

Лабораторная работа 4.1.1  
Центрированные оптические системы  
Лабораторная работа 4.1.2  
Моделирование оптических приборов

Аксенова Светлана

2 апреля 2021 г.

**Цель работы:** изучить методы определения фокусных расстояний линз, исследовать модель зрительной трубы (астрономическая труба Кеплера) и определить увеличение.

**В работе используются:** оптическая скамья с набором рейтеров; положительные и отрицательные линзы; экран; осветитель с ирисовой диафрагмой; осветитель со шкалой; зрительная труба; кольцевая диафрагма; линейка.

## 1 Определение фокусного расстояния собирающей линзы с помощью зрительной трубы

Фокусное расстояние тонкой собирающей линзы можно определить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность, то есть на параллельный пучок лучей. Разместив между предметом и зрительной трубой положительную линзу и перемещая её вдоль оси системы, можно найти резкое изображение предмета в окуляре зрительной трубы (рис. 1). При этом расстояние от середины линзы до предмета равно фокусному расстоянию тонкой линзы. Результаты измерений фокусных расстояний линз представлены в таблице 1.

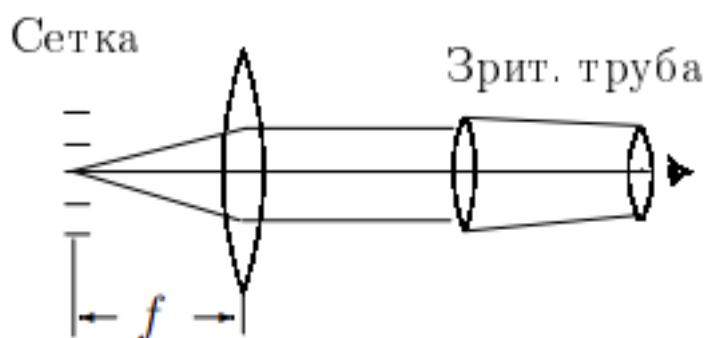


Рисунок 1 – Определение фокусного расстояния положительной линзы

Номер линзы	$F$ , см	$\sigma$ , см
1	9,5	0,7
2	11,3	0,7
3	19,0	0,7
4	32,0	0,7

Таблица 1 – Измеренные фокусные расстояние собирающих линз

## 2 Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы затруднено тем, что изображение предмета получается мнимым (при действительном источнике) и поэтому не может быть получено на экране. Для этого используют вспомогательную собирающую линзу.

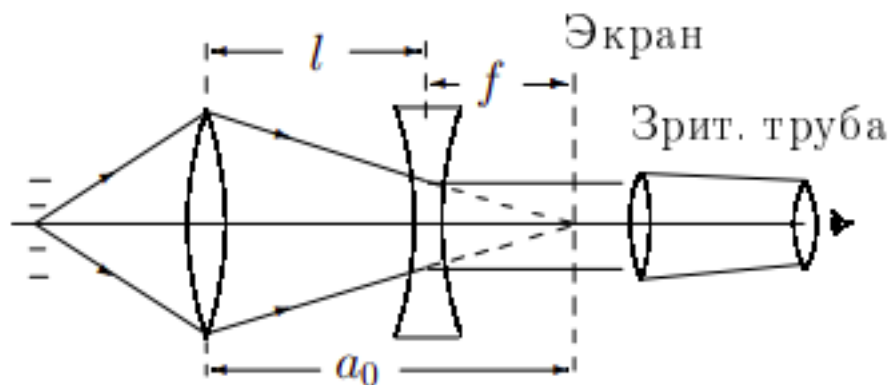


Рисунок 2 – Измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Сначала с помощью собирающей линзы получают на экране действительное изображение предмета  $S_1$ . Затем на пути лучей, выходящих из собирающей линзы, располагают исследуемую рассеивающую линзу и, отодвигая экран, получают чёткое изображение предмета на экране, образованное двумя линзами. Точка  $S_1$  пересечения сходящихся лучей играет по отношению к рассеивающей линзе роль мнимого источника. Изображение источника переместится в точку  $S_2$ . Определив расстояние  $a = a_0 - l > 0$  и  $a' > 0$ , фокусное расстояние тонкой линзы рассчитывают по формуле

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

которое, естественно, должно получиться отрицательным.

