

Лабораторная работа 4.1.1/4.1.2
по курсу «Общая физика»

Геометрическая оптика

Дополнительное описание

Составители:

Попов П. В.
Филатов Ю. Н.

Из лаборатории не выносить!
Электронная версия — на сайте кафедры общей физики physics.mipt.ru

Перед выполнением работы ознакомьтесь с описаниями работ 4.1.1 и 4.1.2 («Лабораторный практикум по общей физике. Оптика» под ред. А.В. Максимычева, 2014).

Внимание!

- **Не касайтесь пальцами стеклянных поверхностей** оптической системы (линз, а также объектива и окуляра подзорной трубы). При случайном касании — аккуратно протрите поверхность мягкой тканью.
- При наблюдении изображений непосредственно *глазом* уменьшайте яркость источника света **до минимума!** При наблюдении изображений *на экране* яркость источника рекомендуется увеличивать до максимума. Яркость источника регулируется на блоке управления или с помощью ирисовой диафрагмы осветителя.
- Перед работой ознакомьтесь со схемой крепления и позиционирования линз, см. Приложение 1.

0. Подготовка к работе

[*время выполнения — не более 20 минут*]

1. Изучите представленный в работе набор линз. Визуально определите, какие линзы являются положительными (собирающими), какие отрицательными (рассеивающими). Оцените по порядку величины фокусные расстояния положительных линз, фокусируя на столе или на полу свет от достаточно далёкого источника (например, лампы на потолке). Фокусное расстояние отрицательной линзы можно оценить, совместив её с одной из положительных (с учётом того, что оптические силы расположенных вплотную линз складываются), либо по размеру светового пятна за линзой (в фокусе отрицательной линзы диаметр пятна от удалённого источника вдвое больше диаметра линзы).

2. Все элементы оптической системы должны быть *центрированы* относительно оптической оси: выставлены по высоте и по поперечному положению. *Перед началом работы* обязательно центрируются: источник, подзорная труба и экран. Центровка линз осуществляется *в процессе работы* по мере необходимости. Ход светового луча удобно отслеживать с помощью небольшого листка бумаги. Чтобы центровка не сбивалась от случайного перемещения элементов, обязательно используйте прижимные и фиксирующие винты (см. Приложение 1); прижимные винты всех элементов следует располагать *с одной стороны* от оптической скамьи. Рекомендуемый порядок центрирования:

- а) установите источник (осветитель с транспарантом) в начале оптической скамьи и направьте его вдоль скамьи (*будьте осторожны* — корпус осветителя может сильно нагреваться!);
- б) установите подзорную трубу вдоль скамьи, так чтобы её объектив оказался непосредственно напротив источника; выровняйте их по высоте и по поперечному расположению; отодвигая трубу к дальнему концу скамьи с помощью листка бумаги убедитесь, что центр светового пятна от источника попадает на объектив трубы;
- в) установите экран непосредственно перед источником и выровняйте его по высоте и поперечному смещению, так чтобы центр светового пятна от источника совпадал с центром экрана; отодвигая экран от источника, убедитесь, что его центровка не нарушается;

- г) для центровки первой собирающей линзы поставьте её между уже центрированными источником и экраном; убедитесь, что плоскость линзы перпендикулярна оптической скамье; отрегулируйте положение линзы по высоте и в боковом направлении так, чтобы центр светового пятна снова оказался в центре экрана; перемещая линзу вдоль скамьи, уточните её центровку; зафиксируйте крепёжные винты линзы;
- д) добавляйте следующие линзы последовательно, устанавливая их между предыдущей линзой и экраном; центрируйте положение пятна на экране, изменяя положение *только* добавляемой линзы.

I. Определение фокусных расстояний линз с помощью подзорной трубы

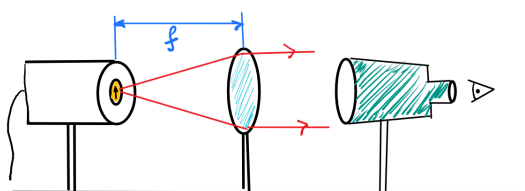
[время выполнения — не более 30 минут]

1. Настройте подзорную трубу так, чтобы она была сфокусирована на «бесконечность». Сначала при включённом свете смотрите в окуляр трубы и его поворотом (без усилий!) добейтесь того, чтобы в окуляр были чётко видны перекрестие и риски. Затем наведите трубу на далёкий предмет (например, стена в конце длинного коридора) и с помощью фокусирующего винта трубы (сбоку) получите чёткое изображение предмета. После настройки *не трогайте* регулировку трубы до конца работы.

