

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ЛИНЗ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

*Методические указания  
к лабораторной работе*

Петрозаводск  
Издательство ПетрГУ  
2007

Рассмотрено и рекомендовано к печати на заседании  
редакционной комиссии по отрасли науки и техники  
«Общая и ядерная физика» 2 сентября 2006 года

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Петрозаводского государственного университета

Составители:

*Чудинова С. А.*, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики;  
*Локшин Г. Р.*, профессор кафедры общей физики МФТИ.

Рецензент:

*Березина О. Я.*, ст. преподаватель, к. ф.-м. н.

Цель работы:

1. Определить фокусные расстояния двух положительных тонких линз разными способами.
2. Определить фокусное расстояние отрицательной линзы.
3. Ознакомиться с устройством и ходом лучей в телескопических системах Кеплера и Галилея.
4. Определить увеличение моделей труб Кеплера и Галилея.

Принадлежности:

1. Полупроводниковый лазер МЛ-01 (мощность излучения 1 мВт, длина волны 670 нм).
2. Направляющая скамья с рейтерами.
3. Набор линз.
4. Разделительная призма ЕРКС.
5. Экран.

**Внимание!** Лазерное излучение опасно при попадании в глаза. Все наблюдения за лазерным лучом во время настройки оптической схемы и выполнения задания проводите только по картинкам на экране.

### **Теоретическое введение**

В основе оптотехники лежат установленные на опыте основные законы оптических явлений:

- закон прямолинейного распространения света;
- закон независимости световых пучков;
- закон отражения света;
- закон преломления света.

Сущность этих законов сводится к следующему.

1. Свет в прозрачной однородной среде распространяется по прямым линиям.
2. Распространение всякого светового пучка в среде совершенно не зависит от того, есть ли в среде другие световые пучки. Освещенность, задаваемая несколькими световыми пучками, равна сумме освещенностей, создаваемых каждым пучком в отдельности.
3. Когда луч света достигает плоской границы раздела двух прозрачных сред, он частично проходит во вторую среду

(преломляется), частично возвращается в исходную среду (отражается).

Под лучом понимается достаточно узкий световой пучок, который еще может существовать изолированно от других пучков светового потока.

Закон отражения утверждает: падающий и отраженный луч лежат в одной плоскости с нормалью к границе раздела в точке падения (эта плоскость называется плоскостью падения); угол падения  $\varphi$  равен углу отражения  $\varphi'$  (рис. 1а):  $\varphi = \varphi'$ .

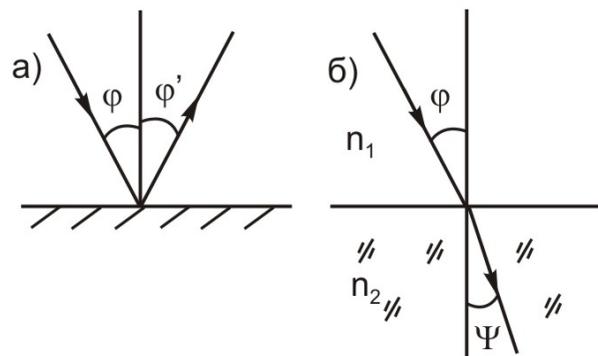


Рис. 1. Законы отражения и преломления света

4. Преломленный луч лежит в плоскости падения (рис. 1б), причем отношение синуса угла падения  $\varphi$  к синусу угла преломления  $\Psi$  для рассматриваемых сред зависит только от длины световой волны, но не зависит от угла падения:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \Psi} = n_{21}, \quad (1)$$

где  $n_{21}$  – относительный коэффициент преломления, равный отношению абсолютных показателей преломления граничащих сред:

$$n_{21} = n_2 / n_1. \quad (2)$$

Для обширной области явлений, наблюдаемых в оптических приборах, все законы соблюдаются достаточно строго.

