

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 9

Измерение главных
фокусных расстояний
тонких линз.

Недостатки линз

Ярославль
2010

Оглавление

1.	Вопросы для подготовки к работе	3
2.	Теоретическое введение	3
3.	Описание установки	8
4.	Порядок выполнения работы	9
	Задание 1.	9
	Задание 2.	9
	Задание 3.	10
	Задание 4.	12
	Задание 5.	13
5.	Контрольные вопросы	14

Лабораторная работа № 9

Измерение главных фокусных расстояний тонких линз. Недостатки линз

Цель работы: экспериментальное определение фокусных расстояний выпуклой и вогнутой линз. Оценка аберраций линз.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, электрический фонарь с набором транспарантов, две тонкие линзы (выпуклая и вогнутая), набор диафрагм для выпуклой линзы, короткофокусная толстая линза, набор светофильтров, белый экран.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1982. – Т. 2.

1. Вопросы для подготовки к работе

1. Что такое линза? Какие линзы называются тонкими?
2. Какая точка называется главным фокусом линзы?
3. Формула тонкой линзы.
4. Построить изображение в собирающей линзе (предмет за фокусом, перед фокусом, за двойным фокусом).
5. Построить изображение в рассеивающей линзе (предмет перед фокусом, за фокусом).
6. Методика измерения фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз.
7. Недостатки линз.

2. Теоретическое введение

Линзой в оптике называется прозрачное тело, ограниченное двумя правильными, обычно сферическими или цилиндрическими поверхностями.

Если расстоянием между вершинами ограничивающих поверхностей пренебречь нельзя, линзу называют толстой. Линза с пренебрежимо малым расстоянием между вершинами называется тонкой. В этой работе речь пойдет преимущественно о тонких линзах.

Линзы могут собирать и рассеивать лучи. К собирающим линзам относятся, например, двояковыпуклые линзы, к рассеивающим — двояковогнутые (для линз, показатель преломления материала которых больше, чем показатель преломления окружающей среды).

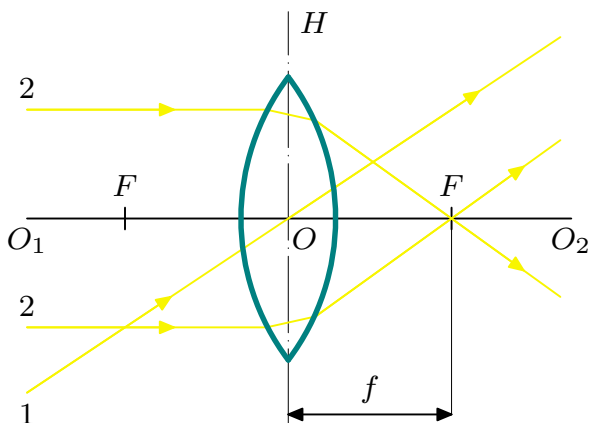


Рис. 2.1

На рис. 2.1 изображена собирающая линза. Прямая O_1O_2 , проходящая через вершины сферических поверхностей, называется главной оптической осью. Точка O называется оптическим центром, а плоскость H — главной плоскостью линзы. Луч света 1, проходящий через оптический центр, линзой не преломляется. Лучи 2, параллельные главной оптической оси, преломляясь в линзе, пересекаются в точке F , лежащей на этой оси и называемой главным фокусом линзы. Расстояние f от оптического центра до главного фокуса называется главным фокусным расстоянием.