2. Расположите одну из линз на оптической скамье перед источником света на расстоянии, приблизительно равном фокусному. Далее за линзой разместите подзорную трубу (на любом удобном расстоянии, но не слишком далеко).

Внимание! Перед тем, как смотреть глазом через подзорную трубу на источник света, рекомендуется предварительно уменьшить яркость источника до минимума!

Глядя в подзорную трубу и слегка перемещая *линзу* добейтесь чёткого изображения, нанесённого на транспарант источника. Линейкой измерьте фокусное расстояние f — расстояние от предмета (транспаранта) до одной из главных плоскостей линзы (отмечена риской на оправе, см. также Приложение 1).



Замечание. Наблюдаемую в трубу картину можно сделать существенно *более чёткой*, если сделать лучи *параксиальными*, надев на оправу линзы дополнительную *диафрагму* (диаметром ~ 5 мм). Этот рецепт применим для *всех* дальнейших упражнений.

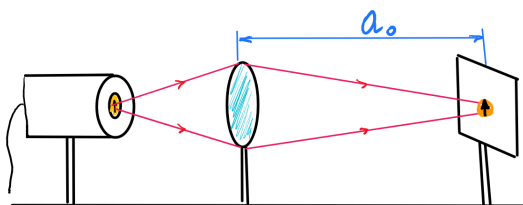
3. Разверните линзу обратной стороной к источнику (используйте винт 3 крепления, см. Приложение 1) и повторите измерение f . Сделайте вывод, можно ли считать данную линзу тонкой.

4. Проведите измерения для *всех* остальных *собирающих* линз из комплекта.

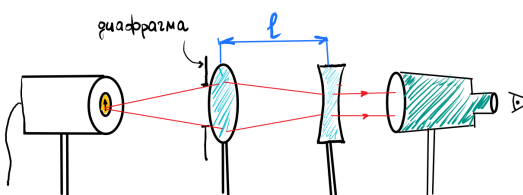
5. Экспериментально оцените погрешность измерения f : повторите одно из измерений несколько раз, каждый раз заново выставляя линзу в фокус, и вычислите среднеквадратичное отклонение σ_f .

6. Измерьте фокусное расстояние отрицательной линзы.

- а) Разместите на скамье перед источником вспомогательную положительную линзу (рекомендуется использовать короткофокусную линзу $f \sim 10$ см) и получите на экране за линзой чёткое изображение предмета. Измерьте расстояние от линзы до экрана a_0 . Рекомендуется подобрать положение линзы так, чтобы a_0 было в 1,5–2 раза больше предполагаемого фокусного расстояния отрицательной линзы.



- б) используйте полученное изображение в качестве мнимого предмета для рассеивающей линзы: поместите отрицательную линзу между положительной и экраном;
- в) уберите экран и за отрицательной линзой разместите подзорную трубу (на любом удобном расстоянии, но не слишком далеко); перемещая отрицательную линзу по скамье (положительная — неподвижна!), получите сфокусированное изображение предмета в подзорную трубу. Для повышения чёткости изображения вставьте в оправу собирающей линзы диафрагму $\varnothing 5$ мм.



- г) измерьте расстояние ℓ между положительной и отрицательной линзами; определите фокусное расстояние отрицательной линзы:

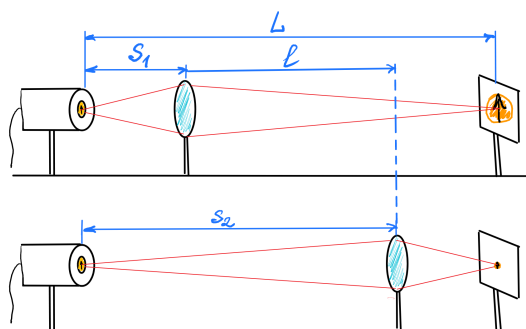
$$f = \ell - a_0.$$

II. Измерение фокусных расстояний линз по формуле тонкой линзы и методом Бесселя

[время выполнения — не более 20 минут]

1. Выберите одну из положительных линз с известным (приблизённо) значением фокусного расстояния f . Поместите экран на некотором расстоянии L от предмета, немного превышающим $L_{\min} = 4f$ (рекомендуемое расстояние $L \sim 1,2L_{\min}$). Измерьте L .

