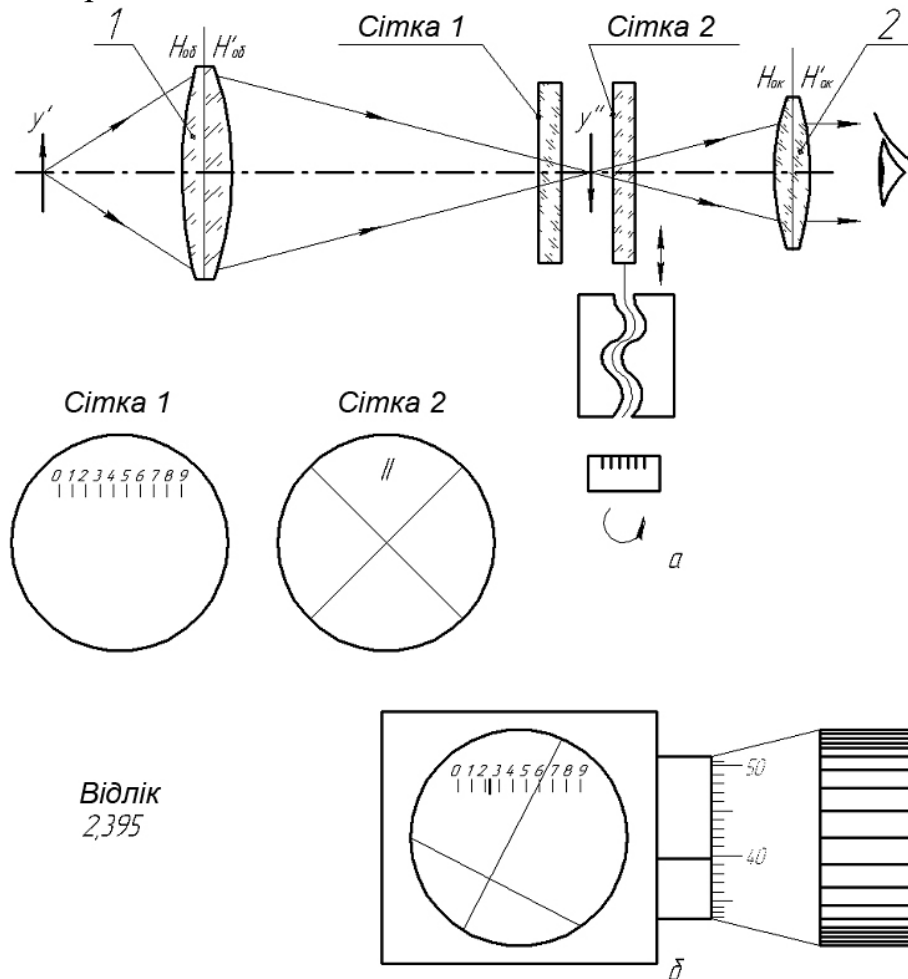


Рис. 4.12. Конструкція вимірювального мікроскопа

Об'єktiv мікроскопа 1 зі збільшенням буде перевернуте зображення предмета  $y'$  в площині сіток  $y''$ . Це зображення розглядається через окуляр 2. Одна з сіток (сітка 1) є нерухомою і містить шкалу з восьми поділок. На рухомій сітці (сітка 2) нанесено перехрестя і біштрих. Відлік знімається після того як

центр перехрестя поєднується з однією з ліній зображення сітки коліматора. Число міліметрів показує цифра, яка знаходиться зліва від вертикального біштриха. Десяті і соті долі міліметра знімаються зі шкали, нанесеної на барабані (рис. 4.12,б).

### Виконання роботи Вимірювання фокального відрізка

1. Зібрати схему вимірювання, зображену на рис. 4.1. Встановити випробувальну систему на оптичній лаві. Увімкнути підсвічування сітки коліматора і, переміщаючи мікроскоп уздовж оптичної осі, знайти таке його положення, при якому різке зображення сітки коліматора опиниться в центрі поля зору мікроскопа. Зняти перший відлік  $x_1$ .

2. Перемістити рейтер з мікроскопом уздовж оптичної осі у напрямку до оптичної системи в положення, при якому в полі зору мікроскопа з'явиться різке зображення пилинок і подряпин задньої поверхні лінзи. Зняти другий відлік  $x_2$ .

3. Повторити вимірювання не менше шести разів, кожен раз розфокусовуючи зображення і знову наводячи на різкість. Результати вимірювання занести в табл. 4.1.

*Таблиця 4.1*

#### Результати вимірювання фокальних відрізків

Тип оптичної системи						
Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$x_1$ , мм						
$x_2$ , мм						
$S'_{Fi} = x_1 - x_2$ , мм						

Провести статичну обробку результатів.

#### Вимірювання робочої відстані фотооб'єктива

Схема досвіду залишається без змін, однак при другому вимірюванні мікроскоп фокусує не на поверхню лінзи, а на торець оправы. Для цього мікроскоп переміщують (в каретці) перпендикулярно до оптичної осі.

Експеримент повторити не менше п'яти разів. Результати вимірювань занести в табл. 4.2.

*Таблиця 4.2*

#### Результати вимірювання робочих відстаней

Тип оптичної системи						
Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$x_1$ , мм						
$x_2$ , мм						
$S'_{Fi} = x_1 - x_2$ , мм						

Провести статичну обробку вимірювань.

### Вимірювання фокусної відстані об'єктива методом збільшення

1. Визначити і занотувати паспортні значення: фокусної відстані об'єктива коліматора  $f_k$ , інтервалу між штрихами сітки коліматора  $y$ , Збільшення вимірювального мікроскопа  $\beta$ , ціну поділки сітки окуляр-мікрометра.

2. Зібрати схему вимірювання, показану на рис. 4.3. Отримати в окулярі вимірювального мікроскопа різке зображення сітки коліматора. Переміщаючи перехрестя окуляр-мікрометра перпендикулярно до оптичної осі, навести перехрестя на один зі штрихів зображення сітки коліматора, Зняти перший відлік  $y_1''$ .

3. Обертаючи барабан окуляра-мікрометра, перенести перехрестя на інший штрих зображення сітки коліматора. Зняти другий відлік  $y_2''$ .

4. Повторити вимірювання не менше шести разів, повторюючи кожен раз суміщення сітки окуляр-мікрометра з зображенням штрихів сітки коліматора. Результати вимірювань занести в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

#### Результати вимірювання фокусної відстані об'єктива

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$y_1''$ , мм						
$y_2''$ , мм						
$y' = y''/\beta$						
$y' = y''/\beta$						

5. Визначити величину зображення інтервалу сітки коліматора (відстані між обраними штрихами) після об'єктива вимірювального мікроскопа:

$$y'' = y_1'' - y_2''.$$

5. За відомим збільшенням об'єктива мікроскопа визначити величину зображення інтервалу сітки коліматора після випробуваного об'єктива.

6. Відповідно до (4.1) з використанням паспортних даних установки (фокусна відстань коліматора  $f_k$ , інтервал між штрихами сітки коліматора  $y$ ) визначити значення фокусної відстані випробуваного об'єктива  $f'$ .

Провести статистичну обробку результатів вимірювань.

### Вимірювання фокусної відстані об'єктива методом вузлової точки

1, Зібрати схему вимірювання відповідно до рис. 4.6. На оптичну лаву встановити випробуваний об'єктив в спеціальному рейтері, який дозволяє переміщати об'єктив уздовж оптичної осі установки і повертати його на деякий кут по відношенню до осі горизонтальної площини. Поєднати спеціальний індекс шкали, нанесеної на направляючі лави, з віссю обертання тримача об'єктива. Зафіксувати рейтер об'єктива притискними гвинтами.

2. Встановити на оптичну лаву вимірювальний мікроскоп таким чином, щоб показник на його основі збігся з іншим спеціальним індексом на шкалі оптичної лави. Зафіксувати основу мікроскопа на лаву притискним гвинтом.

3. Переміщуючи випробуваний об'єктив і мікроскоп вздовж оптичної лави (не змінюючи положення рейтерів відносно індексів оптичної лави), одержати в окулярі мікроскопа зображення сітки коліматора.

4. Переміщаючи об'єктив в рейтері вздовж оптичної осі і одночасно повертаючи рейтер на невеликі кути (близько  $\pm 10$  град), домогтися нерухомого положення зображення сітки коліматора щодо перехрестя окуляра вимірювального мікроскопа. При переміщенні випробуваного об'єктива необхідно щоразу фокусувати мікроскоп на різке зображення сітки коліматора. Зняти відлік за шкалою поздовжніх переміщень вимірювального мікроскопа. Дані вимірювань занести до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

**Результати вимірювання фокусної відстані об'єктива методом вузлової точки**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$x$ , мм						
$f' = l \pm x$						

5. Повторити вимірювання не менше шести разів, щоразу зміщуючи об'єктив і мікроскоп із встановленого у попередніх дослідах положення.

6. Визначити значення фокусної відстані об'єктива  $f'$ , що випробовується, як відстань від осі обертання рейтера до предметної площини вимірювального мікроскопа. Ця відстань визначатиметься відрізком лави  $l$  між рейтерами об'єктива і мікроскопа та відрізком шкали поздовжніх переміщень мікроскопа. Розмір  $l$  вимірюється заздалегідь і є постійної установки (повідомляється викладачем).

Здійснити статистичну обробку отриманих результатів.

**Вимірювання фокусної відстані плоскої пластини методом зорової труби**

1. Зібрати схему вимірювань відповідно до рис. 4.8. Замість вимірювального мікроскопа встановити на оптичну лаву зорову трубу-автоколіматор. Користуючись коліматором, сфокусувати зорову трубу на нескінченність. За шкалою поздовжніх переміщень окуляра зорової труби зняти перший відлік  $x'_1$ .

2. Між коліматором і зоровою трубою встановити випробувану деталь. Відстань між деталлю та об'єктивом труби має бути мінімальною. Перефокусувати трубу (переміщаючи окуляр) до отримання різкого зображення сітки коліматора. Зняти другий відлік  $x'_2$ .

3. Повторити експеримент не менше шести разів, повторюючи щоразу фокусування труби для отримання різкого зображення сітки коліматора.

Результати вимірювань занести до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

**Результати вимірювання фокусної відстані плоскої пластини  
методом зорової труби**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$x_1'$ , мм						
$x_2'$ , мм						
$x' = x_1' - x_2'$						

За формулою (4.6) визначити фокусну відстань досліджуваної деталі. Здійснити статистичну обробку отриманих результатів.

**Вимірювання фокусної відстані плоскої пластини автоколімаційним  
методом**

1. Зібрати схему вимірювання відповідно до рис. 4.9. Встановити на лаву еталонне плоске дзеркало, відключити підсвічування сітки коліматора і включити лампу підсвічування зорової труби-автоколіматора, перетворивши її тим самим в автоколіматор. Користуючись еталонним дзеркалом, встановити автоколіматор на нескінченність, домагаючись різкого автоколімаційного зображення сітки автоколіматора. За шкалою поздовжніх переміщень окуляра автоколіматора зняти перший відлік  $x_1'$ .

2. Між автоколіматором і еталонним дзеркалом встановити випробувану деталь. Перефокусувати автоколіматор (переміщуючи окуляр) до отримання різкого автоколімаційного зображення сітки автоколіматора. Зняти другий відлік  $x_2'$ .

3. Повторити вимірювання не менше шести разів, повторюючи щоразу фокусування автоколіматора.

Результати вимірювань занести в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

**Результати вимірювання фокусної відстані плоскої пластини  
методом автоколіматора**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$x_1'$ , мм						
$x_2'$ , мм						
$x' = x_1' - x_2'$						

За формулою (4.7) визначити фокусну відстань досліджуваної деталі. Здійснити статистичну обробку отриманих результатів.

