

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.1

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

*Цель работы:* знакомство с элементами оптических систем (линзами, зеркалами и пр.) и измерение их параметров; конструирование простейших оптических систем.

*Литература:* [3] 4.1–4.5, 4.7, 4.9–4.11; [16] Гл.3, §3.3; [23] Гл. XII, §§ 68 – 72; 76 – 78; Гл. XIII ; Гл. XIV.

*Приборы и принадлежности:* оптическая скамья с набором деталей для конструирования моделей оптических систем.

### ВВЕДЕНИЕ

Всякая оптическая система предназначена для преобразования электромагнитных волн светового диапазона ( $\lambda_{\text{св}} \sim 400 - 700$  нм) с целью использования энергии этих волн и переносимой ими информации. Во многих практически важных случаях поведение световой волны можно описать на языке **лучевой**, или **геометрической оптики**. Законы лучевой оптики позволяют успешно решать оптические задачи методами геометрических построений.

Данная работа состоит из двух частей. В первой части предлагается ознакомиться с элементами оптических систем, научиться определять фокусные расстояния линз и зеркал, а также получать с их помощью пучки нужной конфигурации. Во второй части работы требуется собрать ряд оптических систем, иллюстрирующих физические принципы действия основных оптических инструментов – телескопа, микроскопа и проектора.

Для успешного выполнения работы необходимо знать законы отражения и преломления света как на плоской, так и на сферической поверхности раздела двух сред, формулы тонкой линзы и сферического зеркала (в приближении оптики приосевых пучков), а также иметь представление о том, чем определяется увеличение простейших двухкомпонентных оптических систем – телескопа и микроскопа.

**Выполнение каждого экспериментального задания должно обязательно сопровождаться изображением соответствующего хода световых лучей**, позволяющем судить о реальном преобразовании пучка данной оптической системой.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рисунке 1 представлена фотография экспериментальной установки. Установка представляет собою оптическую скамью с рейтерами, в которых можно устанавливать источник света (лампу с нитью накала малого размера типа РН-8) и различные элементы оптических систем – линзы, призмы, зеркала и пр. Оправы линз и зеркал снабжены регулировочными винтами, что позволяет устанавливать оптические центры элементов на одной прямой – оптической оси системы.

При выполнении экспериментальных заданий необходимо с помощью точной настройки (юстировки) системы добиваться возможно более полной соосности расположения ее элементов.

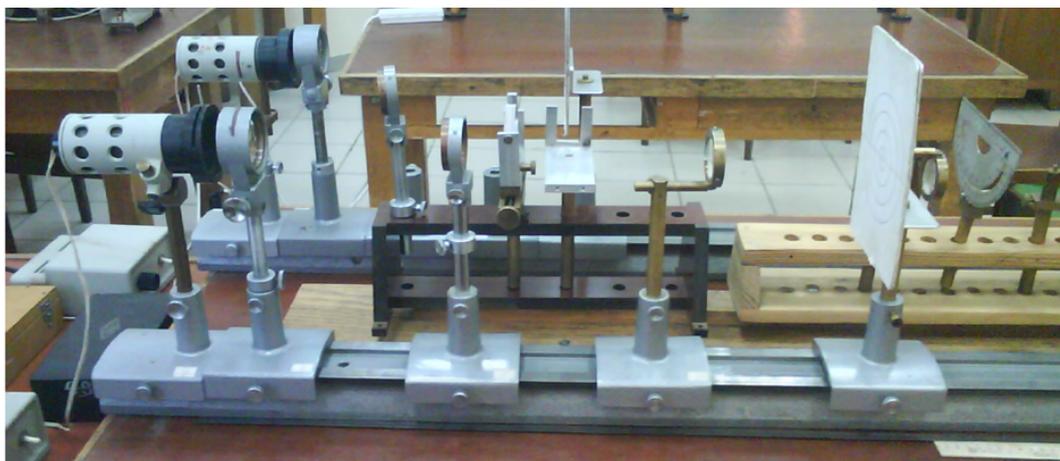


Рисунок 1. Экспериментальная установка.