Идеальной оптической системой называют систему, в которой сохраняется гомоцентричность пучков и изображение гео-

Учебное издание

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ЛИНЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Составитель

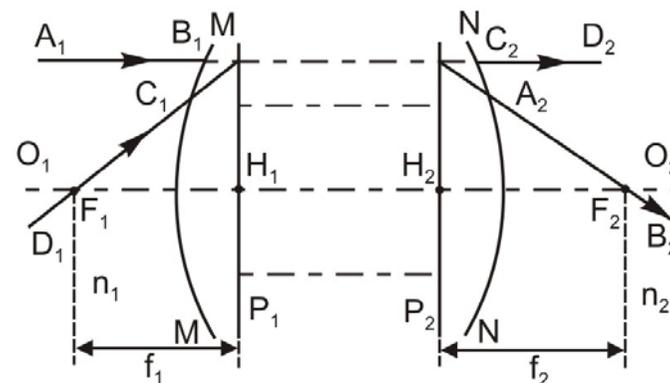
**Чудинова** Светлана Алексеевна

Редактор

Подписано в печать .07. Формат 60 x 84 1/16.  
Бумага газетная. уч.-изд. л. Тираж 200 экз. Изд. №

метрически подобно предмету.

Оптическая система обладает осью симметрии, называемой главной оптической осью ( $O_1O_2$  на рис. 2), и поверхностями, ограничивающими оптическую систему ( $MM$  и  $NN$ ). Луч  $A_1B_1$  – входящий луч, параллельный оптической оси. Луч  $A_2B_2$  – выходящий из системы и проходящий через точку  $F_2$ . Точка  $F_2$  – задний фокус системы. Точка  $F_1$  – передний фокус. Плоскости, перпендикулярные оптической оси  $O_1O_2$  и проходящие через точки  $F_1$  и  $F_2$  – фокальные плоскости. Исходящие из точки  $F_1$  лучи в пространстве изображений параллельны между собой. Плоскости  $P_1$  и  $P_2$  называются главными плоскостями, точки  $H_1$  и  $H_2$  – главными точками системы. Как видно из рис. 2, главные плоскости являются сопряженными плоскостями с линейным увеличением  $+1$ .



*Рис. 2. Кардинальные элементы оптических систем*

Расстояния от главных точек до фокусов называются фокусными расстояниями:  $f_1 = H_1F_1$ ,  $f_2 = H_2F_2$ . С учетом правила знаков для отрезков:

$$\frac{f_1}{f_2} = -\frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Если среда одна та же, то  $f_1 = -f_2$ .

При известном положении фокусов и главных плоскостей изображение предмета может быть найдено путем простых геометрических построений (рис. 3).

Оптическая система называется положительной (собирающей), если передний фокус  $F_1$  лежит слева от главной плоскости  $P_1$ , а задний  $F_2$  – справа от  $P_2$ . Если расположение обратное – система называется отрицательной (рассеивающей). Фокусное расстояние  $f_2$  имеет знак: *плюс* для собирающих и *минус* для рассеивающих систем.

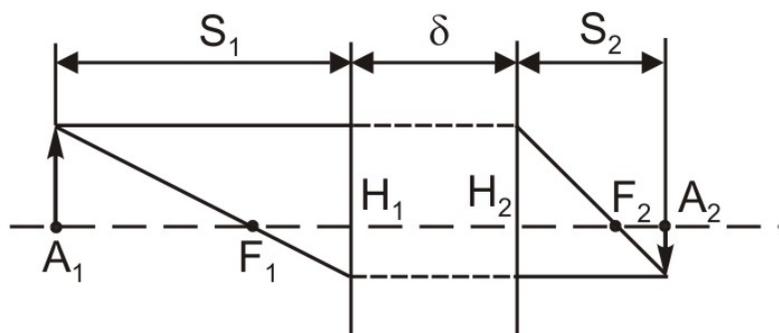


Рис. 3. Построение изображения по кардинальным элементам

Легко установить соотношение между расстояниями до предмета  $S_1$  и изображения  $S_2$  от главных плоскостей и фокусными расстояниями  $f_1$  и  $f_2$ :

$$\frac{f_1}{S_1} + \frac{f_2}{S_2} = 1. \quad (4)$$

Эта формула называется формулой отрезков.

Знак второго фокусного расстояния системы определяет знак ее оптической силы  $\Phi$ , а именно:

$$\Phi = \frac{n_2}{f_2} = -\frac{n_1}{f_1}, \quad (5)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$  – показатели преломления сред до системы и после системы (предметное пространство и пространство изображений).

