



Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ УВЕЛИЧЕНИЯ

Лабораторная работа № 5.2

МОСКВА 2005

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

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. 1–3.

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 плоскости. 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<sup>1</sup>, расстояние  $d$  даже для одного и того же наблюдателя может существенно изменяться от опыта к опыту. При

<sup>1</sup>Область аккомодации нормального человеческого глаза простирается с расстояния около 10 см до бесконечности.

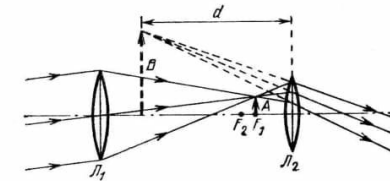


Рис. 1. Ход лучей в трубе Кеплера

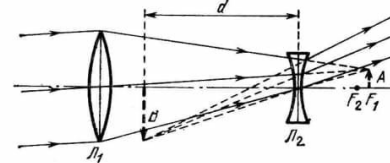


Рис. 2. Ход лучей в трубе Галилея

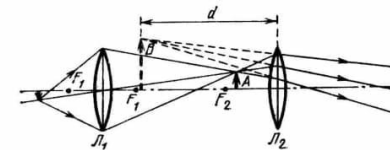


Рис. 3. Ход лучей в микроскопе

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.

**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*.

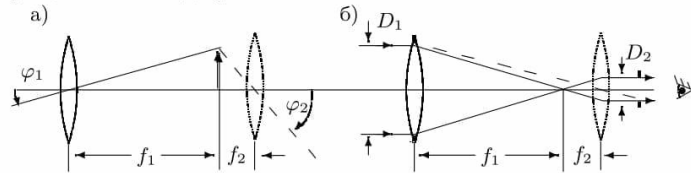


Рис. 4. К расчёту увеличения зрительной трубы Кеплера

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. 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. 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. 4б). Ширина пучка, прошедшего 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.

**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

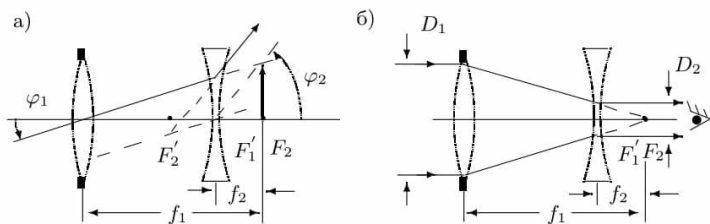


Рис. 5. К расчёту увеличения галилеевой зрительной трубы

(точнее — алгебраической сумме) их фокусных расстояний (рис. 5а), 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.

**Увеличение микроскопа.** Рассмотрим ход лучей в микроскопе в предположении, что глаз наблюдателя аккомодирован на бесконечность (рис. 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).

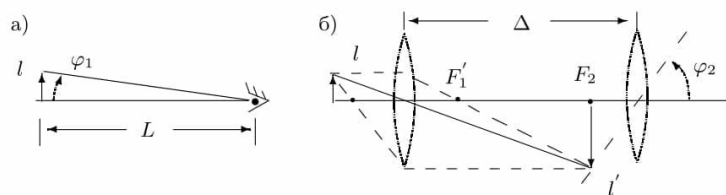


Рис. 6. К расчёту увеличения микроскопа

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  $\Delta = 16$  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  $\Gamma$ :

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{l''/L}{l/L} = \frac{l''}{l} = \Gamma,$$

где  $l''$  — размер окончательного изображения.

Можно оценить увеличение микроскопа как произведение увеличений объектива  $\Gamma_{об}$  и окуляра  $\Gamma_{ок}$ :

$$\gamma = \Gamma = \frac{l''}{l} = \frac{l'}{l} \frac{l''}{l'} = \Gamma_{об} \cdot \Gamma_{ок}.$$

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

$$\gamma = \Gamma = \Gamma_{об} \cdot \Gamma_{ок} \approx \frac{\Delta - f_2}{f_1} \cdot \frac{L}{f_2} \approx \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{L}{f_2}. \quad (8)$$

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.

**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.

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается определить фокусные расстояния линз, смоделировать трубу Галилея, трубу Кеплера, микроскоп и определить их увеличения.

