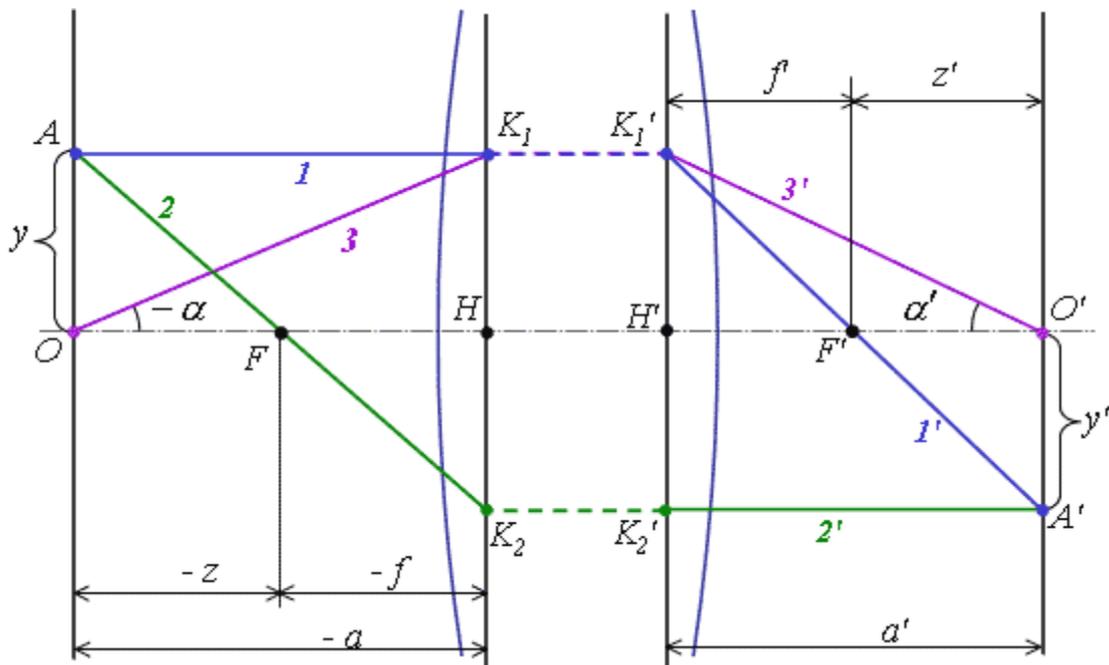


ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

ЧАСТЬ 1



Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

ЧАСТЬ 1

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО по направлениям подготовки бакалавриата и специалитета 12.03.02 «Оптотехника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 16.03.01. «Техническая физика», 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования.



Санкт-Петербург

2019

Авторы: Н.Д. Толстоба, А.О. Вознесенская, О.В. Багдасарова, А.В. Бахолдин, Г.В. Карпова **Геометрическая оптика. Учебно-методическое пособие. Часть 1.** - СПб: Университет ИТМО, 2019. – 87 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Губанова Л.А., профессор факультета ФиОИ Университета ИТМО

Учебно-методическое пособие предназначено для преподавателей, ведущих практические занятия и лабораторные работы по дисциплине «Геометрическая оптика», и для обучающихся по данной дисциплине. Задания, размещенные в учебно-методическом пособии, направлены на выработку практического опыта решения задач по тематике дисциплины.

Учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата и специалитета 12.03.02 «ОпTOTехника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 16.03.01. «Техническая физика», 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования.

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии для реализации образовательных программ высшего образования бакалавриата и специалитета по направлениям подготовки 12.03.02 «ОпTOTехника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения». (Протокол № 2 от 27 мая 2019).



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Н.Д. Толстоба, А.В. Вознесенская, О.В. Багдасарова,
А.В. Бахолдин, Г.В. Карпова, 2019

Содержание

Введение.....	4
Практическое занятие №1. Энергетика световых волн.....	6
Примеры решения задач.....	6
Задачи для самостоятельной работы.....	9
Практическое занятие №2. Правило знаков в оптике. Основные законы распространения света	14
Примеры решения задач.....	14
Задачи для самостоятельной работы.....	20
Практическое занятие №3. Построение хода луча в оптической системе. Основные соотношения параксиальной оптики..	31
Примеры решения задач.....	31
Задачи для самостоятельной работы.....	45
Заключение.....	86
Литература	87

Введение

Дисциплина «Геометрическая оптика» относится к фундаментальному модулю дисциплин и направлена на формирование результатов обучения (умений, навыков), которые являются основой для последующих дисциплин программ бакалавриата и специалитета по ОГНП «Фотоника» и развития общепрофессиональных компетенций: ОПК-1 Способность применять математические, естественнонаучные и общепрофессиональные знания для понимания окружающего мира и для решения задач профессиональной деятельности; ОПК-4 Способность к теоретическим и экспериментальным исследованиям в области профессиональной деятельности, включая постановку эксперимента, верификацию результатов, анализ и интерпретацию данных.

Учебно-методическое пособие предназначено для организации и проведения контактной и самостоятельной работы обучающихся, а также оценивания результатов обучения (домашние задания, контрольные работы) по дисциплине «Геометрическая оптика» в соответствии с ее рабочей программой.

Обучающиеся совместно с преподавателем изучают разделы в соответствии с рабочей программой дисциплины. Часть материала может быть предоставлена на самостоятельное изучение.

По завершении изучения раздела на домашнюю проработку каждому обучающемуся выдается индивидуальный комплект задач. После изучения темы на домашнюю проработку каждому обучающемуся выдается индивидуальный комплект задач. В данном пособии представлены типовые задачи и показаны способы решения типовых задач по всем подлежащим изучению темам. Самостоятельная работа студента организуется, в том числе, и путем работы с учебно-методическим комплексом, изучения студентами необходимого материала в данном пособии, в конспекте лекций, в электронном учебнике.

Модуль 1

В первом модуле предусматривается три практических занятия и контрольная работа, проводимая на четвертом занятии.

В течение модуля обучающимися под руководством преподавателя и в сотрудничестве с ним должны быть изучены темы «Энергетика световых волн», «Основные законы распространения света», «Построение хода лучей в оптической системе. Основные соотношения параксиальной оптики».

На самостоятельную проработку можно дать тематику «Энергетика световых волн», она хорошо усваивается обучающимися. Проверку полученных знаний необходимо проводить в режиме домашних заданий и контрольных работ. Для работы у доски можно выбрать темы, связанные с

энергетикой световых волн, построение хода лучей в оптической системе, а также решение задач на основные законы распространения света.

Для домашнего задания необходимо выдавать комплектом по 2 – 3 задачи на разные аспекты изученной тематики.

Для контрольной работы можно отобрать 5 задач по количеству баллов, отводимых на рубежную аттестационную контрольную работу.

Модуль 2

Во втором модуле предусматривается три практических занятия и контрольная работа. В течение модуля изучаются три темы: «Определение параксиальных параметров линз различных типов», «Расчет характеристик системы с использованием матричной оптики», «Ограничение пучков лучей в оптических системах».

На самостоятельную проработку можно дать тематику «Расчет характеристик системы с использованием матричной оптики». Для работы у доски можно выбрать темы, связанные с ограничением пучков лучей в оптических системах.

В данном модуле запланировано два домашних задания: первое – по теме «Определение параксиальных параметров линз различных типов», выдается на 1 – 2 неделе модуля. Второе – расчетно-графическое задание по тематике «Расчет характеристик системы с использованием матричной оптики», предусматривающее большую расчетно-графическую работу, на которую отведено больше времени СРС. Это задание студенты делают до конца модуля. Таким образом, тема «Ограничение пучков лучей в оптических системах» изучается в аудитории, а также при подготовке к контрольной работе. Домашнее задание по данной тематике не предусмотрено.

Для контрольной работы можно отобрать 5 задач по количеству баллов, отводимых на рубежную аттестационную контрольную работу.

Задачи из данного пособия могут быть использованы в качестве экзаменационных заданий.

Практическое занятие №1. Энергетика световых волн

Теоретический материал изложен в главе "2. Энергетика световых волн" [1,2].

Примеры решения задач

Задача

Потоком в 6.28 Вт освещается прямоугольная площадка размером 0.5 на 0.8 м. Определить освещенность площадки.

Решение:

Освещенность – величина, обратно пропорциональная площади.