**Вимірювання фокусної відстані від'ємної лінзи**

1. Зібрати вимірювальну схему відповідно до рис. 1.40. Встановити на оптичну лаву зорову трубу. Домагаючись різкого зображення сітки коліматора

у фокальній площині об'єктива зорової труби, встановити її на «нескінченність». Після фокусування зафіксувати положення окуляра затискним гвинтом.

2. За шкалою, встановленою у фокальній площині зорової труби, визначити відстань між зображенням штрихів сітки коліматора. Зняти відлік  $y'_0$ .

3. Повторити експеримент не менше шести разів, повторюючи щоразу фокусування труби для отримання різкого зображення сітки коліматора.

4. За формулою (4.10) визначити фокусну відстань досліджуваної деталі. Розмір  $y'$  взяти з рис.4.11.

Результати вимірювань занести до табл. 4.7. Здійснити статистичну обробку отриманих результатів.

Таблиця 4.7

**Результати вимірювання фокусної відстані від'ємної лінзи**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6
$y'_0$ , мм						
$y'$ , мм						
$f'_0 = y'_0 / y' \cdot f'_d$ , мм						

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5**

### **ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СИСТЕМ**

Мета роботи - вивчити методи вимірювання характеристик телескопічних систем; набути практичних навичок роботи з оптичним теодолітом ОТ-02 та іншими оптичними приладами.

#### **Завдання**

1. Повторити основи теорії телескопічних систем.
2. Поглибити та закріпити знання про кутомірні інструменти, їх конструкції на базі оптичного теодоліту ОТ-02.
3. Вивчити методи виміру характеристик телескопічних систем.
4. Виміряти видиме збільшення, кутове поле в просторі предметів, діаметр і віддалення вихідної зіниці, роздільну здатність зорової труби оптичного теодоліту ОТ-02.

#### **Загальні положення**

##### **Основні характеристики телескопічної системи**

Основною властивістю телескопічних систем є те, що пучок паралельних променів, який потрапляє до вхідної зіниці системи, виходить через вихідну зіницю також пучком паралельних променів.

До телескопічних систем належать астрономічні та геодезичні труби, біноклі, перископи, різні зорові труби.

Телескопічна система складається, як мінімум, з двох компонентів - об'єктиву та окуляра. Причому площина заднього фокуса об'єктива співпадає з площиною переднього фокусу окуляра  $F_{ок}$  (рис. 5.1, а, б). Оптична сила такої системи дорівнює нулю. Максимальний кут, під яким промені, що виходять з позаосьових точок предмета, проходять без він'єтування через оптичну систему, називається кутовим полем зору телескопічної системи в просторі предметів ( $2\omega$ ). Кутове поле обмежується польовою діафрагмою ПД, розташованою у передній фокальній площині окуляра. Кут, під яким із телескопічної системи виходять промені з краю ПД, називається кутовим полем у просторі зображення ( $2\omega'$ ).

Об'єктив телескопічної системи є додатнім компонентом і тому утворює дійсне перевернуте зображення предмета в своїй задній фокальній площині. Окуляр, подібно до лупи, дозволяє розглядати це зображення у збільшеному вигляді. Окуляр може бути додатнім (система Кеплера, рис. 5.1,а) або від'ємним (система Галілея, рис. 5.1,б).

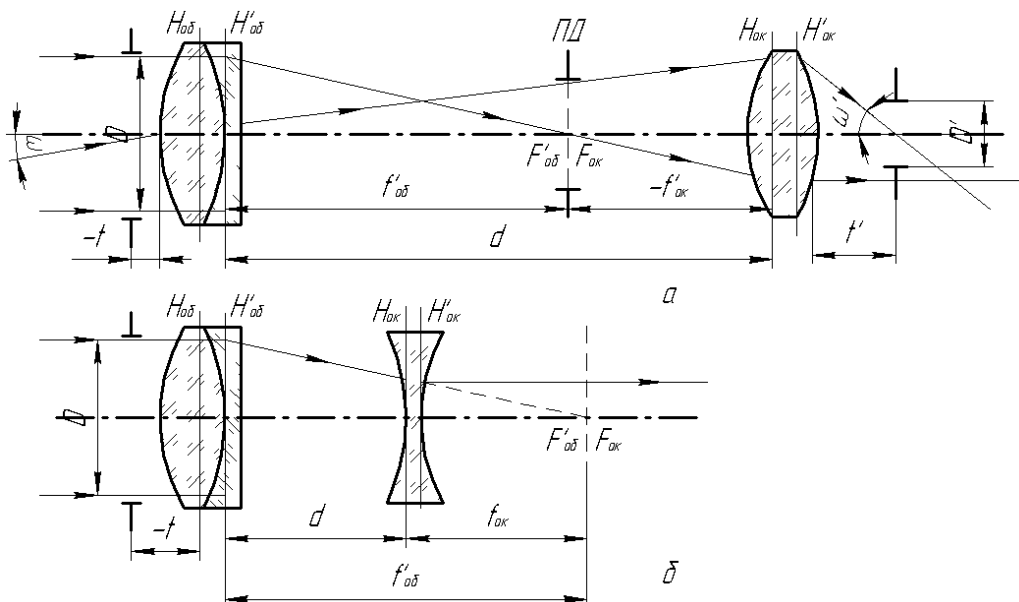


Рис. 5.1. Телескопічні системи Кеплера (а) та Галілея (б)

Осьовий пучок входить у телескопічну систему паралельно оптичної осі і повністю заповнює вхідну зіницю діаметра  $D$ . Вхідна зіниця в загальному випадку не співпадає з оправою об'єктива. Головний промінь позаосьового пучка утворює з оптичною віссю кут  $\omega$  і проходить через центр вхідної зіниці. У найпростішій трубі Кеплера зображення виходить перевернутим. Для формування прямого зображення застосовуються різні обертальні системи. У зоровій трубі Галілея зображення виходить неперевернутим. Також труба Галілея є значно коротшою за трубу Кеплера. Її недоліками є відсутність проміжного дійсного зображення, що унеможливує розміщення в площині такого зображення шкали або вимірювальної сітки, а також значне він'єтування похилих пучків.

Типові зорові труби мають збільшення  $\Gamma_T = 4^x \dots 60^x$ , кутове поле зору в просторі предметів  $2\omega = 1 \dots 10^\circ$ , розмір вихідної зіниці  $D' = 0,7 \dots 4$  мм. Відносний отвір об'єктивів знаходиться в межах від 1:6 до 1:10. В системі Кеплера в передній фокальній площині окуляра встановлюється сітка для наведення на предмети та зняття відділків.

Предмети можуть розташовуватися на різних відстанях від приладу, починаючи приблизно від 5 м до нескінченності, тому в конструкції зорової труби обов'язково є фокусуєчі пристрої. На рис. 5.2, а, б показані телескопічні системи із зовнішнім і внутрішнім фокусуванням відповідно.

У зоровій трубі першого типу фокусування здійснюється переміщенням окуляра 3 з сіткою 2 щодо нерухомого об'єктива 1. Величина переміщення окуляра  $z'$  є тим більшою, чим більша фокусна відстань об'єктива  $f'_{об}$ . Ці величини є пов'язаними:

$$z' = -\frac{f'_{об}}{z}, \quad (5.1)$$

де  $Z$  – відстань від переднього фокусу об'єктива до предмета.

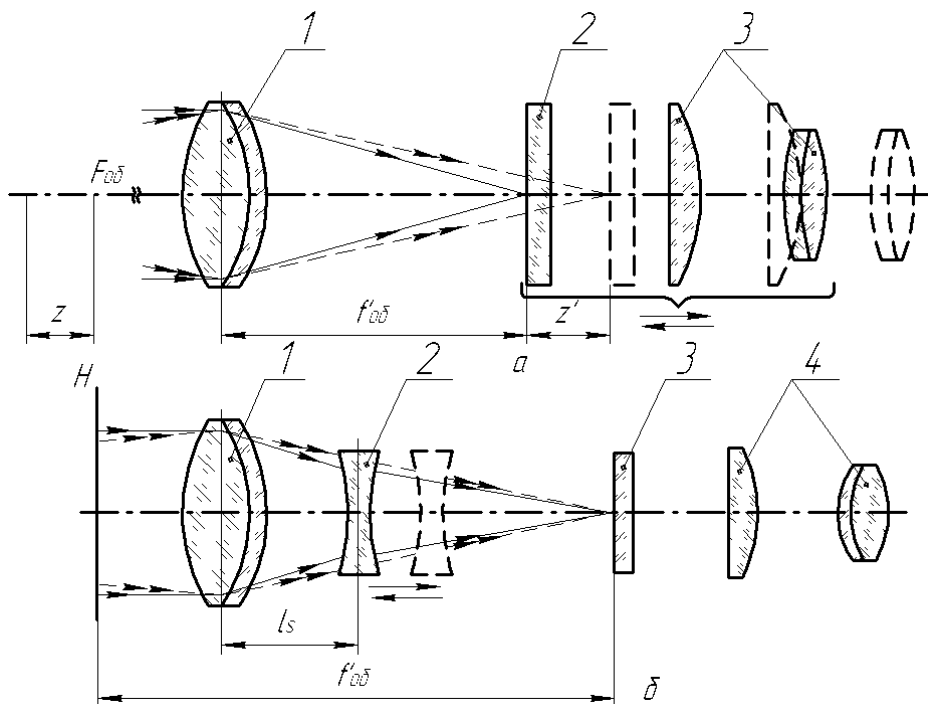


Рис. 5.2. Фокусування в зорових трубах

Відповідно в довгофокусних телескопічних системах переміщення буде великим. Цей недолік усунуто в трубах з внутрішнім фокусуванням (рис. 5.2,б), особливість яких полягає в тому, що в них об'єктив 1 і окуляр 4 є нерухомими, а фокусування на сітку 3 здійснюється переміщенням додатньої або від'ємної лінзи 2, що знаходяться всередині труби. У цьому випадку об'єктив з лінзою, що фокусує, розглядається як один складний об'єктив, який називають телеоб'єктивом. Еквівалентна фокусна відстань телеоб'єктива становить

$$f'_{об} = f'_1 f'_2 / (f'_1 + f'_2 - l_1), \quad (5.2)$$

де  $l_1$  - відстань між компонентами телеоб'єктива.

Положення фокусуєчої лінзи телеоб'єктива відносно основного об'єктива при наведенні на ближній предмет дорівнює

$$l_s = 1/2[(a' + L) - \sqrt{(a' - L)(a' - L + 4f')}], \quad (5.3)$$

де  $L$  - довжина труби;  $a'$  визначається формулою  $a' = a * f'_1 / (f'_1 + a)$ , де  $a$  - відстань від предмета до передньої головної площини об'єктива.

Основними характеристиками телескопічної системи є:

- видиме збільшення  $\Gamma_T$ ;
- кутове поле зору у просторі предметів  $2\omega$ ;
- діаметр  $D'$  і віддалення  $t'$  вихідної зіниці;
- кутова границя роздільної здатності  $\psi$ .

Видиме збільшення  $\Gamma_T$ , лінійне  $\beta$  та кутове  $Y_T$  збільшення телескопічної системи пов'язані наступною залежністю:

$$\Gamma_T = Y_T = \frac{1}{\beta} = \frac{D}{D'} = \frac{tg\omega'}{tg\omega}, \quad (5.4)$$

де  $D$  та  $D'$  - діаметр вхідної та вихідної зіниці відповідно.

З рис. 5.1 випливає, що

$$\Gamma_T = -\frac{f'_{об}}{f_{ок}}. \quad (5.5)$$

Роздільну здатність телескопічної системи визначають для простору предметів і оцінюють по кутовій границі роздільної здатності  $\psi$ . Для максимуму спектральної чутливості зорової системи теоретичне значення роздільної здатності становить

$$\psi = \frac{120''}{D}. \quad (5.6)$$

Щоб око спостерігача могло повністю використовувати роздільну здатність об'єктиву телескопічної системи, її видиме (корисне) збільшення має становити

$$\Gamma_{т.п} = \frac{60''}{\psi}. \quad (5.7)$$

Кутомірні інструменти призначаються для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів та класифікуються за призначенням, точністю, розмірами, розташуванням зорової труби.

