

# Лабораторная работа

## «Изучение центрированных оптических систем»

### Теоретическая часть

Явления интерференции и дифракции света показывают, что распространение света представляет собой волновой процесс. С помощью волновой теории можно решать задачи о распространении света как в однородной среде, так и через любую оптическую систему. Однако в очень многих областях, имеющих важное практическое значение, например, в теории формирования светового пучка и образования изображения, решение можно получить гораздо более простым путём с помощью представлений геометрической оптики.

Геометрическая оптика оперирует понятием отдельных световых лучей, подчиняющихся известным законам преломления и отражения, и независимых друг от друга.

При попытке на практике получить тонкий световой луч при помощи диафрагмы или последовательности диафрагм неизбежно реализуется дифракционное расширение светового пучка. Угол расширения можно приближенно оценить следующим образом:  $\phi \approx \lambda/D$ , где  $\lambda$  – длина волны света,  $D$  – диаметр отверстия в диафрагме. Таким образом, тонкий нерасходящийся световой пучок («луч») можно получить только в том случае, когда  $\lambda/D \rightarrow 0$ . Именно в этом приближении верны утверждения, получаемые в рамках геометрической оптики.

В рамках данной лабораторной работы соотношение  $\lambda/D \ll 1$  выполняется, поскольку геометрические размеры используемых оптических элементов (линз, пластин и т.д.)  $D$  существенно превышают длины волн светового диапазона, в связи с чем уместно применение формул и соотношений, полученных в рамках приближения геометрической оптики. Тем не менее, следует помнить, что лабораторная работа сопровождается проявлением дифракционных эффектов, например, отсутствием резких границ теней, т.е. частичным размытием границы света и тени на экране, где происходит фокусировка изображения.

В большинстве реальных оптических систем содержится несколько преломляющих сферических поверхностей. Оптическую систему называют центрированной, если центры всех поверхностей лежат на одной прямой, которую называют главной оптической осью системы. Световые пучки называются гомоцентрическими, если, выйдя из одной точки и пройдя оптическую систему, пучки или их продолжения снова сходятся в одной точке.

Идеальной оптической системой называют систему, в которой сохраняется гомоцентричность пучков и изображение геометрически подобно предмету. Как показывает теория, изображение предметов с помощью идеальной оптической системы может быть построено без

детального исследования хода лучей внутри системы и требует только знания фокусного расстояния и положения особых, так называемых главных плоскостей. Идеальная оптическая система обладает осью симметрии, которая называется главной оптической осью. Пусть  $MM_1$  и  $NN_1$  — крайние поверхности, ограничивающие оптическую систему, а  $O_1O_2$  — главная оптическая ось (рис. 1). Проведём луч  $A_1V_1$ , параллельный главной оптической оси. Этому лучу соответствует луч  $C_2D_2$ , выходящий из системы. Ход луча внутри оптической системы нас интересовать не будет. Точка  $F_2$  пересечения луча  $C_2D_2$  с главной оптической осью является изображением бесконечно удалённой точки (это легко показать с помощью второго луча, распространяющегося вдоль главной оптической оси). Точку  $F_2$  называют задним фокусом системы (фокусом в пространстве изображений). Плоскость, перпендикулярная  $O_1O_2$  и проходящая через точку  $F_2$ , называется задней фокальной плоскостью. Задний фокус системы не всегда, конечно, лежит справа от неё, как показано на рис. 1. В рассеивающих системах задний фокус может лежать слева от всех оптических поверхностей, входящих в состав системы.

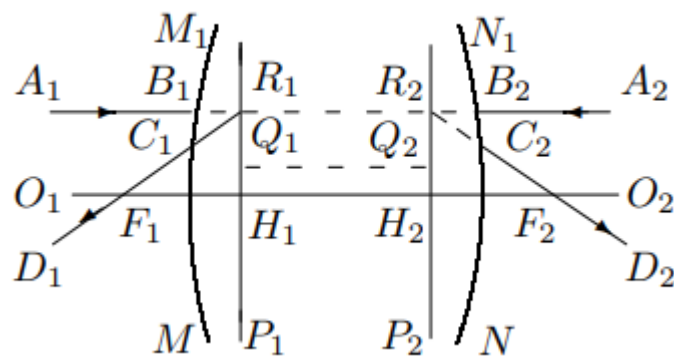


Рисунок 1 - Ход лучей в толстой линзе.

Рассмотрим теперь луч  $A_2B_2$ , входящий в систему справа и лежащий на продолжении луча  $A_1B_1$ . Слева из системы выйдет луч  $C_1D_1$ , сопряжённый лучу  $A_2B_2$ . Точку  $F_1$  называют передним фокусом системы (фокусом в пространстве предметов). Исходящие из него лучи в пространстве изображений параллельны оптической оси. Продолжим теперь  $C_1D_1$  и  $C_2D_2$  до пересечения с продолжениями  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$  и отметим точки пересечения  $R_1$  и  $R_2$ . Легко видеть, что эти точки сопряжены, т.е. являются изображением друг друга. Действительно, точка  $R_1$  лежит на пересечении лучей  $A_1B_1$  и  $C_1D_1$ , а точка  $R_2$  — на пересечении сопряжённых им лучей  $A_2B_2$  и  $C_2D_2$  (для большей наглядности направление одной пары сопряжённых лучей, например,  $A_2B_2$  и  $C_1D_1$ , можно изменить на противоположное, пользуясь обратимостью световых лучей). Из построения ясно, что точки  $R_1$  и  $R_2$  лежат на одинаковом расстоянии от главной оптической оси, т.е.  $R_1H_1 = R_2H_2$  (поперечное увеличение равно +1). Можно показать, что в идеальной системе все точки плоскости  $P_1$ , перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через  $R_1$ , попарно сопряжены точкам плоскости  $P_2$ , также

перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через  $R_2$ . При этом сопряжённые точки находятся на одинаковых расстояниях от оси (например, точки  $Q_1$  и  $Q_2$ ). Плоскости  $P_1$  и  $P_2$  называются главными плоскостями, а точки  $H_1$  и  $H_2$  — главными точками системы. Расстояния от главных точек до фокусов называются фокусными расстояниями:  $f_1 = H_1F_1$ ,  $f_2 = H_2F_2$ . В том случае, если с обеих сторон системы находится одна и та же среда (например, воздух),  $f_1 = f_2 = f$ . Если известно положение фокусов и главных плоскостей, изображение предмета может быть найдено путём простых геометрических построений. Рисунок 2 иллюстрирует эти построения. Удобно рассматривать лучи: а) падающие на линзу параллельно главной оптической оси; б) проходящие через передний фокус линзы; в) проходящие через центр линзы. Между главными плоскостями  $P_1$  и  $P_2$  все лучи следует строить параллельно главной оптической оси. Для построения изображения точки необходимо рассмотреть ход двух любых лучей. Третий луч используют для проверки правильности построения изображения.

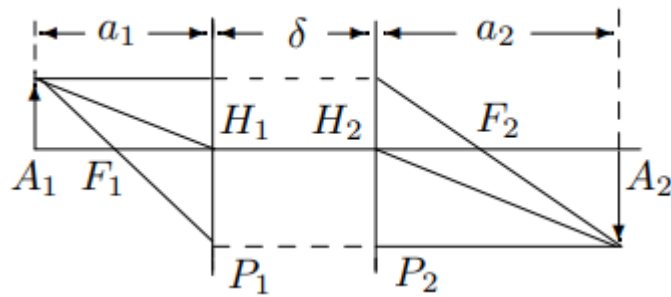


Рисунок 2 - Построение изображения в толстой линзе.

Оптическая система называется положительной или собирающей, если лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси, пройдя систему, отклоняются в направлении оси (собираются). Передний фокус  $F_1$  в этом случае лежит слева от главной плоскости  $P_1$ , а задний фокус  $F_2$  — справа от  $P_2$ . Если те же лучи, пройдя систему, отклоняются от оси, система называется отрицательной, или рассеивающей. При этом с оптической осью пересекаются не сами лучи, а их продолжения;  $F_1$  располагается правее  $P_1$ , а  $F_2$  — левее  $P_2$ . Фокусному расстоянию приписывается определённый знак: плюс для положительной системы и минус для отрицательной. Если ввести расстояния от предмета и изображения до соответствующих главных плоскостей, то легко установить соотношение между этими расстояниями и фокусным расстоянием системы:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

В формуле (1)  $a_1$  считается положительным, если предмет лежит слева от передней главной плоскости,  $a_2$  положительно, если изображение лежит справа от задней плоскости, а фокусное расстояние  $f$  берётся со своим знаком. Следует подчеркнуть, что главные плоскости и главные точки могут лежать как внутри, так и вне системы и при этом могут располагаться

асимметрично относительно поверхностей, ограничивающих оптическую систему.

Большой практический интерес представляет случай, когда размер оптической системы в направлении главной оптической оси значительно меньше фокусного расстояния. Оптический луч, проходя внутри такой системы, мало смещается, поэтому главные плоскости  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 2) практически совпадают и располагаются где-то посередине системы. Такая оптическая система называется тонкой линзой. Формула (1) остаётся, конечно, справедливой и для тонкой линзы; расстояния  $a_1$  и  $a_2$  и фокусное расстояние  $f$  можно в этом случае приближённо отсчитывать от центра линзы. Более подробную информацию, касающуюся изучаемого вопроса, можно найти, например, в [1] (§§ 68-79). Об aberrациях оптических систем можно прочитать там же в §§ 80-86.

## Практическая часть

В рамках выполнения данной лабораторной работы требуется последовательно решить несколько практических задач. Общие правила работы с оптическими элементами и правила их установки и юстировки на оптической скамье приведены в соответствующем разделе в конце описания.

### **Задача 1. Определить фокусное расстояние тонкой положительной линзы.**

Измерение расстояния собирающей линзы можно выполнить несколькими способами. В данной работе предлагается использовать два способа: а) с использованием плоского зеркала; б) с использованием экрана.

