

## 1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ (ЛУЧЕВАЯ) ОПТИКА.

Основные теоретические положения, законы, особенности экспериментальных методов геометрической оптики подробно изложены в учебниках [1 – 5]. В данном разделе настоящего учебного пособия кратко приводятся общие теоретические сведения и методические описания лабораторных работ по геометрической оптике физического практикума кафедры физики СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

### 1.1. ЛИНЗЫ. ХОД ЛУЧЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗАХ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Оптической *линзой* называется центрированная оптическая система (оптически прозрачное тело), ограниченная с двух сторон поверхностями [1 – 5]. Ограничивающие линзу поверхности могут быть сферическими, цилиндрическими, в общем случае с разными радиусами кривизны. Кроме того, одна из поверхностей может быть плоской. Далее будут рассматриваться только линзы с двумя сферическими поверхностями ( $S_1$  и  $S_2$ ), радиусы кривизны которых  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 1.1).

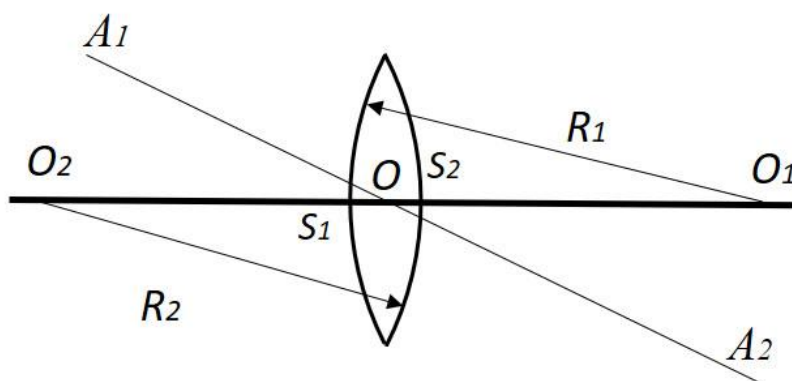


Рис. 1.1. Двояковыпуклая линза

*Главной оптической осью* линзы называют прямую, проходящую через центры кривизны обеих сферических поверхностей линзы (точки  $O_1$  и  $O_2$  на рис. 1.1) и ее *оптический центр* (точка  $O$ ). Другие оси, проходящие через оптический центр линзы (например, ось  $A_1A_2$ ), являются *побочными*. Оптический центр линзы обладает тем свойством, что лучи, проходящие через него, не преломляются.

Линза называется *тонкой*, если расстояние между ее преломляющими поверхностями мало по сравнению с расстояниями до объекта и до его изображения [2], или если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей ( $R_1$  и  $R_2$  на рис. 1.1) [1].

Одно из определений *фокуса* собирающей линзы [1] - место схождения лучей параллельных оптической оси после их преломления в линзе. В рассеивающей линзе рассматривается место схождения продолжений лучей после их преломления в линзе. Различают *главный* и *побочные* фокусы линзы. В первом случае рассматриваются падающие на линзу лучи, параллельные главной оптической оси, во втором – лучи, параллельные какой-либо побочной оптической оси. Главный и побочные фокусы линзы располагаются в *фокальной плоскости* линзы, которая перпендикулярна главной оптической оси.

*Фокусным расстоянием*  $F$  тонкой линзы называют расстояние между оптическим центром линзы и ее главным фокусом. Для используемых в данном лабораторном практикуме тонких линз выполняется следующее соотношение [1 – 4]:

$$D = \frac{1}{F} = \left( \frac{n_{\text{л}}}{n_0} - 1 \right) \left( \pm \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $D$  - *оптическая сила* линзы,  $n_{\text{л}}$  - показатель преломления материала линзы,  $n_0$  - показатель преломления среды, в которой находится линза,  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны сферических поверхностей линзы. Эта общая формула линзы справедлива как для выпуклых, так и для вогнутых линз при любом расположении источника света и соответствующем расположении фокуса. При  $(n_{\text{л}}/n_0) > 1$  в зависимости от знака и значений  $R_1$  и  $R_2$  фокусное расстояние и оптическая сила линзы могут быть как положительными, так и отрицательными величинами. Соответственно, фокус может быть действительным или мнимым. Если фокусы действительны и оптическая сила положительна, т.е. параллельные лучи после преломления в линзе сходятся, то линза называется собирающей или положительной. При мнимых фокусах и отрицательном значении оптической силы, когда лучи после преломления в линзе становятся расходящимися, то такие линзы называются рассеивающими или отрицательными.