За призначенням кутомірні прилади поділяються на універсали, теодоліти і вертикальні кола. Універсали призначені для вимірювання з однаковою точністю горизонтальних та вертикальних кутів. Теодоліти призначені для вимірювання горизонтальних кутів. Теодоліти-тахеометри призначені для вимірювання вертикальних, горизонтальних кутів і дальності.

За діаметром горизонтального лімба  $D$  кутомірні прилади вважаються великими ( $D > 20$  см), середніми ( $12 < D < 20$  см) та малими ( $D < 12$  см). Прилади можуть бути з центральною, бічною та «ламанною» зоровою трубою. По точності кутомірні інструменти поділяються на чотири групи: високоточні, точні, технічної та малої точності. Прилади зі скляними лімбами та оптичною системою, що передає зображення поділок лімбів у поле зору мікроскопа, розташованого на підставці труби або поруч із трубою, називаються оптичними.

### **Конструкція оптичного теодоліту ОТ-02**

Оптичний теодоліт ОТ-02 відноситься до високоточних кутомірних інструментів. До цієї групи інструментів відносяться також теодоліти ТО5 і Т1, призначені для різних вимірювальних робіт високої точності в геодезії та маркшейдерській справі.

Теодоліт ОТ-02 відноситься до оптичного типу з поворотним горизонтальним колом та двостороннім оптичним мікрометром з плоскопаралельними пластинками. Технічні характеристики теодоліту ОТ-02 наведено у табл. 5.1.

На рис. 5.3 показано схему оптичної частини теодоліта і розповсюдження променів у ньому. Схема зорової труби включає 5-тилінзовий об'єктив 31, симетричний окуляр 33 з сіткою і фокусуючу лінзу 32. Відлікові системи горизонтального вертикального лімбів аналогічні

одна одній. Введення зображення з кожного лімба в поле зору мікроскопа здійснюється окремо за допомогою призми 9. Промені світла, відбившись від дзеркал 1 і 21, пройшовши призми 2, 22 і 20, потрапляють у конденсори 3 і 23. Паралельні пучки світла з конденсора 3 потрапляють в алідадні призми 5 горизонтального круга, а з конденсора 23 - в алідадні призми 25 вертикального круга. З алідадних призм промені світла потрапляють на діаметрально протилежні частини горизонтального 4 і вертикального 24 лімбів з дзеркальним покриттям, відбиваються назад у зазначені алідадні призми і направляються останніми відповідно в об'єктиви 6, 7 відлікової системи горизонтального лімба і в об'єктив 26 вертикального лімба.

Таблиця 5.1

**Основні характеристики оптичного теодоліту ОТ-02**

Назва параметра	Величина параметра
<b>Зорова труба</b>	
1. Збільшення	24 <sup>x</sup> , 30 <sup>x</sup> , 40 <sup>x</sup>
2. Поле зору	1°
3. Діаметр вхідної зіниці	60 мм
4. Діаметр вихідної зіниці	1,5 мм
5. Віддалення вихідної зіниці	6,7 мм
6. Роздільна сила	4
7. Збільшення окуляра	30 <sup>x</sup>
8. Перефокусування окуляра, дптр	±10
9. Фокусна відстань об'єктива	348 мм
10. Фокусна відстань окуляра	9,8 мм
11. Найменша відстань візування	5 м
<b>Мікроскоп</b>	
1. Збільшення	46 <sup>x</sup>
2. Діаметр вхідної зіниці	1,3 мм
3. Віддалення вихідної зіниці	12 м
4. Перефокусування окуляра, дптр	±5
<b>Горизонтальний лімба</b>	
1. Діаметр	140 мм
2. Ціна поділки лімбу	4
3. Ціна поділки оптичного мікроскопа	0,2
4. Точність вимірювання	0,02
<b>Вертикальний лімба</b>	
1. Діаметр	90 мм
2. Ціна поділки лімбу	8
3. Ціна поділки оптичного мікрометра	0,4
4. Точність вимірювання	0,04

Зображення діаметрально протилежних штрихів горизонтального лімба проектуються об'єктивами 6, 7 через призму 8, а вертикального лімба



16 та мікроскоп. Через пластинку 11 і призму 13 проходить пучок променів, який потрапляє в призму 15 і освітлює штрихи лімба 30 мікромметра, зображення яких теж потрапляє у поле зору мікроскопа. На рис. 2.4 показано поле зору мікроскопа із зображенням у верхньому вікні лімба, а в нижньому - шкали мікромметра. Зняття відліку проводиться за принципом торцевого поєднання зображень протилежних штрихів лімба.

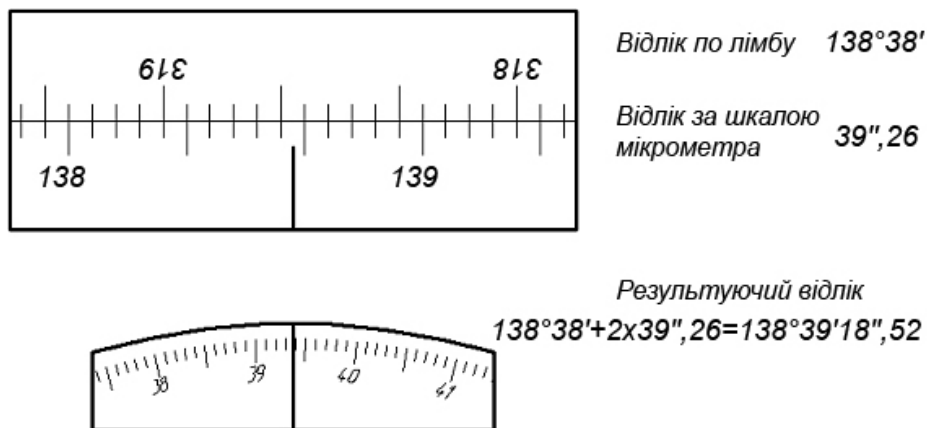


Рис. 5.4. Вид полів зору при вимірюваннях

Повороту лімба мікромметра на довжину всієї шкали в 600 поділок відповідає зміщення зображень штрихів кожного лімба на половину ціни поділки, тобто на 2. Шкала мікромметра оцифрована через кожних 10 поділок цифрами від 0 до 60, зменшеними порівняно з натуральними значеннями відділків у два рази. Тому для отримання правильного результату відлік за шкалою подвоюють.

### Методи вимірювання характеристик телескопічних систем

#### Вимірювання збільшення телескопічних систем

Відповідно до (5.4) видиме збільшення телескопічної системи може бути визначено або через відношення діаметра зіниці входу до діаметра вихідної зіниці (метод вимірювання  $\Gamma_T$  по лінійному збільшенню), або через відношення тангенсів кутів  $\omega'$  та  $\omega$  (метод вимірювання  $\Gamma_T$  за кутом збільшення).

На рис. 5.5 показана схема вимірювання видимого збільшення телескопічних систем  $\Gamma_T$  по лінійному збільшенню  $\beta$ .

Скляну масштабну шкалу 3 розміром  $Y$  поміщають поблизу об'єктива 4 випробуваної телескопічної системи 4, 5.

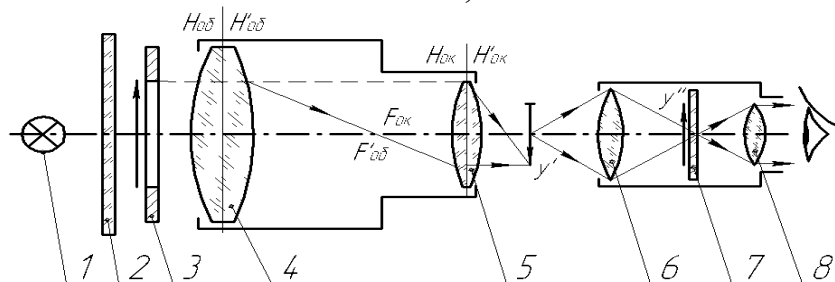


Рис. 5.5. Схема вимірювання видимого збільшення по лінійному збільшенню  $\beta$

Для визначення збільшення вимірюють величину зображення  $Y'$  за допомогою вимірювального мікроскопа з гвинтовим окулярним мікрометром 6-8. Скляна масштабна шкала може бути замінена однією або декількома круглими або ромбічними діафрагмами, розміри яких є заздалегідь відомими. Діафрагма чи шкала повинні бути освітлені денним розсіяним світлом чи лампою через молочне чи матове скло 2.

На рис. 5.6 показана схема вимірювання видимого збільшення телескопічних систем  $\Gamma_T$  по кутовому збільшенню  $\gamma_T$ .

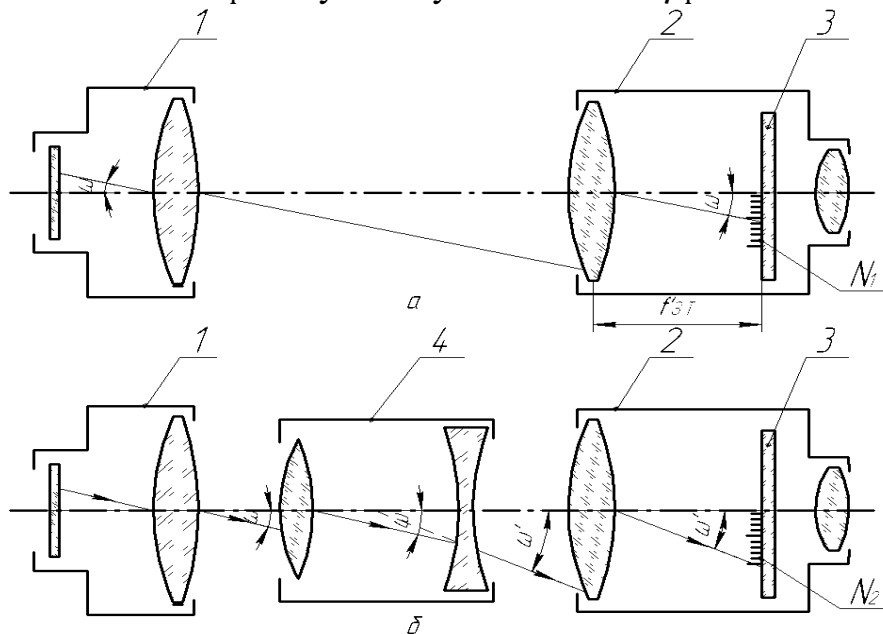


Рис. 5.6. Схема вимірювання видимого збільшення по кутовому збільшенню  $\gamma_T$

Відповідно до схеми рис. 5.6, вимірювання виконуються в такій послідовності. Попередньо зорову трубу 2 наводять на коліматор 1 і помічають, скільки поділок  $N_1$  за шкалою 3 труби займає зображення однієї або декількох поділок шкали коліматора (рис. 5.6,а). Потім між коліматором 1 і зоровою трубою 2 поміщають випробувану телескопічну систему 4 (рис. 2.5,б) і знову помічають, скільки поділок  $N_2$  за шкалою 3 зорової труби займає зображення тієї ж поділки (або кількох поділок) шкали коліматора. У цьому випадку кутове або видиме збільшення телескопічної системи визначають у відповідності до (5.4) як

$$\Gamma_T = \gamma_T = \frac{N_2}{N_1} . \quad (5.8)$$

### Вимірювання кутового поля телескопічної системи

Вимірювання кутового поля телескопічної системи можна здійснити кількома методами.

1. Схема визначення кутового поля зору з допомогою спеціальної рейки показана на рис. 5.7.