2. Поместите исследуемую линзу между источником и экраном и найдите два её положения, при которых на экране возникают чёткие действительные изображения — в одном случае увеличенное, а в другом уменьшенное. Измерьте соответствующие расстояния s_1 и s_2 от источника до линзы. Отдельно тщательно измерьте смещение между этими положениями $\ell = s_2 - s_1$.



Замечание 1. Если линзу не удаётся придвинуть до достаточно близко к экрану, чтобы получить сфокусированное изображение, — используйте подставки под линзы с укороченными основаниями или уменьшите длину L . Если различие между уменьшенным или увеличенным изображениями слабо заметно — увеличьте L .

Замечание 2. Чтобы лучше видеть уменьшенное изображение на экране, используйте одну из короткофокусных линз набора в качестве лупы. Для уменьшения aberrаций можно надеть на оправу линзы диафрагму $\varnothing 5$ мм.

3. Вычислите фокусные расстояния линз:

а) По формуле тонкой линзы (здесь $s = s_1$ или $s = s_2$):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{L - s}$$

б) По приближённой формуле Бесселя:

$$f = \frac{L^2 - \ell^2}{4L}.$$

Оцените погрешности. Проверьте, совпадают ли результаты для разных методов.

4. Разверните линзу обратной стороной и повторите измерения.

5. По указанию преподавателя (или исходя из затраченного времени) проведите измерения остальных положительных линз (всех или нескольких).

III. Измерение фокусных расстояний методом Аббе

[время выполнения — не более 20 минут]

1. Установите линзу между осветителем с транспарантом — предметом известного размера y_0 — и экраном (размер y_0 указан на установке, либо может быть измерен непосредственно линейкой). Для увеличения точности измерений наденьте на оправу линзы диафрагму $\varnothing 5$ мм. Получите на экране сфокусированное действительное изображение предмета и измерьте его линейный размер y_1 .

2. Отодвиньте осветитель на некоторое расстояние Δx от линзы (линза неподвижна!), измерив величину смещения. Затем придвиньте экран к линзе на измеряемое расстояние $\Delta x'$ до получения сфокусированного изображения. Измерьте новый размер изображения y_2 (желательно, чтобы y_1 и y_2 отличались друг от друга в несколько раз).

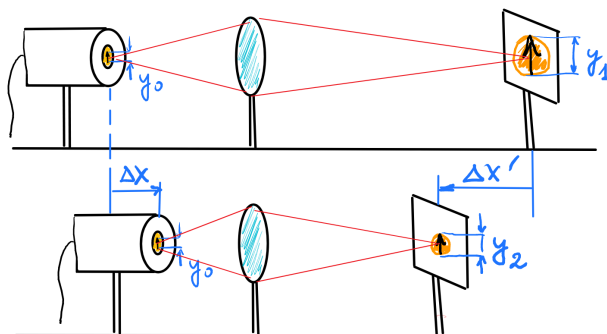
3. Рассчитайте фокусное расстояние линзы по методу Аббе

$$f = \frac{\Delta x'}{y_1/y_0 - y_2/y_0} = \frac{\Delta x}{y_0/y_2 - y_0/y_1}.$$

Замечание: если размер предмета y_0 не известен, f можно вычислить по формуле

$$f^2 = \Delta x \cdot \Delta x' \cdot \frac{y_2 y_1}{(y_2 - y_1)^2}$$

(получите самостоятельно).



4. Повторите опыт несколько раз и усредните результаты. Оцените погрешность измерения f . Сравните результат с другими методами.

5. По указанию преподавателя (или исходя из затраченного времени) проведите измерения остальных положительных линз (всех или нескольких).

6. Составьте таблицу результатов всех измерений f всеми методами. Сделайте выводы о точности методов и проанализируйте возможные причины расхождения результатов.

