

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 аккомодации¹, расстояние d даже для одного и того же наблюдателя может существенно изменяться от опыта к опыту. При

¹Область аккомодации нормального человеческого глаза простирается с расстояния около 10 см до бесконечности.

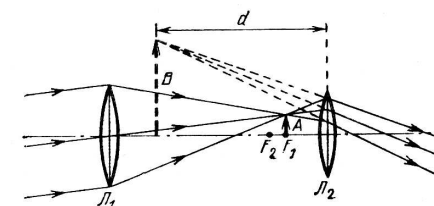


Рис. 1. Ход лучей в трубе Кеплера

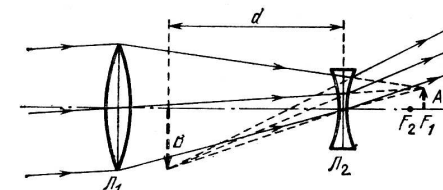


Рис. 2. Ход лучей в трубе Галилея

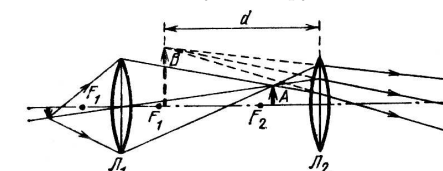


Рис. 3. Ход лучей в микроскопе

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*.

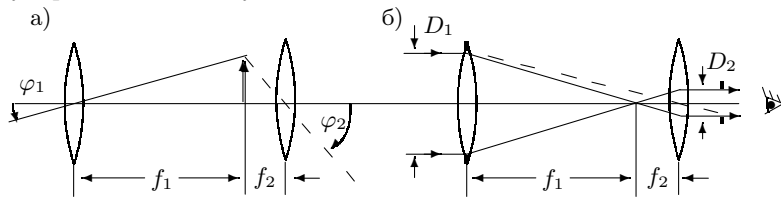


Рис. 4. К расчёту увеличения зрительной трубы Кеплера

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 φ_1 , а пучок, выходящий из окуляра, — угол φ_2 . Увеличение γ зрительной трубы по определению равно

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

Строго говоря, φ_1 — это угловой размер объекта, рассматриваемого невооружённым глазом, но при наблюдении бесконечно удалённого объекта с помощью зрительной трубы угол φ_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

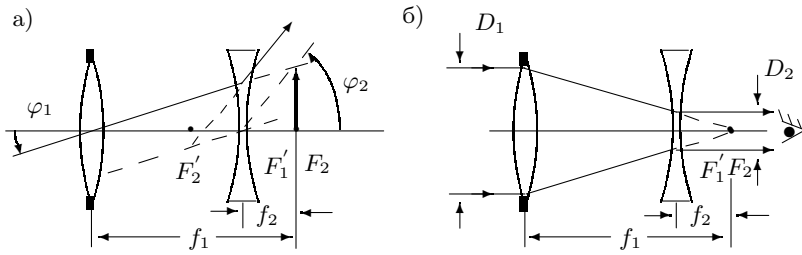


Рис. 5. К расчёту увеличения галилеевой зрительной трубы

(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 φ_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, Δ — длина тубуса (расстояние между линзами).

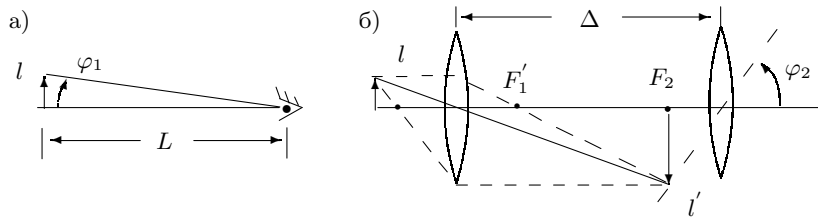


Рис. 6. К расчёту увеличения микроскопа

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 γ равно линейному Γ :

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

где l'' — размер окончательного изображения.

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

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

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

5. Для определения фокусных расстояний линз с помощью зрительной трубы (рис. 7) необходимо настроить трубу на бесконечность. Эту настройку проще всего осуществить, наведя трубу на удалённый объект (например, на окно в конце длинного коридора). Предварительно вращением

глазной линзы окуляра трубы настройтесь на резкое видение окулярной шкалы. Не следует настраивать трубу на предметы, расположенные за оконным стеклом, т.к. оконное стекло часто оказывается недостаточно плоским.

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. Диафрагма диаметром $d = 1$ см, надета на ближнюю к осветителю линзу, уменьшит сферические aberrации и повысит чёткость изображения.