## ЧАСТЬ I ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Задание 1. Получение расходящегося светового пучка.

Используя "точечный" источник света – нить накала лампы или светодиод – получите расходящийся световой пучок. Регулируя положение осветителя, добейтесь того, чтобы ось пучка была перпендикулярна плоскости экрана (при отодвигании экрана от осветителя граница светового круга должна совпадать с одной из нарисованных на экране концентрических окружностей).

### Задание 2. Получение параллельного светового пучка.

Используя линзу №1, добейтесь того, чтобы при перемещении экрана на 30 – 50 см от линзы диаметр освещенного круга практически не возрастал, а центр круга не смещался относительно центра экрана. Измерьте расстояние от середины оправы линзы до риски на корпусе осветителя. Оно равно фокусному расстоянию линзы.

*Замечание:* на оправках линз имеются винты для небольших поворотов линзы. Ставьте линзы в рейтер винтом к себе.

### Задание 3. Получение сходящегося светового пучка и измерение фокусного расстояния линзы.

В сформированный ранее параллельный пучок поместите линзу №2 и получите на экране минимальное световое пятно, расположенное точно в центре экрана. Используя соотношения геометрической оптики, найдите фокусное расстояние линзы № 2 для двух случаев положения экрана и линзы в пределах параллельного пучка

### Задание 4. Получение изображения предмета на экране.

Используя линзу №1, получите в центре экрана сначала **уменьшенное**, а затем **увеличенное** изображение нити накала лампы (при этом следует уменьшить диаметр диафрагмы осветителя до 5 мм, а накал нити сделать сравнительно небольшим.).

Вставьте в щель осветителя матовое стекло, чтобы убрать изображение нити накала, и пластинку с буквой **F** (диафрагму осветителя надо раскрыть, накал нити увеличить). Перемещая линзу №1 и экран, получите поочередно уменьшенное, увеличенное и равное

изображения буквы на экране. Нарисуйте ход лучей для каждого из трех случаев и, измерив нужные расстояния, вычислите с помощью формулы линзы фокусное расстояние линзы №1. Оцените погрешность полученной величины.

### **Задание 5. Исследование рассеивающей линзы.**

Снимите со скамьи линзу №1 и выньте объект из щели осветителя. Выбрав из имеющихся в наборе линз **рассеивающую**, поставьте ее между осветителем и экраном, получив на экране теневое изображение линзы в оправе. Построив ход лучей, объясните, почему изображение имеет вид темного круга, окруженного при определенных условиях (каких?) **светлым** кольцом (ореолом).

### **Задание 6. Превращение параллельного пучка в расходящийся.**

Сформируйте параллельный пучок (см. задание 2) и при помощи рассеивающей линзы превратите его в расходящийся, следя за тем, чтобы ось пучка проходила точно через центр экрана. Постройте ход лучей от источника до экрана.

### **Задание 7. Измерение фокусного расстояния рассеивающей линзы с помощью собирающей линзы.**

Вставьте в щель осветителя матовое стекло и пластинку с буквой **Ф**. Убедитесь в том, что с помощью одной рассеивающей линзы невозможно получить изображение объекта на экране ни при каком расположении линзы и экрана.

Уберите рассеивающую линзу и, поставив вместо нее собирающую, получите на экране изображение объекта. Отметьте в протоколе, какое изображение вы видите: прямое или перевернутое, увеличенное или уменьшенное. Добавьте в схему рассеивающую линзу (см. рис. 3.1.1), отодвиньте экран и вновь получите на нем изображение объекта. Запишите в протоколе, как изменилось изображение по сравнению с предыдущим. Из рисунка 3.1.1 видно, что "старое" изображение  $S'$  можно считать предметом, "новое" изображение которого  $S''$  получено с помощью рассеивающей линзы ( $L_{\text{расс}}$ ). Измерив нужные отрезки, найдите с помощью формулы линзы фокусное расстояние рассеивающей линзы.

Повторите измерения с новыми положениями линз и экрана.