IV. Сборка и изучение подзорных труб Кеплера и Галилея

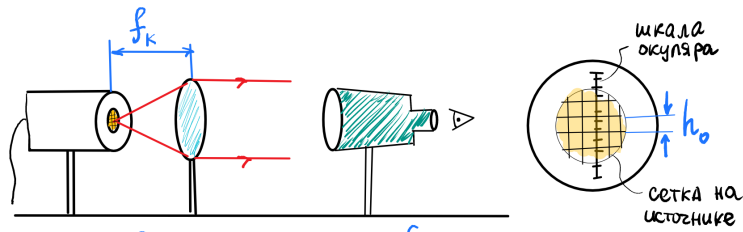
[время выполнения — не более 30 минут]

Соберите модель телескопа Кеплера или Галилея (по указанию преподавателя) и определите его угловое увеличение.

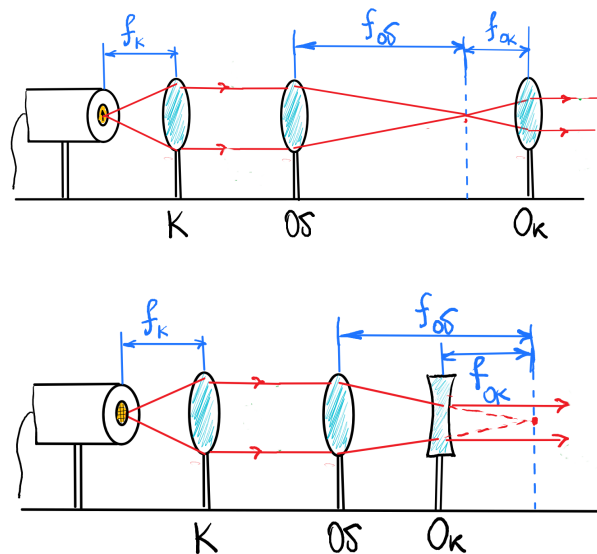
1. Из имеющегося набора линз выберите три: две линзы для *объективна* и *окуляра*, чтобы расчётное угловое увеличение телескопа было равно $\gamma \sim 2 - 4$, а также одну из собирающих линз для использования в качестве *коллиматора* (устройства для получения параллельного пучка света). Для коллиматора рекомендуется использовать одну из наиболее длиннофокусных линз.

2. С помощью подзорной трубы установите коллиматорную линзу перед источником так, чтобы транспарант оказался строго в фокусе линзы (как при измерении фокусных расстояний в упражнении I). Таким образом вы создадите расположенный на бесконечности предмет (с угловым размером y_0/f_k), который и будете затем рассматривать с помощью модели телескопа.

3. Глядя в окуляр вспомогательной подзорной трубы, оцените, сколько ячеек сетки изображения укладывается в поле зрения на размере окулярной риски. Приняв размер окулярной риски за условную единицу, вычислите наблюдаемый угловой размер ячейки сетки α_0 (как величину, обратную числу укладываемых ячеек). Для более точного измерения сфотографируйте наблюдаемую в окуляр картину на камеру смартфона. После этого уберите вспомогательную трубу (отодвиньте на край скамьи).

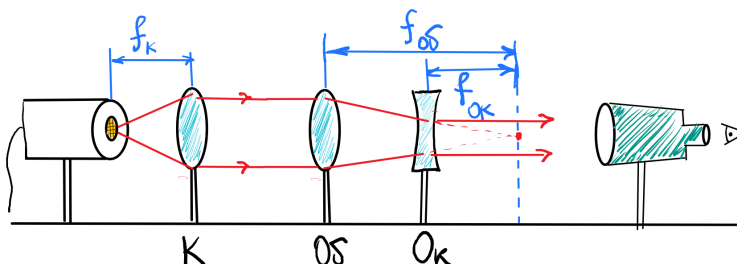


4. Соберите на скамье модель телескопа Кеплера (или Галилея). Собирающую линзу с наибольшим (по модулю) фокусным расстоянием — объектив телескопа — расположите сразу за коллиматором. Вторую линзу (собирающую или рассеивающую) — окуляр телескопа — установите на расстоянии $f_{об} + f_{ок}$ от объектива (для трубы Галилея $f_{ок} < 0$).



5. При непосредственном наблюдении глазом через окуляр «телескопа» (не забудьте уменьшить яркость!) должно наблюдаться увеличенное изображение сетки на поверхности источника. Чёткость изображения можно существенно повысить, если разместить на коллиматоре или объективе дополнительную диафрагму $\varnothing 5$ мм.