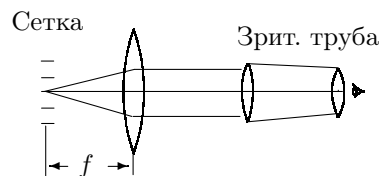


Рис. 7. Определение фокусного расстояния собирающей линзы

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).

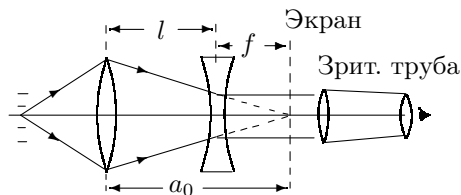


Рис. 8. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

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 — задиафрагмируйте

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.

III. Труба Кеплера

12. Из имеющегося набора отберите две собирающих линзы для создания модели зрительной трубы Кеплера с увеличением 2–3 (рис. 9). В качестве коллиматора используйте линзу с фокусным расстоянием $f \approx 15$ –20 см (при этих условиях размер изображения предмета не будет превышать размера поля зрения вспомогательной зрительной трубы).

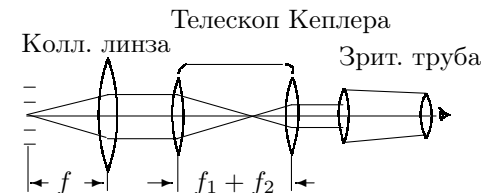


Рис. 9. Модель телескопа

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 диафрагму диаметром 1 см и уменьшить яркость осветителя.

Для последующих расчётов увеличения определите размер изображения l_1 одного миллиметра шкалы осветителя в делениях окулярной шкалы зрительной трубы. Очевидно, $l_1 = k \operatorname{tg} \varphi_1$, где k — некоторый коэффициент, характеризующий увеличение зрительной трубы, φ_1 — угловой размер изображения миллиметрового деления шкалы осветителя, наблюдаемого через коллиматор.

14. Линзу с максимальным фокусным расстоянием — объектив модели — расположите почти вплотную к линзе коллиматора, окуляр — 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.
17. Для определения увеличения телескопа через тангенсы углов, под которыми объект виден через трубу и без неё, определите размер l_2 изображения миллиметрового деления шкалы осветителя в делениях окулярной шкалы вспомогательной трубы: $l_2 = k \operatorname{tg} \varphi_2$. Здесь φ_2 — угловой размер изображения миллиметрового деления шкалы, наблюдаемой через исследуемую трубу.

Сравнивая угловые размеры изображения с телескопом и без него, определите увеличение телескопа по формуле (1).

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. Отодвигая 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 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!).

VI. Модель микроскопа

20. Для создания модели микроскопа с пятикратным увеличением используйте самые короткофокусные линзы из набора. Рассчитайте необходимую длину тубуса Δ по формуле (7).

Расположите объектив и окуляр на соответствующем расстоянии Δ друг от друга (рис. 10) и закрепите рейтеры. Сфокусируйте модель микроскопа на сетку осветителя. Для этого перемещайте осветитель вдоль

оптической скамьи до тех пор, пока в окуляре микроскопа не появится отчётливое увеличенное изображение сетки.

21. Расположите за окуляром модели микроскопа зрительную трубу, настроенную на бесконечность. Слегка перемещая осветитель, получите в поле зрения трубы изображение миллиметровой шкалы осветителя. Чёткость изображения повысится, если надеть на объектив микроскопа диафрагму диаметром 1 см и уменьшить яркость осветителя.

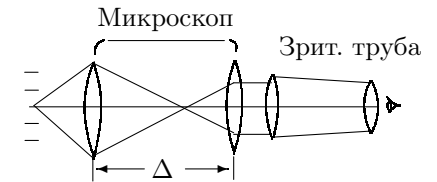


Рис. 10. Модель микроскопа

22. Для экспериментального определения увеличения микроскопа измерьте величину изображения l_2 миллиметрового деления предметной шкалы в делениях окулярной шкалы зрительной трубы. Используя результат аналогичных измерений с коллиматорной линзой (l_1 в п. 13), фокус f которой известен, рассчитайте увеличение микроскопа по формуле

$$\gamma = \frac{l_2 L}{l_1 f}, \quad (9)$$

где L — расстояние наилучшего зрения нормального глаза. Сравните результат с теоретическим расчётом.

23. Оцените погрешности в определении увеличения всех моделей оптических приборов.

Контрольные вопросы

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.