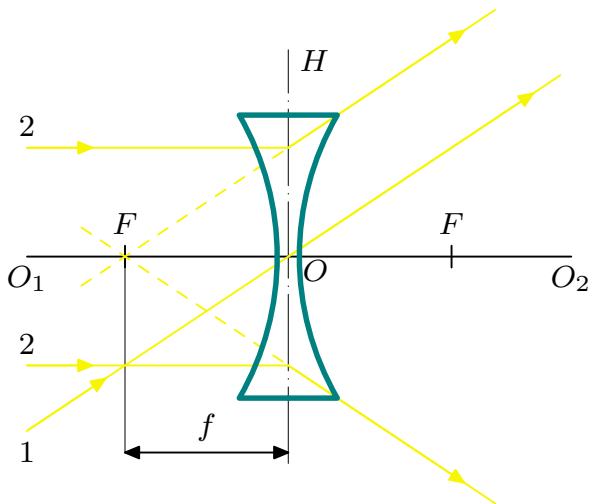


Рис. 2.2

На рис. 2.1 изображена собирающая линза. Прямая O_1O_2 , проходящая через вершины сферических поверхностей, называется главной оптической осью. Точка O называется оптическим центром, а плоскость H — главной плоскостью линзы.

Луч света 1, проходящий через оптический центр, линзой не преломляется. Лучи 2, параллельные главной оптической оси, преломляясь в линзе, пересекаются в точке F , лежащей на этой оси и называемой главным фокусом линзы. Расстояние f от оптического центра до главного фокуса называется главным фокусным расстоянием.

На рис. 2.2 изображена рассеивающая линза. Обозначения те же, что и на рис. 2.1. Фокус у рассеивающей линзы мнимый: в точке фокуса пересекаются не сами лучи, а их воображаемые продолжения.

При построении изображения в тонкой линзе соотношение между расстоянием от предмета до главной плоскости линзы — a , от этой плоскости до изображения — b и главным фокусным расстоянием — f имеет вид:

ным расстоянием — f имеет вид:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (2.1)$$

Это выражение носит название формулы тонкой линзы. Записанное в таком виде, оно предполагает применение следующего правила знаков:

- f — положительно для собирающей линзы и отрицательно для рассеивающей;
- $a > 0, b > 0$ — для действительных предмета и изображения;
- $a < 0, b < 0$ — для мнимых предмета и изображения.

В этом случае из формулы (2.1) следует для собирающей линзы:

$$f = \frac{ab}{a + b}; \quad (2.2)$$

для рассеивающей линзы

$$f = \frac{ab}{a - b}. \quad (2.3)$$

Оптическая сила D и фокусное расстояние f линзы зависят от радиусов кривизны R_1 и R_2 поверхностей, ограничивающих линзу, а также от показателя преломления n_2 материала линзы и n_1 окружающей среды:

$$D = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.4)$$

Линза дает стигматическое или точечное изображение (т.е. любая точка предмета изображается точкой, поэтому нет искажений), если:

- линза тонкая;
- лучи параксиальные (близкие к оптической оси);
- свет монохроматический.

Примечание. Существует и другое правило знаков: a и b считаются положительными, если отложены по ходу луча, и отрицательными, если отложены против хода луча. Такое же правило имеет место и для радиусов кривизны линзы. С учетом изложенного, формула линзы примет вид:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

В реальных линзах наблюдаются специфические искажения изображения (абберации). Это хроматическая и геометрические aberrации, астигматизм, дисторсия, кома и др.

Хроматическая aberrация — это неодинаковая фокусировка лучей, характеризующих волны разной длины (рис. 2.3). Хроматическая aberrация есть проявление дисперсионных свойств материала линзы. В результате изображение, полученное от источника, испускающего белый свет, размыто и окрашено по краям.

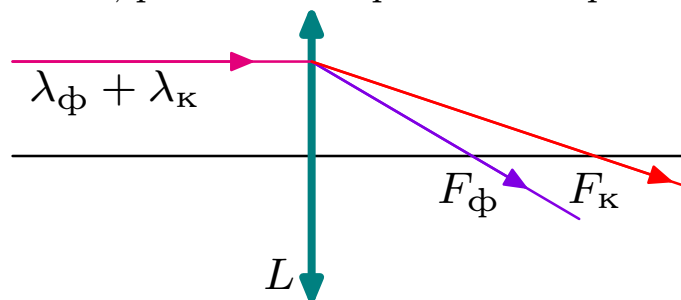


Рис. 2.3

Дадим краткую характеристику основных видов геометрических aberrаций.