6. Для нахождения углового увеличения собранного телескопа измерьте новый видимый размер α изображения ячейки сетки осветителя. Для этого вновь установите вспомогательную трубу на скамью непосредственно за окуляром телескопа, и повторите измерение углового размера ячейки аналогично п. 3. Для более точного измерения сфотографируйте наблюдаемую в окуляр картину и сопоставьте два изображения в графическом редакторе. Рассчитайте увеличение $\gamma_{эксп} = \alpha/\alpha_0$ и сравните его с теоретическим $\gamma_{теор} = |f_{об}/f_{ок}|$. В чем могут быть причины расхождения теории и измерений?



Замечание. Если увеличение «телескопа» оказалось настолько большим, что размер увеличенной ячейки невозможно измерить (ячейка оказалась больше поля зрения), пересоберите схему, используя более длиннофокусный коллиматор (это уменьшит эффективный угловой размер источника) и/или комбинацию объектива и окуляра с меньшим увеличением. Можно также поменять местами объектив и окуляр — тогда угловое «увеличение» трубы окажется обратным (меньшим 1).

7. Определите увеличение телескопа по отношению диаметров его входного и выходного «зрачков». С помощью тонкого листа бумаги и линейки измерьте диаметр $D_{об}$ светового пятна, падающего на объектив, и диаметр светового пятна за окуляром $D_{ок}$. Рассчитайте увеличение телескопа как $\gamma = D_{об}/D_{ок}$ и сравните с результатами выше. В чём могут быть причины расхождения результатов? Как изменяются результаты, если установить на объектив диафрагму?



V. Сборка и изучение модели микроскопа

[время выполнения — не более 30 минут]

Теоретические сведения. Обозначения: $f_{об}$ — фокус объектива, $f_{ок}$ — фокус окуляра, Δ — оптический интервал (расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра), $L_{зр} \approx 25$ см — расстояние наилучшего зрения (для здорового глаза).

При аккомодации глаза на *бесконечность* угловое увеличение микроскопа

$$\gamma_{\infty} \equiv \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{y_1/f_{ок}}{y_0/L_{зр}} = \frac{L_{зр}}{f_{ок}} \cdot \frac{\Delta}{f_{об}}$$

(y_0 — размер предмета, y_1 — размер промежуточного изображения предмета в объективе).

При аккомодации глаза на *расстояние наилучшего зрения* $d_{зр}$, когда глаз расположен *вплотную* к окуляру:

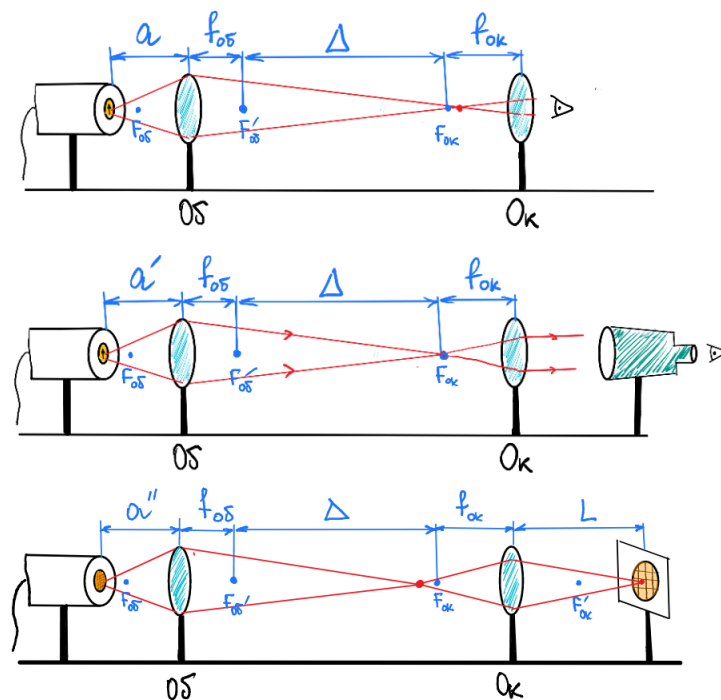
$$\gamma_{зр} = \frac{y_2/L_{зр}}{y_0/L_{зр}} = \frac{L_{зр} + f_{ок}}{f_{ок}} \cdot \frac{\Delta}{f_{об}}$$

(в этом случае угловое увеличение совпадает с линейным). При $f_{ок} \ll L_{зр}$ формулы совпадают: $\gamma_{зр} \approx \gamma_{\infty}$.