Для центрированной оптической системы, в нашем случае – тонкой линзы, ограниченной двумя сферическими поверхностями, формулу тонкой линзы можно выразить через простое соотношение между фокусным расстоянием  $F$  линзы, расстоянием  $d$  от линзы до предмета и расстоянием  $f$  от линзы до изображения предмета (рис.1.2, а для собирающей линзы):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

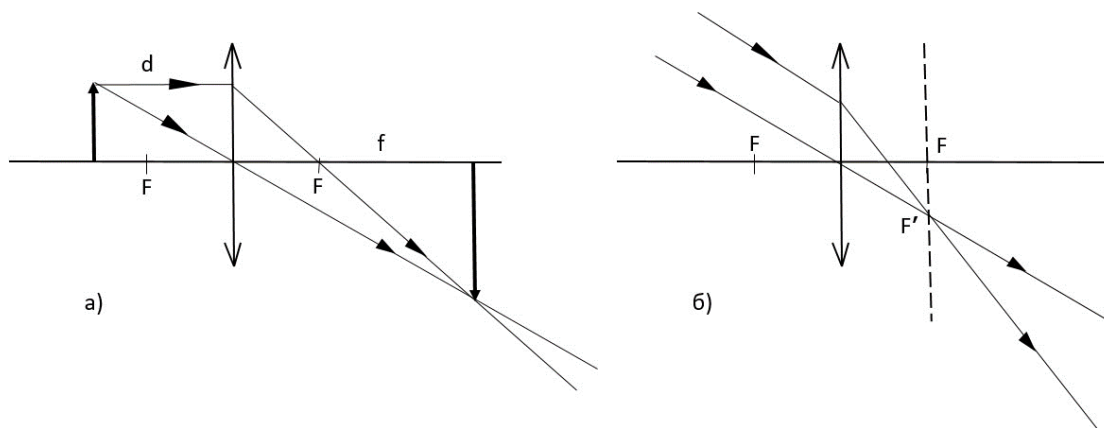


Рис. 1.2. Построение изображения предмета (а) и хода лучей (б) в собирающей линзе

Величины  $d$ ,  $f$ ,  $F$ , входящие в формулу тонкой линзы, могут быть как положительными, так и отрицательными. Если линза собирающая, то ее фокус действительный, и перед членом  $1/F$  ставится знак "плюс", если линза рассеивающая, то фокус мнимый и перед членом  $1/F$  должен стоять знак "минус". Перед слагаемым  $1/f$  ставится знак "плюс", если изображение действительное, и знак "минус" в случае мнимого изображения. Наконец, перед слагаемым  $1/d$  ставят знак "плюс" в случае действительного источника, и "минус", если источник мнимый (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

При построении изображений в собирающих линзах достаточно взять по два луча от каждой точки предмета и найти точку пересечения этих лучей после преломления в линзе. Удобно использовать следующие лучи (рис. 1.2):

- 1) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси и проходящий после преломления через главный фокус линзы,
- 2) луч, падающий на линзу параллельно побочной оптической оси и проходящий после преломления через точку пересечения этой оси с фокальной плоскостью (побочный фокус линзы  $F'$ ) (рис. 1.2, б),
- 3) луч, проходящий через оптический центр линзы без преломления,
- 4) луч, проходящий через главный фокус линзы и идущий после преломления параллельно главной оптической оси.

Аналогичные построения, только с использованием продолжений лучей после преломления, применяются при построении изображений в рассеивающих линзах.