Оптическая сила системы зависит от формы преломляющих поверхностей и от показателей преломления всех сред. Например, 1) для одной сферической преломляющей поверхности с радиусом кривизны  $r$ :

5. Что называется фокусным расстоянием оптической системы? Каково соотношение между первым и вторым фокусными расстояниями?
6. В чем заключается правило знаков для отрезков?
7. Какие лучи выбираются для построения изображения по кардинальным элементам?
8. Что такое оптическая сила системы? В каких единицах измеряется?
9. Как рассчитать оптическую силу системы двух тонких линз?
10. Какая оптическая система называется телескопической? Каковы особенности прохождения лучей через такую систему?
11. Исследуйте построением, при каком условии система двух тонких линз будет телескопической, если:
  - обе линзы собирающие;
  - одна линза собирающая, другая рассеивающая;
  - обе линзы рассеивающие.
12. В чем заключается формула отрезков?
13. Что называется увеличением телескопической системы?
14. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.

### Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. М.: Физматлит, 2003, гл. XII, XIV.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. М.: Наука, 1980. Т. IV, гл. II, §§ 9-12.
3. Иродов И. Е. Волновые процессы. Основные законы / И. Е. Иродов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002, гл. 3, § 3.3.
4. Бутиков Е. И. Оптика / Е. И. Бутиков. М.: Высшая школа, 2003, гл. 7, §§ 7.1, 7.2.

ную линзу, расходятся и попадают в положительную линзу. Выбором места расположения положительной линзы настраивают оптическую систему и добиваются, чтобы лучи света на выходе шли параллельно. Следовательно, собранная модель будет телескопической системой. Для моделирования используются линзы, фокусные расстояния которых определены в упражнениях 1 и 2.

### Задание

1. Соберите схему согласно рис. 10. Для этого лазер ставится в положение 1 направляющей, делительная призма в положение 2, длиннофокусная линза в паз 6, отрицательная линза в положение 5, экран наблюдения в положение 7. На экране закрепляется лист бумаги для зарисовки положения оптических лучей.
2. Включите лазер. Установите делительную призму в луч лазера, как в упражнении 1.
3. Передвигая по пазу положительную длиннофокусную линзу, добейтесь параллельности лучей, падающих на экран.
4. Проверьте параллельность выходящих из схемы Галилея лучей. Для этого при двух расположениях экрана отметьте на бумаге несколько раз положения лучей и измерьте расстояние "b" (рис. 8Б) между ними. Усредните результаты.
5. Измерьте расстояние L между линзами. Сравните L с фокусными расстояниями линз ( $f_1$ ,  $f_2$ ). Проверьте по формуле (8) телескопичность собранной модели.
6. Определите увеличение системы  $\beta = a/b$ . Сравните его с теоретическим значением  $\beta = f_1/f_2$ .

### Контрольные вопросы

1. Какая оптическая система называется идеальной?
2. Перечислите кардинальные элементы оптических систем.
3. Какие плоскости называются главными? Где они располагаются в тонкой линзе?
4. Что такое фокусы и фокальные плоскости?

$$\Phi = \frac{n_2 - n_1}{r}; \quad (6)$$

2) для тонкой линзы:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (7)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – оптические силы каждой поверхности, рассчитываемые по формуле (6);

3) для системы двух тонких линз:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{L}{n_{cp}} \Phi_1 \Phi_2, \quad (8)$$

где  $\Phi_1$ ,  $\Phi$  – оптические силы каждой линзы, рассчитываемые по формуле (7); L – расстояние между линзами;  $n_{cp}$  – показатель преломления среды между линзами.

Из формулы (8) следует, что в некоторых случаях оптическая сила системы может стать равной нулю ( $\Phi = 0$ ). Такая система называется телескопической. Параллельный пучок света после прохождения такой системы сохраняет параллельность.

**Упражнение 1.** Определение фокусного расстояния положительной линзы двумя способами.

**Способ 1.** Определение фокусного расстояния с помощью параллельных лучей.

Схема опыта дана на рис. 4. Оптическая система в этом упражнении и в последующих собирается на небольшой направляющей с рейтерами, схема расположения которых изображена на рис. 5.