Изображение предмета в микроскопе можно сделать действительным и сфокусировать его на экране за окуляром (проекционный микроскоп). Увеличение проекционного микроскопа равно

$$\gamma_{пр} = \frac{L - f_{ок}}{f_{ок}} \cdot \frac{\Delta}{f_{об}},$$

где L — расстояние от окуляра до экрана.



1. Отберите из набора собирающих линз две собирающие короткофокусные линзы. Задав увеличение модели микроскопа $\gamma = 3 - 5$, вычислите необходимую длину *оптического интервала* Δ (см. формулы для увеличения выше).

2. Разместите линзы согласно проведённым расчётам. Предмет (источник с транспарантом) разместите вблизи фокуса объектива. Глядя непосредственно глазом в окуляр модели микроскопа (**при минимальной яркости!**) и немного смещая *предмет* (линзы — неподвижны!), добейтесь чёткой фокусировки увеличенного изображения сетки. Чёткость изображения существенно повысится, если на объектив надеть диафрагму $\varnothing 5$ мм. Оцените (качественно), каково наблюдаемое глазом увеличение предмета.

3. Для измерения увеличения микроскопа, по заданию преподавателя, либо а) воспользуйтесь настроенной на бесконечность вспомогательной трубой, либо б) установите за окуляром экран (соберите проекционный микроскоп).

а) Для измерения увеличения микроскопа с помощью настроенной на бесконечность подзорной трубы, установите трубу за окуляром модели микроскопа и глядя в окуляр вспомогательной трубы, слегка смещайте *предмет* (линзы — неподвижны!) и снова добейтесь сфокусированного изображения — теперь микроскоп работает в режиме аккомодации *на бесконечность*. С помощью риски окуляра вспомогательной подзорной трубы измерьте видимый в микроскоп угловой размер ячеек сетки α (как величину, обратную количеству укладываемых ячеек изображения на размере риски окуляра). Для более точного измерения *сфотографируйте наблюдаемую в окуляр картину и сопоставьте изображения в графическом редакторе*. Угловое увеличение микроскопа в режиме аккомодации на бесконечность будет равно (объясните эту формулу самостоятельно):

$$\gamma_{\infty} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \cdot \frac{L_{\text{зр}}}{f_{\text{кол}}},$$

где α_0 — угловой размер ячейки при наблюдении её через коллимационную линзу в п. IV.3, $f_{\text{кол}}$ — фокусное расстояние той коллимационной линзы, $L_{\text{зр}}$ — расстояние наилучшего зрения. Сравните результат с теоретическим.

- б) Установите за окуляром микроскопа экран на некотором расстоянии $L > f_{\text{ок}}$ (можно, например, взять $L = L_{\text{зр}} + f_{\text{ок}}$). Слегка смещая *предмет* (линзы — неподвижны!), добейтесь сфокусированного изображения на экране. Измерьте размер изображения на экране и, зная размер предмета y_0 , рассчитайте линейное увеличение проекционного микроскопа. Сравните результат с теоретическим.

VI. Изучение составной оптической системы

[время выполнения — не более 30 минут]

В качестве составной оптической системы предлагается использовать две линзы, расположенные на фиксированном расстоянии друг от друга. Рекомендуется использовать короткофокусную собирающую и рассеивающую линзы (возможны и другие комбинации). Измерьте фокусные расстояния и определите положения фокальных точек и главных плоскостей составной системы.

1. Разместите выбранные линзы подставками вплотную друг к другу (используйте укороченные подставки). Измерьте расстояние l между линзами. Оцените фокусное расстояние f системы по формуле

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l}{f_1 f_2}$$

и убедитесь, что оно положительно (измерения методами Бесселя или Аббе возможны только для фокусирующих систем).

2. С помощью настроенной на бесконечность подзорной трубы определите положения фокусов составной системы (аналогично п. I). Измерьте расстояние F от ближайшей к источнику линзы до фокуса (является ли это расстояние фокусным расстоянием системы?). Разверните систему, сохранив расстояние между линзами, и аналогичным образом найдите положение второго фокуса F' . Зарисуйте в тетради чертёж расположения линз и фокальных точек системы.

