

Лабораторная работа 4.1.2.  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ  
ПРИБОРОВ

Державин Андрей, Б01-901

14 апреля 2021 г.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Теоретические сведения</b>	<b>3</b>
1.1	Увеличение астрономической зрительной трубы . . . . .	4
1.2	Увеличение галилеевой зрительной трубы . . . . .	6
1.3	Увеличение микроскопа . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Экспериментальная установка</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Ход работы</b>	<b>10</b>
3.1	Определение фокусных расстояний линз с помощью зрительной трубы . . . . .	10
3.2	Моделирование трубы Кеплера . . . . .	12
3.3	Моделирование трубы Галилея . . . . .	14
3.4	Моделирование микроскопа . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Вывод</b>	<b>16</b>

**Цель работы:** изучить модели зрительных труб (астрономической трубы Кеплера и земной трубы Галилея) и микроскопа, определить их увеличения.

**В работе используются:** оптическая скамья, набор линз, экран, осветитель со шкалой, зрительная труба, диафрагма, линейка.

## 1 Теоретические сведения

В настоящей работе изучаются модели зрительных труб (астрономической и земной) и микроскопа. Каждый из этих оптических приборов 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 и земной зрительных трубах и в микроскопе представлен на рис. 1.1, 1.2, 1.3.

Поскольку зрительные трубы используются для наблюдения удалённых предметов, находящихся от объектива на расстояниях, значительно превышающих его фокусное расстояние, изображение  $A$  предмета, даваемое объективом, находится практически в его фокальной плоско-

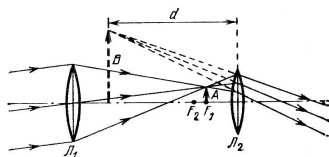


Рис. 1.1: Ход лучей в трубе Кеплера

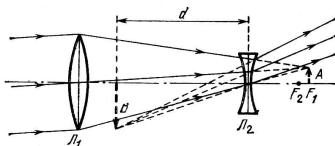


Рис. 1.2: Ход лучей в трубе Галилея

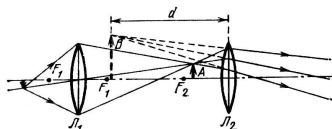


Рис. 1.3: Ход лучей в микроскопе

сти. В случае микроскопа промежуточное изображение  $A$  находится далеко за фокальной плоскостью объектива, так как предмет располагается вблизи переднего фокуса.

Мнимое изображение  $B$ , 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 1, 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  $B$  должно располагаться в бесконечности, и, следовательно, промежуточное изображение  $A$  должно совпадать с фокальной плоскостью окуляра.

При наблюдении предметов с помощью зрительной трубы или микроскопа 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. При этом в случае микроскопа полагают, что при непосредственном наблюдении расстояние между объектом и глазом равно расстоянию наилучшего зрения глаза, т.е. 25 см. В случае зрительной трубы всегда предполагается, что расстояние между объектом и наблюдателем значительно превышает фокусное расстояние объектива.

## 1.1 Увеличение астрономической зрительной трубы

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*.

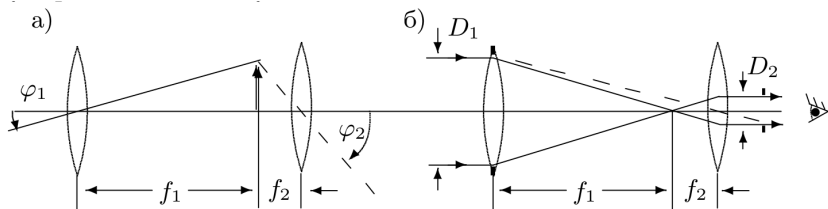


Рис. 1.4: К расчёту увеличения зрительной трубы Кеплера

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. 1.4а). 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

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} \quad (1)$$

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. 1.4а, угловое увеличение телескопа равно отношению фокусов объектива и окуляра:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (2)$$

Отношение фокусных расстояний равно отношению диаметров пучка, прошедшего объектив и окуляр (рис. 1.4б). Ширина пучка, про-

шедшего объектив, определяется диаметром  $D_1$  его оправы; ширина пучка, выходящего из окуляра, – диаметром  $D_2$  изображения оправы объектива, даваемого окуляром:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (3)$$

Таким образом, угловое увеличение телескопа

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (4)$$

В том случае, когда диаметр  $D_2$  пучка, выходящего из окуляра, равен диаметру  $d_0$  зрачка наблюдателя ( $d_0 \approx 5$  мм), увеличение телескопа называется нормальным. Соотношение (4) 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. В настоящей работе используются все три способа.