Площадь прямоугольного объекта $S=0.5 \cdot 0.8=0.4$ (м²)

Освещенность $E=\Phi/S=6.28/0.4=15.7$ (Вт/м²)

Ответ: Освещенность $E=15.7$ Вт/м²

Задача

Обратная предыдущей задача – рассматривается светимость тела. Светимость круглой площадки 10 Вт/м². Поток, излучаемый площадкой, составляет 31.4 Вт. Определить радиус площадки.

Решение:

Соотношение для расчета светимости: $M=\Phi/S$

$S=\Phi/M=31.4/10=3.14$ (м²)

$S=\pi \cdot r^2=3.14 \cdot r^2$, откуда $r^2=S/\pi=1$ (м²)

Следовательно, радиус площадки $r=1$ (м)

Ответ: Радиус площадки составляет 1 м.

Задача

Источник находится на высоте 1 м над квадратной площадкой. Размер стороны квадрата 100 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 6.28 Вт. Найти силу света.

Решение:

Сила света зависит от телесного угла и потока. Телесный угол в данном случае рассчитывается так: $\Omega=S/r^2$

$S=1$ (м²); $\Omega=1/1=1$ (ср)

$I=\Phi/\Omega=6.28/1=6.28$ (Вт/ср)

Ответ: Сила света составляет 6.28 Вт/ср.

Задача

Источник излучает неравномерный поток света, равный 31.4 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.

Решение:

Средняя сферическая сила света рассчитывается по формуле:

$$I = \Phi / (4 \cdot \pi) = 2.5 \text{ (Вт/ср)}$$

Ответ: Сила света составляет 2.5 Вт/ср.

Задача

Потоком освещается круглая площадка. Освещенность равна 2 лк. Радиус площадки равен 1 м. Определить поток.

Решение:

Освещенность – величина, обратно пропорциональная площади.

Сначала необходимо определить площадь объекта:

$$S = \pi \cdot r^2 = 3.14 \cdot 1 \cdot 1 = 3.14 \text{ (м}^2\text{)}$$

Поток находится исходя из соотношений для освещенности:

$$E = \Phi / S, \text{ значит } \Phi = E \cdot S = 2 \cdot 3.14 = 6.28 \text{ (лм)}$$

Ответ: Поток $\Phi = 6.28$ лм.

Задача

Светимость круглой площадки 12.7 лм/м². Поток, излучаемый площадкой, составляет 10 лм. Определить радиус площадки.

Решение:

$$\text{Светимость } M = \Phi / S$$

Следовательно, площадь равна: $S = \Phi / M = 0.785 \text{ (м}^2\text{)}$.

$$S = \pi \cdot r^2 = 3.14 \cdot r^2, \text{ откуда } r^2 = S / \pi = 0.25 \text{ (м}^2\text{)} .$$

Следовательно, радиус $r = 0.5 \text{ (м)}$.

Ответ: Радиус площадки составляет 0.5 м.

Задача

Полный поток от сферического ламбертовского излучателя в телесном угле, образованном вращением плоского угла $\sigma=90^\circ$, составляет 40 лм. Определить силу света излучателя.

Решение:

Сила света рассчитывается исходя из соотношения: $I=\Phi/\Omega$

Сначала производится расчет телесного угла:

$$\Omega=4\cdot\pi\cdot\sin^2(\sigma/2)=4\cdot\pi\cdot 2/4=2\pi \text{ (ср)}$$

$$\text{Тогда сила света: } I=\Phi/\Omega=40/6.28=6.36 \text{ (лм/ср)}$$

Ответ: $I=6.36 \text{ лм/ср}$

Задача

Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 31.83 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла $\sigma=90^\circ$. Определить полный поток от излучателя.

Решение:

Полный поток от плоского ламбертовского излучателя:

$$\Phi=(\pi\cdot I\cdot\sin^2\sigma)/2$$

$$\Phi=31.8\cdot 3.14\cdot 1/2=100/2=50 \text{ (лм)}$$

Ответ: Полный поток $\Phi=50 \text{ лм}$

Задача

Поток 40 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 2 м. Степень белизны поверхности 0.5. Определить яркость рассеивателя.

Решение:

Задача решается в несколько этапов:

$$L = \frac{\alpha E}{\pi}$$

Яркость рассеивателя L рассчитывается через освещенность.

$$\text{Сначала определяем освещенность площадки, } E=\Phi/S=40/4=10 \text{ (лк)}$$

$$\text{Затем яркость } L=0.5\cdot 10/\pi=5/3.14=1.59 \text{ (кд/м}^2\text{)}$$

Ответ: Яркость $L=1.59 \text{ кд/м}^2$.

Задачи для самостоятельной работы

1. Поток 30 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 1.6 м. Степень белизны поверхности 0.2. Определить яркость рассеивателя.
2. Поток 35 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 10 см. Степень белизны поверхности 0.2. Определить яркость рассеивателя.
3. Поток 35 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 40 см. Степень белизны поверхности 0.4. Определить яркость рассеивателя.
4. Поток 25 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 2 м. Степень белизны поверхности 0.5. Определить яркость рассеивателя.
5. Поток 15 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 15 см. Степень белизны поверхности 0.6. Определить яркость рассеивателя.
6. Поток 15 лм освещает квадратный рассеиватель. Яркость рассеивателя составляет 11 кд/м^2 . Степень белизны поверхности 0.7. Определить размер стороны рассеивателя. Ответ дать в м.
7. Поток 20.5 лм освещает квадратный рассеиватель. Яркость рассеивателя составляет 18 кд/м^2 . Степень белизны поверхности 0.7. Определить размер стороны рассеивателя. Ответ дать в м.
8. Поток 30 лм освещает квадратный рассеиватель. Яркость рассеивателя составляет 21 кд/м^2 . Степень белизны поверхности 0.5. Определить размер стороны рассеивателя. Ответ дать в м.
9. Поток 30 лм освещает квадратный рассеиватель. Яркость рассеивателя составляет 5 кд/м^2 . Степень белизны поверхности 0.5. Определить размер стороны рассеивателя. Ответ дать в м.
10. Поток 10 лм освещает квадратный рассеиватель. Яркость рассеивателя составляет 11 кд/м^2 . Степень белизны поверхности 0.7. Определить размер стороны рассеивателя. Ответ дать в м.
11. На рассеивателе создана освещенность 11 лк. Альbedo поверхности равно 0.6. Определить яркость рассеивателя.
12. На рассеивателе создана освещенность 21 лк. Альbedo поверхности равно 0.2. Определить яркость рассеивателя.
13. На рассеивателе создана освещенность 65 лк. Альbedo поверхности равно 0.4. Определить яркость рассеивателя.
14. На рассеивателе создана освещенность 21 лк. Альbedo поверхности равно 0.45. Определить яркость рассеивателя.
15. На рассеивателе создана освещенность 47 лк. Альbedo поверхности равно 0.3. Определить яркость рассеивателя.

16. На рассеивателе создана освещенность 53 лк. Альbedo поверхности равно 0.2. Определить яркость рассеивателя.
17. На рассеивателе создана освещенность 17 лк. Альbedo поверхности равно 0.6. Определить яркость рассеивателя.
18. На рассеивателе создана освещенность 100 лк. Яркость рассеивателя составляет 12 кд/м². Определить альbedo поверхности.
19. На рассеивателе создана освещенность 312,5 лк. Яркость рассеивателя составляет 64 кд/м². Определить альbedo поверхности.
20. На рассеивателе создана освещенность 312,5 лк. Яркость рассеивателя составляет 59 кд/м². Определить альbedo поверхности.
21. На рассеивателе создана освещенность 312,5 лк. Яркость рассеивателя составляет 54 кд/м². Определить альbedo поверхности.
22. На рассеивателе создана освещенность 62,5 лк. Яркость рассеивателя составляет 10 кд/м². Определить альbedo поверхности.
23. На рассеивателе создана освещенность 110 лк. Яркость рассеивателя составляет 12 кд/м². Определить альbedo поверхности.
24. На рассеивателе создана освещенность 310 лк. Яркость рассеивателя составляет 63 кд/м². Определить альbedo поверхности.
25. На рассеивателе создана освещенность 300 лк. Яркость рассеивателя составляет 55 кд/м². Определить альbedo поверхности.
26. На рассеивателе создана освещенность 225 лк. Яркость рассеивателя составляет 50 кд/м². Определить альbedo поверхности.
27. Полный поток от сферического ламбертовского излучателя в телесном угле Ω , образованном вращением плоского угла 20° , составляет 5 лм. Определить силу света излучателя.
28. Сила света сферического ламбертовского излучателя составляет 6.37 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 20° . Определить полный поток от излучателя.
29. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 14.32 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 20° . Определить полный поток от излучателя.
30. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 24 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 20° . Определить полный поток от излучателя.
31. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 18 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 30° . Определить полный поток от излучателя.

32. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 24 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 25° . Определить полный поток от излучателя.
33. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 5 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 10° . Определить полный поток от излучателя.
34. Поток в 5 Вт освещается прямоугольная площадка размером 20 см на 10 см. Определить освещенность площадки.
35. Поток в 16 Вт освещается прямоугольная площадка размером 2 на 1 м. Определить освещенность площадки.
36. Поток в 10 Вт освещается квадратная площадка, сторона квадрата 1 м. Определить освещенность площадки.
37. Поток в 25 Вт освещается прямоугольная площадка размером 2 на 1 м. Определить освещенность площадки.
38. Поток в 16 Вт освещается прямоугольная площадка размером 12 см на 16 см. Определить освещенность площадки.
39. Поток в 16 Вт освещается прямоугольная площадка размером 2 на 1 м. Определить освещенность площадки.
40. Поток в 15 Вт освещается квадратная площадка, сторона квадрата 1 м. Определить освещенность площадки.
41. Поток в 10 Вт освещается квадратная площадка, сторона 20 см. Определить освещенность площадки.
42. Поток в 50 Вт освещается квадратная площадка, сторона квадрата 1.2 м. Определить освещенность площадки.
43. Поток в 56 Вт освещается прямоугольная площадка размером 3 на 1 м. Определить освещенность площадки.
44. Светимость круглой площадки 10 Вт/м^2 . Поток, излучаемый площадкой, составляет 15.7 Вт. Определить радиус площадки.
45. Светимость круглой площадки 15 Вт/м^2 . Поток, излучаемый площадкой, составляет 30 Вт. Определить радиус площадки.
46. Светимость круглой площадки 25 Вт/м^2 . Поток, излучаемый площадкой, составляет 45 Вт. Определить радиус площадки.
47. Светимость круглой площадки 16 Вт/м^2 . Поток, излучаемый площадкой, составляет 41 Вт. Определить радиус площадки.
48. Источник находится на высоте 0.5 м над квадратной площадкой. Размер стороны квадрата 20 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 6 Вт. Найти силу света.

49. Источник находится на высоте 2 м над квадратной площадкой, сторона квадрата 40 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 9,42 Вт. Найти силу света.
50. Источник находится на высоте 2 м над квадратной площадкой, сторона квадрата 50 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 15 Вт. Найти силу света.
51. Источник находится на высоте 2 м над круглой площадкой. Радиус круга 50 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 20 Вт. Найти силу света.
52. Источник находится на высоте 2 м над прямоугольной площадкой. Размеры прямоугольника 50 на 60 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 20 Вт. Найти силу света.
53. Источник находится на высоте 1 м над квадратной площадкой, сторона квадрата 50 см. Поток, падающий на данную площадку, составляет 20 Вт. Найти силу света.
54. Источник излучает неравномерный поток света, равный 5 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.
55. Источник излучает неравномерный поток света, равный 10 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.
56. Источник излучает неравномерный поток света, равный 25 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.
57. Источник излучает неравномерный поток света, равный 45 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.
58. Источник излучает неравномерный поток света, равный 50 Вт. Определить среднюю сферическую силу света.
59. Потокосом освещается круглая площадка. Освещенность равна 5 лк. Радиус площадки равен 10 мм. Определить поток.
60. Потокосом освещается круглая площадка. Освещенность равна 5 лк. Радиус площадки равен 56 см. Определить поток.
61. Потокосом освещается круглая площадка. Освещенность равна 5 лк. Радиус площадки равен 40 см. Определить поток.
62. Светимость площадки 1.7 лм/м^2 . Излучаемый поток составляет 10 лм. Определить площадь.
63. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 10 кд. Телесный угол образован вращением плоского угла 15° . Определить полный поток от излучателя.

64. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 20 кд. Телесный угол образован вращением плоского угла 10° . Определить полный поток от излучателя.
65. Поток 50 лм освещает квадратный рассеиватель. Сторона квадрата 0.5 м. Степень белизны поверхности 0.5. Определить яркость рассеивателя.
66. Полный поток от сферического ламбертовского излучателя в телесном угле Ω образованном вращением плоского угла 10° составляет 3 лм. Определить силу света излучателя.
67. Сила света сферического ламбертовского излучателя составляет 15 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 14° . Определить полный поток от излучателя.
68. Сила света плоского ламбертовского излучателя составляет 12 кд. Телесный угол Ω образован вращением плоского угла 30° . Определить полный поток от излучателя.
69. Поток в 26 Вт освещается прямоугольная площадка размером 5 на 50 мм. Определить освещенность площадки.

Практическое занятие №2. Правило знаков в оптике. Основные законы распространения света

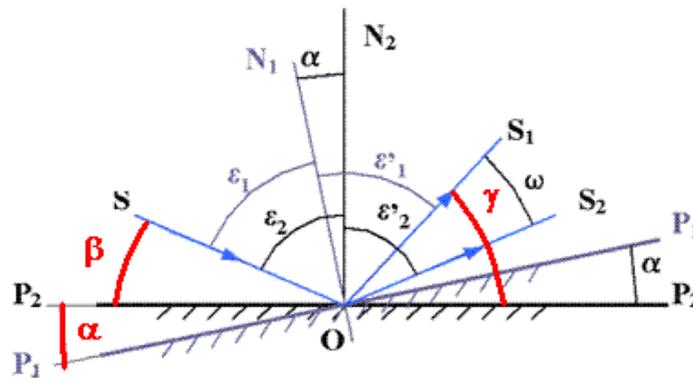
Теоретический материал изложен в главе 3 "Прохождение света через границу раздела двух сред" [1,2].

Примеры решения задач

Задача

Определить угол поворота α плоского зеркала относительно оси ОХ, если направление падающего луча задано углом $\beta=10^\circ$, а направление отраженного луча от первого положения зеркала – углом $\gamma=80^\circ$.

Решение:



По закону отражения углы падения и отражения равны по модулю, значит, направление отраженного луча при втором положении зеркала $\beta'=10^\circ$.

Угол отклонения луча: $\omega = \gamma - \beta' = 70^\circ$.

Как известно, угол отклонения луча в два раза больше угла поворота зеркала: $\omega = 70^\circ = 2\alpha$.

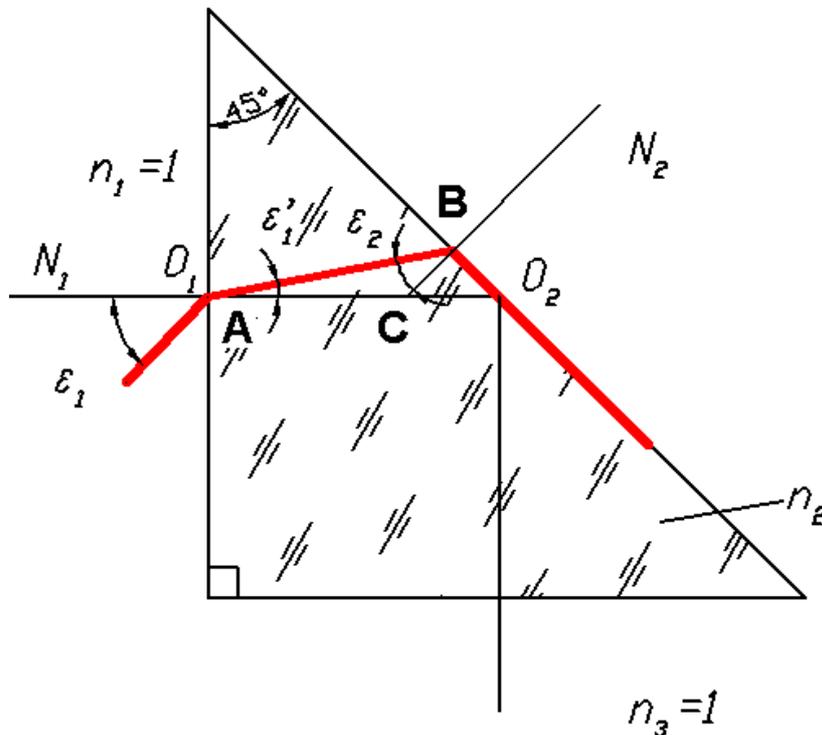
Следовательно, $\alpha = 35^\circ$.