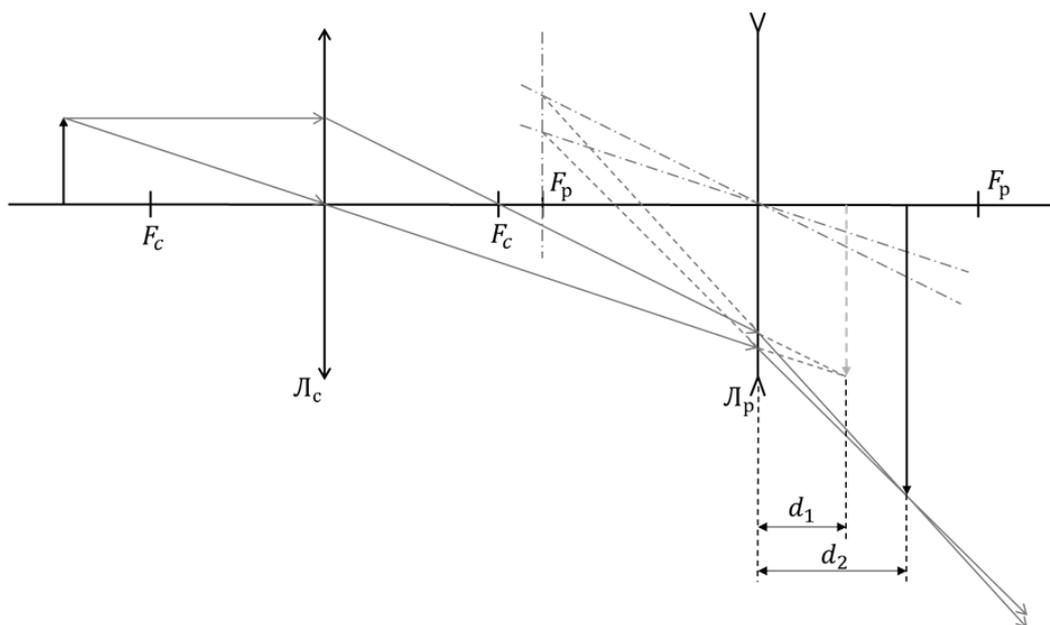


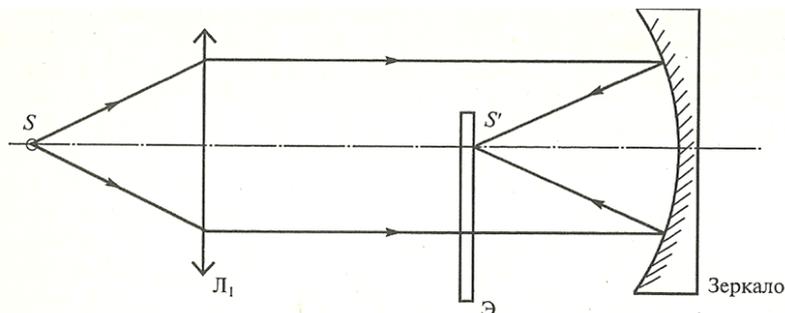
Рис. 3.1.1

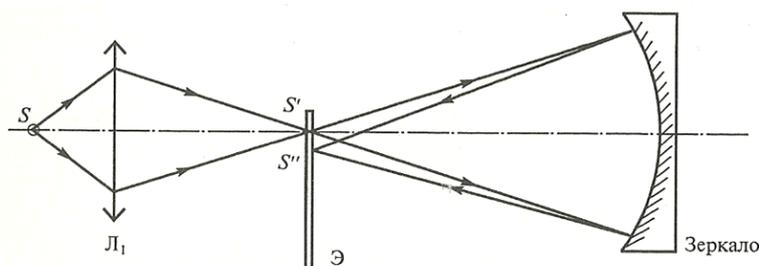
### Задание 8. Изучение цилиндрической линзы.

Сформируйте параллельный пучок и, поставив цилиндрическую линзу, получите на экране сначала **вертикальную**, а затем, повернув линзу в оправе, – **горизонтальную** полосу. Нарисуйте ход лучей (вид сверху и вид сбоку) и подумайте, какой будет форма пучка на значительном расстоянии от линзы. Высказав предположение, проверьте его экспериментально.

### Задание 9. Измерение фокусного расстояния и радиуса кривизны вогнутого зеркала.

Сформируйте параллельный пучок. Поставив на пути этого пучка вогнутое зеркало (оно закрепляется в специальном держателе), получите изображение нити лампы на вспомогательном матовом экране, помещенном на оси зеркала (см. рис.3.1.2). Измерив нужный отрезок, найдите фокусное расстояние зеркала.