## 1.2 Увеличение галилеевой зрительной трубы

Если заменить положительный окуляр астрономической трубы отрицательным, получается галилеева (или земная) труба. При телескопическом ходе лучей в галилеевой трубе расстояние между объективом и окуляром равно разности

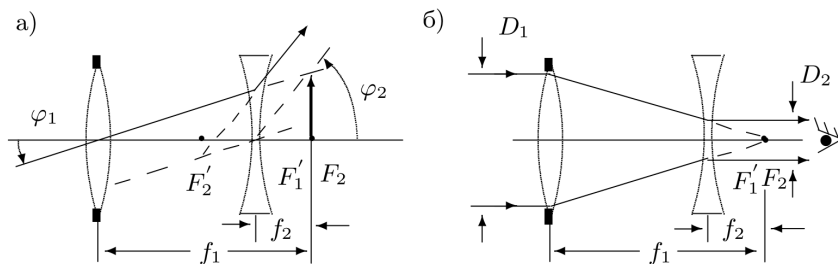


Рис. 1.5: К расчёту увеличения галилеевой зрительной трубы

(точнее - алгебраической сумме) их фокусных расстояний (рис. 1.5), а изображение оправы объектива, даваемое окуляром, оказывается мнимым. Это изображение располагается между объективом и окуляром. Легко показать, что формула (4)), полученная для астрономической трубы, справедлива и для земной трубы.

Достоинством галилеевой трубы является то, что она даёт прямое изображение. Поэтому зрительные трубы, бинокли и т.д. делаются по схеме Галилея.

### 1.3 Увеличение микроскопа

Рассмотрим ход лучей в микроскопе в предположении, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность (рис. 1.6). Тангенс угла  $\varphi_2$ , под которым видно изображение, определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l'}{f_2} = \frac{l(\Delta - f_1 - f_2)}{f_1 f_2}, \quad (5)$$

где  $l'$  – размер промежуточного изображения,  $l$  – размер предмета,  $\Delta$  – длина тубуса (расстояние между линзами).

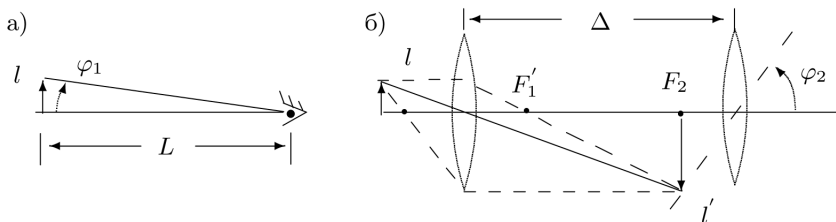


Рис. 1.6: К расчёту увеличения микроскопа

При наблюдении предмета невооружённым глазом с расстояния наилучшего зрения  $L$  угловой размер предмета  $l$  равен

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l}{L}. \quad (6)$$

Увеличение микроскопа, следовательно, равно

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{l(\Delta - f_1 - f_2)}{f_1 f_2}. \quad (7)$$

У всех микроскопов, выпускаемых отечественной промышленностью, длина тубуса равна  $\Delta = 16\text{см}$ . Следует ещё раз подчеркнуть, что формулы для расчёта увеличения оптических приборов основаны на предположении об аккомодации глаза наблюдателя на бесконечность. В этом предположении увеличение является объективной характеристикой оптического инструмента. Если глаз наблюдателя изменяет аккомодацию, то оптический инструмент должен быть соответственно перефокусирован, и его увеличение несколько изменится. В связи с этим часто говорят о субъективном увеличении прибора. Впрочем, как правило, разница между субъективным и объективным увеличениями оптического инструмента оказывается незначительной.

Можно показать, что при аккомодации глаза на расстояние наилучшего зрения  $L$  угловое увеличение микроскопа  $\gamma$  равно линейному  $\Gamma$ :

$$\gamma = \Gamma = \frac{l''}{l} = \frac{l'}{l} \cdot \frac{l''}{l'} = \Gamma_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}} \quad (8)$$

С учётом того, что объектив и окуляр микроскопа – короткофокусные линзы (предмет и промежуточное изображение лежат практически в фокальных плоскостях объектива и окуляра, а  $\Delta - f_2 \approx \Delta$ ), при аккомодации глаза на расстояние наилучшего зрения увеличение микроскопа

$$\gamma = \Gamma = \Gamma_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}} \approx \frac{\Delta - f_2}{f_1} \cdot \frac{L}{f_2} \approx \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{L}{f_2} \quad (9)$$

Зная увеличение объектива (в стандартных микроскопах оно обычно указано на оправе) и длину тубуса (16 см), можно оценить расстояние от объектива до плоскости, в которой следует располагать предмет. Обычно это 1-3 см.