Ответ: $\alpha = 35^\circ$.

Задача

Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может еще не иметь зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.5163$ и находится в воздухе.

Решение:



Определяем предельный угол ПВО на границе раздела стекло-воздух.

По закону преломления $n_2 \cdot \sin \varepsilon_2 = n_3 \cdot \sin 90^\circ$

$$\varepsilon_2 = 41^\circ 16'$$

Из треугольника ABC определяем угол ε_1' .

Внешний угол треугольника ABC равен 45° . (угол между нормалью равен углу между сторонами треугольника, как углы со взаимно перпендикулярными сторонами).

Внешний угол треугольника равен сумме углов, не прилежащих к вершине, отсюда:

$$\varepsilon_1' + \varepsilon_2 = 45^\circ, \text{ следовательно } \varepsilon_1' = 3^\circ 44'.$$

Применим закон преломления к первой поверхности призмы и определим угол ε_1 .

$$n_1 \cdot \sin(\varepsilon_1) = n_2 \cdot \sin(\varepsilon_1');$$

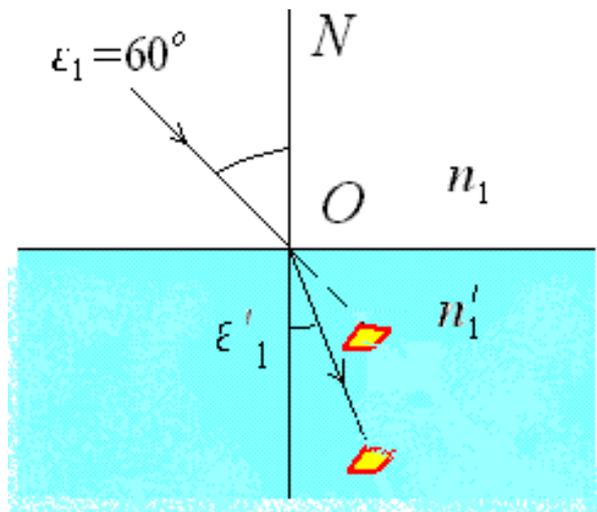
$$\sin(\varepsilon_1) = 1.5163 \cdot \sin(3^\circ 44'), \quad \varepsilon_1 = 5^\circ 40'.$$

Ответ: $\varepsilon_1 = 5^\circ 40'$

Задача

Объект, находящийся в воде, виден под углом 60° . Определить угол наклона преломленного луча в воде, если показатель преломления $n=1.33$.

Решение:



Под углом в $\varepsilon_1 = 60^\circ$ мы наблюдаем мнимое изображение объекта.

Применим закон преломления и найдем реальный угол ε'_1 , под которым объект находится в воде.

Угол, под которым виден объект — это угол мнимый, а реально это угол, под которым мы смотрим на объект. Таким образом, нам даны ε_1 , n' и n .

По закону преломления : $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$.

$$\sin(\varepsilon'_1) = \sin(\varepsilon) / n';$$

$$\sin(\varepsilon'_1) = \sin(60^\circ) / 1.33 = 0.709.$$

Преломленный угол ε'_1 равен $40^\circ 30'$.

Ответ: Угол $\varepsilon'_1 = 40^\circ 30'$

Два плоских зеркала, расположенные под углом

Угловое зеркало – часто используемая в оптике конструкция.

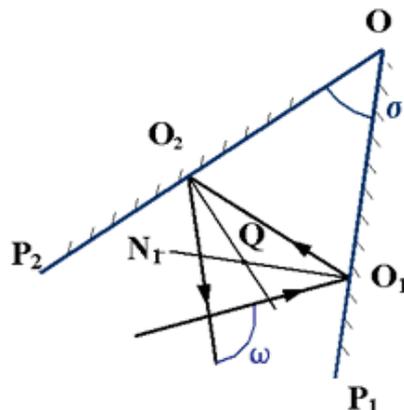


Рис. 1 Угловое зеркало

Зависимость между направлениями падающего и выходящего лучей для угловой системы, состоящей из двух зеркал : $\omega = 2\sigma$.

1. Угол отклонения равен удвоенной величине угла между зеркалами.
2. При повороте углового зеркала угол отклонения не изменяется
3. Угол отклонения не зависит от угла падения

Задача

Угловое зеркало изменяет направление падающего на него луча на величину $\omega = 30^\circ$. Определить угол при вершине зеркала.

Решение:

Угловое зеркало поворачивает луч на угол, равный удвоенному углу при вершине зеркала.

Значит, угол при вершине $\sigma = 15^\circ$.

Ответ: Угол при вершине двойного зеркала $\sigma = 15^\circ$.

Эффект полного внутреннего отражения как частный случай закона преломления

По соотношениям закона преломления несложно установить, что предельный угол полного внутреннего отражения – это угол, при падении под которым преломленный луч пойдет вдоль границы раздела двух сред, теоретически даже не проникая ни в одну из них.

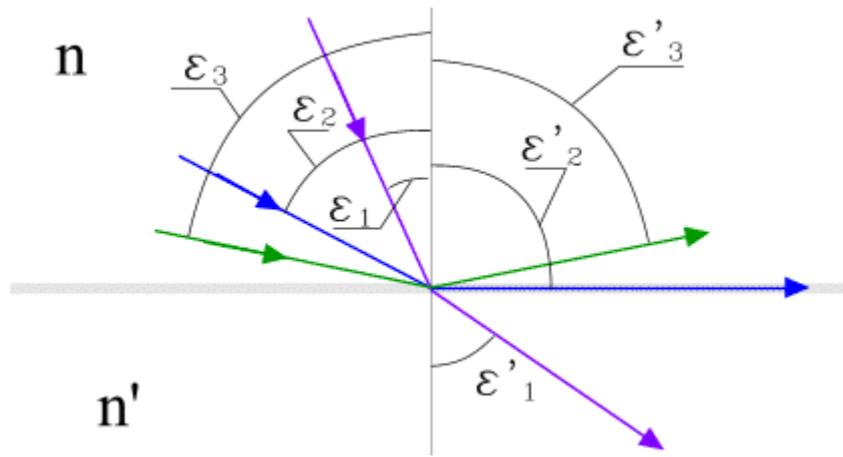


Рис. 2 Эффект ПВО

По соотношениям для закона преломления несложно установить:

$$n \cdot \sin \varepsilon_2 = n' \cdot \sin \varepsilon'_2 \rightarrow \varepsilon'_2 = 90^\circ$$

Угол полного внутреннего отражения:

$$\sin \varepsilon_2 = \frac{n'}{n} = \sin \varepsilon_{\text{ПВО}} \quad \sin \varepsilon_{\text{ПВО}} = \frac{1}{n'}$$

Полное внутреннее отражение может происходить только для перехода из среды более плотной в менее плотную. Иначе получится синус угла полного внутреннего отражения больше 1 (а это невозможно).

Применение явления ПВО

Явление полного внутреннего отражения используется в оптике: в волоконной оптике, в призмах для подсветки штрихов и перекрестий и т. д.

а) Световод

Для передачи света или изображения по волокну используется световод:

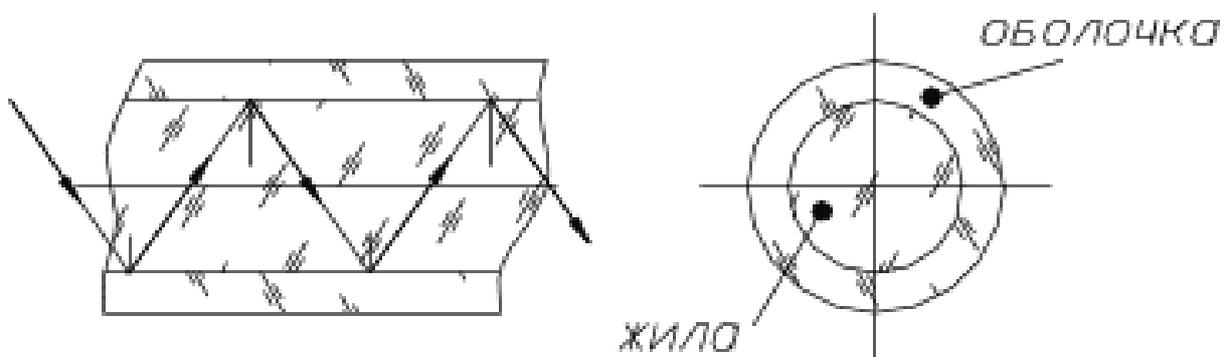


Рис. 3 Световод

$$n_{\text{ж}} > n_{\text{об.}}$$

Свет запускается в жилу световода под углом, большим угла ПВО, и таким образом, многократно отражаясь от стен, свет доходит до конца световода.