Если расстояние  $a$  на рис. 2 совпадает с модулем фокусного расстояния рассеивающей линзы, то изображение  $S_2$  перемещается в бесконечность, то есть лучи выходят из линзы параллельным пучком.

Параллельность пучка можно установить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность (рис. 2). Таким образом, было определено фокусное расстояние рассеивающей линзы

$$f = -49 \pm 0,7 \text{ см.}$$

### 3 Телескоп Кеплера

Модель телескопа Кеплера представлена на рис. 3. В качестве коллиматора была использована линза 3 с фокусным расстоянием 19 см. Объектив телескопа - линза с максимальным фокусным расстоянием (линза 4), он был расположен почти вплотную к коллиматору. Окуляр (линза 2) был расположен на расстоянии, примерно равных сумме фокусных расстояний обеих линз трубы. Далее за окуляром была закреплена зрительная труба и, слегка перемещая окуляр вдоль оптической скамьи, было получено изображение сетки в объективе вспомогательной трубы.

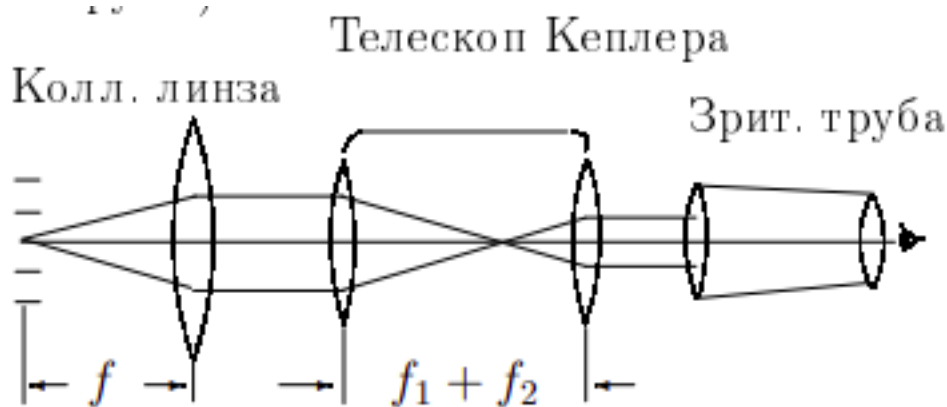


Рисунок 3 – Модель телескопа Кеплера

Сумма фокусных расстояний объектива и окуляра

$$f_4 + f_2 = 43 \pm 1 \text{ см},$$

измеренное расстояние между объективом и окуляром

$$l = 42,5 \pm 0,7 \text{ см}.$$

Величина  $l$  должна быть равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра, что согласуется с экспериментальными данными.

Рассчитаем увеличение исследуемой модели телескопа по формуле

$$N_T = -\frac{f_4}{f_2}, \quad (2)$$

полученный результат показан в таблице 2.

Далее рассчитаем увеличение телескопа через отношение углов, под который объектив видел через телескоп и без него. Для этого было найдено количества делений у изображения  $h_1$  и  $h_2$  одного миллиметра шкалы осветителя в делениях окулярной шкалы зрительной трубы и в делениях окулярной шкалы вспомогательной трубы. Соответственно,  $h_1 \approx k\alpha_1$  и  $h_2 \approx k\alpha_2$ . Тогда увеличение рассчитывается по формуле

$$N_T = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = -\frac{h_2}{h_1}, \quad (3)$$

результаты представлены в таблице 2.