## 2 Экспериментальная установка

Набор линз, осветитель, экран, зрительная труба, необходимые для моделирования оптических приборов, устанавливаются при помощи рейтеров на оптической скамье. Предметом служит миллиметровая сетка, нанесённая на матовое стекло осветителя.



**Центрирование линз.** При юстировке любых оптических приборов важно правильно центрировать входящие в систему линзы. Проходя через плохо отцентрированную систему линз, лучи света отклоняются в сторону и могут вообще не доходить до глаза наблюдателя. Центрировать линзы следует как по высоте, так и в поперечном направлении (для чего линзы крепятся на поперечных салазках). Подробно с правилами центрировки Вы познакомитесь при выполнении задания.

**Юстировка коллиматора.** При составлении моделей телескопических систем необходимо иметь удалённый объект. В качестве такого объекта обычно используется бесконечно удалённое изображение предмета (шкалы осветителя), установленного в фокальной плоскости положительной линзы. Лучи, выходящие из одной точки предмета, пройдя через линзу, образуют параллельный пучок. Устройство такого рода называется коллиматором. Для юстировки коллиматора удобно использовать вспомогательную зрительную трубу, предварительно настроенную на бесконечность. Передвигая линзу коллиматора вдоль скамьи, добиваются появления резкого изображения предмета в окуляре зрительной трубы.

**Измерение фокусных расстояний линз.** Для того чтобы сознательно моделировать оптические инструменты, нужно знать фокусные расстояния линз, которые могут быть использованы в качестве объектива или окуляра модели. Фокусные расстояния положительных линз проще всего найти с помощью вспомогательной зрительной трубы, установленной на бесконечность. Работа выполняется так же, как при юстировке коллиматора.

При определении фокусного расстояния отрицательной линзы предметом служит изображение сетки, которое даёт вспомогательная положительная линза.

## 3 Ход работы

### 3.1 Определение фокусных расстояний линз с помощью зрительной трубы

**Определение фокусного расстояния собирающих линз** Настроим зрительную трубу на бесконечность. Поставим положительную линзу на расстоянии от предмета примерно равном фокусному. На небольшом расстоянии от линзы закрепим трубу, настроенную на бесконечность, и отцентрируем её по высоте. Диафрагма диаметром  $d = 1$  см, надетая на ближнюю к осветителю линзу, уменьшит сферические aberrации и повысит чёткость изображения.

Передвигая линзу вдоль скамьи, получим в окуляре зрительной трубы изображение предмета — миллиметровой сетки. При этом расстояние между предметом и серединой тонкой линзы (между точками на оправках) равно фокусному.

Таблица 1: Результаты измерения фокусных расстояний линз

$n$	$F_1, \text{cm}$	$F_2, \text{cm}$	тип линзы
1	8	8.2	соб.
2	10	10	соб.
3	18,8	19,3	соб.
4	32,5	32,5	соб.
5	-9	-9	рас.

**Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы** Для определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы сначала получим на экране увеличенное изображение сетки при помощи одной короткофокусной положительной линзы. Измерим расстояние между линзой и экраном  $a_0 = 33.7$  см. Разместим сразу за экраном трубу, настроенную на бесконечность, и закрепим её. Уберём экран и поставьте на его место исследуемую рассеивающую линзу (рис. 8). Перемещая рассеивающую линзу, найдите в окуляре зрительной трубы резкое изображение сетки.

Измерив расстояние между линзами  $l = 24.7$  см, рассчитаем

фокусное расстояние рассеивающей линзы  $f = a_0 - l$ . Результаты измерения фокусного расстояния рассеивающих линз:

$$f_{\text{рас}} = 33,7 - 24,7 \approx 9 \text{ см}$$

За погрешность измерений берем предел в 0.5 см, что логично из таблицы (1). Кроме того наложим ограничение в  $0.05F$  для получения четкого изображения.