б) Призмы

Отражение от граней в призмах.

ПРИЗМА ОПТИЧЕСКАЯ – призма из прозрачного вещества (стекло, кварца, флюорита, LiF, NaCl, KBr, CsI и др.) Различают спектральные (дисперсионные) призмы, которые используют для изучения явлений, связанных с дисперсией света, и применяют в спектральных приборах; отражательные призмы, применяющиеся в оптических системах для изменения направления лучей; поляризационные призмы.

Если расчет показывает, что угол падения луча на отражающую грань больше угла полного внутреннего отражения, это означает, что на данную грань отражающее покрытие наносить не нужно.

Задача

Определить угол полного внутреннего отражения на границе раздела сред стекло – воздух.

Решение:

$n = 1$ (воздух); $n' = 1.5163$; $\varepsilon_{\text{ПВО}} \cong 41^\circ 16'$ – угол полного внутреннего отражения.

Ответ: Полное внутреннее отражение будет наступать при углах, больших чем $\varepsilon_{\text{ПВО}} \cong 41^\circ 16'$.

Задача

Показатель преломления первой среды $n_1=2$. Синус угла ПВО $\sin \varepsilon_{\text{ПВО}}=0.71$. Определить показатель преломления второй среды.

Решение:

По соотношениям для угла ПВО:

$$n_2 = \sin \varepsilon_{\text{ПВО}} \cdot n_1$$

Таким образом, $n_2 = 0.71 \cdot 2 = 1.42$

Ответ: Показатель преломления второй среды $n_2 = 1.42$

Задачи для самостоятельной работы

1. Свет падает нормально на границу раздела двух сред. Показатель преломления второй среды $n_2=1.3$. Коэффициент отражения $\rho=0.018$. Определить показатель преломления первой среды.
2. Свет падает нормально на границу раздела двух сред. Показатель преломления первой среды $n_1=1.33$. Коэффициент отражения $\rho=0.004$. Определить показатель преломления второй среды.
3. Свет падает нормально на границу раздела двух сред. Показатель преломления второй среды $n_2=1.5$. Коэффициент отражения $\rho=0.004$. Определить показатель преломления первой среды.
4. Свет падает нормально на границу раздела двух сред. Показатель преломления первой среды $n_1=1.4$. Коэффициент пропускания $\tau=0.969$. Определить показатель преломления второй среды.
5. Свет падает нормально на границу раздела двух сред. Показатель преломления второй среды $n_2=2$. Коэффициент пропускания $\tau=0.969$. Определить показатель преломления первой среды.
6. Показатель преломления первой среды $n_1=1.5$, второй, $n_2=1.8$. Определить коэффициент отражения при нормальном падении света.
7. Показатель преломления первой среды $n_1=1.5$, второй, $n_2=1.6$. Определить коэффициент пропускания при нормальном падении света.
8. Показатель преломления первой среды $n_1=1.5$, второй, $n_2=1.6$. Определить коэффициент отражения при нормальном падении света.
9. Определить угол наклона отраженного от плоского зеркала луча (γ), если направление падающего луча задано углом $\beta=0^\circ$, а угол наклона зеркала $\alpha=45^\circ$.
10. Определить угол наклона падающего на плоское зеркало луча (β), если направление отраженного луча задано углом $\gamma=90^\circ$, а угол наклона зеркала $\alpha=45^\circ$.
11. Определить угол поворота плоского зеркала относительно оси ОХ (α), если направление падающего луча задано углом $\beta=10^\circ$, а направление отраженного луча $\gamma=60^\circ$.
12. Определить угол поворота плоского зеркала относительно оси ОХ (α), если направление падающего луча задано углом $\beta=45^\circ$, а направление отраженного луча $\gamma=85^\circ$.
13. Определить направление падающего на плоское зеркало луча (β), если направление отраженного луча задано углом $\gamma=60^\circ$, а угол наклона зеркала $\alpha=25^\circ$.

14. После углового зеркала луч идет в сторону, обратную направлению падения. Определить угол при вершине двойного зеркала.

15. Угловое зеркало имеет угол при вершине 10° . Определить угол поворота луча, падающего на такое зеркало.

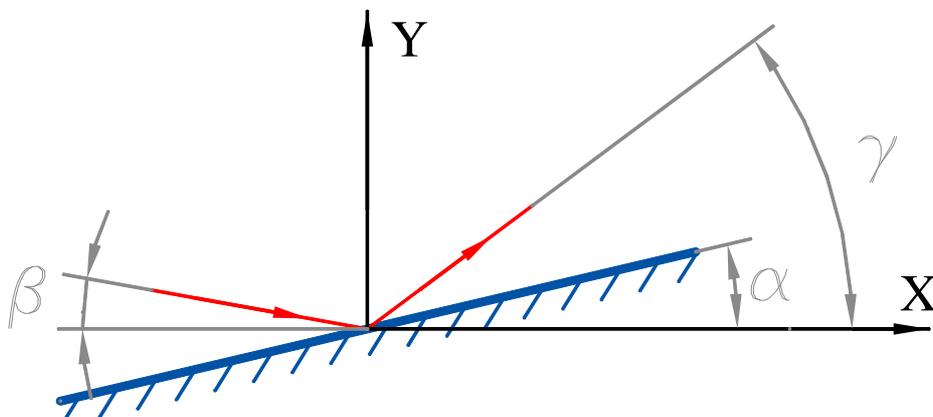


Рис. 4 Поворот зеркала

16. Угловое зеркало изменяет направление падающего на него луча на величину $\gamma=90^\circ$. Определить угол при вершине зеркала.

17. Угловое зеркало изменяет направление падающего на него луча на величину $\gamma=180^\circ$. Определить угол при вершине зеркала.

18. Угловое зеркало имеет угол при вершине 90° . Определить угол поворота луча, падающего на такое зеркало.

19. Показатель преломления первой среды $n_1=1.41$. Синус угла ПВО $\sin(\epsilon_{\text{ПВО}})=0.71$. Определить показатель преломления второй среды.

20. Показатель преломления второй среды $n_2=1$. Синус угла полного внутреннего отражения $\sin(\epsilon_{\text{ПВО}})=0.71$. Определить показатель преломления первой среды.

21. Показатель преломления первой среды $n_1=1.55$. Угол полного внутреннего отражения равен 45° . Определить показатель преломления второй среды.

22. Показатель преломления первой среды $n_1=2$, второй, $n_2=1$. При каком наименьшем угле падения (в градусах) возможно явление полного внутреннего отражения?

23. Показатель преломления первой среды $n_1=2$. Угол полного внутреннего отражения равен 45° . Определить показатель преломления второй среды.

24. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе алмаз – воздух. Показатель преломления алмаза $n=2.417$.

направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=60^\circ$.

49. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=10^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=20^\circ$.

50. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=17^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=34^\circ$.

51. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=10^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=50^\circ$.

52. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=30^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=80^\circ$.

53. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=10^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=30^\circ$.

54. Плоское зеркало повернуто на угол $\alpha=15^\circ$ относительно оси ОХ. Определить направление падающего на зеркало луча (угол β), если направление отраженного луча от первого положения зеркала задано углом $\gamma=45^\circ$.

55. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=15^\circ$, направление падающего луча задано углом $\beta=25^\circ$. Определить угол падения луча ε_1 при первом положении зеркала.

56. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=10^\circ$, направление падающего луча задано углом $\beta=40^\circ$. Определить угол падения луча ε_1 при первом положении зеркала.

57. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=70^\circ$, направление падающего луча задано углом $\beta=15^\circ$. Определить угол падения луча ε_1 при первом положении зеркала.

58. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=40^\circ$, направление падающего луча задано углом $\beta=20^\circ$. Определить угол падения луча ε_1 при первом положении зеркала.

72. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=30^\circ$. Угол падения луча при первом положении зеркала $\varepsilon_1=20^\circ$. Определить угол падения луча ε_2 при повороте зеркала.
73. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=20^\circ$. Угол падения луча при первом положении зеркала $\varepsilon_1=42^\circ$. Определить угол падения луча ε_2 при повороте зеркала.
74. Угол отклонения луча при повороте плоского зеркала $\omega=42^\circ$. Угол падения луча при первом положении зеркала $\varepsilon_1=19^\circ$. Определить угол падения луча ε_2 при повороте зеркала.
75. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.8$.
76. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.85$.
77. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.5$.
78. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.55$.
79. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.6$.
80. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.65$.
81. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.7$.
82. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.75$.
83. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.5163$.
84. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=2.417$.
85. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-воздух. Показатель преломления стекла $n=1.4$.
86. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.45$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
87. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.85$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.

88. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.4$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
89. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.55$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
90. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.622$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
91. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.5$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
92. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.65$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
93. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.8$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
94. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.7$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
95. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.75$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
96. Определить в градусах предельный угол полного внутреннего отражения на границе стекло-вода. Показатель преломления стекла $n_1=1.5163$. Показатель преломления воды $n_2=1.33304$.
97. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.4$ и находится в воздухе.
98. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.9$ и находится в воздухе.
99. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.8$ и находится в воздухе.

100. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.45$ и находится в воздухе.

101. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.65$ и находится в воздухе.

102. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.75$ и находится в воздухе.

103. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.5163$ и находится в воздухе.

104. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.55$ и находится в воздухе.

105. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.7$ и находится в воздухе.

106. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.6$ и находится в воздухе.

107. Определить в градусах и минутах предельный угол падения лучей ε_1 на входную грань прямоугольной равнобедренной призмы, при котором отражающая грань может быть еще без зеркального покрытия. Призма изготовлена из стекла $n_2=1.85$ и находится в воздухе.

108. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=30^\circ$. Определить угол σ в градусах.

109. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=20^\circ$. Определить угол σ в градусах.

110. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=40^\circ$. Определить угол σ в градусах.

111. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=50^\circ$. Определить угол σ в градусах.

112. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=60^\circ$. Определить угол σ в градусах.

113. Система из двух плоских зеркал, расположенных под углом σ друг к другу, изменяет направление падающего на нее луча на величину $\omega=35^\circ$. Определить угол σ в градусах.

114. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=50^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

115. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=32^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

116. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=30^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

117. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=20^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

118. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=22^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

119. Дана система из двух плоских зеркал, расположенных под углом $\sigma=12^\circ$ друг к другу. Определить угол ω изменения направления падающего на систему зеркал луча.

120. Объект, находящийся в воде, виден под углом 55° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

121. Объект, находящийся в воде, виден под углом 60° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

122. Объект, находящийся в воде, виден под углом 80° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

123. Объект, находящийся в воде, виден под углом 30° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

124. Объект, находящийся в воде, виден под углом 50° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

125. Объект, находящийся в воде, виден под углом 75° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

126. Объект, находящийся в воде, виден под углом 45° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

127. Объект, находящийся в воде, виден под углом 40° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

128. Объект, находящийся в воде, виден под углом 65° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

129. Объект, находящийся в воде, виден под углом 70° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

130. Объект, находящийся в воде, виден под углом 35° . Определить реальный угол в воде, под которым находится объект. Показатель преломления воды 1.33304.

Практическое занятие №3. Построение хода луча в оптической системе. Основные соотношения параксиальной оптики

Кардинальные точки оптической системы. Построение лучей в системе, заданной главными плоскостями. Построение изображения. Основные формулы: Формула отрезков. Формула Ньютона, формула для линейного увеличения.

Теоретический материал изложен в главе 5 "Геометрическая теория оптических изображений. Идеальные оптические системы" [1,2].

Примеры решения задач

Правила построения хода лучей в оптической системе

Луч, идущий параллельно оптической оси после линзы, пройдет через точку заднего фокуса.

Если параллельный пучок лучей после линзы собирается в одну точку, то такая линза – собирающая, положительная, и точка – ее действительный фокус.

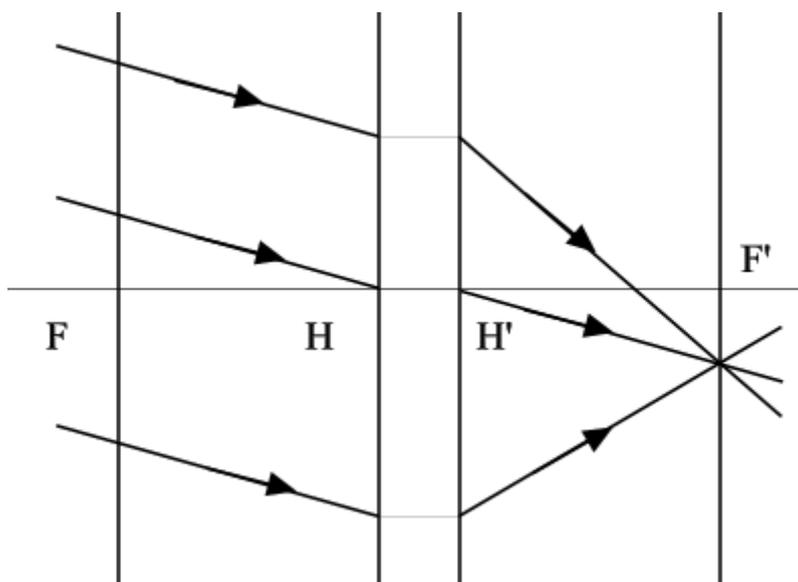


Рис. 5 Собирающая линза

Если параллельный пучок лучей после линзы расходится, как будто все лучи пущены из единого центра, то линза – рассеивающая, отрицательная.

Для понимания, с каким из фокусов имеем дело, принято называть фокус в пространстве предметов – передним, фокус в пространстве изображений – задним. Фокальные отрезки называются соответственно.

Фокальная плоскость - плоскость, проходящая через точку фокуса перпендикулярно оптической оси.

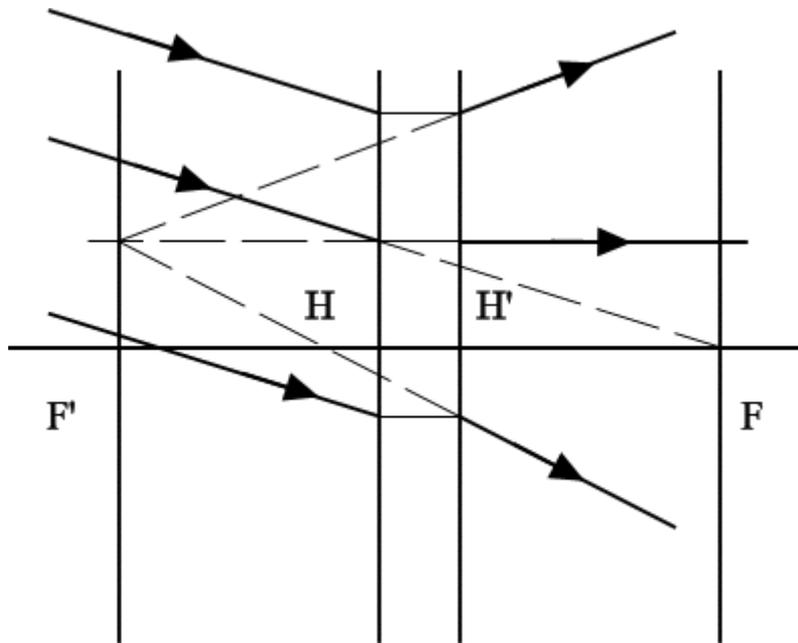


Рис. 6 Рассеивающая линза

Луч, проходящий через точку переднего фокуса, после линзы пойдет параллельно оптической оси.

Лучи, идущие параллельно друг другу, сойдутся в одной точке на задней фокальной плоскости.