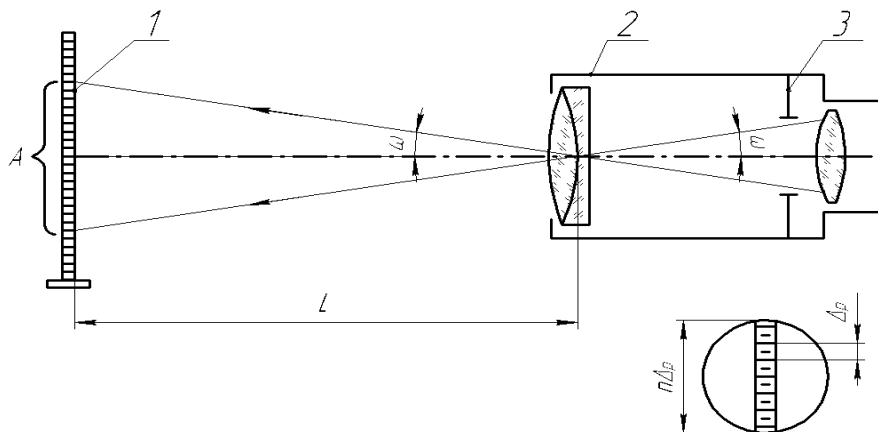


Рис. 5.7. Перший варіант визначення кутового поля зору телескопічної системи

Теодоліт 2 розміщують так, щоб його візирна вісь була приблизно горизонтальною. Перед теодолітом 2 встановлюють рейку 1 з поділками. Знаючи відстань  $A$  між поділками рейки, видимими на краях кутового поля зору контрольованої системи, і виміривши відстань від рейки 1 до об'єктиву теодоліту 2, визначають кутове поле телескопічної системи в просторі предметів:

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{A}{2L}\right). \quad (5.8)$$

2. Схема визначення кутового поля зору за допомогою коліматора показана на рис. 5.8.

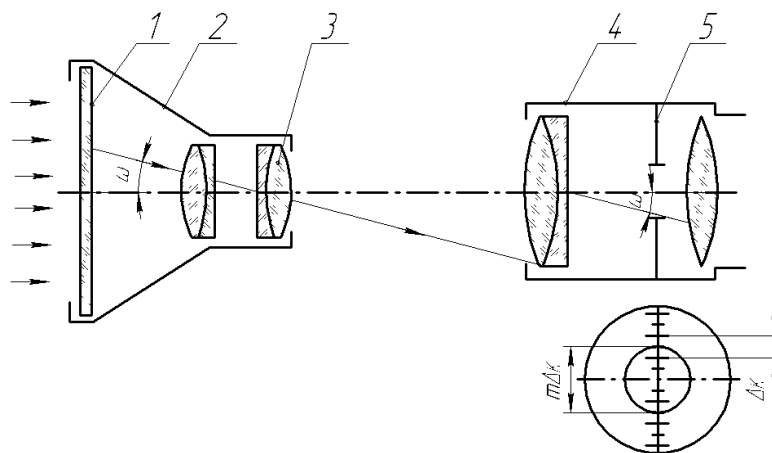


Рис. 5.8. Другий варіант визначення кутового поля зору телескопічної системи

Сітка 1 коліматора 2 має вимірювальну шкалу, на якій поділки виконані в кутовій мірі. При визначенні кутового поля зору зорової труби 4 розглядають сітку 1. Число поділок сітки 1, різке бачення яких в окуляр зорової труби обмежується польовою діафрагмою 5, визначає кутове поле випробуваної системи в просторі предметів.

3. Схема вимірювання кутового поля зору телескопічної системи шляхом спостереження віддалених предметів показана на рис. 5.9.

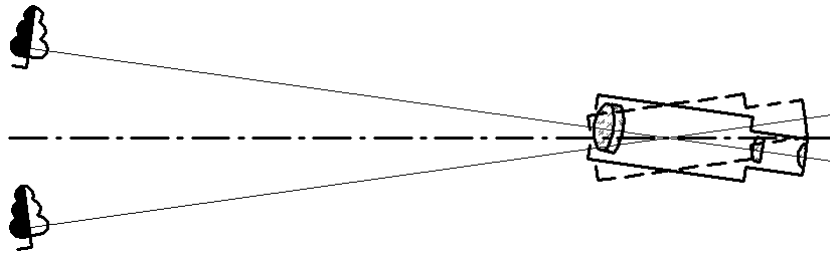


Рис. 5.9. Третій варіант визначення кутового поля зору телескопічної системи

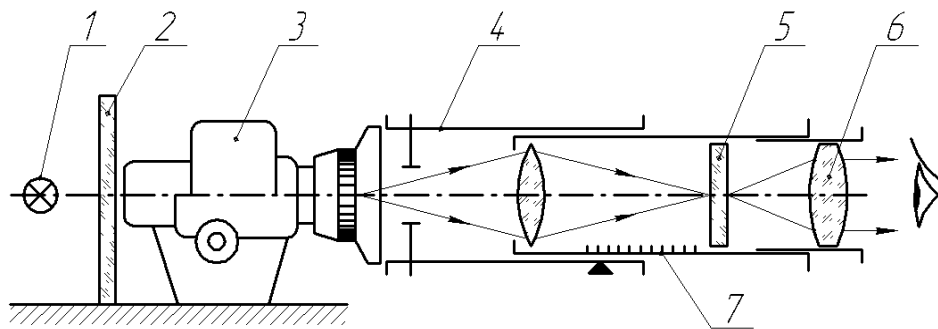
Зорову трубу теодоліту по черзі наводять спочатку одним краєм діафрагми поля зору (наприклад, верхнім або лівим), а потім - іншим (діаметрально протилежним) краєм на віддалену точку на місцевості, наприклад дерево. Після кожного наведення знімають відліки по вертикальному або горизонтальному лімбу. Різниця відповідних відліків дорівнює кутовому полю випробувальної системи в просторі предметів.

### **Вимірювання діаметру та віддалення вихідної зіниці телескопічної системи**

Розмір вихідної зіниці є однією з найважливіших характеристик будь-якого оптичного приладу, оскільки світлосила приладу пропорційна квадрату діаметра вихідної зіниці.

Вимірювання діаметра вихідної зіниці виконують за допомогою вимірювального мікроскопа або мікроскопа-динаметра [6]. Вихідна зіниця зазвичай має вигляд світлого повного круга. При використанні вимірювального мікроскопа його фокусують на зображення вхідної зіниці випробуваної зорової труби теодоліту. По шкалі окулярного мікрометра знімають відліки, які відповідають візуванню діаметрально протилежних країв зіниці (аналогічно вимірюванням збільшення телескопічних систем за видимим збільшенням системи). Схема установки для вимірювання діаметра вихідної зіниці та її віддалення з допомогою мікроскопа-динаметра зображено на рис. 5.10.

Вхідна зіниця контрольованого приладу 3 освітлюється лампою 1 через матове скло 2. Мікроскоп-динаметр насадкою 4 притискається до наглазника окуляра контрольованого приладу, який встановлено на нуль діоптрій. Переміщенням окуляра 6 і всього мікроскопа-динаметра по зовнішній трубі домагаються отримання різкого зображення вихідної зіниці на сітці 5 динаметра. Розмір вихідної зіниці визначається за шкалою сітки, а його віддалення - по бічній міліметровій шкалі 7 при почерговому наведенні мікроскопа-динаметра на останню поверхню очної лінзи окуляра контрольованої системи 3 і на зображення вихідної зіниці.



а)



б)

Рис. 5.10. Вимірювання параметрів вихідної зіниці з допомогою мікроскопа-динаметра: а) схема установки; б) зовнішній вигляд динаметра

### Вимірювання роздільної здатності телескопічної системи

Для визначення роздільної здатності телескопічної системи застосовуються випробувальні тест-об'єкти - штрихові та радіальні міри.

Кутову границю розділення визначають візуально відповідно до ГОСТ 15114-78 на вимірювальній установці, схема якої показана на рис. 5.11.

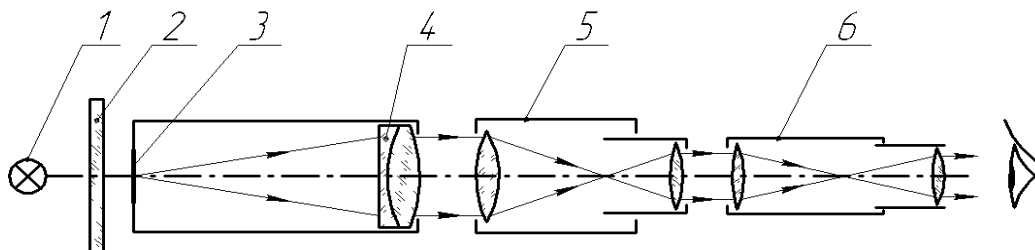


Рис. 2.11. Схема вимірювання роздільної здатності телескопічної системи

Випробувальна штрихова міра містить матрицю 5x5 елементів. Кожний елемент складається з чотирьох груп паралельних штрихів (рис. 5.12). Параметри штрихової міри наведені в табл. 5.2.

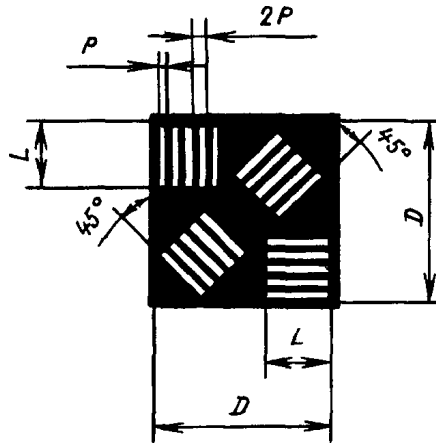


Рис. 5.12. Вид елемента штрихової міри за ГОСТ 15114-78

У кожній мірі ширина штрихів при переході від елемента  $N1$  до елемента  $N25$  зменшується в геометричній прогресії,  $\frac{1}{12\sqrt{2}} = 0,94$ .

Таблиця 5.2

**Геометричні розміри виміральної міри**

Номер міри	Число штрихів на 1 мм в елементі		База міри, мм
	$N25$	$N1$	
1	200	50	1,2
2	100	25	2,4
3	50	12,5	4,8
4	25	6,5	9,6
5	12,5	3,1	19,2
6	6,3	1,56	38,4

Кут роздільної здатності елементів міри, тобто. кутова відстань між серединами сусідніх чорних штрихів (або світлих смуг) в секундах визначається як

$$\psi = \frac{2a}{f'_k} \cdot 206265 \quad (5.10)$$

де  $2a$  - ширина штриха, мм;  $f'_k$  - фокусна відстань коліматора, мм; 206265 – число кутових секунд у 1 радіані.

Випробувальну міру 3 встановлюють у фокальну площину об'єктива коліматора 4 і освітлюють лампою 1 через матове скло 2. Утворене випробуваною зоровою трубою 5 зображення міри розглядають через додаткову зорову трубу 6 невеликого збільшення ( $2^x - 3^x$ ). Збільшення додаткової зорової труби 6 вибирається з умови, щоб діаметр зображення вихідної зіниці випробуваної зорової труби 5 не був би меншим 1 мм (в цьому випадку зорова система спостерігача не обмежує роздільну здатність).

Спостерігаючи в додаткову зорову трубу 6 зображення міри, визначають групу штрихів, в якій ще можна впевнено розрізняти роздільно усі чотири взаємно перпендикулярні напрямки групи штрихів міри.

Роздільна здатність  $R'_N$  випробуваного об'єктива в штрихах на міліметр визначається за формулою

$$R'_N = \frac{60}{\beta} k_N \frac{f'_k}{f'_{\text{вип}}}, \quad (5.11)$$

де  $k_N = 1,06^{N-1}$ - коефіцієнт залежить від номера елемента  $N$  і бази  $\beta$  міри (табл. 5.2);  $f'_k$  та  $f'_{\text{вип}}$  - фокусні відстані об'єктивів коліматора та випробуваної телескопічної системи (видаються викладачем).