Определим увеличение телескопа, сравнив диаметр оправы его объектива  $D_1$  и диаметр изображения этой оправы в окуляре  $D_2$  по формуле

$$N_T = \frac{D_1}{D_2}. \quad (4)$$

Метод	$N_T$	$\sigma$
Отношение фокусных расстояний	2,83	0,19
Отношение угловых размеров	2,67	0,32
Отношение диаметра объектива и его изображения	3,09	0,29

Таблица 2 – Таблица полученных увеличений телескопа тремя способами

Таким образом, увеличение телескопа было измерено тремя способами.

#### 4 Проверка формулы тонкой линзы

Если считать толщину линзы пренебрежимо малой ( $\delta \rightarrow 0$ ), формула линзы имеет вид

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{L - s} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

Было измерено несколько пар значений  $s, L$  для линзы 2. По формуле (5) для каждой пары было рассчитано фокусное расстояние. Среднее значение

$$f = 10,6 \pm 0,9 \text{ см.}$$

Формулу (5) можно представить в виде

$$Ls - s^2 = fL, \quad (6)$$

тогда фокусное расстояние можно определить по наклону графика  $y(s, L) = aL$  (рис. 4), он был рассчитан по методу  $\chi^2$  с учётом погрешностей каждой точки

$$f = 10,8 \pm 0,4 \text{ см.}$$

#### 5 Метод Бесселя

Схема метода Бесселя представлена на рис. 4. Он основан на том, что при заданном расстоянии  $L$  между предметом и экраном формула тонкой линзы представляет собой квадратное уравнение относительно расстояния  $a$  от главной плоскости пространства предметов до предмета ( $s > 0$ ):

$$-\frac{1}{s} + \frac{1}{L - \delta + s} = \frac{1}{f}, \quad (7)$$

имеющее при условии  $L > 4f + \delta$  решения  $a_1$  и  $a_2$ , показанные на рис. 4, где  $\delta$  - расстояние между главными плоскостями линзы.

С учётом симметрии и направлений измерения расстояний, положения предметов определяются соотношениями  $a'_2 = -a_1$  и  $a'_1 = -a_2$ . Для расстояния  $L$