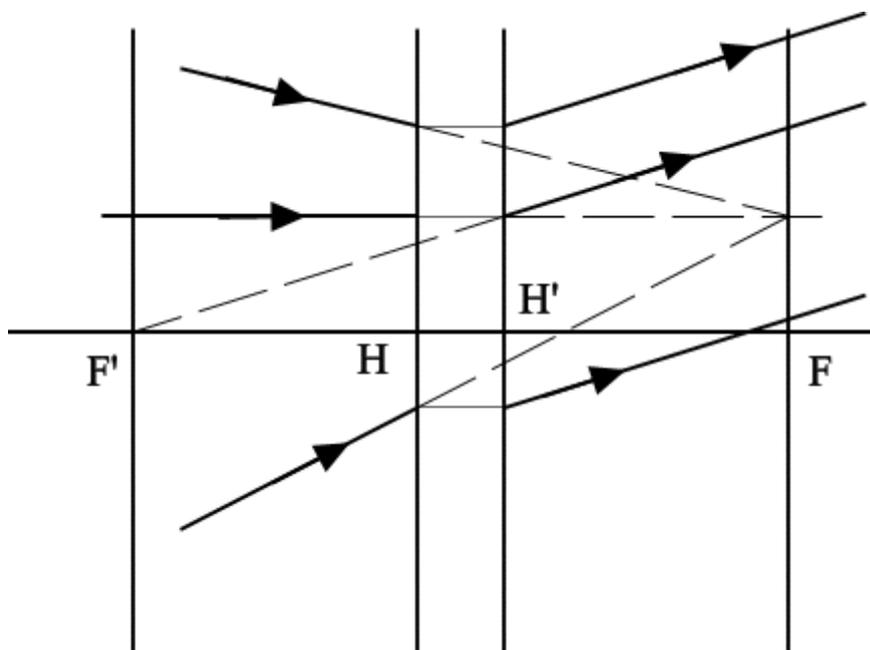


Рис. 7 Иллюстрация правила

Лучи, идущие из одной точки на передней фокальной плоскости, пойдут после линзы параллельно друг другу.

В пучке лучей выбирается луч, построение которого легко осуществить, и остальные строятся параллельно.

Частный случай: для системы, находящейся в однородной среде, луч, проходящий через центр линзы, не преломляется.

Построения изображения

Необходимо построить два луча, проходящих через точку предмета. Пересечение преломленных лучей дает нам точку изображения.

- Проводим луч через край предмета параллельно оптической оси. Преломленный луч пройдет через точку заднего фокуса.
- Проведем луч через край предмета и точку переднего фокуса. Дальше луч пойдет параллельно оптической оси.
- На пересечении построенных лучей находится искомое изображение точки предмета.

Собирающая (положительная) линза

Если предмет находится между линзой и ее фокусом, то его изображение – увеличенное, мнимое, прямое, и расположено оно по ту же сторону от линзы, что и предмет, и дальше от линзы, чем предмет.

Если предмет находится между фокусом и двойным фокусом линзы, то линза дает его увеличенное, перевернутое, действительное изображение: оно расположено по другую сторону от линзы по отношению к предмету, за двойным фокусным расстоянием.

Если предмет находится за двойным фокусным расстоянием линзы, то линза дает уменьшенное, перевернутое, действительное изображение предмета, лежащее по другую сторону линзы между ее фокусом и двойным фокусом.

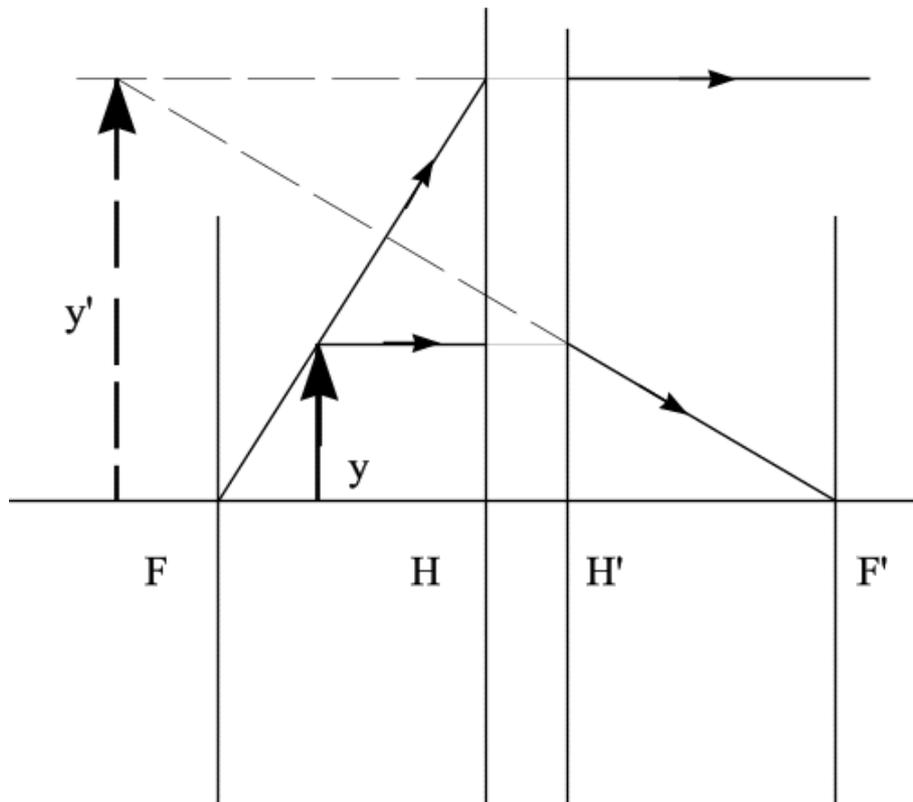


Рис. 8 Построение изображения в собирающей линзе

Рассеивающая (отрицательная) линза

Рассеивающая линза не дает действительных изображений, при всех положениях предмета дает уменьшенное, мнимое, прямое изображение, лежащее по ту же сторону от линзы, что и предмет.

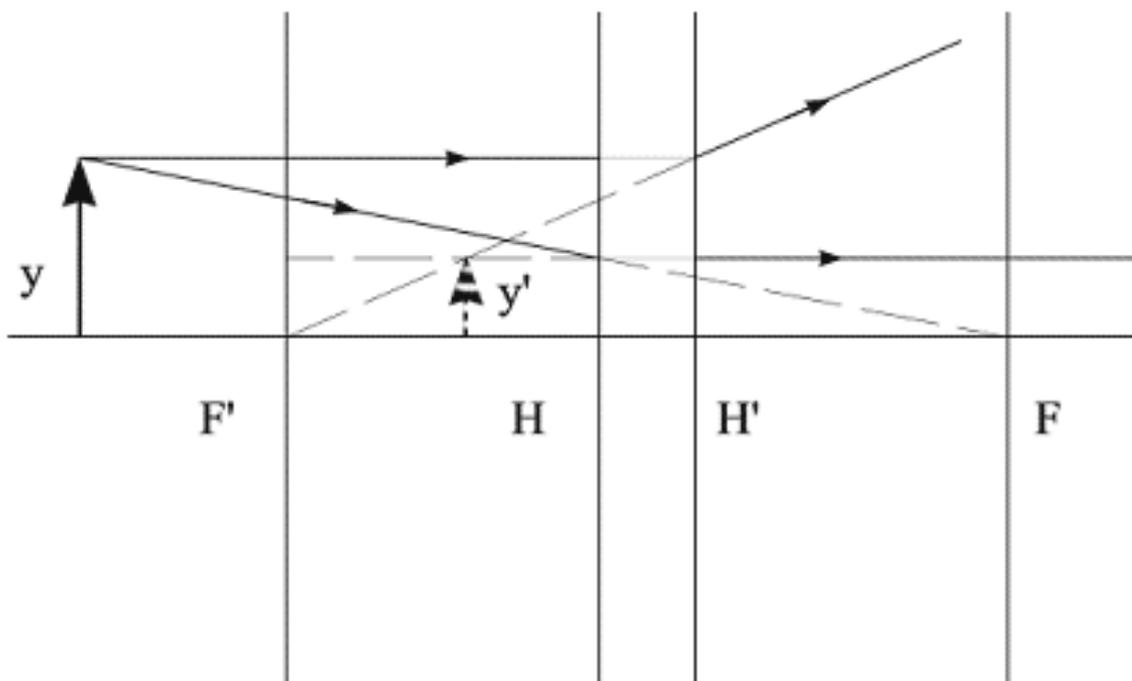
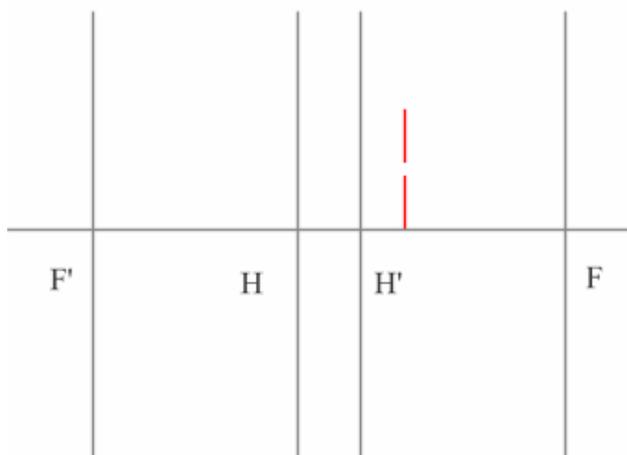