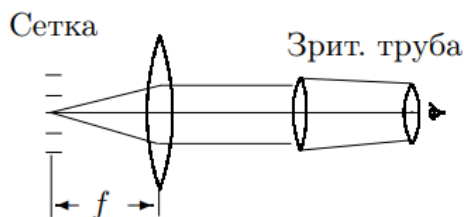


Рис. 3.1: Определение фокусного расстояния собирающей линзы  
подпись к рисунку

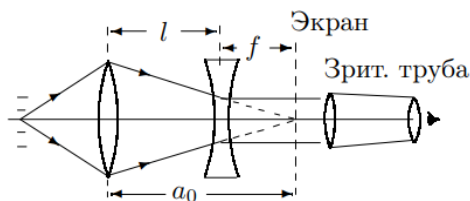


Рис. 3.2: Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

### 3.2 Моделирование трубы Кеплера

Рассмотрим ход лучей в трубе Кеплера и найдём увеличение оптической схемы, изображенной на рисунке 1.1. 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

$$N = \frac{\tan \varphi_2}{\tan \varphi_1}, \quad (10)$$

но также из рис. 3.3 следует, что :

$$N_\tau = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{D_1}{D_2}, \quad (11)$$

где  $D_1$  - ширина пучка, прошедшего через объектив, а  $D_2$  - ширина пучка, вышедшего из окуляра

Построим оптическую систему из коллиматора и непосредственно трубы Кеплера.

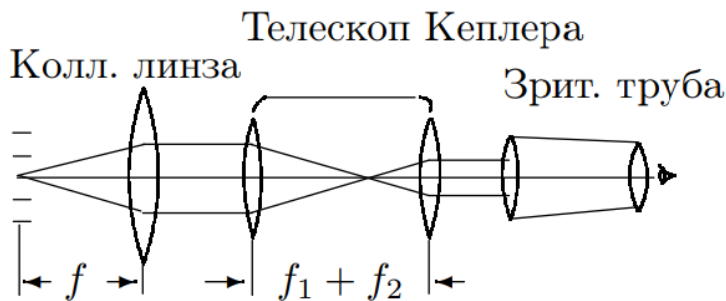


Рис. 3.3: Схема трубы Кеплера

Параметры действующих линз:

$$f_1 = 32.5 \text{ см} \quad f_2 = 8 \text{ см}$$

Найдём увеличение трубы Кеплера непосредственно: пусть  $h_1$  - размер ячейки миллиметровой сетки без телескопа,  $h_2$  - с телескопом

$$h_1 = 9 \text{ мал. дел.}, \quad h_2 = 34 \text{ мал. дел.}$$
$$N_\tau = -\frac{h_2}{h_1} \approx 3,7 \pm 0,53$$

При этом по формуле (2) также

$$N_\tau = -\frac{f_1}{f_2} \approx 4,06 \pm 0,51$$

Кроме того существует еще один способ найти увеличение: частное  $D_1$  - диаметр объектива и  $D_2$  - диаметр его изображения.

$$N_\tau = -\frac{D_2}{D_1} = -\frac{3,4}{0,8} \approx -4,25 \pm 0,62$$

### 3.3 Моделирование трубы Галилея

Труба Галилея получается из трубы Кеплера заменой собирающей линзы окуляра рассеивающей. Формулы для увеличения, соответственно, остаются теми же:

$$N_{\tau} = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{D_1}{D_2} = -\frac{h_2}{h_1} \quad (12)$$

Заменим собирающую линзу с фокусным расстоянием  $f_2 = 8$  см рассеивающей с фокусным расстоянием  $f_2 = 9$  см. Проведём те же операции, что и для трубы Кеплера:

$$\begin{aligned} h_1 &= 9 \text{ малых дел.}, & h_2 &= 30 \text{ малых дел.} \\ N_{\tau} &= -\frac{h_2}{h_1} \approx -3,33 \pm 0,46 \end{aligned}$$

При этом выполняется так же:

$$N_{\tau} = -\frac{f_1}{f_2} \approx -3,61 \pm 0,43$$

Полученные значения хорошо совпадают.

### 3.4 Моделирование микроскопа

Для создания модели микроскопа с увеличением  $N_M = -5$  (минус, т.к. изображение перевернуто) отберём самые короткофокусные линзы из набора. Рассчитаем необходимый интервал  $\Delta$  и длину тубуса  $l_12$  по формулам:

$$N_m = -\frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{L}{f_2} \rightarrow \Delta = -\frac{N_m f_1 f_2}{L}$$

Где  $L = 25$  см - расстояние наилучшего зрения нормального.

Получаем, что  $\Delta = 16$  см. Затем  $l_12 = \Delta + f_1 + f_2 = 34$  см. Таким образом:

$$N_m = -\frac{h_2 L}{h_1 f} = -\frac{31 \cdot 25}{9 \cdot 18,8} \approx -4,58 \pm 1,02$$

## 4 Вывод

В ходе работы были определены фокусные расстояния собирающих и рассеивающих линз с помощью зрительной трубы.

Из этих линз далее сконструированы следующие оптические приборы: труба Кеплера, труба Галилея, микроскоп.

Были определены их увеличения и проведено сравнение с её действительным значением. В пределах погрешности теоретическое значение хорошо совпадает с практическим.