

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа фотоники, электроники и молекулярной физики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 4.1.1

Геометрическая оптика

Автор:  
Макаров Лев Евгеньевич  
Б04-306

# 1 Введение

## Цель работы:

1. изучение свойств оптических систем: определение фокусных расстояний линз
2. определение фокусных расстояний и положения главной и фокальной плоскостей сложной оптической системы
3. изучение аббераций оптических систем.

**В работе используются:** оптическая скамья с набором рейтеров, положительные и отрицательные линзы, экран, осветитель с ирисовой диафрагмой, зрительная труба, кольцевые диафрагмы, линейка.

## 2 Теоретические сведения

### Определения фокусных расстояний

Формула тонкой линзы имеет вид

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $a$  – расстояния от предмета до линзы,  $b$  – расстояние от изображения до линзы.

Для измерения фокусного расстояния тонкой собирающей линзы может использоваться схема с рис. 1. и формула (2).

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L} \quad (2)$$

Также фокусное расстояние тонкой собирающей линзы можно измерить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность. Если расположить линзу между предметом и трубой и найти четкое изображение предмета, то расстояние от линзы до предмета будет равно фокусному.

Для определения расстояния тонкой рассеивающей линзы воспользуемся схемой на рис. 2 и формулой тонкой линзы. Также можно воспользоваться зрительной трубой, настроенной на бесконечность. Если расположить предмет у нее в фокусе, то изображение переместится в бесконечность, что можно проверить с помощью зрительной трубы.

Для определения фокусного расстояния и положения главных плоскостей сложной оптической системы может использоваться метод Аббе: схема на рис. 3 и формула (3).

$$f = \frac{\Delta x}{y/y_1 - y/y_2} \quad (3)$$

Пусть пучок света, попадающий в объектив, составляет с оптической осью угол  $\varphi_1$ , а пучок, выходящий из окуляра, — угол  $\varphi_2$ . Увеличение  $\gamma$  зрительной трубы по определению равно

$$\gamma = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1}, \quad (4)$$

но также из рис. 3 следует, что

$$\gamma_K = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (5)$$

где  $D_1$  – ширина пучка, прошедшего через объектив, а  $D_2$  – ширина пучка, вышедшего из окуляра

### 2.1 Моделирование трубы Галилея

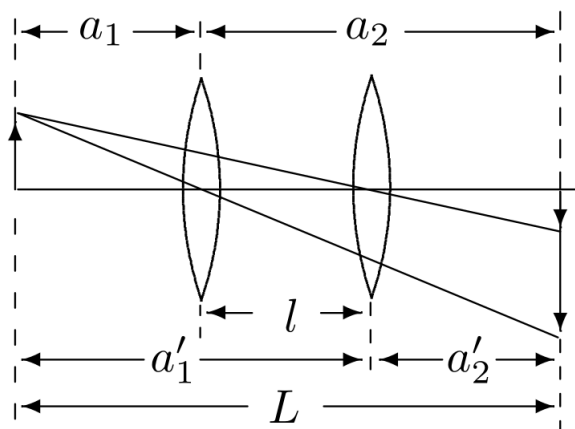


Рис. 1: Схема измерения фокуса тонкой собирающей линзы

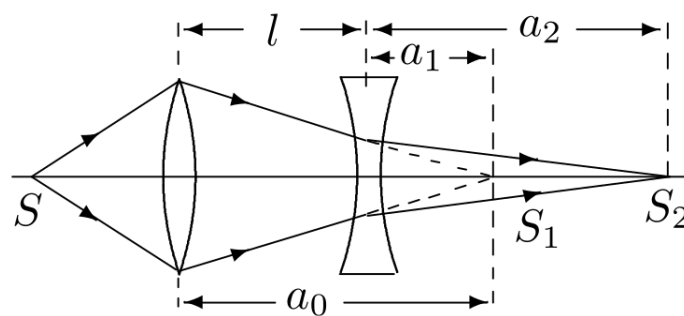


Рис. 2: Схема измерения фокуса тонкой рассеивающей линзы

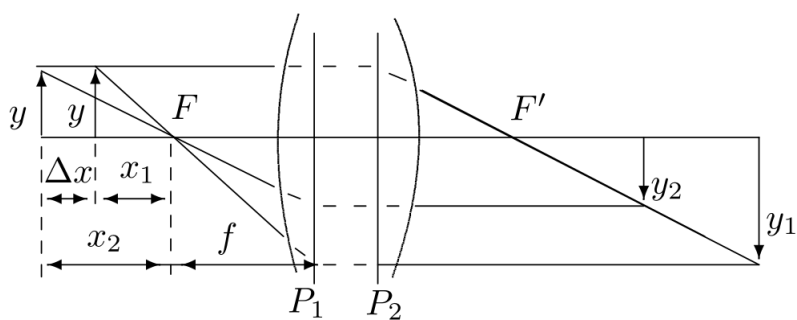


Рис. 3: Схема определения фокусного расстояние и положения главных плоскостей сложной оптической