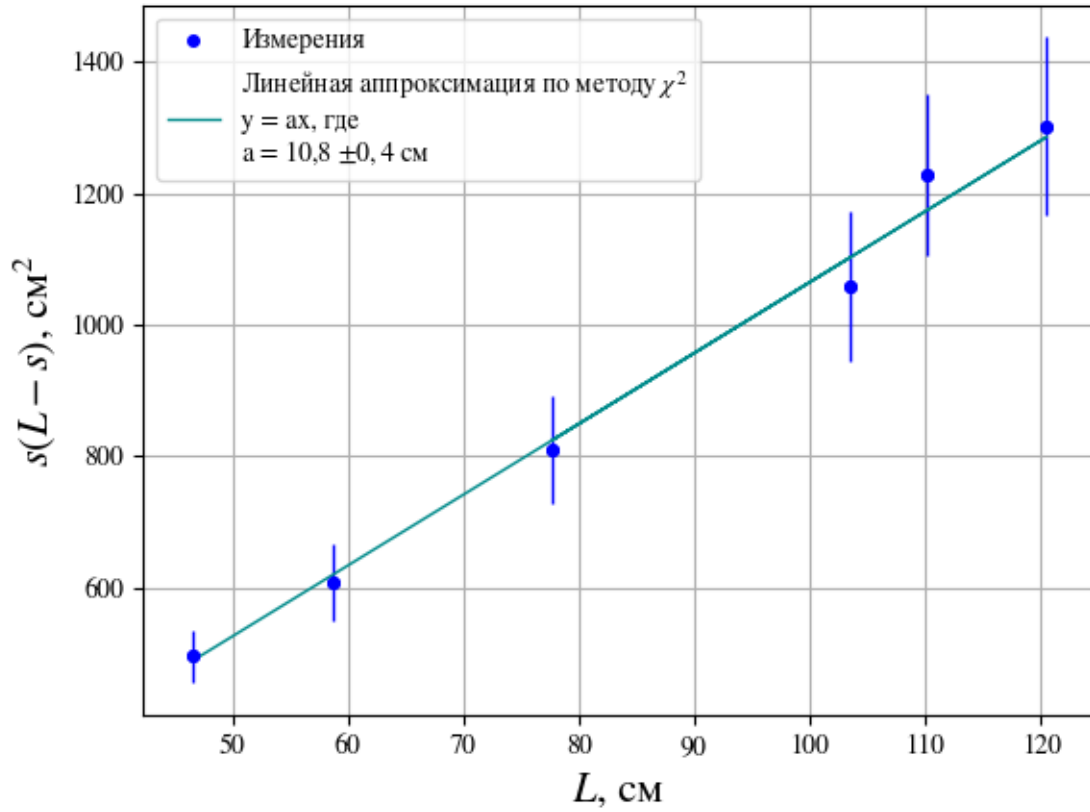


Рисунок 4 – График зависимости  $y(s, L) = KL$

между предметом и экраном и расстояния  $l$  между двумя положениями линзы получаем:  $L - \delta = a'_1 - a_1$ ,  $l = -a_2 + a_1 = a_1 + a'_1$ . Откуда следует, что

$$a_1 = -\frac{1}{2}(L - \delta - l), \quad a'_1 = \frac{1}{2}(L - \delta + l). \quad (8)$$

Подставляя результаты в формулу (5), получаем

$$f = \frac{(L - \delta)^2 - l^2}{4(L - \delta)}. \quad (9)$$

Если выполняется условие  $|\delta| \ll L$ , то формула (7) может быть представлена в более простом виде

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (10)$$

Определим таким образом фокусные расстояния собирающих линз, результаты представлены в таблице 3.

Далее определим оптический интервал и фокусное расстояние одной из линз (линза 2) по методу Бесселя, измерив 6 пар значений  $L, s$ . Формула Бесселя имеет вид

$$l^2 = L'(L' - 4f), \quad (11)$$

где  $l = s_2 - s_1$  - смещение линзы при смещении между увеличенным и уменьшенным изображениями,  $L' = L - \delta$ ,  $\delta$  - оптический интервал для линзы (порядка

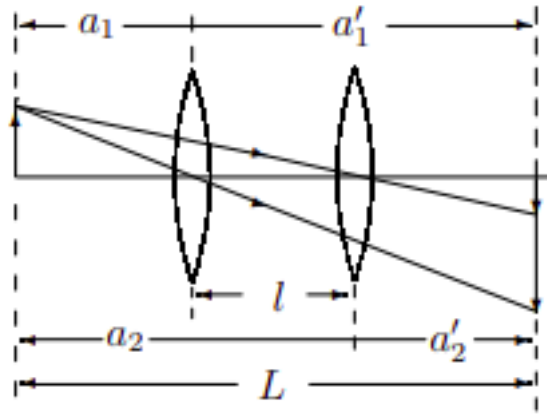


Рисунок 5 – Измерение фокусного расстояния по методу Бесселя

Номер линзы	$F$ , см	$\sigma$ , см
1	8,2	0,04
2	9,9	0,04
3	19,8	0,04

Таблица 3 – Результаты измерения фокусных расстояний собирающих линз по методу Бесселя

её толщины). Преобразуем формулу (12) так, чтобы она приняла вид линейной зависимости:

$$L^2 - l^2 = (4f + 2\delta)L - 4\delta f - \delta^2. \quad (12)$$

Был построен график зависимости, где  $y = L^2 - l^2$ ,  $x = L$  (рис. 6), наилучшая прямая была проведена по методу  $\chi^2$ . Искомые параметры линзы и параметры прямой связаны по формулам

$$a = 4f + 2\delta, \quad b = -4\delta f - \delta^2. \quad (13)$$

Из которой фокусное расстояние

$$f = 13,2 \pm 3,5 \text{ см},$$

и оптический интервал

$$\delta = -7,8 \pm 2,9 \text{ см}.$$

## 6 Вывод

В результате проделанной работы были изучены и применены на практике методы определения фокусных расстояний линз. Были получены результаты для собирающих и рассеивающей линз с помощью зрительной трубы, для