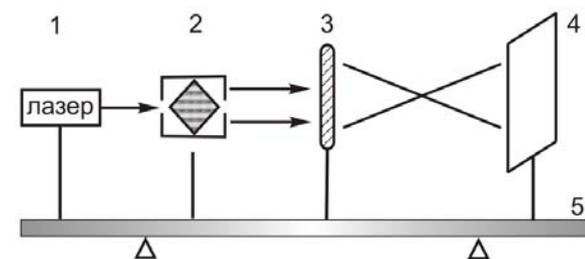


Рис. 4. Схема установки в первом способе упр. 1.  
1. Лазер. 2. Призма. 3. Линза. 4. Экран. 5. Направляющая.

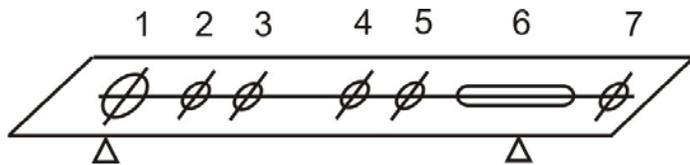


Рис. 5. Направляющая

### Задание

1. Соберите схему согласно рис. 4. Для этого лазер ставится в положение 1 направляющей, делительная призма в положение 2, экран наблюдения в положение 7 (см. рис. 5). На экране с помощью магнитов закрепляется лист бумаги для зарисовки положения оптических лучей. Линзу на скамье пока не устанавливайте.
2. Включите лазер. Установите делительную призму в луч лазера так, чтобы ее грань разделяла луч. В этом случае на экране возникнет два луча. Перемещая призму по высоте, убедитесь в приблизительно одинаковой освещенности в обоих лучах.
3. Карандашом на листке бумаги зарисуйте местоположения лазерных лучей. Сдвиньте бумагу на экране и снова отметьте лучи. После нескольких передвижений бумага снимается, измеряется расстояние "а" между метками с помощью линейки. Найдите среднее значение.
4. Переставьте экран из положения 7 в положение 4 направляющей (см. рис. 5) и проведите измерения п. 3. Оцените параллельность лазерных пучков и определите среднее расстояние "а" между ними. Верните экран в положение 7 направляющей.
5. Найдите фокусное расстояние среднефокусной положительной линзы. Для этого поставьте линзу в оправе и на подставке в паз 6 направляющей. Передвигая линзу по пазу, добейтесь, чтобы оба луча сошлись в одной точке на экране. Измерьте расстояние между серединой линзы и экраном. Отодвиньте линзу от экрана и снова приблизьте. Сделайте это несколько раз. Определите среднее значение фокусного расстояния линзы. Оцените ошибку.

мерьте расстояние "b" между ними. Отметьте на бумаге положения лучей при двух расположениях экрана. Сделайте это несколько раз. Оцените среднее значение расстояния "b" на выходе из оптической системы Кеплера.

4. Измерьте расстояние L между линзами. Сравните это значение с фокусными расстояниями линз ( $f_1$ ,  $f_2$ ). Проверьте по формуле (8) телескопичность собранной модели.
5. Определите увеличение системы:  $\beta = a/b$ . Расстояние "а" определено в упр. 1 (способ 1). Сравните его с теоретическим значением  $\beta = f_1/f_2$ .

### Задача 2. Моделирование трубы Галилея.

На рис. 8Б изображен ход лучей в зрительной трубе Галилея. В ней в качестве окуляра применяется простая двояковогнутая линза (сравните со схемой трубы Кеплера, рис. 8А), передний фокус которой  $F_2$  совпадает с задним фокусом объектива  $F_1$ . При том же фокусном расстоянии объектива труба Галилея значительно короче трубы Кеплера. Изображение получается прямым.

Оптическая схема опыта дана на рис. 10.

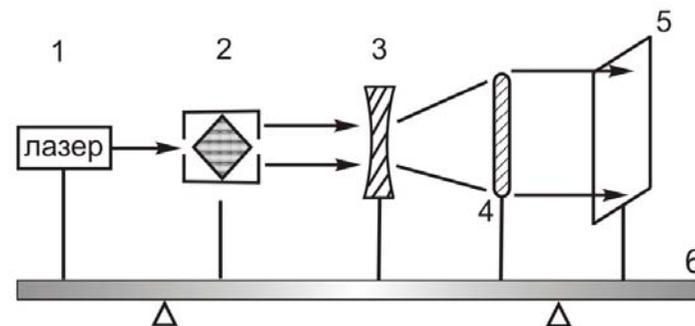


Рис. 10. Схема установки для задачи 2 в упражнении 3.