Сферическая aberrация — это неодинаковая фокусировка лучей различными участками линзы (рис. 2.4). Сферическая aberrация есть следствие сферичности поверхности раздела двух сред (поверхности линзы), а также отсутствия параксиальности реальных световых пучков. Лучи, проходящие ближе к краю линзы, фокусируются ближе к линзе (точка F_1), чем лучи, проходящие около оптической оси (точка F_2). Сферическая aberrация приводит к тому, что на экране вместо точечного изображения получается размытое пятно (кружок рассеяния).

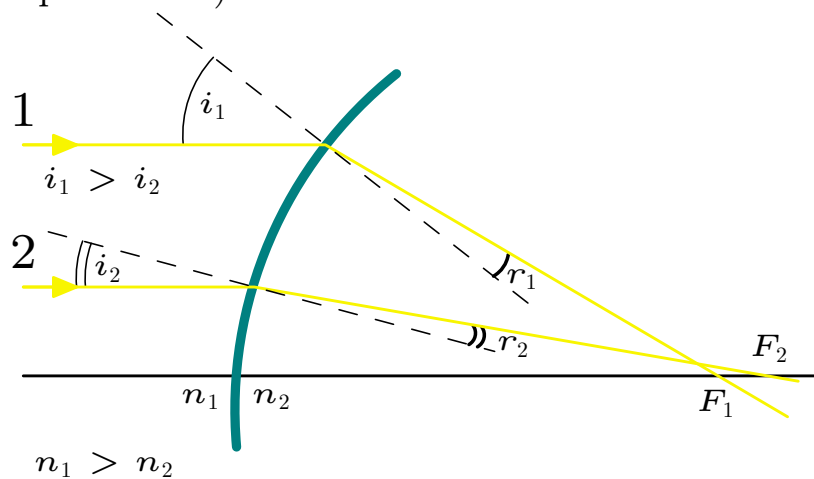


Рис. 2.4

2. Теоретическое введение

Астигматизм — это потеря световым пучком гомоцентричности. (Гомоцентричным называется пучок лучей, исходящих из единого центра.) Если узкий пучок лучей, выходящий из одной точки, падает на линзу под значительным углом, то в результате прохождения через линзу он перестает быть гомоцентричным. Изображение точки в этом случае получается не стигматическим, а в виде двух, пространственно разделенных фокальных линий (рис. 2.5).