Для решения сложных оптических задач применяют оптические системы, состоящие из нескольких линз, например телеобъективы, микроскопы и т. п. Построение хода лучей и расчет параметров таких систем

более сложен, чем для отдельных линз, но и в этом случае для отдельных оптических компонентов (линз) системы можно использовать приведенные выше формулы и указания.

### Лабораторная работа 1.1

#### ИЗМЕРЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ЛИНЗ

Макет и первое описание данной лабораторной работы были разработаны на кафедре физики ЛЭТИ [6].

**Цель работы:** измерение фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз исходя из результатов находжений расстояний от исследуемых линз до предмета и его изображения.

**Приборы и принадлежности:** экспериментальная установка (рис. 1.3) состоит из оптической скамьи с измерительной миллиметровой шкалой, источника света, экрана, собирающей и рассеивающей линз, закрепленных на перемещаемых вдоль скамьи держателях (рейтерах).



Рис. 1.3. Экспериментальная установка по измерению фокусных расстояний линз

Источник света, линзы и экран должны быть установлены так, чтобы их центры находились на одной высоте, а оптические оси линз были параллельны оптической скамье. Предметом служит изображение стрелки на стекле окна в металлическом кожухе лампы.

#### Исследуемые закономерности. Методика эксперимента

Экспериментальное измерение (косвенное) фокусного расстояния *собирающей линзы* может быть проведено различными способами. Наиболее простой из них заключается в получении с помощью исследуемой линзы действительного изображения удаленного предмета на экране. Предполагая,

что лучи от удаленного светящегося предмета падают на линзу параллельным пучком, можно принять расстояние между собирающей линзой и изображением светящегося предмета равным фокусному расстоянию линзы. Погрешность измерений будет тем меньше, чем дальше от линзы будет находиться предмет.

Для измерения фокусных расстояний собирающих линз в данной работе применяют следующие способы:

1) измерение фокусного расстояния линзы посредством нахождения расстояний от линзы до предмета и от его изображения до линзы;

2) измерение фокусного расстояния линзы путем перемещения линзы из положения, при котором на экране получается увеличенное изображение предмета (рис. 1.4, а), в положение, при котором на экране получается уменьшенное изображение предмета (рис. 1.4, б), при неизменном расстоянии между предметом и его изображением (метод Бесселя).

В этом методе, если предмет поставить на расстоянии  $d_1$  от собирающей линзы, то линза дает действительное увеличенное изображение предмета на расстоянии  $f_1$  от нее (рис. 1.4, а). А если предмет поставить на расстоянии  $d_2 = f_1$  от собирающей линзы, то линза согласно формуле (1.1) даст действительное уменьшенное изображение на расстоянии  $f_2 = d_1$  от нее (рис. 1.4, б). Поэтому при одном и том же расстоянии  $L$  между светящимся объектом и экраном (при условии, что  $L > 4F_1$ ) должны существовать два положения линзы, при которых на экране будут получаться резкие изображения предмета (увеличенное и уменьшенное). Расстояние между этими двумя положениями линзы  $l = f_1 - d_1$ . Расстояние между предметом и экраном  $L = f_1 + d_1$ . Из этих соотношений следует, что  $d_1 = (L - l)/2$ ;  $f_1 = (L + l)/2$ , откуда, принимая во внимание формулу (1.1), получим

$$F_1 = (L^2 - l^2) / 4L. \quad (1.2)$$

Метод Бесселя более точен в отличие от других способов измерения фокусного расстояния и применим как для тонких, так и для толстых линз, поскольку не требует знания положения оптического центра линзы.