Способ (а). Очевидно, что если расстояние между линзой и объектом будет в точности равно фокусному расстоянию, то изображение объекта будет располагаться на бесконечности. Если за линзой расположить плоское зеркало, то лучи, прошедшие сквозь линзу, отразятся от зеркала и, вновь пройдя сквозь линзу, сформируют перевернутое изображение объекта без увеличения в фокальной плоскости, т.е. в плоскости, в которой расположен объект.

Задание:

1) Соберите установку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. Расположите элементы на одинаковой высоте, проведите юстировку оптической системы.

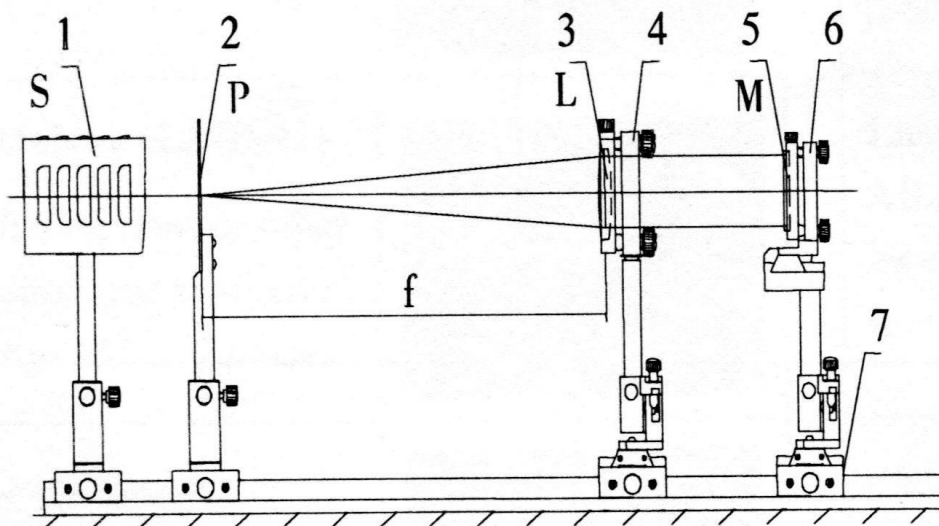


Рисунок 3 – Схема расположения оптических элементов в опыте по определению фокусного расстояния линзы с использованием плоского зеркала. На рисунке изображены следующие элементы: 1 – осветитель S, 2 – объект P (LMP-14<sup>1</sup>), 3 – собирающая линза L ( $f=150$  мм), 4, 6 – двухосевой держатель оптических элементов (LMP-07), 5 – плоское зеркало M.

<sup>1</sup> Здесь и далее в скобках приведена маркировка, нанесенная на оптические элементы

2) Двигайте линзу  $L$  вдоль оптической скамьи, пока не получите перевернутое изображение объекта на пластине  $P$ . Вырез на пластине  $P$ , который является объектом, имеет такую форму, что его перевернутое изображение является его полным дополнением к кругу.

3) Выполните окончательную тонкую настройку положения линзы и осей линзы и зеркала так, чтобы изображение объекта было наиболее чётким и равным по размеру самому объекту.

4) Измерьте расстояние между объектом и линзой. Для этого можно ориентироваться на край рейтера (платформы, которая движется по оптической скамье, и на которую устанавливаются оптические элементы), поскольку стойки, в которые закрепляются оптические элементы, установлены на одинаковом расстоянии от края рейтера.

5) Поверните линзу и предмет на  $180^\circ$  и повторите действия, описанные в пп. 2-4. Найдите фокусное расстояние линзы путём усреднения результатов, полученных в пп. 4 и 5.

6) Оцените погрешность определения фокусного расстояния линзы.

Способ (б). Пусть расстояние между предметом и экраном превышает  $4f$ . Нетрудно убедиться, что при этом всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получаются отчётливые изображения предмета (в одном случае уменьшенное, в другом — увеличенное). Из соображений симметрии ясно, что  $a_1 = a'_2$  и  $a_2 = a'_1$  (рис. 4). Обозначая расстояние между предметом и экраном через  $L$ , а расстояние между двумя положениями линзы через  $l$ , получим:  $L = a_1 + a_2$ ;  $l = a'_1 - a_1 = a_2 - a'_2$ . Отсюда  $a_1 = \frac{L - l}{2}$ ;  $a_2 = \frac{L + l}{2}$ . Используя формулу линзы (1), найдём после несложных преобразований:

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

Для определения фокусного расстояния достаточно, таким образом, измерить расстояние  $L$  между предметом и экраном и расстояние  $l$  между двумя положениями линзы, при которых на экране видны чёткие изображения.

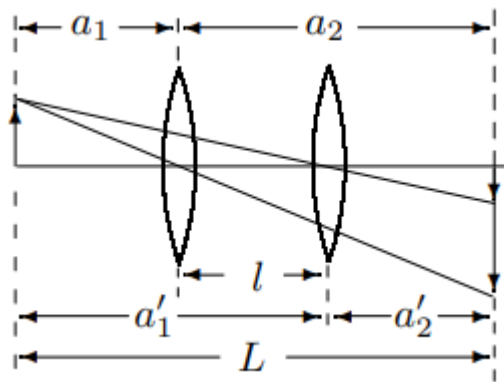


Рисунок 4 – Измерение фокусного расстояния тонкой положительной линзы

Задание:

1) Соберите установку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5. Расположите элементы на одинаковой высоте, проведите юстировку оптической системы.