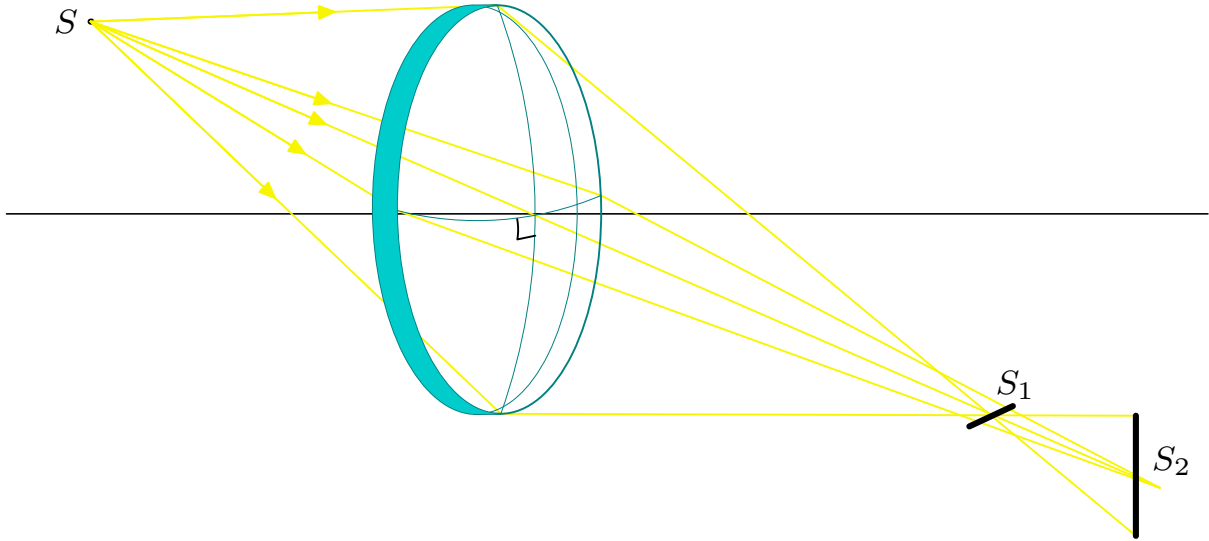


Рис. 2.5

На практике астигматизм приводит к неодинаковой фокусировке вертикальных и горизонтальных линий, если линза расположена под углом к оптической оси.

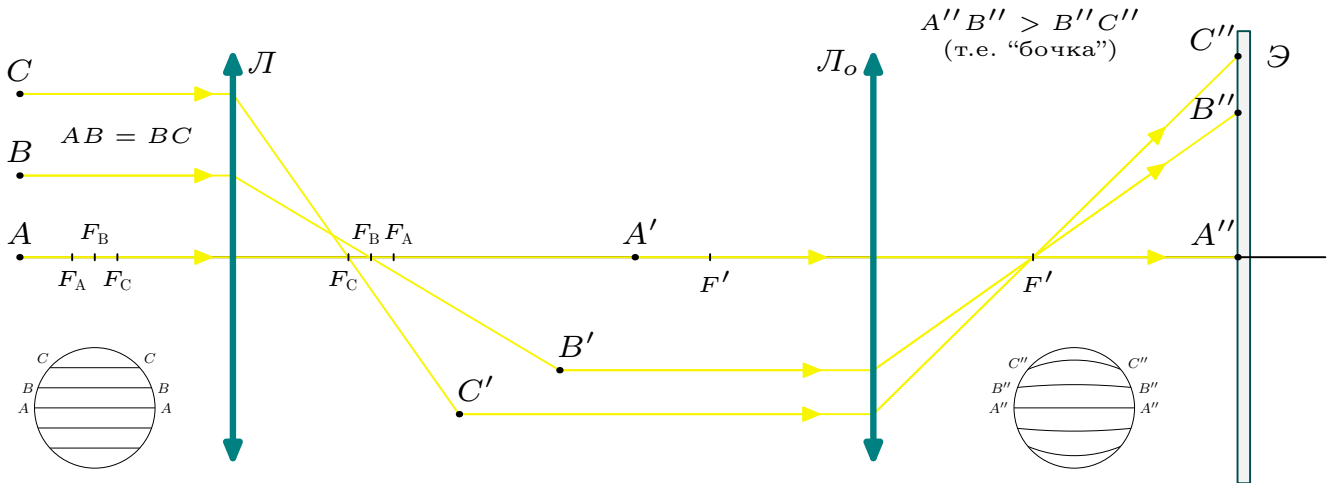


Рис. 2.6

Дисторсия есть искажение геометрической формы изображения протяженного предмета. Оно возникает из-за неравномерности увеличения, даваемом центром линзы и ее краями. Дисторсия проявляется только при работе с внеосевыми пучками, падающими на линзу под разными углами. В этом случае увеличение линзы зависит от угла падения лучей на нее.

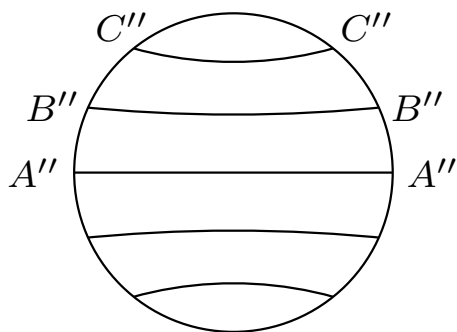


Рис. 2.7

На рис. 2.6 изображена одна из схем наблюдения дисторсии, когда объект (три точки, лежащие на прямой так, что $AB = BC$ и являющиеся сечением линий AA , BB , CC) находится за фокусом F линзы L . Линза L_o моделирует глазной хрусталик, а экран \mathcal{E} — сетчатку глаза, если представить, что через линзу L рассматривается плоский объект с параллельными линиями.