1. Лазер. 2. Призма. 3-4. Линзы. 5. Экран. 6. Направляющая.

В отличие от схемы рис. 8Б телескопическая система, которая исследуется в опыте, собирается таким образом, чтобы она расширяла пучок света. Для этого в схеме 8Б объектив и окуляр меняют местами. В опыте с помощью призмы формируется два параллельных лазерных пучка. Далее они проходят отрицатель-

2. Включите лазер. Установите разделительную призму в луче лазера, как в упр. 1.

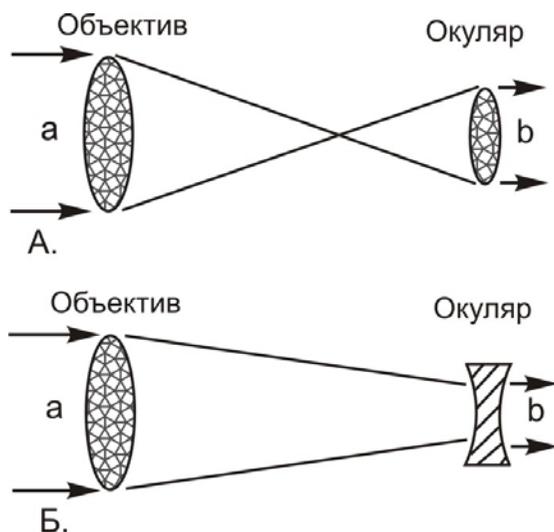


Рис. 8. Ход лучей в телескопических системах.  
А. Труба Кеплера. Б. Труба Галилея

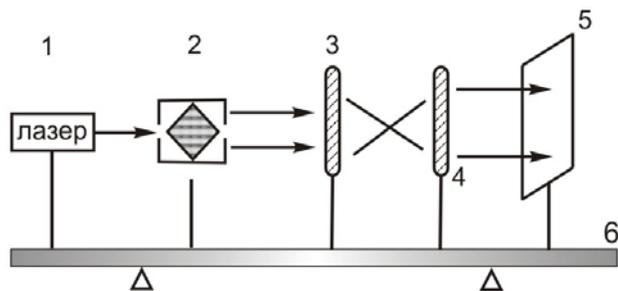


Рис. 9. Схема установки для задачи 1 в упражнении 3.  
1. Лазер. 2. Призма. 3-4. Линзы. 5. Экран. 6. Направляющая.

3. Перемещая по пазу длиннофокусную линзу, добейтесь параллельности лучей, выходящих из системы и падающих на экран. Проверьте параллельность выходящих лучей и из-

## Способ 2. Определение фокусного расстояния по формуле отрезков.

Методика опыта заключается в следующем. Вспомогательная линза 3 (рис. 6) собирает параллельные лучи в точке  $A_1$ .

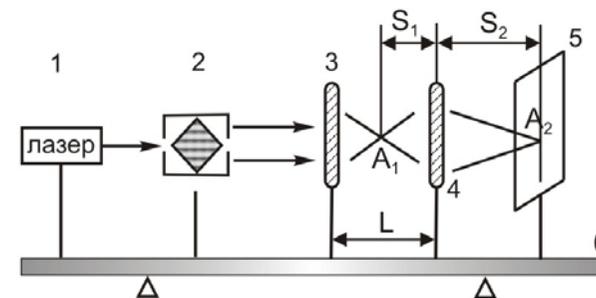


Рис. 6. Схема установки во втором способе упр. 1.  
1. Лазер. 2. Призма. 3-4. Линзы. 5. Экран. 6. Направляющая.

Эта точка будет предметом для исследуемой линзы 4. Перемещением линзы 4 и экрана 5 добиваемся, чтобы лучи сошлись в точке  $A_2$  на экране. Точка  $A_2$  есть изображение предметной точки  $A_1$ . Расстояния  $S_1$  и  $S_2$  измеряются на опыте. Для вычисления фокусного расстояния линзы 4 используем формулу отрезков, записав ее для однородной среды ( $f_1 = -f_2$ ):

$$\frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1} = \frac{1}{f_2}. \quad (9)$$

В качестве вспомогательной линзы 3 используйте среднефокусную линзу, фокусное расстояние которой определено первым способом.