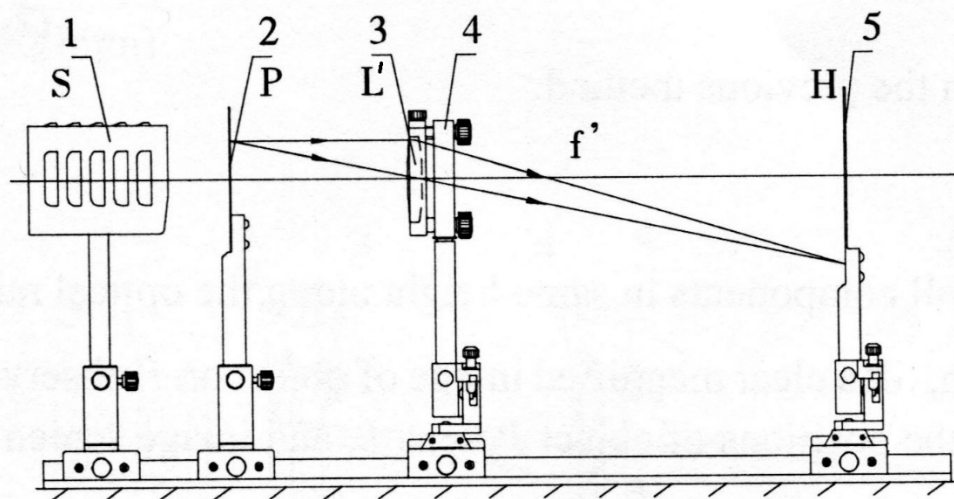


Рисунок 5 – Схема расположения оптических элементов в опыте по определению фокусного расстояния линзы с использованием экрана. На рисунке изображены следующие элементы: 1 – осветитель S, 2 – объект P (LMP-14), 3 – собирающая линза L' ( $f=150$  мм), 4 – двухосевой держатель оптических элементов (LMP-07), 5 – экран H.

2) Перемещайте вдоль оптической скамьи линзу, пока не добьётесь чёткого изображения объекта P на экране H. Запишите расстояние между объектом и экраном ( $L$ ) и координату положения линзы, ориентируясь по рейтеру.

3) Переместите линзу вдоль оптической скамьи так, чтобы на экране появилось чёткое изображения объекта P. Найдите расстояние  $l$  между положениями линзы, при которых наблюдается чёткое изображение.

4) Определите фокусное расстояние линзы по формуле (2).



5) Поверните объект Р, линзу L' и экран Н на 180°. Повторите действия, описанные в пп. 2-4. Найдите фокусное расстояние линзы путём усреднения результатов, полученных в пп. 4 и 5.

6) Оцените погрешность определения фокусного расстояния линзы.

7) Для более точного определения фокусного расстояния линзы выполните действия описанные в пп. 2-6 для трёх значений расстояния между объектом и экраном (L).

### Задача 2. Определить фокусное расстояние линзы по методу Аббе.

Фокусное расстояние любой (в том числе толстой) положительной линзы можно определить по методу Аббе (рис. 6). Пусть предмет, линейный размер которого равен  $y$ , находится на расстоянии  $x_1$  от главного фокуса  $F$  положительной оптической системы. Изображение предмета имеет размер  $y_1$ . Линейное увеличение  $\beta_1$  равно  $\beta_1 = y_1/y = f/x_1$ . Если теперь отодвинуть предмет от линзы на расстояние  $\Delta x$ , то линейное увеличение  $\beta_2$  окажется равным  $\beta_2 = y_2/y = f/x_2$ . Далее нетрудно получить, что

$$f = \frac{\Delta x}{\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2}}, \quad (3)$$

где  $\Delta x = x_2 - x_1$  — перемещение предмета. Таким образом, для определения фокусного расстояния положительной линзы нужно измерить линейное увеличение системы при двух положениях предмета и расстояние между этими двумя положениями.

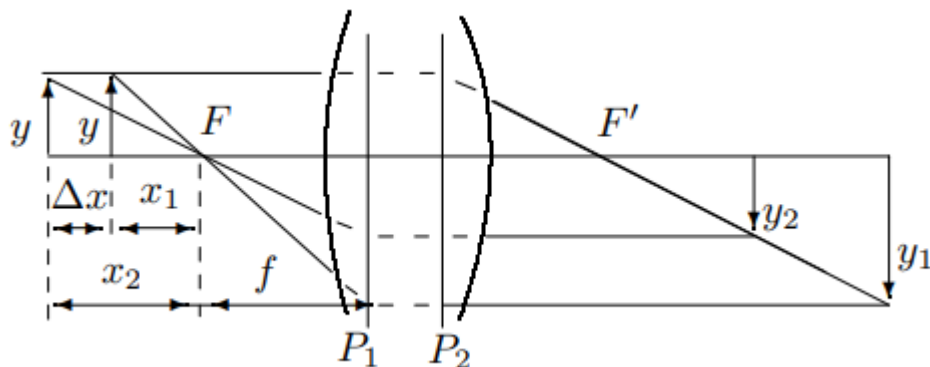


Рисунок 6 - Измерение фокусного расстояния оптической системы по методу Аббе.