Если объект будет находиться между фокусом F и линзой L , то возникнут искажения типа “одушки” (рис. 2.7), в отличие от “бочки” на рис. 2.6.

Таким образом, внешним проявлением дисторсии является искривление изображения прямых линий, скрещивающихся с оптической осью линзы.

3. Описание установки

Установка для определения главных фокусных расстояний тонких собирающих и рассеивающих линз в данной работе (рис. 3.1) состоит из оптической скамьи с делениями, на которой справа установлен электрический фонарь Φ , в передней части которого имеется обойма для помещения фигурных диафрагм (транспарантов) и светофильтров.

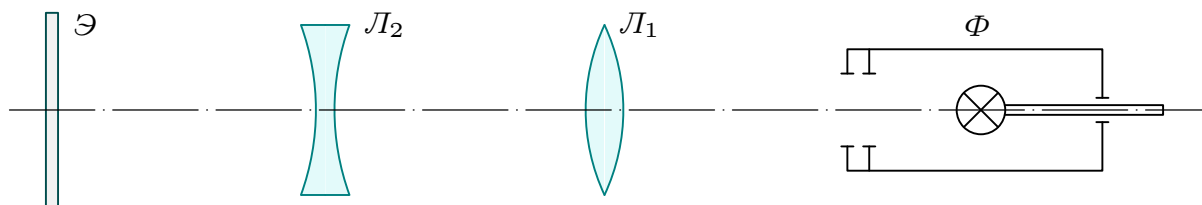


Рис. 3.1

4. Порядок выполнения работы

Транспарант (чаще всего “стрелка”) является тем предметом, изображение которого формируется линзами на белом экране Э, помещенном на левом конце скамьи. Экран закреплен на рейтере и может перемещаться вдоль скамьи. Выпуклая L_1 , и вогнутая L_2 линзы также могут перемещаться на рейтерах между экраном и фонарем.

Для изучения недостатков линз в набор входят круглая и кольцевая диафрагмы, а также специальная линза для наблюдения дистосии. Иногда эту же линзу удобно использовать для наблюдения астигматизма.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.

Задание 2. Определение фокусного расстояния выпуклой линзы по расстояниям от предмета и его изображения до линзы.

Поместите экран на достаточно большом расстоянии от предмета (стрелки), поставьте между ними линзу и передвигайте ее в ту или другую сторону до тех пор, пока на экране не получится отчетливое изображение стрелки (рис. 4.1).