**Не следует касаться поверхности линз пальцами, потому что царапины, пылинки или жирные пятна на стекле рассеивают световые лучи и ухудшают чёткость изображения.**

## I. Центрировка элементов оптической системы

1. Из имеющегося набора отберите собирающие линзы; для этого, держа линзу в одной руке, получите на ладони другой изображение любого удалённого объекта (окна, лампочки) и оцените на глаз фокусное расстояние. Линза, которая не даёт действительного изображения, — рассеивающая. Запишите номера линз и приближённые значения фокусных расстояний.
2. Соберите и отцентрируйте установку. Для этого на одном конце оптической скамьи установите предмет — осветитель с сеткой — и вплотную к нему — экран на рейтере. При юстировке системы следует соблюдать следующие простые правила: все винты рейтеров на скамье и винты поперечных салазок должны находиться с одной стороны оптической скамьи (со стороны экспериментатора). После всякого перемещения рейтеров вдоль скамьи они должны надёжно закрепляться винтами.

Отрегулируйте высоту экрана так, чтобы его центр совпадал с центром яркого круглого пятна от осветителя. 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.

3. Отодвиньте экран от осветителя и разместите в промежутке рейтер с одной из собирающих линз.

Передвигая линзу и экран вдоль скамьи, добейтесь чёткого изображения края диафрагмы осветителя или миллиметровой шкалы на экране. Закрепите рейтеры. Перемещая линзу поперёк оптической оси, приведите центр изображения к центру экрана.

Оптические оси линз устанавливаются параллельно ребру оптической скамьи на глаз.

4. Таким же образом центрируются остальные собирающие линзы. Для центрировки рассеивающих линз воспользуйтесь уже отцентрированной положительной линзой, расположив её впереди отрицательной. Способ центрировки рассеивающих линз продумайте самостоятельно.

## II. Определение фокусных расстояний тонких линз с помощью зрительной трубы

6. Поставьте положительную линзу на расстоянии от предмета примерно равном фокусному. На небольшом расстоянии от линзы закрепите трубу, настроенную на бесконечность (рис. 7), и отцентрируйте её по высоте. Диффрагма диаметром  $d = 1$  см, надетая на ближнюю к осветителю линзу, уменьшит сферические aberrации и повысит чёткость изображения.

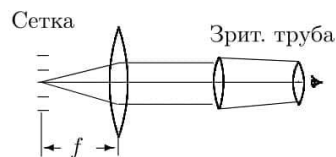


Рис. 7. Определение фокусного расстояния собирающей линзы

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

7. Поверните линзу другой стороной к источнику и повторите измерения фокусного расстояния. По результатам измерений сделайте вывод, можно ли считать линзу тонкой.
8. Измерьте фокусные расстояния остальных положительных линз при помощи зрительной трубы.
9. Для определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы сначала получите на экране увеличенное изображение сетки при помощи одной короткофокусной положительной линзы. Измерьте расстояние  $a_0$  между линзой и экраном (удобно взять  $a_0 \approx 30$  см).

10. Разместите сразу за экраном трубу, настроенную на бесконечность, и закрепите её. Уберите экран и поставьте на его место исследуемую рассеивающую линзу (рис. 8). Отцентрируйте световой пучок с помощью листа бумаги. Перемещая рассеивающую линзу, найдите в окуляре зрительной трубы резкое изображение сетки. Если изображение недостаточно чёткое — задиффрагмируйте

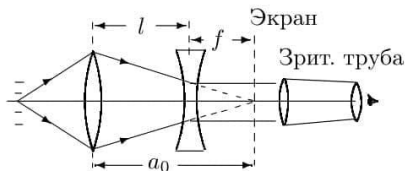


Рис. 8. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Если изображение недостаточно чёткое — задиффрагмируйте

ближнюю к осветителю линзу и заново проведите настройку с экраном.

Подберите оптимальную яркость источника.

Измерив расстояние между линзами  $l$ , рассчитайте фокусное расстояние рассеивающей линзы  $f = a_0 - l$ .

11. Поверните рассеивающую линзу другой стороной к источнику и повторите измерения.

В работе используются следующие линзы: № 9 ( $f = 347$  мм), № 11 ( $f = 81$  мм), № 4 ( $f = 70$  мм), № 2 ( $f = 36$  мм), № 8 ( $f = 162$  мм). № 7

### Моделирование трубы Кеплера

1. На одном конце оптической скамьи укрепить осветитель со стрелой. Стрелка (предмет) находится на расстоянии 120 мм от оси осветителя, отмеряемом по шкале.
2. Линзу № 7 следует установить так, чтобы стрелка осветителя оказалась приблизительно в ее фокальной плоскости ( $f = 172$  мм).
3. Установить на скамье вспомогательную зрительную трубу.
13. Настройте коллиматор при помощи вспомогательной зрительной трубы так же, как Вы делали это при измерении фокусных расстояний. Чёткость изображения повысится, если надеть на коллиматор диффрагму диаметром 1 см и уменьшить яркость осветителя.