В первую очередь примените метод Аббе для определения фокусного расстояния тонкой собирающей линзы.

Задание:

1) Соберите установку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7. Расположите элементы на одинаковой высоте, проведите юстировку оптической системы.

2) Установите линзу Le вблизи объекта М;



3) Перемещая окуляр микроскопа МЕ, добейтесь чёткого изображения делений слайда М при наблюдении в окуляр. В случае, если свет от осветителя слишком яркий для глаза, установите между объектом М и осветителем S делитель света 5:5 (его можно установить в держатель LMP-08). Вращением микрометрического винта совместите одно из больших делений на окуляре с большим делением изображения объекта. Определите увеличение изображения  $\beta_1$  (расстояние между делениями на объекте и на окуляре одинаковые).

4) Отодвиньте линзу на несколько миллиметров от её положения в сторону от объекта. Измерьте это смещение  $\Delta x$ .

5) Повторите действия, описанные в п. 3, и определите увеличение  $\beta_2$ .

6) Найдите фокусное расстояние по формуле (3). Оцените погрешность.

7) Выполните действия, описанные в пп. 2-5, три раза, изменяя смещение  $\Delta x$ .

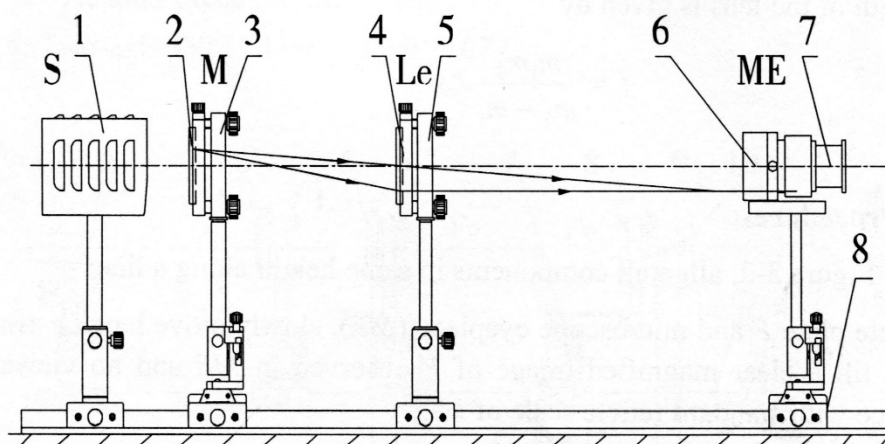


Рисунок 7 – Схема расположения оптических элементов в опыте по определению фокусного расстояния линзы с помощью метода Аббе. На рисунке изображены следующие элементы: 1 – осветитель S, 2 – слайд с делениями M (Reticle), 3 – держатель бипризм (LMP-41), 4 – линза Le ( $f=35$  мм); 5 – двухосевой держатель оптических элементов (LMP-07), 6 – окуляр микроскопа МЕ; 7 – держатель микроскопа (LMP-09).

### **Задача 3. Определить фокусное расстояние и положение главных плоскостей системы линз.**

Рассматривается центрированная оптическая система, состоящая из двух разных собирающих линз, расположенных на известном расстоянии друг от друга. Для отдельных тонких линз главные плоскости совпадают и проходят через геометрический центр линзы, а фокальные плоскости лежат на расстояниях, равных фокусному, от центра линзы. Для оптической системы, состоящей из двух тонких линз с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ , расположенных на расстоянии  $l_{12}$  друг от друга, главные плоскости, вообще

говоря, не совпадают. Более того, они необязательно располагаются симметрично относительно плоскости, проходящей через геометрический центр системы линз перпендикулярно главной оптической оси. Таким образом, для нахождения главных плоскостей и фокусного расстояния системы линз необходимо провести два последовательных опыта, в первом из которых следует найти фокусы (передний и задний), а во втором – найти фокусное расстояние (например, методом Аббе). Из теории (см. [2]) следует, что фокусное расстояние оптической системы, состоящей из двух тонких линз с фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ , расположенных на расстоянии  $l_{12}$  друг от друга, можно определить по формуле:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l_{12}}{f_1 f_2}. \quad (4)$$

Задание:

1) Соберите установку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 8. Расположите элементы на одинаковой высоте, проведите юстировку оптической системы.

