

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ОТЧЁТ  
О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Изучение центрированных  
оптических систем

Работу выполнил,  
студент ФЭФМ группы Б04-107 \_\_\_\_\_ Луговцов Г.С.

Долгопрудный 2023

## Реферат

Работа направлена на изучение способов измерения параметров центрированных оптических систем. Показаны способы измерения фокусного расстояния, влияния хроматических aberrаций и сферических aberrаций на формирование изображения. Описаны методы измерения этих параметров на примере систем из одной и двух псевдотонких линз методами Аббе и Бесселя. В результате оказалось, что хроматические и сферические aberrации могут вносить существенный вклад в формирование изображения – около 3% и 6% от размера изображения соответственно.

## Содержание

Введение . . . . .	4
1 Методика . . . . .	6
1.1 Экспериментальная установка . . . . .	6
1.2 Центрировка элементов оптической системы . . . . .	6
1.3 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана . . . . .	7
1.3.1 Метод Аббе . . . . .	7
1.3.2 Метод Бесселя . . . . .	7
1.4 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи зрительной трубы . . . . .	8
1.5 Определение фокусного расстояния и положения главных и фокальных плоскостей сложной оптической системы . . . . .	8
1.6 Сферическая аберрация . . . . .	9
1.7 Хроматическая аберрация . . . . .	9
2 Обсуждение результатов . . . . .	10
2.1 Результат измерения фокусного расстояния линзы 1 . . . . .	10
2.2 Результат измерения с фокусного расстояния линзы 1 с помощью зрительной трубы . . . . .	10
2.3 Результат измерения с фокусного расстояния линзы 2 с помощью зрительной трубы . . . . .	10
2.4 Вычисление положения главных фокусов системы . . . . .	10
2.5 Влияние сферической аберрации на формирование изображения . . . . .	10
2.6 Влияние хроматической аберрации на формирование изображения . . . . .	11
2.7 Зависимость аберрации от квадрата диаметра диафрагмы . . . . .	11
Заключение . . . . .	12

## Введение

Зачастую предсказание поведения светового потока в макро масштабе основываясь на принципах лишь волновой оптики является достаточно трудно задачей. Возникает вопрос: можно ли находить траекторию распространения света без использования волновых законов? Мы попытались проверить, можно ли для упрощения модели и описания поведения света обычно использовать теорией геометрической оптики. Эта теория пренебрегает волновыми эффектами и вводит понятие светового луча, траектория движения которого описывается законами геометрической оптики (преломления, отражения) и соответствующими параметрами (фокусным расстоянием, положением главных оптических плоскостей). Оптическими приборами называют системы линз – прозрачных объектов разной формы, чаще всего сферической с обеих сторон. Кроме того, показатель преломления материала, из которого изготовлена линза, должен отличаться от показателя изготовления окружающей среды. Каждая линза вносит свой вклад в изменение траектории светового луча, причём этот вклад определяется исключительно геометрическими параметрами и показателем преломления материала.

Оптические приборы, предназначенные для формирования изображений, в большинстве случаев представляют собой так называемые центрированные оптические системы – однородные преломляющие или отражающие среды, отделённые одна от другой сферическими поверхностями, центры кривизны которых лежат на одной прямой. У таких систем, также как и у отдельно взятых линз, выделяют такие характеристики как фокусное расстояние и главные плоскости, которые описывают систему и позволяют точно узнать ход лучей внутри системы.

Как говорилось выше, в силу приближений геометрической оптики, когда свет представляет собой монохроматичное излучение с длиной волны  $\lambda \rightarrow 0$ , мы пренебрегаем волновыми эффектами света. Поэтому в идеальных оптических системах лучи, вышедшие из одной точки объекта, пересекаются в одной и той же точке изображения независимо от угла испускания и длины волны света. В реальных системах такие зависимости вносят ненулевой вклад, из-за чего ухудшается качество изобра-

ражения. Это различие между идеальным и реальным изображением называется аберрацией – нарушением гомоцентричности пучка. Обычно аберрацию раскладывают на две компоненты – сагиттальную и меридиальную, а потом раскладывают их в бесконечный ряд, выделяя различные члены этого ряда. Практика показывает, что основные погрешности при этом возникают благодаря двум аберрациям – сферической и хроматической. Сферическая аберрация – это влияния неидеальности геометрической формы линзы на реальное изображение, хроматическая – различие коэффициента преломления материала линзы для разных длин волн полихроматического излучения.