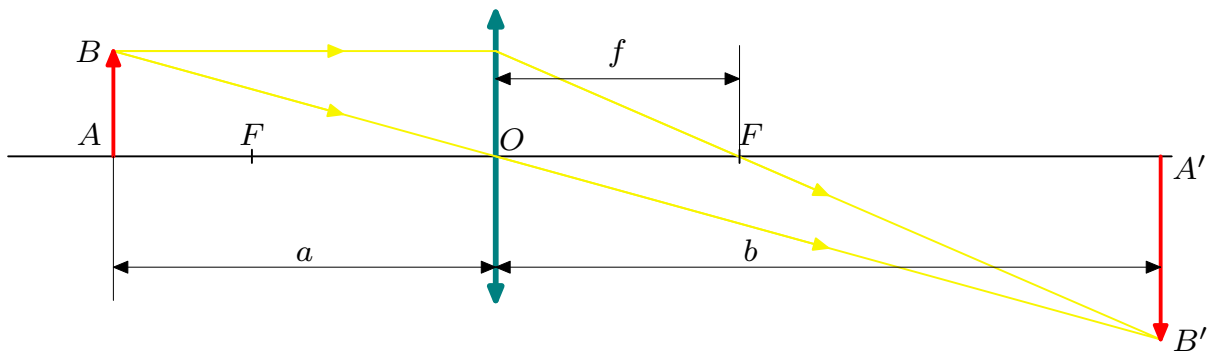


Рис. 4.1

Отсчитайте расстояние от предмета до линзы — a и от линзы до изображения — b по масштабу скамьи и по формуле (2.2) вычислите фокусное расстояние линзы. Эксперимент проведите не менее трех раз и результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

n	a_i	b_i	f_i	Δf_i	$(\Delta f_i)^2$
1					
2					
и т.д.					
X	X	X	$f_{\text{ср.}}$	X	Σ

Ошибку вычислите по формуле

$$\Delta f = t_{\alpha n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta f_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{\alpha n}$ — коэффициент Стьюдента.

Окончательно результат запишите в виде $f = (f_{\text{ср}} \pm \Delta f)$ см, при $\alpha = \dots$

Задание 3. Определение фокусного расстояния выпуклой линзы по величине перемещения линзы.

Способ определения фокусного расстояния, предложенный в задании 2, имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что не всегда четко определено положение оптического центра линзы, а следовательно, в определении расстояний a и b может появиться не учтенная систематическая ошибка. Для более точного определения фокусного расстояния используют метод перемещения линзы.

Если расстояние A от предмета до изображения более $4f$, то всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получается отчетливое изображение предмета: в одном случае — уменьшенное, а в другом — увеличенное (рис. 4.2).

Пусть X — расстояние от предмета до первого положения линзы, ℓ — расстояние между первым и вторым положением линзы. Имея в виду, что $A > 4f$, можно записать по формуле линзы:

$$\text{для положения 1: } f = \frac{(A-x)x}{A}; \quad (4.5)$$

$$\text{для положения 2: } f = \frac{(A-\ell-x)(x+\ell)}{A}. \quad (4.6)$$

4. Порядок выполнения работы

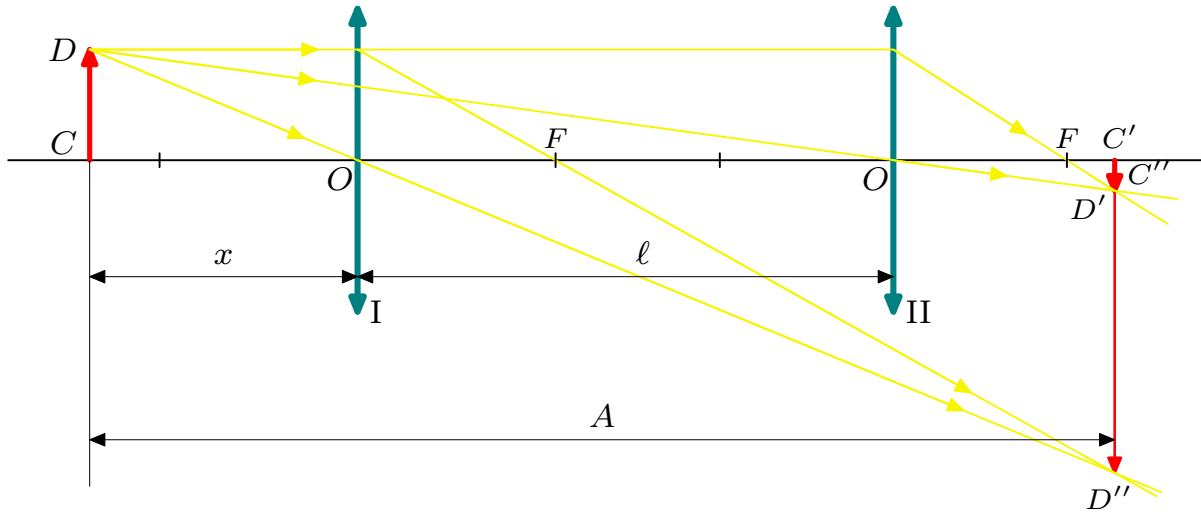


Рис. 4.2

Приравняв правые части, получим

$$x = \frac{A - \ell}{2}.$$

Подставив это значение в (4.5) или (4.6), окончательно получим

$$f = \frac{A^2 - \ell^2}{4A}. \quad (4.7)$$

Практически измерения сводятся к следующему: установите предмет и экран на расстоянии $A > 4f$ (возьмите f из задания 2), добейтесь получения на экране отчетливого изображения, например увеличенного. Заметив это положение линзы, передвиньте ее в сторону экрана и получите уменьшенное изображение. Теперь определите расстояние ℓ между первым и вторым положением линзы. Опыт проделайте не менее трех раз, при этом расстояние A остается постоянным. Результаты запишите в таблицу 2.

Таблица 2

n	A_i	ℓ_i	f_i	Δf_i	$(\Delta f_i)^2$
1					
2					
и т.д.					
X	X	X	$f_{\text{ср.}}$	X	Σ

Ошибку вычислите так же, как в задании 2. Результат запишите в виде $f = (f_{\text{ср}} \pm \Delta f)$ см, при $\alpha = \dots$

Задание 4. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

Рассеивающая линза не дает действительного изображения на экране, поэтому ее исследуют при помощи собирающей линзы (рис. 4.3).

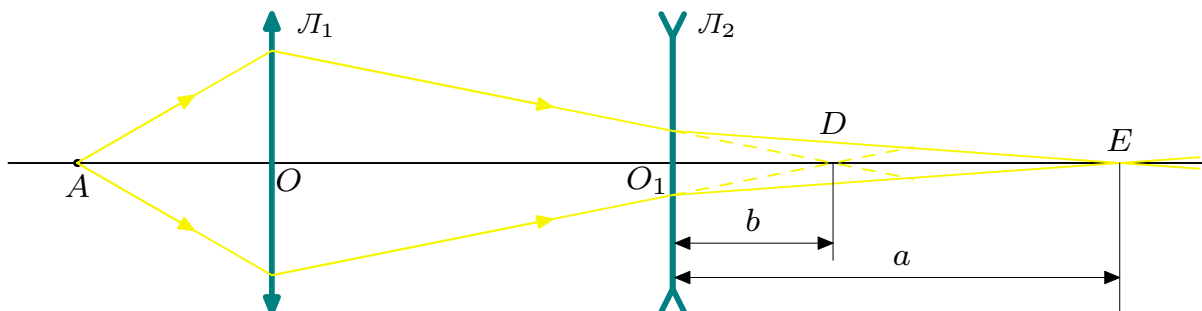


Рис. 4.3

Если на пути лучей, выходящих из точки A и сходящихся в точке D после преломления в собирающей линзе, поставить рассеивающую линзу L_2 , то действительный фокус удалится от линзы L_1 . Пусть изображение точки A переместится при этом из точки D в точку E . Вследствие принципа обратимости лучей, можно рассмотреть лучи света как распространяющиеся из точки E . Тогда точка D будет мнимым изображением точки E после преломления лучей рассеивающей линзой L_2 . Таким образом, расстояние O_1E будет являться расстоянием a от предмета до линзы, а расстояние O_1D — расстоянием b от линзы до изображения.

Эти расстояния удобно определять следующим образом. Между собирающей линзой и экраном поставьте рассеивающую линзу, и, перемещая обе линзы (а при необходимости и экран), получите изображение стрелки. Измерьте расстояние a от экрана до рассеивающей линзы. Затем заметьте положение рассеивающей линзы (точка O_1) и уберите ее. Экран передвиньте в сторону собирающей линзы и снова получите резкое изображение стрелки. Измерьте расстояние b от экрана до замеченной точки O_1 . Опыт повторите не менее трех раз при неизменном положении собирающей линзы. Результат занесите в таблицу 3. Ошибку рассчитайте так же, как в заданиях 2 и 3.