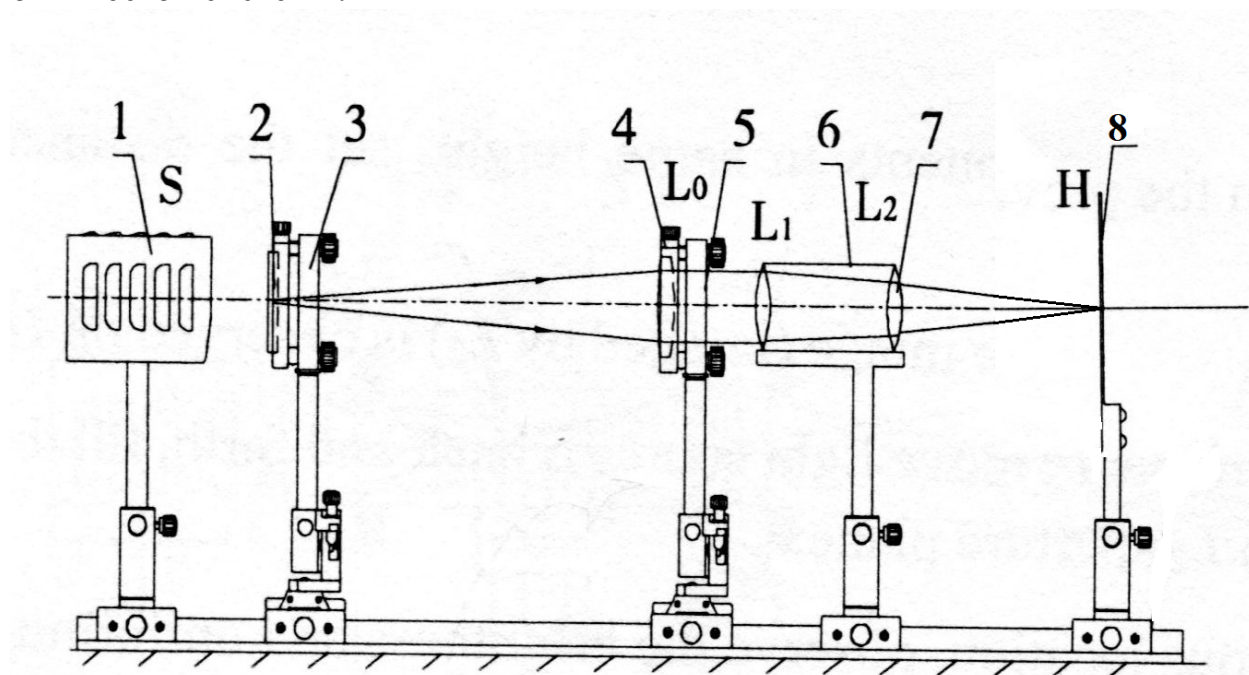


Рисунок 8 – Схема расположения оптических элементов в опыте по определению фокусного расстояния оптической системы с помощью метода Аббе. На рисунке изображены следующие элементы: 1 – осветитель S, 2 – слайд с линейкой (Millimetre Ruler), 3 – держатель бипризм (LMP-41), 4 – линза L<sub>0</sub> (f=150 мм); 5 – двухосевой держатель оптических элементов (LMP-07), 6 – оптическая система, состоящая из линз L<sub>1</sub> (f=190 мм) и L<sub>2</sub> (f=300 мм); 7 – держатель группы линз (LMP-28), 8 – экран H (LMP-13).

2) Установите линзу  $L_0$  на фокусном расстоянии от объекта, роль которого в данном случае играет слайд с линейкой. Для этого можно использовать любой из методов, предложенных ранее. Изображение объекта при таком относительном положении линзы  $L_0$  будет располагаться на бесконечности.

3) Расположите за линзой  $L_0$  систему линз  $L_1$ - $L_2$ . Предварительно нужно зафиксировать любое расстояние  $l_{12}$  между линзами  $L_1$  и  $L_2$  на держателе группы линз и в дальнейшем это расстояние больше не менять.

4) Двигайте экран вдоль оптической скамьи, пока не получите на его поверхности чёткое изображение объекта (линейки). Это будет означать, что экран находится в задней фокальной плоскости системы линз. Запишите расстояние между держателем линз и экраном.

5) Поверните держатель линз на  $180^\circ$ . Повторите действия, описанные в п.4.

6) Уберите линзу  $L_0$  и с помощью метода Аббе определите фокусное расстояние системы линз. В данном случае вместо окуляра микроскопа можно использовать экран. Увеличение изображения, получаемого на экране, следует измерять, принимая во внимание, что расстояние между штрихами на объекте составляет 1 мм. Сравните полученное значение фокусного расстояния с результатом вычисления по формуле (4).

7) Оцените погрешность определения фокусного расстояния.

8) Изобразите на чертеже положение линз оптической системы, а также её фокальных и главных плоскостей.

#### Задача 4. Определить угловое увеличение телескопа.

В настоящей работе изучается модель астрономической зрительной трубы. Этот оптический прибор состоит из двух основных частей: объектива — линзы, обращённой к объекту, и окуляра — линзы, обращённой к наблюдателю. Объектив, в качестве которого используется положительная линза, создаёт действительное изображение предмета. Это изображение рассматривается глазом через окуляр. Ход лучей в астрономической зрительной трубе (трубе Кеплера) представлен на рис. 9.