Работа направлена на определение фокусного расстояния систем из одной и двух рассеивающих и собирающих линз, а также на вычисление влияния хроматических и сферических аберраций на формирование изображения.

# 1 Методика

## 1.1 Экспериментальная установка

Модель экспериментальная установки, требуемой для этой работы представлена на рис. 1.1. В ходе проведения экспериментов набор линз всё время менялся. Все оптические элементы устанавливались на скамье при помощи рейтеров. Ирисовая диафрагма осветителя позволяла менять величину поля зрения. Яркость поля зрения регулировалась ручкой трансформатора осветителя.

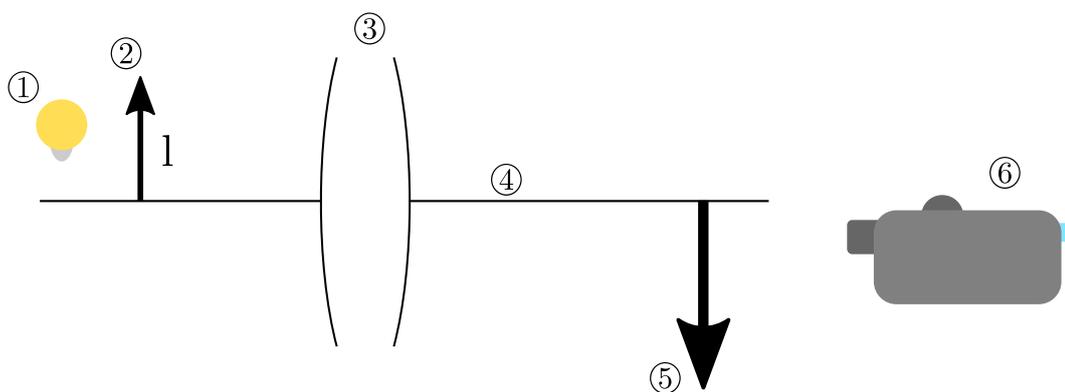


Рисунок 1.1 — Схема экспериментальной установки: 1 – осветитель; 2 – предмет ( $l = 2$  см); 3 – набор линз; 4 – оптическая скамья; 5 – экран; 6 – зрительная труба.

## 1.2 Центрировка элементов оптической системы

Для правильного формирования изображения и уменьшения погрешностей важна правильная центрировка элементов системы. Проходя через плохо отцентрированную систему, лучи света могут отклониться и пройти мимо экрана или глаза наблюдателя.

Для центрировки системы требуется отрегулировать высоту экрана по изображению, а затем последовательно ставить между осветителем и экраном линзы. Регулировка положения линз позволит свести центр изображения и экрана вместе.

### 1.3 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана

Самым простым способом определения фокусного расстояния оптической системы является сравнение размера чёткого изображения с размером источника для разных состояний системы. Инвариантом в системе полученных уравнений как раз будет фокусное расстояние. Этот принцип лежит в основе методов Аббе и Бесселя.

#### 1.3.1 Метод Аббе

Для определения фокусного расстояния тонкой линзы методом Аббе на экране было получено резкое изображение предмета при двух различных положениях осветителя и экрана (рис. 1.2). Тогда фокусное расстояние может быть выражено по формуле

$$f = \frac{\Delta x}{\Delta(y/y')} = -\frac{\Delta x'}{\Delta(y'/y)}. \quad (1.1)$$

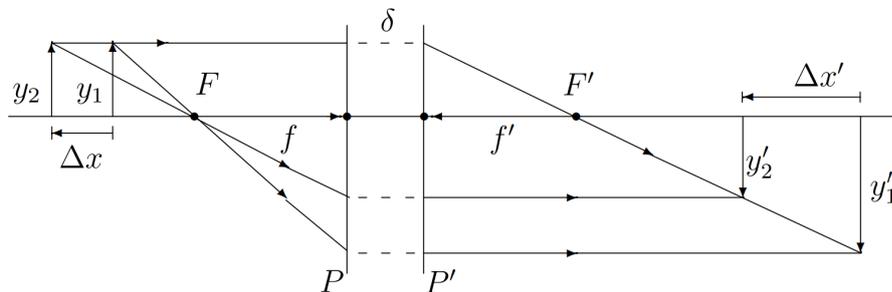


Рисунок 1.2 — Измерение фокусного расстояния по методу Аббе

#### 1.3.2 Метод Бесселя

Напротив, метод Бесселя предполагает передвижение линзы при неподвижном экране и осветителе. Таким образом были получены два разных изображения, измерив размеры которых и воспользовавшись формулой