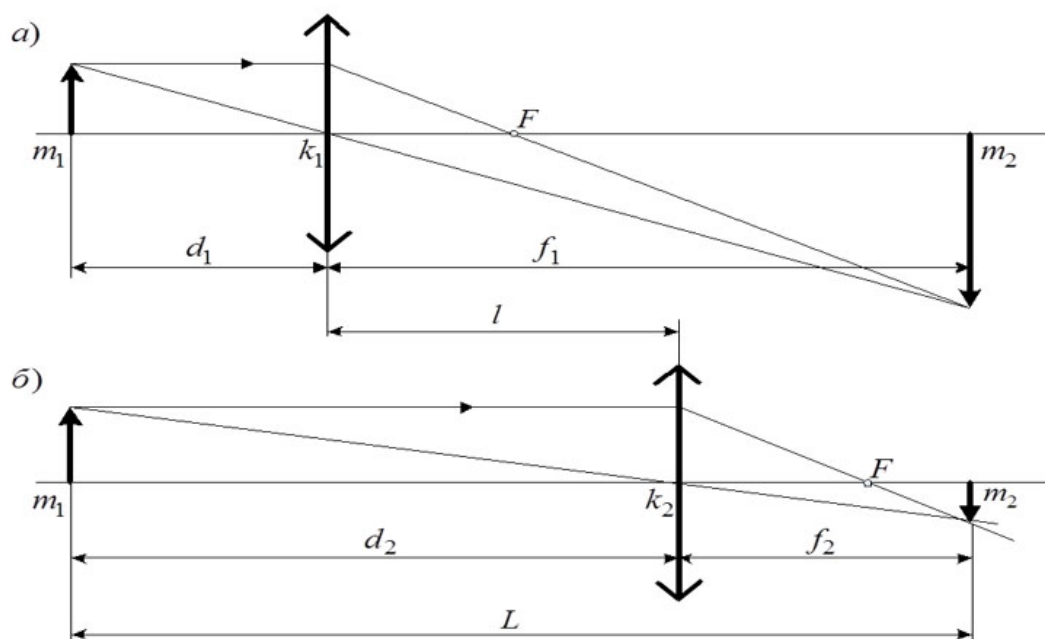


Рис. 1.4. Нахождение фокусного расстояния собирающей линзы

Рассеивающая линза не дает действительного изображения предмета на экране, поэтому для измерения фокусного расстояния такой линзы используют оптическую систему, составленную из двух линз: исследуемой – рассеивающей, и вспомогательной – собирающей (рис.1.5, б).

Из рис. 1.5 видно, что для рассеивающей линзы изображение  $S_1$ , создаваемое собирающей линзой, оказывается за рассеивающей линзой, и его можно для рассеивающей линзы считать «мнимым предметом», а изображение, создаваемое системой линз,  $S_2$  – действительным изображением. Следовательно, расстояние между рассеивающей линзой и изображением  $S_1$  можно положить равным  $d_2 = m_3 - k_4$ , а расстояние между рассеивающей линзой и изображением  $S_2$  равным  $f_2 = m_4 - k_4$ . Изображение  $S_2$  соответствует второму положению экрана.

Тогда фокусное расстояние рассеивающей линзы  $F_2$  можно найти по формуле:

$$F_2 = d_2 f_2 / (f_2 - d_2) \quad (1.3)$$

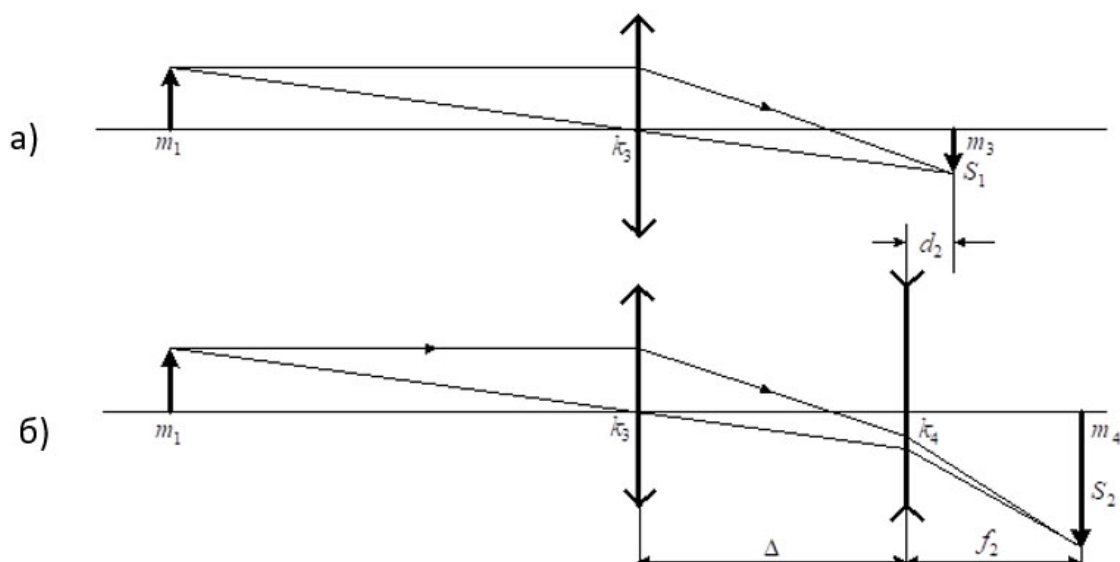


Рис. 1.5. Нахождение фокусного расстояния рассеивающей линзы

### Задание для подготовки к лабораторной работе

1. Изучить общие сведения о тонких линзах и способах экспериментального измерения фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз.
2. Привести формулы, используемые в данной лабораторной работе, и пояснить параметры, входящие в эти формулы.
3. Изобразить ход лучей отдельно в собирающей и рассеивающей линзах, а также в исследуемой системе линз.
4. Подготовить протокол наблюдений, в который будут заноситься результаты экспериментов.

### Указания по выполнению эксперимента и обработке результатов наблюдений

*1. Измерение фокусного расстояния собирающей линзы посредством нахождения расстояний от линзы до предмета и от его изображения до линзы.*

1.1. На одном конце скамьи установить кожух, в котором находится электрическая лампа так, чтобы окно, на котором изображена стрелка (предмет), было направлено на линзу и экран. На некотором расстоянии от лампы установить собирающую линзу, а за ней экран. Сохраняя неизменным расстояние между лампой и экраном, передвиганием линзы вдоль оптической скамьи добиться получения на экране резкого изображения предмета (стрелки на стекле окна в металлическом кожухе лампы). Занести в протокол наблюдений отсчеты по шкале оптической скамьи положения предмета (стрелки)  $m_1$ , линзы  $k_1$  и экрана  $m_2$  по риску на соответствующих держателях.

1.2. При фиксированном положении источника света и линзы (отсчетов  $m_1$  и  $k_1$ ), изменяя положение экрана, провести измерение отсчета  $m_2$  согласно п. 1.1. пять раз, записывая при каждом наблюдении результаты эксперимента в протокол наблюдений.

1.3. Из полученных в п. 1.2 данных определить расстояния  $d_1 = k_1 - m_1$  и  $f_1 = m_2 - k_1$ . Вычислить значения  $F_1$  по формуле  $F_1 = d_1 f_1 / (d_1 + f_1)$  для каждого из пяти результатов наблюдений, найти выборочное среднее  $\bar{F}_1$  и рассчитать погрешность измерений  $\Delta \bar{F}_1$ . Представить результат измерений в округленном виде.

*2. Измерение фокусного расстояния собирающей линзы по величине ее перемещения при неизменном расстоянии между предметом и его изображением.*

2.1. Для измерения фокусного расстояния  $F_1$  указанным способом предмет (стрелку) и экран надо установить на расстоянии друг от друга, большем  $4F_1$ . Это расстояние следует сохранять неизменным в течение опыта. Ориентировочно, для оценки расстояния  $4F_1$  взять среднее значение  $\bar{F}_1$  из предыдущего опыта (п. 1.3). Зафиксировать в протоколе наблюдений положения светящегося предмета (стрелки)  $m_1$  и экрана  $m_2$ .

2.2. Передвигая линзу между лампой и экраном, получить на экране наиболее отчетливое увеличенное изображение стрелки. Записать в протокол наблюдений отсчет  $k_1$ , определяющий положение линзы. Передвинув линзу, получить уменьшенное четкое изображение стрелки и внести в протокол соответствующий отсчет  $k_2$ . Сохраняя неизменным расстояние между предметом и экраном повторить данный эксперимент еще четыре раза.