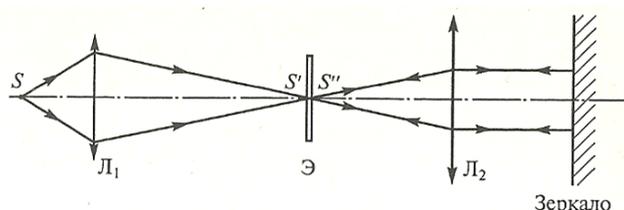




Сформируйте сходящийся пучок (см. рис.3.1.3), получив изображение нити лампы на матовом экране. Поставив за экраном вогнутое зеркало, перемещайте его до тех пор, пока на экране не появится еще одно изображение нити (для получения этого изображения необходимо слегка менять наклон зеркала, а также поворачивать его). В этом случае говорят, что выполнено условие **автоколлимации**. Измерив нужное расстояние, найдите радиус кривизны зеркала.

### Задание 10. Измерение фокусного расстояния линзы методом автоколлимации.

Соберите схему согласно рисунку 3.1.4 (источник – нить лампы). С помощью линзы №1 получите на матовом экране изображение нити лампы. Далее на скамье поместите исследуемую линзу №2, а за ней **плоское** зеркало. Если изображение находится в фокусе линзы №2, то пучок после этой линзы будет параллельным и после отражения от зеркала вновь пройдет линзу №2 и сойдется в плоскости экрана, образуя еще одно изображение нити, почти совпадающее с первым (автоколлимация).



Перемещая линзу №2 и слегка поворачивая зеркало, добейтесь описанной ситуации и найдите фокусное расстояние линзы №2.

### Задание 11. Использование оборачивающей призмы.

Получите с помощью собирающей линзы (№1 или №2) слегка увеличенное **перевернутое** изображение предмета (буквы) на экране. Поставьте между линзой и экраном **прямоугольную призму** (прямым углом вниз) и получите на экране **прямое** изображение предмета (экран при этом следует слегка сместить). Нарисуйте ход лучей и объясните, почему необходимо сместить экран.

### Задание 12. Измерение фокусного расстояния выпуклого зеркала.

Подумайте, каким образом можно измерить фокусное расстояние выпуклого зеркала. Нарисуйте ход лучей для предложенного Вами метода и проверьте решение экспериментально.

## ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ (ЧАСТЬ I)

1. Можно ли получить строго параллельный световой пучок?
2. Какое изображение предмета – действительное или мнимое – мы наблюдаем на экране?
3. Проверьте с помощью построений, можно ли, используя собирающую линзу, получить:  
а) прямое действительное изображение предмета; б) прямое увеличенное изображение;  
в) прямое уменьшенное изображение.
4. Проверьте с помощью построений, можно ли, используя рассеивающую линзу, получить: а) действительное изображение предмета; б) увеличенное изображение; в) прямое изображение.
5. В каких практических случаях целесообразно применять цилиндрическую линзу?
6. Улучшится ли действие оборачивающей призмы, если ее большую грань посеребрить?
7. Можно ли измерить методом автоколлимации фокусное расстояние рассеивающей линзы?
8. Какие изображения (прямые, перевернутые, увеличенные и т.д.) можно получить с помощью вогнутого зеркала?
9. Какие изображения можно получить с помощью выпуклого зеркала?

## ЧАСТЬ II ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Оптические системы могут состоять из одного элемента (одна линза или зеркало), из двух-трех линз (окуляр, театральные бинокль) и, наконец, из многих линз и зеркал (микроскоп, спектрограф и т.д.). В работе предлагается ознакомиться с простейшими системами, схемы которых лежат в основе конструирования самых распространенных оптических приборов – **телескопа** (зрительной трубы), **микроскопа** и **проекторного аппарата** (диапроектора).