### Задание

1. Соберите схему согласно рис. 6. Лазер ставится в положение 1 направляющей (см. рис. 5), делительная призма в положение 2, среднефокусная линза в положение 3, длиннофокусная линза в паз 6, экран наблюдения в положение 7. На экране закрепляется лист бумаги для зарисовки положения оптических лучей. Соблюдается соосность расположения деталей схемы.

2. Включите лазер. Установите делительную призму как в способе 1.
3. Перемещая длиннофокусную линзу, добейтесь схождения лучей на экране наблюдения в одну точку. Измерьте расстояние  $L$  между линзами и расстояние  $S_2$  от длиннофокусной линзы до экрана. Затем передвиньте длиннофокусную линзу и вновь добейтесь схождения лучей на экране. Проведите это несколько раз. Зная величину фокусного расстояния среднефокусной линзы, определите фокусное расстояние искомой по формуле (9). Оцените погрешность. Не забудьте о правиле знаков для отрезков.

### Упражнение 2. Определение фокусного расстояния отрицательной линзы.

Определение фокусного расстояния отрицательной линзы затрудняется тем, что изображение предмета получается мнимым (лучи расходятся). Поэтому расстояние до него не может быть непосредственно измерено. Эту трудность можно обойти с помощью вспомогательной положительной линзы с известным фокусным расстоянием  $f$ .

Параллельные лазерные лучи (рис. 7) после прохождения призмы 2 падают на вспомогательную линзу 3 и далее попадают на отрицательную линзу 4. Подбирая расстояние  $L$  между линзами 3 и 4, добиваются параллельности пучков на выходе из линзы 4. Это соответствует тому, что задний фокус положитель-

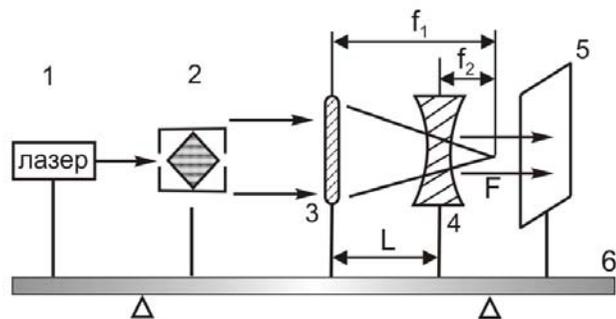


Рис. 7. Схема установки в упр. 2.

1. Лазер. 2. Призма. 3-4. Линзы. 5. Экран. 6. Направляющая.

ной линзы совпадает с передним фокусом отрицательной линзы (точка  $F$ ). Так как фокусное расстояние собирающей линзы 3 известно, то нетрудно определить и фокусное расстояние рассеивающей линзы.

### Задание

1. Соберите схему согласно рис. 7. Для этого лазер ставится в положение 1 направляющей, делительная призма в положение 2, длиннофокусная положительная линза в положение 5, отрицательная линза в паз 6, экран наблюдения в положение 7. На экране закрепляется лист бумаги для зарисовки положения оптических лучей. Соблюдается соосность расположения деталей схемы.
2. Включите лазер. Установите делительную призму, как в упражнении 1.
3. Передвигая по пазу отрицательную линзу, добейтесь параллельности лучей, падающих на экран. Для этого проделайте п.п. 3 и 4 упражнения 1 (способ 1), причем в п. 4 экран ставится в паз за отрицательной линзой.
4. Измерьте расстояние  $L$  между линзами. Зная величину фокусного расстояния длиннофокусной линзы (упражнение 1, способ 2), найдите фокусное расстояние отрицательной линзы, как  $f_2 = f_1 - L$ . Повторите опыт несколько раз. Оцените погрешность.

### Упражнение 3. Моделирование оптических приборов.

На рис. 8А изображен ход лучей в зрительной трубе Кеплера. Сложный окуляр представлен в виде простой собирающей линзы. Эта труба дает перевернутое изображение. Для моделирования в опыте используются линзы, фокусные расстояния которых определены в упр. 1. Предлагаем собрать *телескопическую* систему Кеплера, *расширяющую* световой пучок.

#### Задача 1. Моделирование зрительной трубы Кеплера.

1. Установите все приборы в соответствии со схемой на рис. 9. Лазер и разделительная призма остаются соответственно в положениях 1 и 2. Среднефокусная линза занимает положение 3 или 4, длиннофокусная – паз 6, экран – положение 7.