#### Линзу-объектив № 8

расположите почти вплотную к линзе коллиматора,

линзу-окуляр № 2 расположите на расстоянии,

примерно равном сумме фокусных расстояний обеих линз трубы.

15. Закрепите вспомогательную зрительную трубу за окуляром модели и отцентрируйте световое пятно при помощи листа бумаги.

Слегка перемещая окуляр модели вдоль оптической скамьи, получите изображение сетки в объективе вспомогательной трубы.

Измерьте расстояние между объективом и окуляром телескопа и сравните его с суммой фокусных расстояний.



#### IV. Увеличение телескопа

16. Рассчитайте увеличение исследуемой модели по формуле (4) через отношение фокусов.
18. Определите увеличение телескопа, измерив диаметр оправы его объектива и диаметр изображения этой оправы в окуляре. Для этого отодвиньте вспомогательную трубу и расположите экран за окуляром телескопа. Снимите диафрагму с коллиматора и убедитесь, что световое пятно полностью освещает объектив телескопа и проходит через окуляр. Отдвигая экран от окуляра, получите на нём чёткое изображение оправы объектива. Поднеся к объективу какой-нибудь предмет (например, край линейки), убедитесь, что наблюдается именно изображение оправы объектива. Измерьте диаметр объектива и диаметр его изображения.

Можно дополнительно определить увеличение, измерив расстояния от окуляра до объектива  $a_1$  и до экрана  $a_2$ .

Рассчитайте увеличение трубы через диаметры по формуле (4) и сравните результаты, полученные разными методами.

#### V. Труба Галилея

19. Переход от трубы Кеплера к трубе Галилея легко осуществить, если, не трогая коллиматора и объектива, вместо собирающей окулярной линзы поставить рассеивающую линзу №11 на расстоянии от объектива, равном разности фокусов объектива и окуляра. Дальнейшие измерения выполняются в том же порядке, что и в случае астрономической трубы (см. пп. 15–17, но не 18!).

#### Моделирование микроскопа

1. На оптической скамье укрепить осветитель. Предметом является стрелка на матовом стекле, которая находится на расстоянии 120 мм от оси осветителя.
2. Установить линзу-объектив № 2 на расстоянии 50 мм от предмета (стрелки). Это расстояние несколько больше ее фокусного расстояния  $f_{об} = 36$  мм.

3. За линзой поместить экран и найти промежуточное, четкое, увеличенное изображение стрелки.
  4. Убрав экран, поместить на это же место оптической скамьи линзу – окуляр № 4.
  5. Наблюдая глазом в линзу – окуляр № 4 ( $f_{ок} = 70$  мм) на расстоянии наилучшего зрения ( $l = 0,25$  м) и незначительно смещая ее, получить увеличенное четкое изображение стрелки в окуляре.
  6. Измерить расстояние между линзами  $d$ , вычислить  $\Delta$  по формуле  $\Delta = d - (f_{ок} + f_{об})$ .
  7. Вычислить увеличение полученного микроскопа по формуле (5).
23. Оцените погрешности в определении увеличения всех моделей оптических приборов.

#### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
  2. Что такое линза? Что такое оптический центр и оптическая ось линзы? Как различают линзы по форме? По оптическим свойствам?
  3. Назовите основные характеристики линзы: фокусное расстояние, оптическая сила.
  4. Для каких целей используется микроскоп и зрительная труба?
  5. Что называется тубусом микроскопа?
  6. Запишите формулу тонкой линзы и поясните ее.
1. Опишите методику измерения фокусных расстояний отрицательных линз.
  2. При каком условии угловое увеличение микроскопа равно линейному?
  3. Получите приближённую формулу (8) увеличения микроскопа и оцените увеличение объектива и окуляра, если  $f_1 = 2$  см,  $f_2 = 2,5$  см.
  4. Выведите формулу (9) и объясните соответствующий метод измерения увеличения микроскопа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. — М.: Наука, 1980. Гл. II, §§ 21–24.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. Гл. XIV, §§ 87–93.
- 3\* Дитчберн Р. Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. Гл. 7.