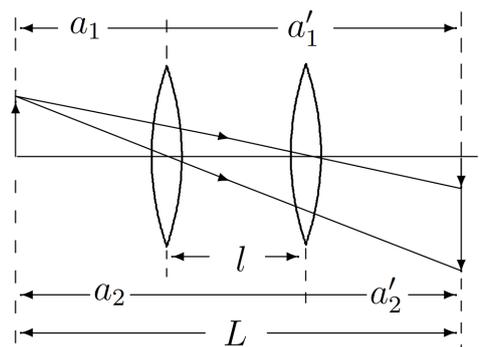


Рисунок 1.3 — Измерение фокусного расстояния по

(1.2) посчитано фокусное расстояние тонкой линзы.

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{L - \delta + a} = \frac{1}{f}, \quad (1.2)$$

где  $\delta = 0$ .

#### 1.4 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи зрительной трубы

Зрительная труба представляет собой оптическую систему с заведомо известными характеристиками и возможностью изменения фокуса от нескольких сантиметров до бесконечности. Как известно, если расположить источник в фокусе линзы, то на выходе получится параллельный поток световых лучей. На этом принципе и основан этот метод.

Для начала необходимо настроить световую трубу на достаточно удалённый объект, то есть на параллельный световой поток. Затем, двигая линзу приблизительно на расстоянии, равном фокусному от источника, получить чёткое изображение предмета. Чтобы понять, можно ли считать линзу тонкой, нужно повернуть её другой стороной и повторить измерения.

#### 1.5 Определение фокусного расстояния и положения главных и фокальных плоскостей сложной оптической системы

Для создания сложной оптической системы в центре оптической скамьи необходимо установить две тонкие линзы на минимальном расстоянии друг от друга и измерить расстояние между ними. Затем, двигая экран и источник, получить чёткое изображение и, воспользовавшись формулами (1.1) и (1.3), найти фокусное расстояние системы.

$$-\frac{1}{f_{2\Sigma}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{|l_{12}|}{f_1 f_2} \quad (1.3)$$

## 1.6 Сферическая aberrация

Для наблюдения хроматической aberrации нужно сначала максимально закрыть диафрагму и получить резкое изображение. Затем, полностью открыв диафрагму, опять получить резкое изображение. Нетрудно заметить, что расстояние до изображения меняется при неизменном расстоянии от линзы до источника.

Чтобы количественно зафиксировать результат, необходимо измерить  $\delta s$ , используя зрительную трубу и изменяя размер кольца диафрагмы.

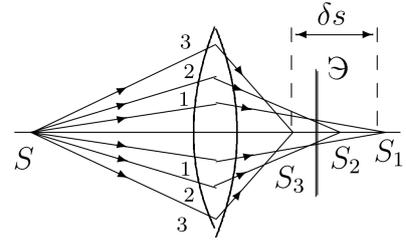


Рисунок 1.4 —  
Сферическая aberrация

## 1.7 Хроматическая aberrация

Используя зрительную трубу и два светофильтра по нониусной шкале можно определить положения линзы, соответствующие резкому изображению предмета. И рассчитать хроматическую aberrацию по формуле

$$\delta f_{\text{xp}} = f_F - f_C$$

и число Аббе  $\nu$  по формуле

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (1.5)$$

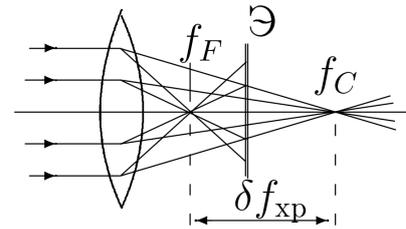


Рисунок 1.5 —  
Хроматическая aberrация (1.4)

## 2 Обсуждение результатов

### 2.1 Результат измерения фокусного расстояния линзы 1

Использование метода Аббе

$$f = 112 \pm 4 \text{ мм.}$$

Метода Бесселя

$$f = 101 \pm 4 \text{ мм.}$$

Метод Аббе показал более близкий к реальному результат ( $F = 110$ ).

### 2.2 Результат измерения с фокусного расстояния линзы 1 с помощью зрительной трубы

$$f_1 = 100 \pm 3 \text{ мм, } f'_1 = 110 \pm 3 \text{ мм,}$$

Так как результат измерения с двух сторон не укладывается в погрешность, линзу 1 *нельзя* считать тонкой.