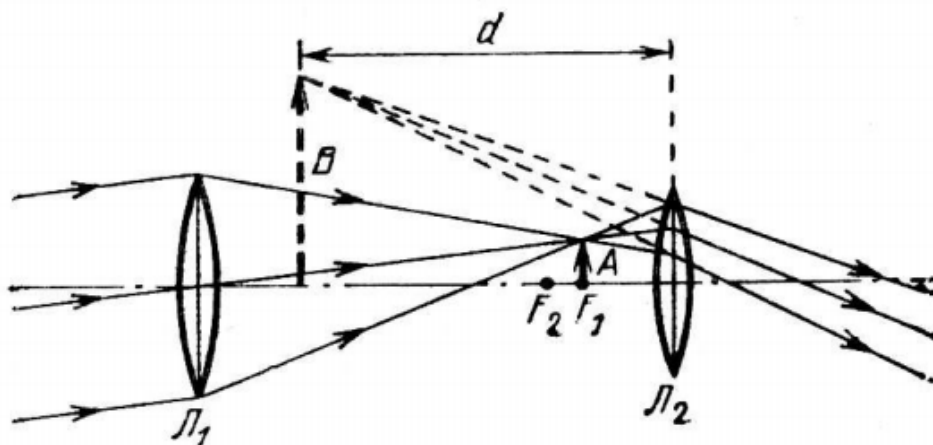


Рисунок 9 – Ход лучей в трубе Кеплера.

Поскольку зрительные трубы используются для наблюдения удалённых предметов, находящихся от объектива на расстояниях, значительно превышающих его фокусное расстояние, изображение А предмета, даваемое объективом, находится практически в его фокальной плоскости. Мнимое изображение В, даваемое окуляром, располагается на некотором расстоянии  $d$  от окуляра. Наводя оптический инструмент на резкость, наблюдатель автоматически устанавливает такое расстояние  $d$ , которое удобно для аккомодации глаза. Поскольку глаз обладает значительной областью аккомодации, расстояние  $d$  даже для одного и того же наблюдателя может существенно изменяться от опыта к опыту. При изменении аккомодации оптический прибор, вооружающий глаз, должен быть несколько перефокусирован. В зрительных трубах этого достигают перемещением окуляра, а в микроскопе — перемещением всей оптической системы относительно предмета. Для того чтобы исключить в теории произвол, связанный с неопределённостью расстояния  $d$ , полагают обычно, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность. При этом мнимое изображение В должно располагаться в бесконечности, и, следовательно, промежуточное изображение А должно совпадать с фокальной плоскостью окуляра. При наблюдении предметов с помощью зрительной трубы угловой размер изображения, рассматриваемого глазом, оказывается существенно больше, чем угловой размер объекта при наблюдении невооружённым глазом. Отношение углового размера изображения объекта, рассматриваемого наблюдателем через окуляр прибора, к угловому размеру объекта, рассматриваемого невооружённым глазом, называется угловым увеличением оптического прибора. В случае зрительной трубы всегда предполагается, что расстояние между объектом и наблюдателем значительно превышает фокусное расстояние объектива.

Как было выяснено, при наблюдении далёких предметов с помощью астрономической зрительной трубы (трубы Кеплера) глазом, аккомодированным на бесконечность, задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. В этом случае труба является афокальной системой: параллельный пучок лучей, входящий в объектив, остаётся параллельным по выходе из окуляра. Такой ход лучей называют телескопическим.

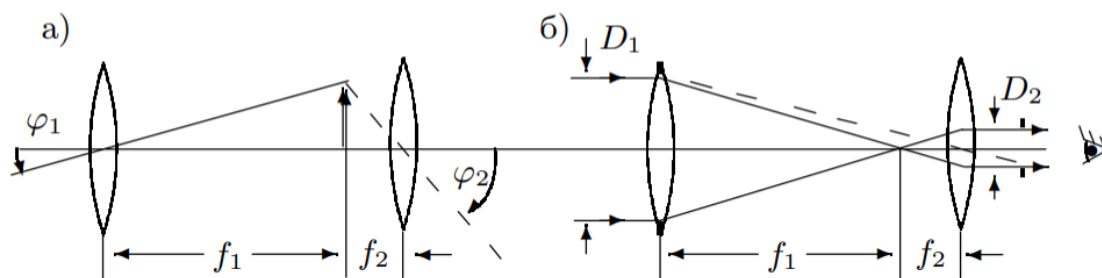


Рисунок 10 - К расчёту увеличения зрительной трубы Кеплера.

Рассматривая параллельный пучок лучей, исходящий из бесконечно удалённой точки, лежащей в стороне от оптической оси, можно для простоты ограничиться лучом, проходящим через центр объектива (рис. 10а). На выходе из окуляра угол наклона пучка к оптической оси изменяется. 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  $\gamma = \text{tg}\varphi_2 / \text{tg}\varphi_1$ . Строго говоря,  $\varphi_1$  — это угловой размер объекта, рассматриваемого невооружённым глазом, но при наблюдении бесконечно удалённого объекта с помощью зрительной трубы угол  $\varphi_1$  для объектива трубы и для невооружённого глаза одинаков.