2.3. Из полученных отсчетов положений стрелки  $m_1$ , экрана  $m_2$ , линзы  $k_1$  и  $k_2$  согласно п. 2.2 найти расстояния  $L = m_2 - m_1$  и  $l = k_2 - k_1$  (см. рис. 1.4) для каждого из пяти наблюдений.

По формуле (1.2) вычислить значения фокусного расстояния  $F_{1i}$ , выборочное среднее  $\bar{F}_1$  и рассчитать погрешность измерений  $\Delta \bar{F}_1$ . Представить результат измерения в округленном виде.

*3. Измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы.*

3.1. Между предметом и экраном поставить сначала только собирающую линзу и получить на экране действительное уменьшенное изображение предмета (рис. 1.5, а). Отметить в протоколе наблюдений положение собирающей линзы  $k_3$  и положение экрана  $m_3$ .

3.2. Между экраном и собирающей линзой поставить рассеивающую линзу, фокусное расстояние которой требуется определить. В результате

действия рассеивающей линзы изображение удалится. Поэтому необходимо отодвинуть экран от данной линзы для получения на нем вновь четкого изображения предмета и произвести отсчет положения рассеивающей линзы  $k_4$  и нового положения экрана  $m_4$ .

3.3. Вычислить расстояние между рассеивающей линзой и изображением  $S_1$  по формуле  $d_2 = m_3 - k_4$ , а расстояние между рассеивающей линзой и изображением  $S_2$  по формуле  $f_2 = m_4 - k_4$ . Найти фокусное расстояние  $F_2$  для рассеивающей линзы по формуле (1.3).

3.4. Эксперименты по нахождению фокусного расстояния рассеивающей линзы (п. 3.1 – 3.3) повторить еще четыре раза при нескольких незначительно отличающихся друг от друга положениях собирающей линзы. Для всех найденных значений  $F_2$  вычислить выборочное среднее  $\overline{F_2}$  и рассчитать погрешность измерений  $\Delta\overline{F_2}$ . Представить результат измерений в округленном виде.

### Контрольные вопросы

1. Что называется главной оптической осью линзы, главным фокусом линзы, фокусным расстоянием тонкой линзы?
2. При каком условии линзу можно считать тонкой?
3. От каких величин зависит фокусное расстояние линзы?
4. Какой из двух способов измерения фокусного расстояния собирающей линзы, используемых в данной работе, более предпочтителен и почему?
5. Покажите, что измерение фокусного расстояния собирающей линзы по величине ее перемещения возможно, если расстояние  $L$  между предметом и экраном удовлетворяет условию  $L > 4F$ .
6. Каково наименьшее расстояние между предметом и его действительным изображением, создаваемым с помощью собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F$ ?
7. Выведите формулу (1.3) для измерения фокусного расстояния рассеивающей линзы методом, используемым в данной работе.
8. Постройте изображение точки, расположенной на главной оптической оси собирающей (рассеивающей) линзы.
9. Можно ли по характеристикам изображения, полученного с помощью линзы, определить какая это линза – собирающая или рассеивающая?
10. Как получить увеличенное и прямое изображение в собирающей линзе? Постройте ход лучей для этого случая.

### Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 928 с.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики: Учебник. В 3-х тт. Т. 3. Оптика. Атомная физика. – СПб.: Изд-во «Лань», 2009. – 656 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т.IV. Оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 792 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. В 3-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Издательство «Лань», 2007. – 496 с.
5. Иродов И. В. Волновые процессы. Основные законы: Учеб. пособие для вузов/ И. Е. Иродов. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 264 с.
6. Оптика. Руководство к выполнению лабораторных работ по физике. В 2-х частях. Ч. 1. Под ред. А. Г. Граммакова. – Л., Изд-во ЛЭТИ, 1975. – 74 с.