### Виконання роботи

#### Вимірювання збільшення телескопічної системи

1. Спостерігаючи віддалені предмети або по коліматору встановити зорову трубу теодоліту ОТ-02 на нескінченність.
2. Зібрати схему вимірювань згідно з рис. 5.5.
3. Розмістити перед об'єктивом скляну масштабну шкалу або надіти на об'єктивну частину зорової труби діафрагму (типи діафрагм визначаються викладачем).
4. Розмістити вимірювальний мікроскоп за окуляром зорової труби і, спостерігаючи в окуляр мікроскопа, отримати чітке зображення діафрагми  $Y'$ .
5. Переміщуючи перехрестя окуляра-мікрометра перпендикулярно до оптичної осі, навести перехрестя на один із країв діафрагми. Зняти перший відлік  $Y_1$ . Обертаючи барабан окуляра-мікрометра, поєднати перехрестя з іншим краєм діафрагми. Зняти другий відлік  $Y_2$ . Повторити вимірювання для всіх діафрагм у двох площинах (меридіональній та сагітальній). Результати вимірювань занести в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

#### Результати вимірювання збільшення телескопічної системи за лінійним збільшенням

Номер діафрагми	1	2	3	4
Меридіональна площина				
$Y_1$				
$Y_2$				
$D''_M = Y''_M = Y_2 - Y_1$				
$D'_M = Y'_M = Y''_M / \beta_{об}$				
$\Gamma_{Т.М}$				
Сагітальна площина				
$Y_1$				
$Y_2$				
$D''_c = Y''_c = Y_2 - Y_1$				
$D'_c = Y'_c = Y''_c / \beta_{об}$				
$\Gamma_{Т.С}$				

6. За формулою (5.4) з врахуванням паспортних даних вимірювального мікроскопа  $\beta_{об}$  визначити збільшення телескопічної системи в меридіональній та сагітальній площинах.

7. Зібрати схему вимірювань згідно з рис. 5.6,а. Контрольовану зорову трубу встановити на нескінченність.
8. Зняти відлік  $N_1$ , за шкалою зорової труби.
9. Зібрати схему вимірювань згідно з рис. 5.6,б.
10. Зняти відлік  $N_2$ .
11. Повторити вимірювання не менше п'яти разів - кожного разу для різного числа поділок шкали коліматора. Результати вимірювань занести в табл. 5.4. За формулою (5.8) визначити видиме збільшення телескопічної системи.

Таблиця 5.4

**Результати вимірювання збільшення телескопічної системи за кутовим збільшенням**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5
Кількість поділок шкали коліматора	1	2	3	4	5
$N_1$					
$N_2$					
$\Gamma_T$					

Провести статистичну обробку результатів вимірювань двома методами.

**Вимірювання кутового поля зору телескопічної системи у просторі предметів**

1. Для вимірювання кутового поля зору телескопічної системи по рейці зібрати схему вимірювань згідно рис. 5.7.
2. Встановити рейку на відстані  $L$  не менше 5 м від об'єктива зорової труби теодоліту ОТ-02. Навести окуляр для отримання різкого зображення поділок рейки. Відрахувати кількість поділок рейки  $n$ , що вміщуються в розмір польової діафрагми. Діаметр польової діафрагми дорівнює

$$A = n\Delta_p, \quad (5.12)$$

де  $\Delta_p$  - ціна поділки рейки (для нівелірної рейки  $\Delta_p = 1$  см).

3. Повторити вимірювання не менше п'яти разів для різних відстаней. Результати занести до табл. 5.5. За формулою (5.7) визначити кутове поле телескопічної системи.

Таблиця 5.5

**Результати вимірювання кутового поля зору по рейці**

Номер вимірювання	1	2	3	4	5
$L$					
$A$					
$2\omega$					

4. Для вимірювання кутового поля по коліматору зібрати схему вимірювань згідно з рис. 5.8. Встановити за об'єктивом коліматора 3 випробувану зорову трубу 4 теодоліту ОТ-02, попередньо виставленого на нескінченність, так, щоб центр його кутового поля збігався з центром перехрестя шкали 1 коліматора.

5. Спостерігаючи в окуляр теодоліту 4, визначити, які поділки шкали коліматора 3 ще видні в межах польової діафрагми 5. Відстань між цими поділками, виражена в кутовій мірі визначає кутове поле зору випробуваної системи в просторі предметів:

$$2\omega = m\Delta_k,$$

де  $\Delta_k$  - ціна поділки шкали сітки коліматора;  $m$  - число поділок шкали, які вміщуються діаметр польової діафрагми.

6. Повторити вимірювання не менше п'яти разів. Результати вимірювань занести до табл. 5.6.

Таблиця 5.6

<b>Результати вимірювання кутового поля зору по коліматору</b>					
Номер вимірювання	1	2	3	4	5
$m$					
$2\omega$					

7. Для вимірювання кутового поля телескопічної системи віддаленому предмету встановити теодоліт ОТ-02 біля вікна. Вибрати характерний предмет на місцевості (одиноке дерево, стовп, дроти електропередач тощо).

8. Навести зорову трубу на вибраний предмет спочатку одним краєм польової діафрагми і зняти відлік  $N_1$ , по горизонтальному лімбу. Потім навести зорову трубу другим краєм діафрагми і зняти другий відлік  $N_2$  по горизонтальному лімбу.

9. Аналогічно п.8 зняти відліки  $M_1$ , і  $M_2$  по вертикальному лімбу при наведенні на місцевий предмет послідовно верхніми і нижніми краями польової діафрагми.

10. Повторити вимірювання не менше двох разів для кожного з лімбів, результати вимірювань занести до табл. 5.7.

Таблиця 5.7

**Результати вимірювання кутового поля зору по віддаленому предмету**

Відліки по лімбах	Номер вимірювання	1	2
Горизонтальний лімб	$N_1$ $N_2$ $2\omega_r =  N_2 - N_1 $		
Вертикальний лімб	$M_1$ $M_2$ $2\omega_v =  M_2 - M_1 $		

Провести статистичну обробку отриманих результатів вимірювання кутового поля трьома методами.

### **Вимірювання діаметра вихідної зіниці телескопічної системи та її віддалення**

1. Зібрати схему вимірювань по рис. 5.10.  
 2. Встановити перед об'єктивом зорової труби теодоліту ОТ-02 освітлювач 1 з матовим склом 2. При цьому діафрагма, розміщена на об'єктивній частині зорової труби, повинна бути знята. Встановити мікроскоп-динаметр насадкою на наглазник окуляра зорової труби. Окуляр має бути при цьому встановлений на нуль діоптрій.

3. Переміщуючи окуляр 6 динаметра, встановити його на різке зображення сітки 5 динаметра. Пересувати мікроскоп-динаметр по зовнішній трубці до тих пір, поки на сітці не з'явиться різке зображення вихідної зіниці.

Для отримання високої точності вимірювання необхідно стежити, щоб шкала сітки динаметра проходила суворо через центр вихідної зіниці, а не по хорді. Діаметр вихідної зіниці визначити за шкалою сітки динаметра:

$$D' = k \cdot \Delta_d , \quad (5.13)$$

де  $\Delta_d$  - ціна поділки шкали сітки динаметра;  $k$  - кількість поділок шкали, що вкладаються у зображення вихідної зіниці.

За міліметровою шкалою 7 зняти перший відлік  $X_1$  при різкому баченні вихідної зіниці. Переміщуючи мікроскоп у зовнішній трубці, навестись на різке зображення останньої поверхні головної лінзи окуляра теодоліту. За шкалою 7 зняти другий відлік  $X_2$ . Різниця цих відліків дає значення віддалення вихідної зіниці:

$$t' = |X_2 - X_1| . \quad (5.14)$$

Повторити вимірювання не менше п'яти разів. Результати занести в табл. 5.8.

*Таблиця 5.8*

#### **Результати вимірювання діаметра вихідної зіниці та її віддалення**

№ виміру	1	2	3	4	5
$k$					
$D'$					
$X_1$					
$X_2$					
$t'$					

Якщо вимірювання виконуються не мікроскопом-динаметром, а вимірювальним мікроскопом, то потрібно скористатися вказівками п.5 «Виконання роботи».

Провести статистичну обробку отриманих результатів вимірювань діаметра вихідної зіниці та її віддалення,

### Вимірювання роздільної здатності телескопічної системи

1. Зібрати схему вимірювань згідно з рис. 5.11. Зорова труба досліджуваного теодоліту ОТ-02 і додаткова зорова труба малого збільшення повинні бути при цьому встановлені на нескінченність.

2. Встановити в фокальній площині об'єктива коліматора штрихову міру (N1 – N6) і освітити її. Спостерігаючи зображення міри в окуляр додаткової зорової труби, визначити номер елемента міри, штрихи якого впевнено візуально розділяються.

3. По формулі (5.11) визначити роздільну здатність у штрихах на міліметр, а потім, скориставшись співвідношенням  $2a = 1/R'_N$ , згідно (5.10) визначити кутове розділення зорової труби. Результати вимірювань та обчислень занести в табл. 5.9.

Таблиця 5.9

#### Результати вимірювання роздільної здатності

№ цілі	1	2	3	4	5	6
N						
$R'_N$						
$\psi$						

## Лабораторна робота №6 ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОСКОПУ

**Мета роботи** - вивчити оптичну схему, характеристики мікроскопа та методу вимірювання; набути практичних навичок роботи з навчальним мікроскопом УМ-301 та бінокулярним мікроскопом МБС-7.

### Завдання

1. Повторити основи теорії мікроскопів.
2. Поглибити та закріпити знання про мікроскопи, їх конструкції на базі навчального мікроскопа УМ-301 та бінокулярного мікроскопа МБС-9.
3. Засвоїти методи вимірювання характеристик мікроскопів.
4. Виміряти видиме збільшення, лінійне поле зору і числову апертуру в просторі предметів, що роздільну здатність об'єктива мікроскопа.

### Загальні положення

#### Основні характеристики мікроскопа

Мікроскоп - це оптична система, призначена для спостереження близько розташованих об'єктів з великим збільшенням і високою роздільною здатністю.

Найпростіший мікроскоп містить об'єктив і окуляр. На рис. 6.1 зображено оптичну схему мікроскопа.

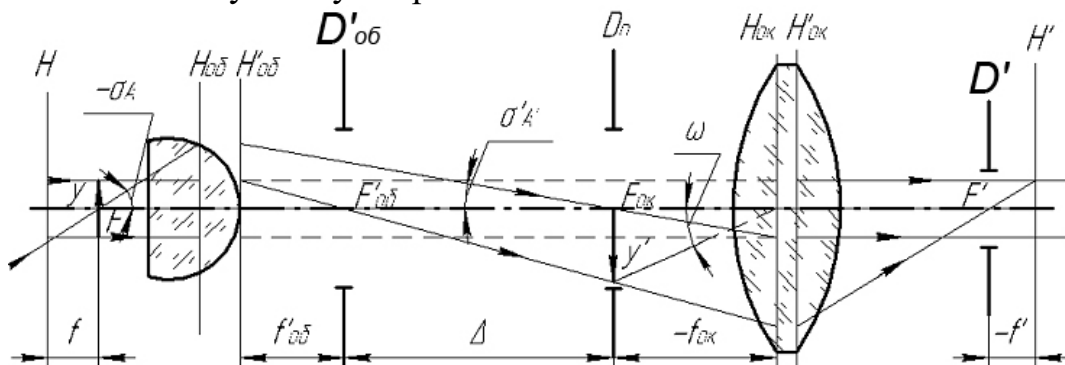


Рис. 6.1. Оптична схема мікроскопа

Об'єкт розміром  $y$  знаходиться на деякій відстані від переднього фокусу  $F_{об}$  об'єктива. Об'єктив утворює дійсне збільшене і перевернуте зображення

об'єкта розміром  $y'$  в площині, що збігається з переднім фокусом  $F_{ок}$  окуляра. Окуляр працює подібно до лупи і формує на нескінченності збільшене уявне пряме зображення розміром  $y''$ . Тобто об'єкт знаходиться в передньому фокусі мікроскопа. В результаті мікроскоп дає дуже збільшене перевернуте зображення об'єкта.