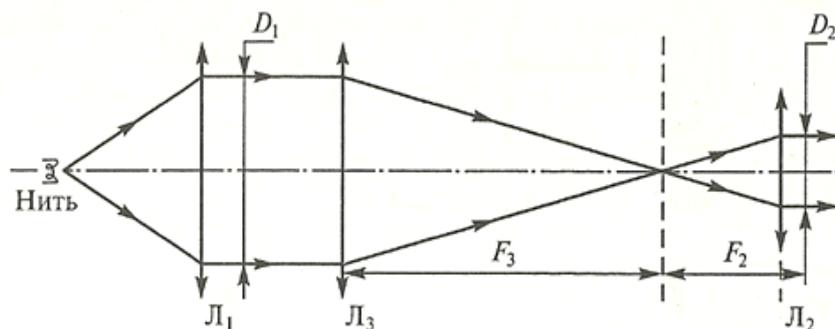
**Выполнение всех заданий должно сопровождаться построением хода лучей** и указанием параметров используемых линз, зеркал и прочих элементов.

### 1. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

#### Задание 1.1. Осуществление телескопического хода лучей.

Сформируйте параллельный световой пучок, используя линзу №1 (в дальнейшем будем использовать обозначения – линза 1, линза 2 и т.д.), а в качестве источника – нить лампы (см. задание 2, часть I) Подобную операцию часто называют **коллимацией** светового пучка, а осуществляющую ее оптическую схему – коллиматором.

На пути полученного пучка поставьте собирающую линзу 3 (на расстоянии порядка 20 см от линзы 1) и получите пучок, сходящийся в ее фокусе (см. рис. 3.1.5). На экране, помещенном в этом месте, вы увидите четкое изображение источника – нити накала или светодиода. Убрав экран, далее на пути вновь расходящегося пучка поставьте линзу 2 (ее фокусное расстояние определено при выполнении части I настоящей работы) так, чтобы фокусы линз 2 и 3 совпали. Убедитесь, что за линзой 2 распространяется по-прежнему параллельный пучок<sup>1</sup>. Полученная таким образом система линз 3 и 2 является частным случаем **телескопической** системы, преобразующей входящий в нее параллельный пучок опять-таки в параллельный, другого диаметра.



**Угловое увеличение** оптической системы в нашем случае:

$$N_{\text{тел}} = F_3/F_2 \quad (1)$$

или, как следует из рис.3.1.5,

$$N_{\text{тел}} = D_2/D_1, \quad (2)$$

<sup>1</sup>Строгая параллельность, разумеется, недостижима вследствие конечных размеров источника, aberrаций линз, дифракционного расхождения и пр., поэтому следует считать хорошим приближением ситуацию, при которой на протяжении 15 – 20 см диаметр пучка изменяется на 2 – 3 мм.

где  $D_2/D_1$  – диаметры световых пучков.

Рассчитайте угловое увеличение полученной системы используя формулы 1 и 2, предварительно измерив диаметры входящего и выходящего пучков.

### Задание 1.2. Моделирование зрительной трубы Кеплера.

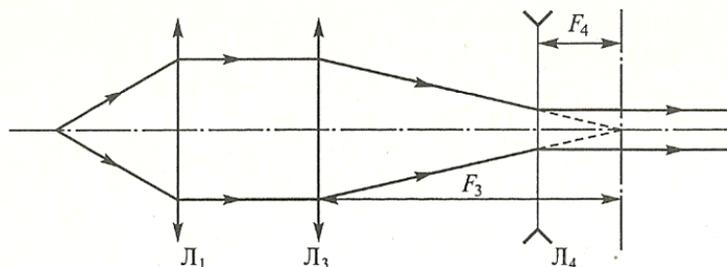
Сформируйте параллельный пучок, используя в качестве источника освещенный объект в виде небольшой буквы<sup>2</sup>. Для этого вставьте в щель осветителя матовое стекло и пластинку с буквой, а коллиматорную линзу 1 переместите так, чтобы объект-источник оказался в ее фокусе. Установка объекта в фокусе коллиматорной линзы равносильна удалению его на бесконечно большое расстояние от сконструированной ранее телескопической системы линз 3 и 2.

Не меняя взаимного расположения линз 3 и 2, наблюдайте глазами изображение объекта (буквы) в полученную таким образом зрительную трубу – трубу Кеплера. Линза 3 в этом случае называется **объективом**, а линза 2 – **окуляром**.

Заметьте, что длина трубы Кеплера равна сумме фокусных расстояний объектива и окуляра.

### Задание 1.3. Моделирование трубы Галилея.

Замените собирающую линзу окуляра трубы Кеплера рассеивающей (линза 4), поставив ее так, чтобы система оставалась телескопической (см. рис. 3.1.6). Наблюдайте глазами **прямое** изображение объекта в полученную зрительную трубу – трубу Галилея.