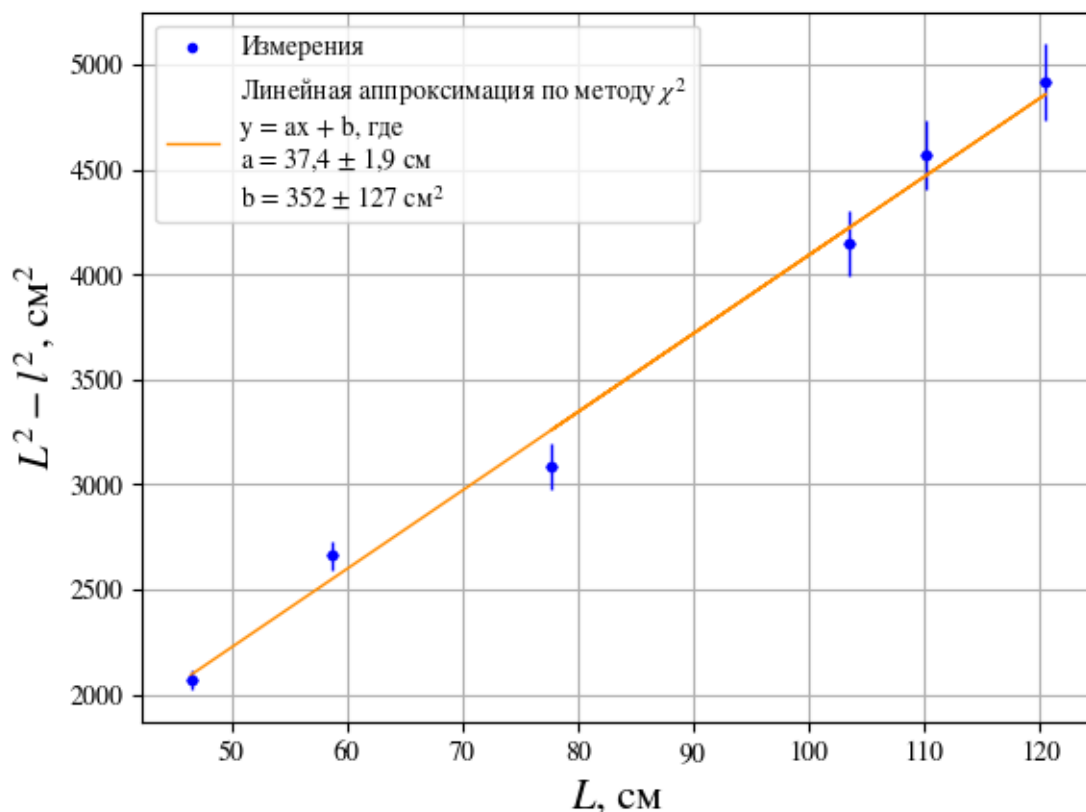


Рисунок 6 – График зависимости  $y = ax + b$ , где  $y = L^2 - l^2$ ,  $x = L$

положительных линз использовался метод Бесселя. Полученные значения различаются на 15 % для первой линзы, на 13 % для второй линзы и на 4 % для третьей линзы. Также для второй линзы было измерено фокусное расстояние по формуле тонкой линзы и по методу Бесселя (с учётом толщины линзы). Максимальное отличие полученных значений составляет 20 %. Также был рассчитан оптический интервал для второй линзы, который получился отрицательным.

Была изучена модель телескопа Кеплера и рассчитано его увеличение тремя способами: по отношениям линейного и углового размеров и диаметров объектива и его изображения. Полученные значения хорошо согласуются между собой.



## 7 Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т.2. Оптика / А. В. Максимычев, Д. А. Александров, Н. С. Берюлёв и др.; под ред. А. В. Максимычева. - М.: МФТИ, 2014. - 446 с.;
2. [Дополнительное описание к лабораторной работе 4.1.1;](#)
3. [Дополнительное описание к лабораторной работе 4.1.2;](#)

## 8 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)