Основні характеристики мікроскопа:

- видиме збільшення  $\Gamma$ ;
- лінійне поле зору у просторі предметів  $2y$ ;
- числова апертура у просторі предметів  $A$ ;
- роздільна здатність об'єктива мікроскопа  $d$ .

Під видимим збільшенням мікроскопа  $\Gamma$  розуміють відношення розміру зображення об'єкта на сітківці ока, утворене при спостереженні через мікроскоп, до розміру зображення того ж об'єкта, отриманого на сітківці при спостереженні неозброєним оком з відстані найкращого зору.

Найчастіше видиме збільшення мікроскопа визначають як

$$\Gamma = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок} = \beta_{об} \cdot 250 / f'_{ок}, \quad (6.1)$$

де  $\beta_{об}$  - лінійне збільшення об'єктива;  $\Gamma_{ок}$  - видиме збільшення окуляра;  $f'_{ок}$  - фокусна відстань окуляра.

Поле зору мікроскопа обмежує польова діафрагма  $D_{п}$  яка, встановлена в площині проміжного зображення (рис. 6.1).

Лінійне поле у просторі предметів  $2y$  визначається величиною предмета, зображення якого заповнює польову діафрагму:

$$2y = \frac{D_{п}}{\beta_{об}} = \frac{500tg\omega'}{\Gamma}, \quad (6.2)$$

де  $2\omega'$  - кутове поле зору окуляра у просторі зображень.

Числовою апертурою у просторі предметів  $A$  називають добуток показника заломлення  $n_1$  середовища, в якому знаходиться об'єкт, на синус апертурного кута у просторі предметів:

$$A = n_1 |\sin\sigma_A|. \quad (6.3)$$

У вимірювальних мікроскопах зазвичай  $n_1 = 1$  (імерсія не використовується, середовищем є повітря), тому  $A = \sin\sigma_A$ .

Апертурним кутом  $\sigma_A$  називається половина кута при вершині конуса променів, який виходить з осьової точки об'єкта та спирається на краї апертурної діафрагми. Зображення апертурної діафрагми у просторі предметів називають вхідною зіницею, а просторі зображень – вихідною зіницею. В об'єктивах мікроскопів вихідною зіницею є оправа однієї з останніх лінз чи спеціальна діафрагма. Вважають, що вихідна зіниця мікрооб'єктива  $D'_{об}$  збігається з його задньою фокальною площиною, а вхідна зіниця об'єктива (і всього мікроскопа) знаходиться в нескінченності. Вихідна зіниця мікроскопа  $D'$  є зображенням вихідної зіниці об'єктива, утвореним окуляром. Діаметр вихідної зіниці об'єктива (рис. 6.1)

$$D'_{об} = 2\Delta \cdot tg\sigma'_A, \quad (6.4)$$

де  $\Delta$  - відстань від заданого фокусу об'єктива до переднього фокусу окуляра, називається оптичною довжиною тубуса мікроскопа.

Діаметр вихідної зіниці мікроскопа пов'язаний з діаметром вихідної зіниці об'єктива співвідношенням.

$$D' = D'_{об} \frac{f'_{ок}}{\Delta}. \quad (6.5)$$

Якщо кут  $\sigma'_A$  є невеликим, то (3.5) можна записати у вигляді

$$D_{вих} = \frac{2\Delta A}{\beta_{об}} \cdot \frac{250}{\Delta\Gamma_{ок}} = \frac{500A}{\beta_{об}\Gamma_{ок}} = \frac{500A}{\Gamma}. \quad (6.6)$$

Роздільна здатність мікроскопа залежить від числової апертури об'єктива, якості та контрасту зображення, досконалості усунення аберацій та якості виготовлення об'єктива. Роздільна здатність мікрооб'єктива

виражається в лінійній мірі і визначається відстанню  $d$  між двома точками об'єкта, що світяться, і є роздільно видимими через мікроскоп.

При хорошому виправленні аберацій і точному виготовленні роздільна здатність обмежується дифракцією і визначається числовою апертурою:

$$d = 0,61 \frac{\lambda}{A}, \quad (6.7)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі світла, що використовується при спостереженні.

Для забезпечення достатньої роздільної здатності необхідно правильно визначити загальне збільшення мікроскопа. Воно розраховується з умови, щоб кутова відстань між зображеннями об'єктів, що розглядаються, по відношенню до центру зіниці ока спостерігача знаходилася в межах  $(2 - 4)'$ . Для  $\lambda = 0,555$  мкм та відстані до зображення 250 мм збільшення мікроскопа, називають корисним  $\Gamma_k$ . Це збільшення знаходиться в межах

$$500A < \Gamma_k < 1000A. \quad (6.8)$$

Застосування збільшення меншого, ніж нижня границя, не дозволяє розрізнити всі деталі, які дозволяє об'єктив. Збільшення, яке є більше корисного, не тільки не дає ніякої додаткової інформації про об'єкт, а й навпаки, є шкідливим, оскільки призводить до помітності дифракційної картини.

### **Конструктивні особливості мікроскопів**

Функціонально мікроскоп складається з трьох основних вузлів: освітлювальної системи, об'єктиву та окулярної частини (монокулярної, бінокулярної, проєкційної тощо) [6].

Об'єктив є найбільш відповідальним вузлом мікроскопа. Об'єктиви мікроскопа класифікуються:

- за призначенням (біологічні, металографічні, поляризаційні, криміналістичні, люмінісцентні тощо);
- по робочому спектральному діапазону;
- за способом освітлення об'єкта;
- по довжині тубуса, на яку вони розраховані;
- за наявності покривного скла та імерсійної рідини;
- за конструктивними особливостями (лінзові, дзеркально-лінзові, дзеркальні).

Спектральна область роботи мікрооб'єктивів визначається ступенем корекції аберацій, за якою мікрооб'єктиви поділяються на монохромати, ахромати, апохромати, суперапохромати і планооб'єктиви. У монохроматів аберації виправлені для вузької спектральної області. Вони використовуються для спостережень в окремих ділянках ультрафіолетової області спектра шириною не більше 20 нм; складаються із набору одиночних лінз, виконаних з кварцу, флюориту або фтористого літію; для видимої області спектру не використовуються. У ахроматів аберації виправлені для двох довжин хвиль. Вони застосовуються в біологічних,

поляризаційних, металографічних і флюоресцентних мікроскопах; забезпечують збільшення ( $1^x - 100^x$ ) з апертурою (0,05 - 0,85) без імерсії та з апертурою (0,85 - 1,6) з водною або масляною імерсією. У апохроматів спектральна область розширена, і ахроматизація виконується для трьох довжин хвиль. Такі об'єктиви використовують в біологічних та металографічних мікроскопах при дослідницьких роботах. Вони забезпечують збільшення ( $3,6^x - 50^x$ ) з апертурою (0,1 - 0,85) без імерсії і (0,85 - 1,4) з водною або масляною імерсією. У суперапохроматів ахроматизація виконана для видимої та ультрафіолетової областей спектра. В планооб'єктивах виправлено кривизну поля і збільшено поле зору. Збільшення становить ( $3,5^x - 75^x$ ) з апертурою (0,1 - 1,25), причому при апертурі (0,9 - 1,25) використовується масляна імерсія. Фазові об'єктиви з фазово-контрастною пластинкою призначені для досліджень методом фазового контрасту прозорих і безбарвних об'єктів, не видимих у звичайний мікроскоп (біологічні та мінералогічні препарати). Вони мають збільшення ( $10^x - 70^x$ ) з апертурою (0,3 - 1,25); при апертурі (0,75 - 1,5) використовується водна чи масляна імерсія.

Збільшення об'єктиву  $\beta_{об}$  - одна з основних його характеристик. Зазвичай збільшення вказується на оправі об'єктива з зазначення його числової апертури - наприклад  $9^x$  0,20;  $21^x$  0,40. Необхідно пам'ятати, що таке фіксоване збільшення  $\beta_{об}$  можливе лише при визначеній довжині тубуса  $\Delta$  мікроскопа, з якою  $\beta_{об}$  пов'язано співвідношенням

$$\beta_{об} = -\frac{\Delta}{f'_{об}}. \quad (6.9)$$

Для усунення неоднозначності визначення  $\beta_{об}$  встановлюють фіксоване значення  $\Delta$ , що визначається з умови, що відстань між площиною кріплення оправі об'єктива і площиною окуляра повинна становити 160 мм або 190 мм.

Окуляри, що застосовуються в мікроскопах, можна розділити на дві основні групи: візуальні окуляри, що слугують для спостереження зображення оком, і окуляри, використовувані в мікрофотографії і мікропроекційних пристроях.

Візуальні окуляри повинні давати неспотворене зображення по всьому полю. Застосування окуляра визначається типом об'єктива і характером використання аберацій. Найбільш поширеними в мікроскопах і простими за конструкцією є окуляри Гюйгенса, Рамсдена, Кельнера та фотографічні. Вони застосовуються в мікроскопах з об'єктивами-ахроматами, їх збільшення становить  $7^x$ ,  $10^x$  і  $15^x$ , лінійне поле зору відповідно становить 18 мм, 14 мм та 8 мм (кутове поле у просторі предметів  $2\omega \approx 30^\circ$ ). Хроматична аберация збільшення у окуляра відрізняється за знаком від об'єктивів-ахроматів. Оптична схема окулярів з  $\Gamma_{ок} = 3^x \dots 10^x$  є подібною до окуляра Гюйгенса, але замість однієї головної лінзи в них використовують склеєну з двох лінз. Окуляри зі збільшенням  $\Gamma_{ок} = 15^x \dots 20^x$  є аналогічними ортоскопічним окулярам, але з іншим виправленням хроматизму збільшення.

У мікроскопах з об'єктивами-апохроматами і планоб'єктивами використовуються різні типи компенсаційних окулярів, а також іноді – симетричні окуляри. В деяких мікроскопах замість окулярів для компенсації кривизни зображення і хроматизму збільшення використовуються від'ємні оптичні системи – гомали. Вихідна зіниця гомалів розташована всередині, тому вони застосовуються головним чином для фотографування.

Методи освітлення та конструкція освітлювальної системи залежать від властивостей об'єкта, що спостерігається, окремі елементи якого по-різному поглинають або відбивають випромінювання, а також відрізняються показником заломлення. Це викликає різну інтенсивність пучків променів, які пройшли через мікроскоп, або запізнення у фазі через різницю в оптичному ході одних променів щодо інших, що дозволяє спостерігати подробиці об'єкта.

Освітлювачі для спостереження в світлі, що проходить, і працюють за методом світлого поля застосовуються при дослідженні прозорих зразків (рис. 3.2).