Измерьте длину трубы Галилея и сравните ее с суммой фокусных расстояний объектива и окуляра. Используя формулу 1, рассчитайте угловое увеличение полученной системы.

## 2. Оптические системы лупы и микроскопа

Для наблюдения увеличенного изображения мелких близко расположенных объектов могут применяться системы, состоящие из одной собирающей линзы (в этом случае называемой **лупой**) или из нескольких линз (микроскоп).

Увеличение **лупы** приближенно рассчитывают, зная ее фокусное расстояние  $F_{л}$  и так называемое расстояние наилучшего зрения  $L$ , равное для среднего нормального глаза 250 мм:

$$N_{лупы} = L/F_{лупы} = 250 \text{ мм}/F_{лупы} \text{ (мм)}. \quad (3)$$

Увеличение **микроскопа**, состоящего в простейшем случае из двух линз – **объектива** с фокусным расстоянием  $F_{об}$  и **окуляра** с фокусным расстоянием  $F_{ок}$  – можно рассчитать,

<sup>2</sup>Накал нити лампы должен быть небольшим, чтобы изображение не было чрезмерно ярким.

зная опять-таки расстояние наилучшего зрения  $L$ , а также расстояние между фокусами объектива и окуляра, называемое оптическим интервалом микроскопа  $\Delta$ :

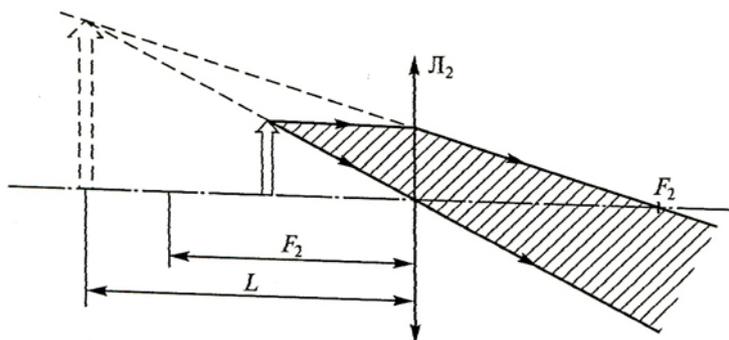
$$N_{\text{микр}} = L\Delta / F_{\text{об}}F_{\text{ок}} \quad (4)$$

Как лупа, так и микроскоп дают **мнимое** изображение предметов; не следует, однако, забывать, что на сетчатке глаза, вооруженного лупой или микроскопом, формируется всегда **действительное** изображение.

Выражения (3) и (4) не являются вполне определенными, так как увеличение вооружающих глаз приборов зависит от параметров глаза, в частности от его оптической силы, которая, как известно, изменяется при рассматривании объектов, находящихся на различных расстояниях от глаза (**аккомодация** глаза).

### Задание 2.1. Изучение лупы и измерение ее увеличения.

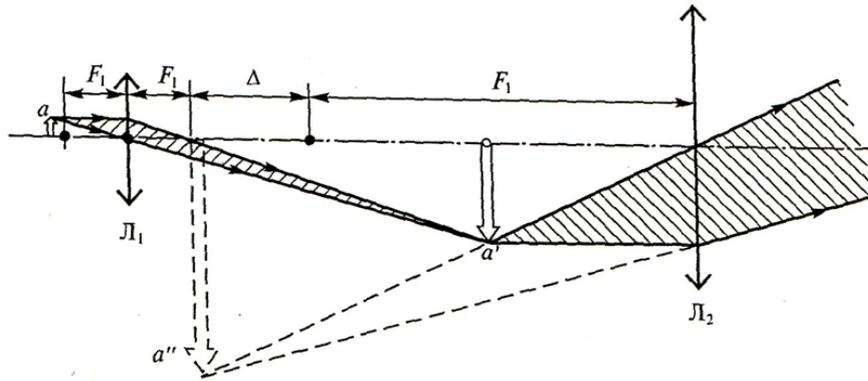
В качестве лупы используйте собирающую линзу 2 (см. рис.3.1.7). Поставьте перед ней (на расстоянии, несколько меньшем фокусного) шкалу с миллиметровыми делениями и наблюдайте, приблизив к линзе глаз, **увеличенное** изображение шкалы.