3. Проведите измерение фокусного расстояния f и оптического интервала δ системы по методу Бесселя (альтернативно, по указанию преподавателя, можно использовать метод Аббе). Разместите систему между источником и экраном, расположенными на расстоянии $L > L_{\text{min}} = 4f$. Перемещая систему как целое между источником и экраном измеряйте её смещение l между двумя чёткими изображениями (увеличенным и уменьшенным). Проведите измерения для 6–8 различных L в диапазоне $L_{\text{min}} < L \lesssim 2L_{\text{min}}$.

4. Используя расчётную формулу для метода Бесселя

$$l^2 = (L - \delta)(L - \delta - 4f),$$

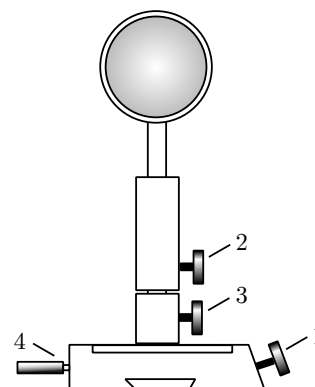
подберите замену переменных, при которой экспериментальные точки должны лечь на прямую зависимость¹. Постройте график и проведите наилучшую прямую. Определите параметры f и δ . Найдите положение главных плоскостей, отметьте их на чертеже. Сравните результаты с теоретическими расчётами. Оцените погрешности.

¹Альтернативно: подберите оптимальные параметры f и δ с помощью какого-либо численного метода фитирования произвольных кривых (например, функция `curve_fit` пакета `scipy.optimize` языка Python).

Приложение 1

Схема устройства креплений линз

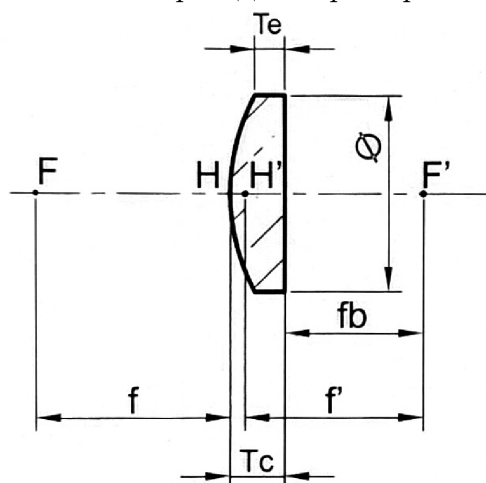
- 1: Прижимной винт (для фиксации на оптической скамье)
- 2: Винт фиксации вертикального смещения
- 3: Винт фиксации поворота вокруг вертикальной оси
- 4: Регулировка поперечного смещения



Приложение 2

Характеристики используемых в работе линз

Все используемые в работе собирающие линзы являются *плосковыпуклыми*. Если ориентировать линзу *выпуклой* стороной к предмету, то главная плоскость *пространства предметов* H проходит через крайнюю точку выпуклой поверхности линзы (см. схему).



f - фокусное расстояние (сторона объекта)
 f' - фокусное расстояние (сторона изображения)
 f_b - задний фокальный отрезок
 Q - диаметр линзы
 T_c - толщина по оси
 T_e - толщина кромки
 F, F' - точки фокусировки
 H, H' - главные точки

Part №	\varnothing - диаметр, мм	R - радиус выпуклой поверхности, мм	f - фокусное расстояние, мм	$f_b (S'f)$ - задний фокальный отрезок	T_c - толщина по центру	T_e - толщина по краю	Масса, г
GCL-010173N	50,8	38,76	75	67,42	11,5	2,02	36
GCL-010118N	50,8	51,7	100	92,7	11	4,3	34
GCL-010174N	50,8	64,6	125	120,06	7,5	2,3	25
GCL-010119N	50,8	77,52	150	144,1	9	4,7	30
GCL-010175N	50,8	90,44	175	171,04	6	2,36	21
GCL-010176N	50,8	103,36	200	196,57	5,2	2,03	19
GCL-010120N	50,8	129,2	250	245,4	7	4,5	24
GCL-010177N	50,8	155,04	300	296,7	5	2,91	20

Оптический интервал линзы $\delta \equiv \overline{HH'} = T_c + f_b - f$.