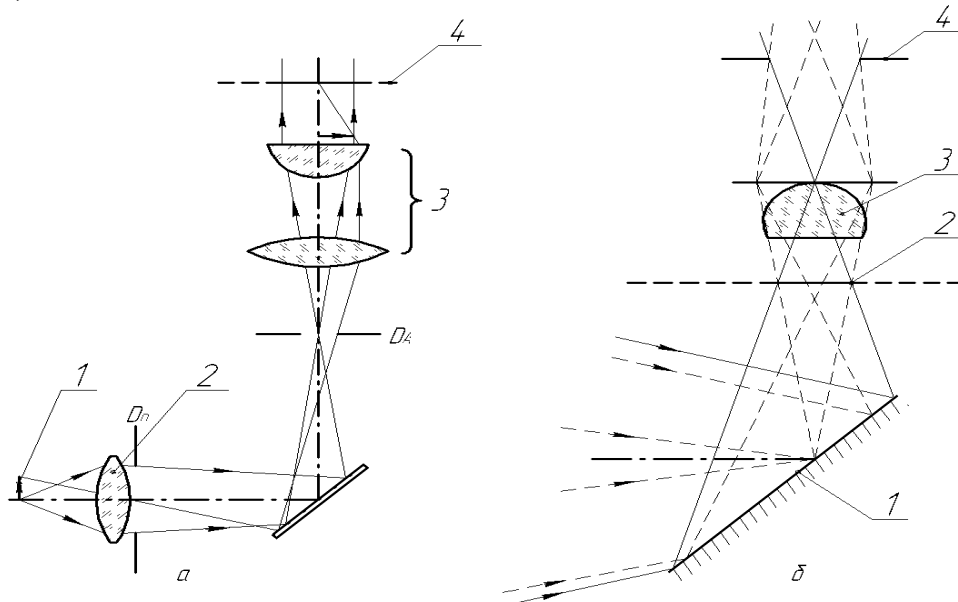


Рис. 6.2. Освітлювальні системи мікроскопів

При освітленні невеликих прозорих об'єктів лампою з тілом розжарення 1 (рис. 6.2,а) застосовується однолінзовий або дволінзовий конденсор 2. Він проектує в площину предмета 4 або поблизу неї зображення тіла розжарення 1 із збільшенням, яке є достатнім щоб заповнювати повністю подвійний апертурний кут об'єктива мікроскопа і освітлювати предмет повністю. В мікроскопах з невеликою апертурою зовнішнє світло збирається за допомогою плоского або сферичного дзеркала 1 (рис. 6.2,б). Це дозволяє повністю заповнити подвійний апертурний кут об'єктива 3, що спирається на вихідну зіницю 4 (рис. 6.2). Освітлюваний предмет знаходиться в площині 2.

Освітлювачі для спостереження непрозорих предметів повинні освітлювати об'єкт збоку або зверху. Об'єкт зазвичай розглядається без покривного скла, так як при бічному освітленні воно відбивало б багато світла. Об'єкт, що освітлюється збоку, видно в мікроскоп темним з

освітленими виступаючими елементами, які є дещо спотвореними бічним освітленням. Рівномірне сповіщення можна отримати, застосовуючи опаклюмінатори.

Освітлювачі для спостереження в темному полі і в світлі, що проходить, застосовуються в біології, мінералогії. Для спостереження в темному полі непрозорих предметів застосовується освітлювач, що складається з конденсора 1, кільцевого плоского 2 і параболічного 3 дзеркал, які направляють промені на предмет 4 під великими кутами і дозволяють спостерігати в об'єктив 5 світлі частинки на темному тлі (рис. 6.3).

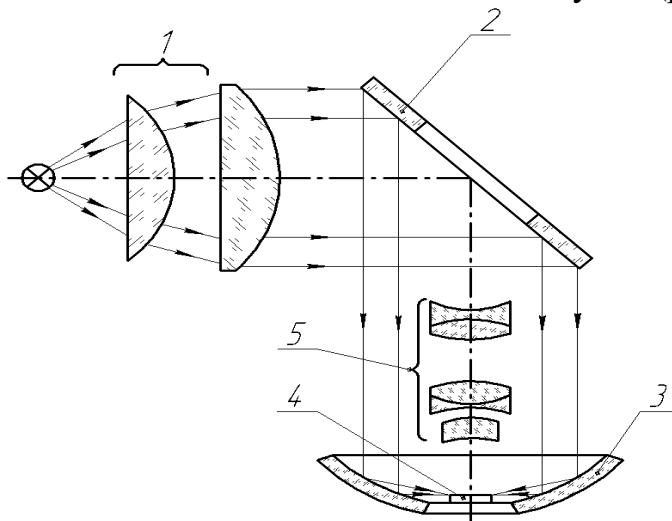


Рис. 6.3. Схема освітлювача для спостереження в темному полі

У цій лабораторній роботі застосовуються модернізований навчальний мікроскоп УМ-301 і бінокулярний мікроскоп МБС-9. Деякі їх технічні характеристики наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

**Технічні характеристики мікроскопів**

Характеристика	УМ-301	МБС-9
Тип окуляра	Рамсдена	Рамсдена
Збільшення окуляра	6 <sup>x</sup> , 8 <sup>x</sup>	4 <sup>x</sup> , 8 <sup>x</sup> , 14 <sup>x</sup>
Тип об'єктива	Ахромат	Ахромат з барабаном телескопічних систем Галілея
Збільшення об'єктиву	8 <sup>x</sup> , 20 <sup>x</sup>	0,6 <sup>x</sup> , 1 <sup>x</sup> , 2 <sup>x</sup> , 7 <sup>x</sup>
Тип освітлювача	ОТП з лампою А6-21, однолінзовим конденсором та матовим склом	Лампа РН 12-50 з однолінзовим конденсором і матовим склом

## Методи визначення характеристик мікроскопа Вимірювання видимого збільшення мікроскопа

Збільшення будь-якої оптичної системи визначається як

$$\Gamma = \frac{y'}{y} \quad (6.10)$$

де  $y, y'$  - величина відповідно предмета і його зображення.

З іншого боку, трансформувавши формулу (6.2), можна записати

$$\Gamma = \frac{250}{y} \operatorname{tg} \omega' \quad (6.11)$$

Якщо за площину зображення прийняти площину яка знаходиться від ока на відстані 250 мм, то збільшення, обчислені за (6.10) і (6.11) співпадають.

На підставі викладеного застосовує два методи вимірювання збільшення мікроскопа: метод Аббе та метод Юдіна.

Метод Аббе. У цьому методі порівнюють два масштаби: при спостереженні безпосередньо оком і через випробуваний мікроскоп (рис. 6.4). Перед вимірюванням мікроскоп 2 фокусують на різке зображення штрихів об'єкта-мікрометра 1, поміщеного на предметному столику мікроскопа. На окуляр мікроскопа надягають оправу з невеликою куб-призмою 3. Перпендикулярно до оптичної осі мікроскопа на відстані 250 мм від ока встановлюють масштабну лінійку 4. Спостерігач крізь призму 3 одночасно бачить поділки об'єкта-мікрометра в мікроскопі та поділки масштабної лінійки. Спостерігач визначає, яке число поділок  $n_2$  масштабної лінійки збігається з числом поділок  $n_1$  об'єкта-мікрометра.

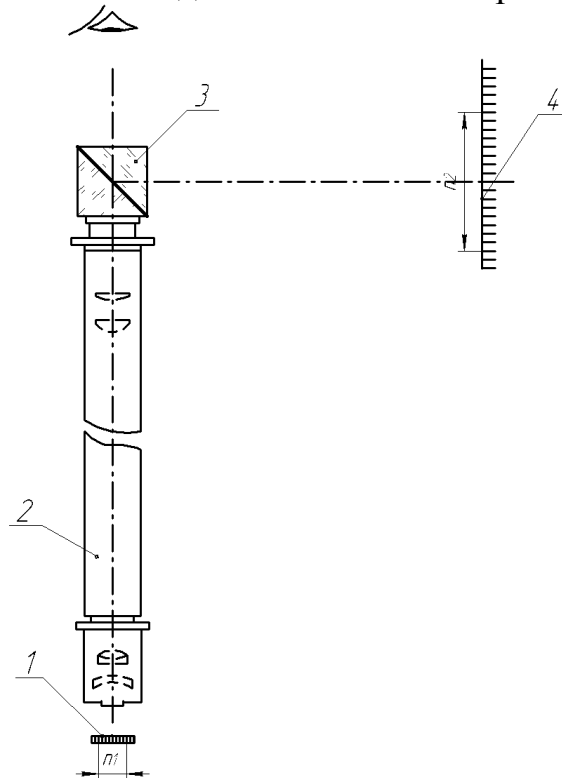


Рис. 6.4. Схема вимірювання збільшення мікроскопа методом Аббе

Збільшення мікроскопа при цьому дорівнює

$$\Gamma = \frac{y'}{y} = \frac{m_2 n_2}{m_1 n_1}, \quad (6.12)$$

де  $m_1$ ,  $m_2$  - ціна поділки відповідно об'єкта-мікрометра та масштабної лінійки (зазвичай 1 поділка відповідає 1 мм).

Метод Юдіна. Цей метод ґрунтується на вимірюванні кута, під яким видно предмет, розташований у предметній площині мікроскопа [7].

Схему вимірювань показано на рис. 6.5. На столику мікроскопа 1 поміщають об'єкт-мікрометр 2, на який фокусують мікроскоп 3. До окуляра мікроскопа прикладено телескопічну трубку 4 з однократним збільшенням і з сіткою, що складається з ряду паралельних штрихів.

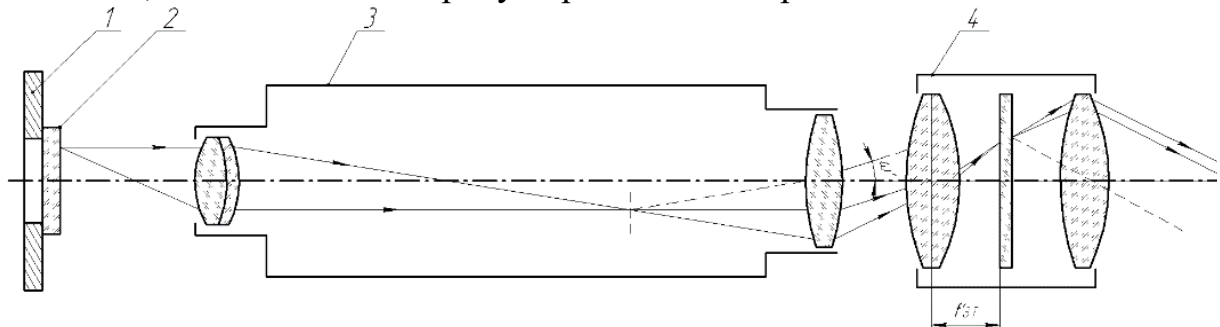


Рис. 6.5. Схема вимірювання збільшення мікроскопа методом Юдіна

При спостереженні у трубку одночасно видно поділки об'єкта-мікрометра та поділки сітки телескопічної трубки. Відмічають число поділок  $n_3$  трубки Юдіна, які збігаються з числом поділок  $n_1$  об'єкта-мікрометра. Збільшення мікроскопа при цьому дорівнює

$$\Gamma = \frac{250}{l} tg \omega' = \frac{250 n_3 m_3}{n_1 m_1 f'_{т.ю.}}, \quad (6.13)$$

де  $m_3$ ,  $m_1$  - лінійна ціна поділки трубки Юдіна та об'єкта-мікрометра відповідно;  $f'_{т.ю.}$  - фокусна відстань об'єктива трубки Юдіна.

#### Вимірювання поля зору мікроскопа

На відміну від лупи поле зору мікроскопа різко обмежується однією з оправ окуляра або спеціальною діафрагмою поля зору, яка розташовується в першій фокальній площині окуляра. Так як мікроскоп працює з конкретними близько розташованими предметними площинами, то його поле зору задається не в кутових величинах, а в лінійних і визначається діаметром видимого круга в предметній площині мікроскопа.

Поле зору мікроскопа перевіряють за певної механічної довжини тубуса. Для знаходження поля зору мікроскопа на його предметний столик поміщають прозору масштабну шкалу і помічають, скільки поділок  $k$  шкали укладається в діаметр видимого круга поля зору. Тоді величина поля зору складає

$$2y = km_1, \quad (6.14)$$

де  $m_1$  - ціна поділки масштабної шкали.

Вимірювання виконують при кількох положеннях масштабної шкали, повертаючи її щоразу на кут  $90^\circ$ . За лінійне поле зору вважають середнє арифметичне значення з отриманих відліків.

### Визначення числової апертури об'єктива мікроскопа

Числова апертура об'єктива мікроскопа може бути визначена за допомогою діафрагми 2, розташованої в предметній площині мікроскопа, і масштабної лінійки 1 (рис. 6.6).