### 2.3 Результат измерения с фокусного расстояния линзы 2 с помощью зрительной трубы

$$f_1 = 135 \pm 3 \text{ мм, } f'_1 = 138 \pm 3 \text{ мм,}$$

Так как результат измерения с двух разных сторон линзы укладывается в погрешность, линзу 2 *можно* считать тонкой.

### 2.4 Вычисление положения главных фокусов системы

$$F_{1\Sigma} = 38 \pm 3 \text{ мм, } F_{2\Sigma} = 35 \pm 3 \text{ мм.}$$

### 2.5 Влияние сферической аберрации на формирование изображения

$$\delta s(r) = 1.20 \pm 0.22 \text{ мм,}$$

составляет 6% от размера источника.

## 2.6 Влияние хроматической aberrации на формирование изображения

$$\delta f_{\text{хр}} = 0.58 \pm 0.14 \text{ мм},$$

составляет 2.9% от размера источника, что более чем в два раза меньше, чем влияние сферической aberrации.

## 2.7 Зависимость aberrации от квадрата диаметра диафрагмы

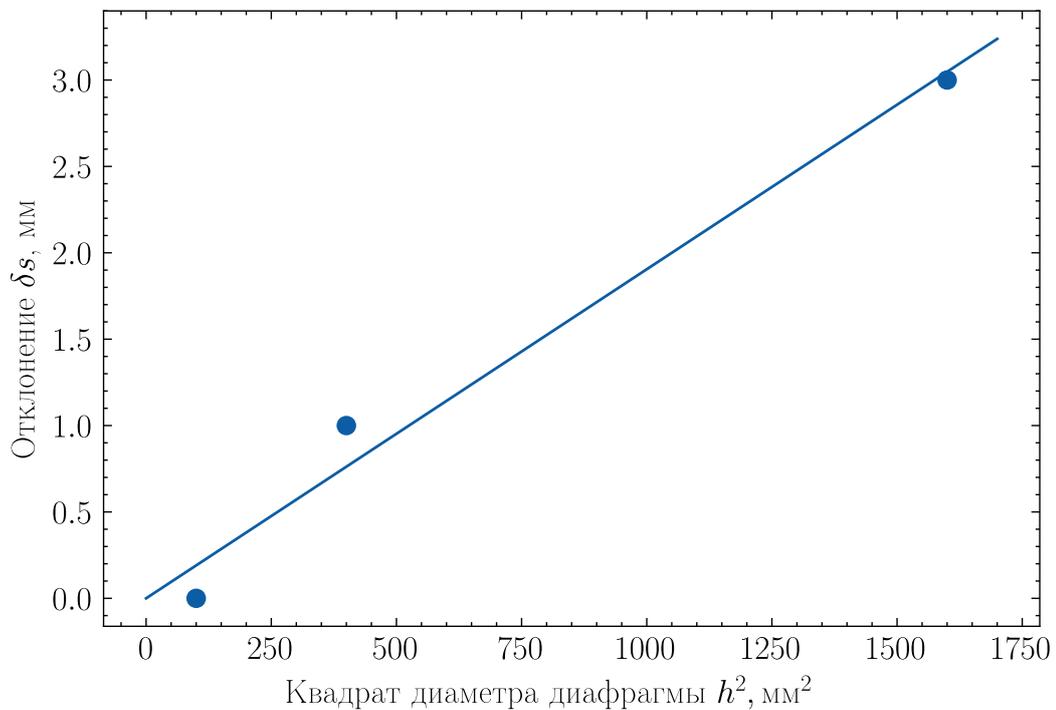


Рисунок 2.1 — Зависимость aberrации от квадрата диаметра диафрагмы

На графике (рис. 2.1) видна линейная зависимость отклонения от квадрата диаметра диафрагмы.

## Заключение

Метод Аббе и метод Бесселя дали разный результат, причём метод Аббе оказался более точным для измерения фокусного расстояния оптической системы. Это может быть связано с не точным измерением расстояний от линзы до изображения, так как на штативе с линзой не было указано положение главных оптических плоскостей.

Линзу 1 нельзя считать тонкой, а линзу 2 – можно. Это связано с тем, что первая линза имеет большие поперечные размеры, чем вторая.

Влияние хроматической аберрации оптической системы на формирование изображения равно 3%, сферической – 6%, то есть в два раза больше. Это связано с неидеальностью используемых в системе линз. Зависимость сферической аберрации от квадрата диафрагмы оказалась линейной, как и утверждала теория.

Методы геометрической оптики позволяют описать поведение света не прибегая к волновой теории. Это доказывает состоятельность теории.