Как следует из рис. 10а, угловое увеличение телескопа равно отношению фокусов объектива и окуляра:  $\gamma = f_1/f_2$ . Отношение фокусных расстояний равно отношению диаметров пучка, прошедшего объектив и окуляр (рис. 10б). Ширина пучка, прошедшего объектив, определяется диаметром  $D_1$  его оправы; ширина пучка, выходящего из окуляра, — диаметром  $D_2$  изображения оправы объектива, даваемого окуляром:  $f_1/f_2 = D_1/D_2$ . Таким образом, угловое увеличение телескопа

$$\gamma = \frac{\text{tg}\varphi_2}{\text{tg}\varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (5)$$

В том случае, если диаметр  $D_2$  пучка, выходящего из окуляра, равен диаметру  $d_0$  зрачка наблюдателя ( $d_0 \approx 5$  мм), увеличение телескопа называется нормальным. Соотношение (5) показывает, что увеличение трубы можно определить следующими тремя способами: путём измерения углов, под которыми предмет виден через трубу и без неё, путём измерения диаметров объектива и его изображения в окуляре, и, наконец, путём измерения фокусных расстояний объектива и окуляра.

Задание:

1) Установить на оптическую скамью осветитель, объект-линейку (Ruler) в держателе бипризм LMP-08 и коллиматорную линзу  $L_0$  с  $f=150$  мм в двухосном держателе LMP-07.

2) Разместите эти оптические элементы так, чтобы объект был точно в переднем фокусе линзы. Для этого используйте зрительную трубу Veber 8-20\*25, настроенную на бесконечность. О том, как настроить зрительную трубу на бесконечность, см. в п. «Общие правила работы с оптическими элементами». Наблюдая в зрительную трубу линзу  $L_0$ , перемещайте линзу вдоль оптической скамьи, пока не получите чёткое изображение линий объекта-линейки,

3) Зафиксируйте положение линзы  $L_0$ . Посчитайте количество линий ( $N_1$ ), которые укладываются в область зрения трубы.

4) Соберите трубу Кеплера, используя линзу  $L_1$  с  $f_1=190$  мм (держатель LMP-07) в качестве объектива, а линзу  $L_2$  с  $f_2=105$  мм (держатель LMP-08) в качестве окуляра. Расположите линзу  $L_1$  вблизи (на расстоянии 50-60 мм) от

коллиматорной линзы  $L_0$ . Установите расстояние между линзами  $L_1$  и  $L_2$  приблизительно равным сумме их фокусных расстояний.

5) Наблюдая в зрительную трубу линзу  $L_2$ , перемещайте эту линзу вдоль оптической скамьи, пока не получите чёткое увеличенное изображение линий объекта-линейки.

6) Зафиксируйте положение линзы  $L_2$ . Посчитайте количество линий ( $N_2$ ), которые укладываются в область зрения трубы.

7) Угловое увеличение трубы Кеплера по определению является отношением  $\gamma = N_1/N_2$ . Сравните полученное значение углового увеличения с результатом вычисления по формуле (5):  $\gamma = f_1/f_2$ .

## Общие правила работы с оптическими элементами

1) Не следует касаться поверхности линз пальцами, потому что царапины, пылинки или жирные пятна на стекле рассеивают световые лучи и ухудшают чёткость изображения. Если всё же поверхность линзы оказалась загрязнена, то не нужно удалять это загрязнение подручными средствами. По вопросу очищения оптических элементов обратитесь к преподавателю. Помните, что слегка ухудшенная чёткость изображения из отпечатка пальца существенно лучше, чем отсутствие изображения по причине полной непригодности оптического элемента из-за неправильной очистки.

2) Для центрирования оптической системы на одном конце оптической скамьи установите осветитель с объектом (LMP-14) и вплотную к нему — лист бумаги с небольшим отверстием на рейтере. Отметьте карандашом на экране точку, в которую попадает свет. Эта операция должна выполняться при плотно затянутом винте, закрепляющем рейтер на оптической скамье. Для перемещения рейтера вдоль скамьи винт следует только слегка ослабить, чтобы не допустить перпендикулярного скамье смещения центра. Перемещая рейтер, прижимайте его к скамье со стороны, противоположной винту. Отодвиньте экран от осветителя и разместите в промежутке рейтер с собирающей линзой. Передвигая линзу и экран вдоль скамьи, добейтесь чёткого изображения края отверстия объекта на экране. Закрепите рейтеры. Смещая линзу по высоте, а также вращая винты держателя линз, приведите изображение к отметке. С дополнительными оптическими элементами, размещаемыми на оптической скамье, поступайте аналогичным образом.

3) Оптические оси линз устанавливаются параллельно ребру оптической скамьи на глаз. Легко убедиться на опыте, что при небольших увеличениях, получаемых в настоящей работе, такая установка является достаточной.

4) Для настройки зрительной трубы на бесконечность, глядя в зрительную трубу, получите чёткое изображение окна в конце длинного коридора, находясь в другом конце этого коридора. Также можно, глядя из окна, наводиться на далёкие объекты, например, шпили, антенны на крышах домов и т.п. Чем дальше будет предмет, на который осуществляется фокусировка, тем точнее зрительная труба настроена на бесконечность. **Внимание:** после выполнения указанных выше операций вы получите трубу, настроенную с учётом особенностей глаза. Если вы наблюдаете в трубу другим глазом, то труба, вообще говоря, уже не будет настроенной на бесконечность.

### Список литературы

1. Г.С. Ландсберг. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 7-е изд. стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 852 с.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. — М.: Наука, 1980.