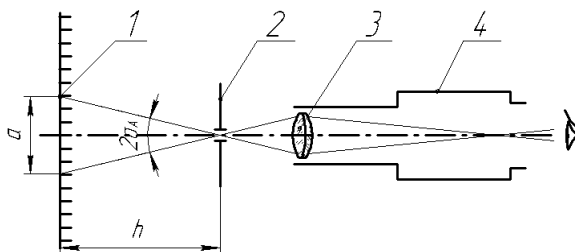


Рис. 6.6. Схема визначення числової апертури об'єктива мікроскопа

Для цього через тубус мікроскопа 4 (без окуляра) розглядають зображення шкали лінійки 1 на фоні світлого отвору об'єктива і відраховують видиму кількість поділок  $a$ . Знаючи відстань  $h$  від лінійки 1 до діафрагми 2 визначають тангенс апертурного кута

$$\operatorname{tg} \sigma_A = \frac{a}{2h}. \quad (6.15)$$

Після цього обраховують апертуру  $A = \sin \sigma_A$ .

### Визначення роздільної здатності об'єктива мікроскопа

Максимальну величину роздільної здатності об'єктива мікроскопа, яка визначається дифракцією можна обрахувати для заданої довжини хвилі  $\lambda$  через числову апертуру об'єктива  $A$  по формулі (6.7).

Але для конкретного приладу це значення встановлюють експериментально. Поширеним методом визначення роздільної здатності мікрооб'єктивів є автоколімаційний метод. Можливу схему вимірювань за цим методом показано на рис. 6.7. Світло від джерела 1 через конденсор 2 освітлює міру 3, яка розташована в площині зображення мікрооб'єктива 7. Далі пучки світла, відбившись від напівпрозорої гіпотенузної грані допоміжної призми-куба 4, проходять через призму Шмідта з дахом 5, систему зміни збільшення 6, випробуваний об'єктив 7 і попадають на допоміжне дзеркало 8, встановлене в предметній площині об'єктива 7. Після відбиття від допоміжного дзеркала 8, світловий пучок повертається в випробуваний об'єктив 7, проходить систему зміни збільшення 6, призму Шмідта 5 і утворює автоколімаційне зображення міри 3 у сполученій площині зображення 9 мікрооб'єктива 7. Це зображення розглядають за допомогою окуляра 10.

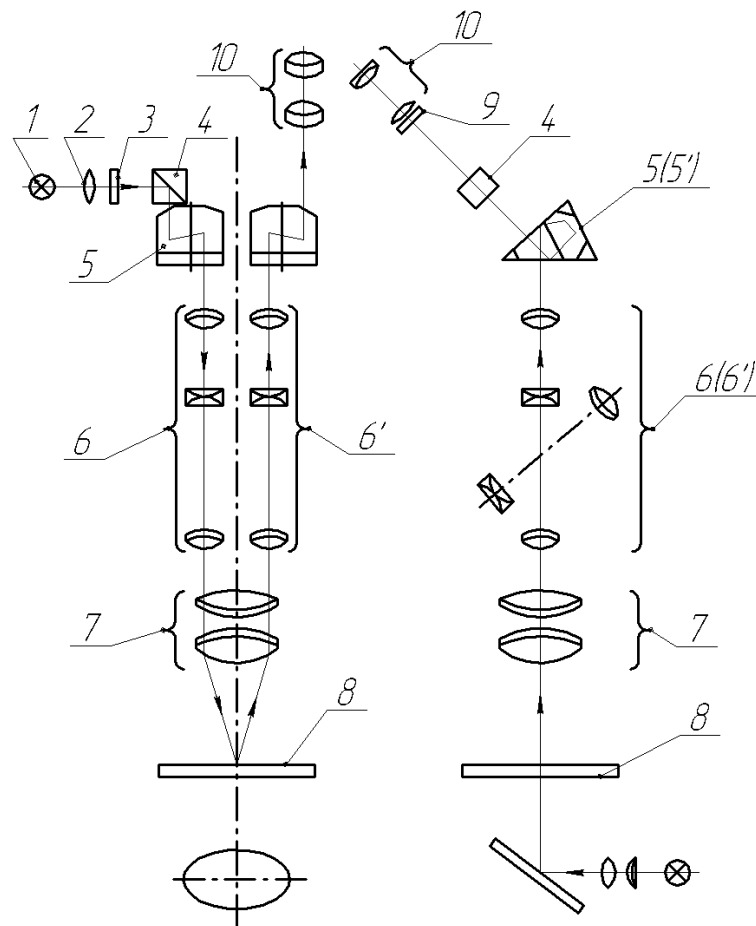


Рис. 6.7. Схема автоколімаційного методу визначення роздільної здатності об'єктива мікроскопа

Розміри міри 3 визначають з урахуванням збільшення контрольованого мікро об'єктиву. Для вимірювань можна використовувати будь-які міри, наприклад, ті, що описані в лабораторній роботі 2. Недоліком методу є те, що при такій оцінці роздільної здатності світло двічі проходить через контрольований об'єктив, що звичайно викривляє реальне значення роздільної здатності.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему вимірювань видимого збільшення мікроскопа за методом Аббе (рис. 6.4).

2. Занотувати вихідні дані для мікроскопа, параметри якого вимірюються:  $\beta_{об} =$ ;  $\Gamma_{ок} =$ ;  $m_1 =$ ;  $m_2 =$ ;  $m_3 =$ ;  $h =$ .

3. При одночасному спостереженні через куб-призму обох шкал (об'єкт-мікрометра та масштабної лінійки) визначити число поділок  $n_1$  об'єкта-мікрометра, що збігаються з числом поділок  $n_2$  масштабної лінійки.

4. Вимірювання повторити шість разів, домагаючись зміщення об'єкт-мікрометра вздовж зображення масштабної лінійки. Результати вимірювань занести в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

## Результати визначення характеристик мікроскопа

№ вимірювання	Вимірювання збільшення				Вимірювання лінійного поля зору	Вимірювання числової апертури		Роздільна здатність
	Метод Аббе		Метод Юдіна			$\alpha$	A	
	$n_1$	$n_2$	$n_1$	$n_3$	$k$			
1								
2								
3								
4								
5								
6								

5. Здійснити вимірювання методом Юдіна, визначити число поділок  $n_1$  об'єкт-мікрометра, що збігаються з числом поділок  $n_3$  трубки Юдіна.

6. Вимірювання повторити шість разів. Результати вимірювань занести в табл. 6.2.

7. Виміряти лінійне поле зору в просторі предметів мікроскопа, визначаючи число  $k$  поділок об'єкт-мікрометра, що укладаються в діаметр видимого круга поля зору.

8. Вимірювання повторювати шість разів, повертаючи об'єкт-мікрометр на кут не менше  $60^\circ$ . Результати вимірювань занести в табл. 6.2.

9. Зібрати схему вимірювань числової апертури згідно з п. «Визначення числової апертури об'єктива мікроскопа» (рис. 6.6).

9. Визначити відстань  $\alpha$  між межами видимої через мікроскоп частини лінійної шкали.

10. Вимірювання повторити 6 разів. Результати вимірювань занести в табл. 6.2.

11. Встановити штрихову міру в освітлювальний канал мікроскопа згідно з п. «Визначення роздільної здатності об'єктива мікроскопа» (рис. 3.7).

12. Спостерігаючи в окуляр вимірювального каналу, визначити номер елемента міри, штрихи всіх чотирьох груп якого ще дозволяються об'єктивом.

13. Повторити вимірювання шість разів, за потреби змінюючи міру. Результати вимірювань занести в табл. 6.2.

14. Провести статистичну обробку результатів вимірювань.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Вимірювання параметрів оптичних деталей візуальними методами: методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Оптичні вимірювання та основи метрології» для студентів приладобудівного факультету оптичних спеціальностей. Ч.1. / Укл. М.О. Денисов, Л.А. Міхеєнко. – К.: КПІ, 1992. – 40 с. – Рос. мовою.
2. Вимірювання параметрів оптичних деталей візуальними методами: методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Оптичні вимірювання і основи метрології» для студентів приладобудівного факультету оптичних спеціальностей. / Укл. М.О. Денисов, Л.А. Міхеєнко. – К.: КПІ, 1992. – 56 с. – Рос. мовою.
3. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. - К.: Техніка, 1987.
4. Афанасьев В.А. Оптические измерения. - М.: Высшая школа, 1981.
5. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. - М.: Машиностроение, 1974, - 333 с.
6. Оптические приборы в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 1974. - 323 с.
7. Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев В.Н. и др. Оптико-механические измерения. - М.: Машиностроение, 1984. - 352 с.

## Інструкція з електробезпеки при виконанні лабораторних робіт

1. Електричний струм небезпечний тим, що його дія на організм людини може викликати порушення серцевої діяльності, зупинку дихання, шоківий стан, опіки, а нерідко закінчується смертю. Внаслідок цього користування приладами, що живляться електричним струмом, вимагає особливої уваги та обережності від людини.

2. При ураженні електричним струмом розрізняють: електричні удари, коли струмом уражається весь організм, і електротравми, коли отримують місцеві зовнішні та внутрішні ураження тіла – опіки. При електричному ударі, коли струм проходить через тіло людини, у більшості випадків спочатку порушується дихання, а серце продовжує працювати з порушенням свого ритму, після чого може статися його зупинка, а потім і смерть.

Електричні опіки тіла можуть бути отримані, як при проходженні електричного струму через тіло людини, так і від іскор вольтової дуги при різноманітних умовах короткого замикання, наприклад при зміні зіпсованих електрозапобіжників, при випадковому замиканні різних електричних фаз металевими предметами або несправної ізоляції живлячих дротів та інші. При цьому опік може виявлятися почервонінням шкіри та утворенні на ній пухирів, а іноді - викликати глибоке порушення тканин і навіть обвуглення кісток.

3. Для уникнення ураження електричним струмом при користуванні електроприладами під час виконання лабораторної роботи слід дотримуватися правил:

- не вмикати в електромережу електроприлади, шнури живлення яких мають пошкоджену ізоляцію;
- не вмикати в електромережу електроприлади, які мають пошкоджені або ненадійно з'єднані з електричним дротом живлення, вилками, розетками та подовжувачами;
- не користуватися пошкодженими розетками, відгалуджувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншою електроарматурою, а також електролампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;

- не користуватися саморобними подовжувачами, які не відповідають вимогам ПУЕ, що пред'являються до переносних електропроводок;

- при можливості уникати доторкання руками до металевих частин електроприладів, увімкнених в електромережу;

- не доторкатися руками до обірваних та оголених дротів електромережі, електроприладів;
- не замінювати самостійно зіпсовані електрозапобіжники, електролампи, не проводити ремонт електроприладів, електромережі;

- не залишати без догляду працюючі електроприлади;

- по закінченні роботи вимкнути вимикач на електроприладі та від'єднати дріт живлення від розетки електромережі. При цьому слід пам'ятати, що від'єднуючи вилку електроспоживача від розетки її слід тримати за корпус, а не смикати за дріт живлення, бо можна висмикнути один з дротів і потрапити під дію електричного струму.

4. При ураженні електричним струмом слід негайно звільнити потерпілого від його дії шляхом вимкнення електричного струму або відривання його від джерела струму тримаючись за одяг потерпілого, якщо він сухий, чи ставши на гумову ковдру, суху дошку, картон, фанеру, брезент.

5. Якщо потерпілий опинився в стані непритомності, слід забезпечити йому приплив свіжого повітря, розстібнути тісний одяг, дати нюхати нашатирний спирт, обприскати водою, розтирати і зігрівати тіло. Негайно викликати швидку медичну допомогу.

6. При рідкому та судорожному вдиханні потерпілого, слід робити йому штучне дихання. Допомогу потерпілому повинні надавати дві особи:

- одна з них накладає долоню на нижню третину грудей і створює поштовхи на груди з частковою приблизно 50-ти поштовхів на хвилину;

- друга особа надає допомогу, щільно притуливши свої губи до роту потерпілого і вдуває в його легені повітря. Надавати цю допомогу потерпілому продовжувати до прибуття кваліфікованої медичної допомоги. При отриманні потерпілим опіків, не торкатися руками обпечених місць, обережно накласти на пошкоджені місця стерильну пов'язку і відвести потерпілого до медичного закладу.