4. Порядок выполнения работы

Таблица 3

n	a_i	b_i	f_i	Δf_i	$(\Delta f_i)^2$
1					
2					
и т.д.					
X	X	X	$f_{\text{ср.}}$	X	Σ

Окончательный результат запишите в виде $f = (f_{\text{ср}} \pm \Delta f)$ см, при $\alpha = \dots$

Задание 5. Исследование недостатков линз.

а) Для определения **хроматической аберрации** собирающей линзы измерьте ее фокусные расстояния (как в задании 2) для красных и фиолетовых лучей (т.е. для граничных лучей видимого спектра, полагая, что в этом диапазоне величина хроматической аберрации есть монотонная функция от длины волны). Разность этих фокусных расстояний может служить мерой хроматической аберрации.

Светофильтры вставляйте в обойму в передней части осветителя. Фокусные расстояния измерьте не менее трех раз при неизменном положении осветителя и экрана (передвигается линза) или при неизменном положении осветителя и линзы (передвигается экран). Результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4

n	λ	a_i	b_i	$f_i + \frac{a_i b_i}{a_i + b_i}$	$S_i = f_{\text{к}} + f_{\text{ф}}$	ΔS_i	$(\Delta S_i)^2$
1	$\lambda_{\text{к}}$						
	$\lambda_{\text{ф}}$						
2	$\lambda_{\text{к}}$						
	$\lambda_{\text{ф}}$						
3	$\lambda_{\text{к}}$						
	$\lambda_{\text{ф}}$						
X	X	X	X	X	$S_{\text{ср.}}$	X	Σ

Ошибку рассчитайте так же, как в предыдущих заданиях.
Окончательный результат запишите в виде

$$S = (S_{\text{ср}} \pm \Delta S) \text{ см, при } \alpha = \dots$$

б) Наблюдение **сферической аберрации** проведите с красным светофильтром. Сначала откройте кольцевой диафрагмой периферическую часть линзы и определите ее фокусное расстояние по методике задания 2. Затем откройте круглой диафрагмой центральную часть линзы и аналогично определите фокусное расстояние. Разность этих фокусных расстояний может служить мерой сферической аберрации. Измерения сделайте не менее трех раз и результаты занесите в таблицу 5, которая по форме аналогична таблице 4, с той лишь разницей, что $\lambda_{\text{кр}}$ следует заменить на “кольцевая диафрагма”, а $\lambda_{\text{ср}}$ — на “круглая диафрагма”. Обработку данных проведите аналогично.

в) Явление **астигматизма** пронаблюдайте чисто качественно, повернув линзу вокруг вертикальной оси на произвольный угол и используя в качестве предмета крестообразную щель.

г) На качественном уровне пронаблюдайте **дисторсию**. Для этого поместите в обойму для светофильтров стекло с нарисованной сеткой. Рассматривая глазом эту сетку через собирающую линзу, получите ее бочкообразное и подушкообразное изображения. Зарисуйте полученные изображения.

5. Контрольные вопросы

1. Выведите формулу тонкой линзы и формулу (4.7).
2. Какую величину называют оптической силой линзы? От чего она зависит?
3. Может ли двояковыпуклая линза быть рассеивающей?
4. Как определить ход луча, падающего на линзу под произвольным углом?
5. Задав фокусы линз, постройте изображение точки A (рис. 4.3). Всегда ли в такой системе линз получится действительное изображение?
6. Почему мы считаем точку D изображением точки E в рассеивающей линзе? (Рис. 4.3) Что можно назвать мнимым изображением?

5. Контрольные вопросы

7. Как изменится изображение предмета, если закрыть половину линзы?
8. Какой из примененных в работе методов измерения фокусного расстояния собирающей линзы более точен?
9. От чего зависит точность результатов в каждом задании?