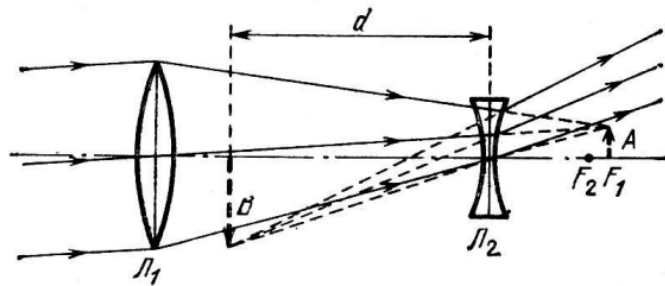


Рис. 4: Ход лучей в трубе Галилея

## 2.2 Моделирование микроскопа

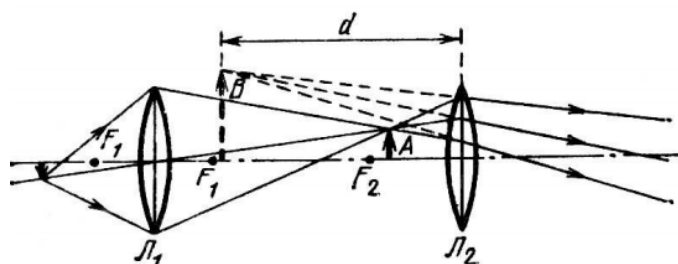


Рис. 5: Ход лучей в микроскопе

Ход лучей в микроскопе показан на рис. 6. Увеличение микроскопа вычисляется по формуле

$$\gamma_M = \Gamma_{ob} \Gamma_{oc} = \frac{\Delta}{f_1} \frac{L}{f_2}, \quad (6)$$

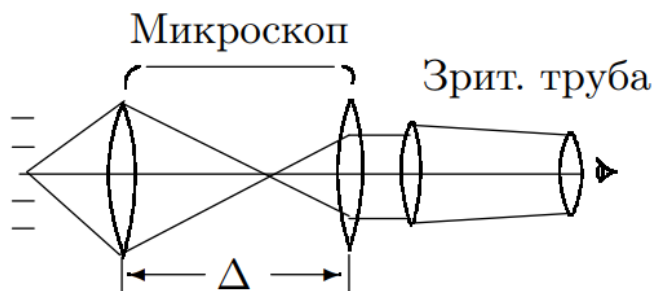


Рис. 6: Схема микроскопа

## 3 Результаты измерений и обработка данных

### 0. Подготовка к работе

1. Определим какие линзы являются собирающими, а какие рассеивающими.
  - собирающие: 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6;
  - рассеивающие: 3.5.
2. Отцентрируем линзы относительно оптической оси, так чтобы свет источника проходил через центр всех линз.

## I. Определение фокусных расстояний линз с помощью подзорной трубы

1. Настроим подзорную трубу на бесконечность.
2. Расположим одну из линз на оптической скамье на приблизительно фокусном расстоянии. Далее разместим за линзой подзорную трубу. Слегка перемещая линзу добьемся наиболее четкого изображения. Измерим фокусное расстояние линейкой.
3. Перевернем линзу обратной стороной и измерим фокусное расстояние еще раз.
4. Повторим измерения для остальных линз и результаты измерений запишем в таблицу 1.

Таблица 1: Фокусные расстояния всех линз

линза	$f$ , см	$f_{\text{обратное}}$ , см
3.1	6.4	6.8
3.2	14.5	14.5
3.3	19.0	19.0
3.4	29.3	29.3
3.6	4.0	4.5

5. Повторим измерение для линзы 3.3 несколько раз и измерим среднеквадратичное отклонение  $\sigma_f^{\text{кв}}$ . Результаты измерений запишем в таблицу 2.

Таблица 2: Фокусные расстояния линзы 3.3

$f$ , см	19.0	18.9	19.0	18.8	19.2
$\sigma_f$ , см	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Тогда  $\sigma_f^{\text{кв}} = 0.07$  см.

6. Измерим фокусное расстояние отрицательной линзы. Разместим вспомогательную положительную линзу и получим на экране четкое изображение источника. Разместим отрицательную линзу между положительной и экраном. Уберем экран и разместим вместо него подзорную трубу. Перемещая отрицательную линзу получим четкое изображение предмета. Для повышения четкости вставим диафрагму. Измерим фокусное расстояние линзы как:

$$f = l - a_0 = 27.2 - 35.8 \approx -8.6 \text{ см}$$

## II. Измерение фокусных расстояний линз по формуле тонкой линзы и методом Бесселя

1. Разместим одну из положительных линз на оптической скамье. Разместим экран на расстоянии  $L = 91$  см  $> 4f$  от предмета.
2. Разместим исследуемую линзу между источником и экраном и получим на экране четкие изображения: одно увеличенное, а другое уменьшенное. Измерим соответствующие расстояния от источника до линзы  $s_1$  и  $s_2$ .

$$s_1 = 28.5 \text{ см}; \quad s_2 = 61.7 \text{ см}$$

$$l = s_2 - s_1 = 33.2 \text{ см}$$

3. Вычислим фокусное расстояние двумя способами:

Формула тонкой линзы:

$$f = \frac{1}{\frac{1}{s} + \frac{1}{L-s}}$$

$$f_1 = \frac{1}{\frac{1}{s_1} + \frac{1}{L-s_1}} = (19.6 \pm 0.4) \text{ см}$$

$$f_2 = \frac{1}{\frac{1}{s_2} + \frac{1}{L-s_2}} = (19.9 \pm 0.2) \text{ см}$$

Формула Бесселя:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L} = (19.7 \pm 0.3) \text{ см}$$

4. Развернем линзу и повторим измерения

$$f_1 = (19.5 \pm 0.4) \text{ см}; \quad f_2 = (19.9 \pm 0.2) \text{ см}; \quad f = (19.7 \pm 0.3) \text{ см};$$

### III. Измерение фокусных расстояний методом Аббе

1. Установим линзу между осветителем и экраном. Получим на экране четкое действительное изображение. Измерим линейное изображение предмета  $y_0$  и предмета  $y_1$ .
2. Отодвинем осветитель на расстояние  $\Delta x = 5 \text{ см}$  от линзы. Передвинем экран к линзе на расстояние  $\Delta x' = 57 \text{ см}$ , чтобы получилось четкое изображение. Измерим линейный размер изображения  $y_2$ .
3. Рассчитаем фокусное расстояние методом Аббе:

$$f = \frac{\Delta x'}{y_1/y_0 - y_2/y_0} = \frac{\Delta x}{y_0/y_2 - y_0/y_1}$$

Таблица 3: Линейные размеры предмета и изображений

$y_0, \text{ см}$	2.1	1.4	0.6
$y_1, \text{ см}$	4.5	3.0	1.5
$y_2, \text{ см}$	9.0	6.3	3.1
$f, \text{ см}$	21.4	20.4	24.2
$f', \text{ см}$	21.9	19.9	17.6

## IV. Сборка и изучение подзорной трубы Кеплера

1. В качестве коллиматора возьмем линзу 3.3, окуляра – 3.1, объектива – 3.4.
2. С помощью подзорной трубы установим коллиматорную линзу перед источником, так чтобы он оказался в фокусе.
3. Глядя в окуляр трубы, оценим количество ячеек, которое уместится в поле зрения. Угловой размер ячейки:  $\alpha_0 = 1/4 = 0.25$ .
4. Объектив разместим сразу за коллиматором. Окуляр расположим на расстоянии  $f_{об} + f_{ок}$  от объектива.
5. При наблюдении глазом через окуляр телескопа наблюдаем увеличенное изображение сетки на поверхности источника. Повысим четкость, разместив диафрагму на коллиматоре.
6. Измерим видимый размер изображения ячейки  $\alpha = 1/2 = 0.5$ .

$$\gamma_{\text{эксп}} = \frac{\alpha}{\alpha_0} = 2$$
$$\gamma_{\text{эксп}} = \frac{f_{об}}{f_{ок}} = \frac{29.3}{6.8} \approx 4.3$$

Расхождению теории от эксперимента может быть из-за неточности измерений фокусных расстояний, неточности в сборке телескопа. Неточности в измерении угловых размеров.

7. Измерим увеличение по диаметрам входного и выходного зрачков телескопа.  $D_{об}$  – диаметр светового пятна, падающего на объектив,  $D_{ок}$  – диаметр светового пятна за окуляром.

$$\gamma = \frac{D_{об}}{D_{ок}} = \frac{1.9}{1} = 1.9$$

## V. Сборка и изучение модели микроскопа

1. В качестве объектива используем линзу 3.6, а окуляра – 3.1.

$$\Delta = 4.5 \text{ см};$$

$$\gamma_{\text{экр}} = \frac{L - f_{ок}}{f_{ок}} \cdot \frac{\Delta}{f_{об}} \approx$$

2. Разместим линзы согласно расчетам. Источник разместим вблизи фокуса объектива. Глядя в окуляр и немного смещая предмет, добьемся четкого изображения сетки. Повысим четкость надев диафрагму на объектив.
3. Для измерения увеличения установим за микроскопом экран. Слегка смещая предмет, добьемся четкого изображения на экране. Измерим его линейный размер. Рассчитаем линейное увеличение:

$$\gamma = \frac{y_1}{y_0} = \frac{1.8}{1.4} \approx 1.3$$

## VI. Изучение составной оптической системы

1. Используем линзы 3.5 и 3.6. Разместим их подставками плотно друг к другу и измерим расстояние между ними  $l = 3.5$  см. Оценим фокусное расстояние:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{l}{f_1 f_2}$$

$$f = 4 \text{ см}$$

## 4 Вывод

Были исследованы различные способы нахождения фокусных расстояний линзы. Наиболее эффективным оказался метод с использованием подзорной трубы – все значения совпали в пределах погрешности. Также неплохо показал себя метод Бесселя. Метод Аббе не получился из-за ошибки в выполнении.

Также были собраны телескоп Кеплера и микроскоп и измерены их увеличения.