Зная фокусное расстояние линзы 2, рассчитайте увеличение лупы, пользуясь выражением (3).

### Задание 2.2. Моделирование микроскопа.

1. Соберите схему микроскопа (см. рис. 3.1.8). В качестве объекта используйте шкалу (1 деление = 0,1 мм), нанесенную на стекло, помещенное в прямоугольную оправу. Объект поставьте на столик вблизи осветителя, в щель осветителя вставьте матовое стекло. Поставьте на скамью **объектив** (линзу 1) так, чтобы расстояние между объектом (шкалой в оправе) и объективом было несколько больше (на 2–3 см) фокусного расстояния объектива.



Пользуясь вспомогательным экраном или матовым стеклом на подставке, найдите место, где формируется действительное увеличенное изображение шкалы. Поставьте **окуляр** (линзу 2) так, чтобы рассматривать в него, как в лупу, действительное изображение шкалы (все поле зрения должно быть при этом равномерно освещенным, а деления шкалы – предельно резкими).

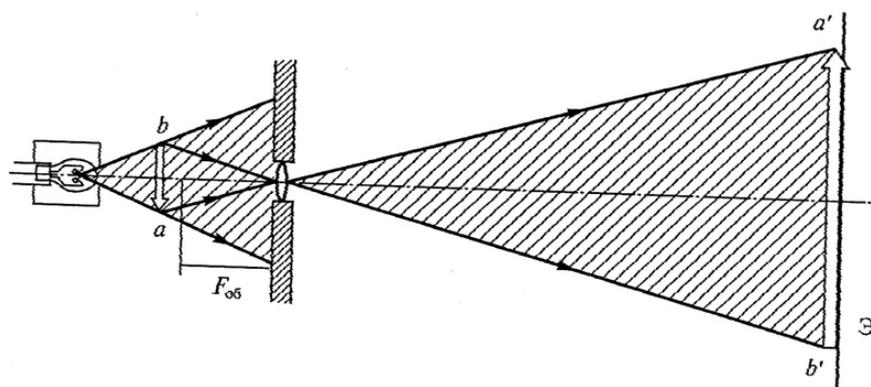
- Поместив в фокальную плоскость окуляра (ниже оси) шкалу с делениями (линейку), наблюдайте обе шкалы одновременно и определите **субъективное увеличение микроскопа**. Для этого необходимо знать цену шкалы объекта (1 деление = 0,1 мм), цену деления линейки и увеличение лупы (окуляра).

**Пример.** При наблюдении в окуляр 19 делений шкалы объекта совпадают с 1 см линейки. С учетом увеличения окуляра (2 раза) получаем:  $1 \text{ см} \cdot 2 = 2,0 \text{ см} = 20 \text{ мм}$  (линейки) соответствуют  $19 \cdot 0,1 = 1,9$  (мм) шкалы. Следовательно, увеличение микроскопа равно  $20 \text{ мм} / 1,9 \text{ мм} = 10,5$ .

- Рассчитайте увеличение собранного Вами микроскопа, измерив на скамье оптический интервал микроскопа (см. рис. 3.1.8), зная  $F_{об}$  и  $F_{ок}$  и пользуясь выражением (4). Сравните результаты расчета с ранее (см.п.2) полученным экспериментально значением увеличения.
- Уменьшите расстояние между объектом и объективом (не забывайте, что оно не должно быть меньше фокусного расстояния объектива!). Пользуясь методикой, описанной в п.п. 2 и 3, измерьте новое значение субъективного увеличения микроскопа и сравните его (измерив новое значение  $\Delta$ ) с вновь рассчитанным по формуле (4).

### 3. Оптическая система диапроектора

Система диапроектора предназначена для получения на экране **действительного увеличенного** изображения прозрачного объекта – диапозитива ("слайда"). В принципе для этого достаточно одной собирающей линзы; предмет (слайд) должен при этом находиться относительно линзы (объектива) на расстоянии, слегка превышающем фокусное (см. рис. 3.1.9)



### Задание 3.1. Моделирование простейшего диапроектора.

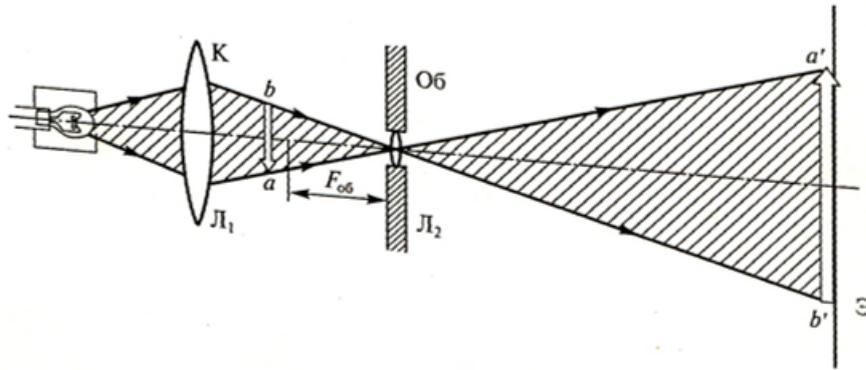
Соберите установку по схеме рис. 3.1.9, поместив слайд в рамке (прикрепленной к столику) на некотором (10–15 см) расстоянии от осветителя и используя в качестве объектива линзу 2. Получите изображение слайда на экране, удаленном от объектива на 30 – 40 см.

Опыт показывает, что несмотря на возможность получения резкого изображения (по крайней мере, его центральной части), освещенность изображения очень мала даже при полном накале нити лампы осветителя.

Дело в том, что использованная схема **энергетически невыгодна**: через сравнительно небольшое отверстие оправы объектива проходит лишь малая часть светового потока. Для повышения энергетической эффективности оптической системы диапроектор снабжают **конденсором** — собирающей линзой, устанавливаемой между источником света и объектом (см. рис. 3.1.10). Конденсор  $K$  направляет световой поток источника на предмет, причем в дальнейшем световой пучок продолжает сходить. В правильно рассчитанном проекторе объектив расположен так, что он пропускает практически всю энергию, падающую на объект; расстояния же от слайда до объектива и от объектива до экрана остаются практически такими же, как и в предыдущей схеме.

### Задание 3.2. Повышение энергетической эффективности схемы диапроектора.

Соберите схему проектора, используя тот же объектив, что и в п.3.1. и, кроме того, конденсор (линзу 1), поместив его так, как показано на рис. 3.1.10. Убедившись, что практически весь световой пучок проходит теперь через объектив, получите на экране достаточно яркое и резкое изображение диапозитива (слайда).



Выполнение всех заданий должно сопровождаться построением хода лучей с указанием параметров оптических элементов!

## ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ (ЧАСТЬ II)

1. Какова оптическая сила телескопической системы?
2. Можно ли говорить о линейном увеличении телескопической системы?
3. Почему пучок, выходящий из собранной Вами телескопической системы, резко ограничен (проверьте это экспериментально) только в одном месте?
4. Какими физическими соображениями следует пользоваться при практическом выборе диаметра: а) объектива трубы Кеплера? б) ее окуляра?
5. Какие элементы следует ввести в схему трубы Кеплера, чтобы получить с ее помощью **прямое** изображение? В каких приборах это применяется?
6. В каких распространенных приборах используется схема Галилея?
7. Целесообразно ли конструировать по схеме Галилея трубу, в поле зрения которой должна быть измерительная сетка (шкала)?
8. Каким образом можно экспериментально оценить увеличение лупы, не зная ее фокусного расстояния?
9. Какое изображение — прямое или перевернутое — наблюдают при помощи микроскопа?
10. Могут ли два микроскопа, имеющие одинаковые объективы и одинаковые окуляры, обладать различным увеличением?
11. Какая часть микроскопа — объектив или окуляр — должна быть в большей степени свободной от недостатков (аббераций), присущих реальным линзам?
12. Можно ли наблюдать в оптический (световой) микроскоп предметы, размеры которых меньше длины световой волны?
13. Как следует вставлять слайд в рамку проектора, чтобы изображение на экране не было перевернутым — ни "вверх ногами" ни "справа-налево"?
14. Каким должен быть минимальный размер конденсора в правильно рассчитанном диа-проекторе?