Рис. 9 Построение изображения в рассеивающей линзе

Задача

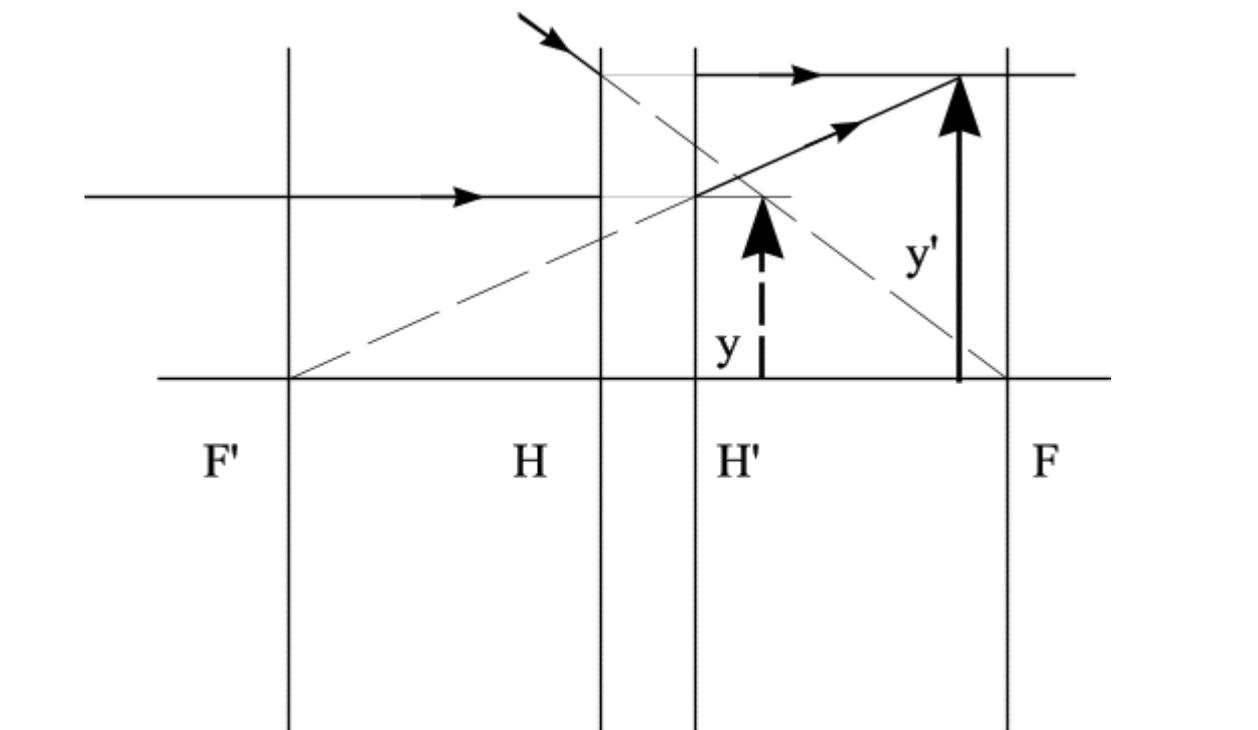
Построение изображения мнимого предмета



Решение:

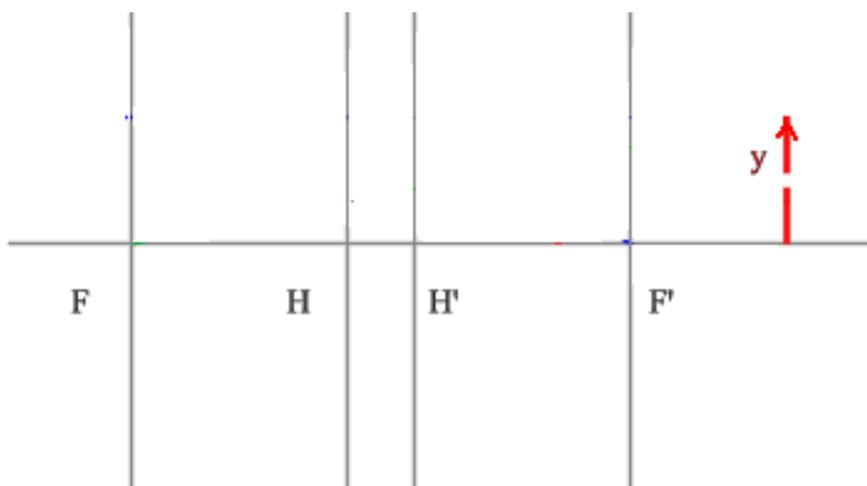
Первый луч проводим через край предмета и точку переднего фокуса. После оптического элемента луч пойдет параллельно оптической оси.

Второй луч направляется параллельно оси через точку предмета. По правилам преломления после оптического элемента луч пройдет через задний фокус.



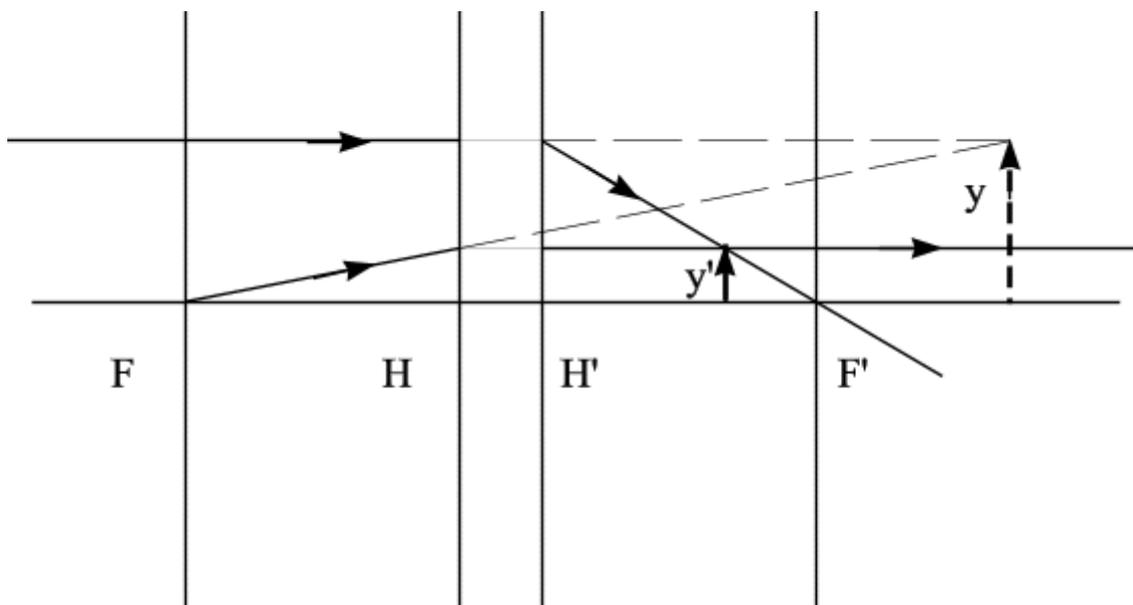
Задача

Рассмотрим пример: Найти изображение заданного предмета.



Решение:

Первый вспомогательный луч таким же образом проводим через передний фокус и край предмета. Не дойдя до мнимого предмета, луч преломится и пойдет параллельно оптической оси. Второй луч направляется параллельно оптической оси через точку предмета. После оптического элемента луч пойдет через задний фокус.



Построение луча

Первый способ построения луча

- Проводим луч параллельно заданному лучу через точку переднего фокуса. Преломленный луч пойдет параллельно оптической оси. Лучи, идущие параллельно друг другу, сойдутся в одной точке на задней фокальной плоскости.

- Соединяем точку пересечения луча с задней фокальной плоскостью с точкой выхода заданного луча из линзы. Это и будет искомый луч.

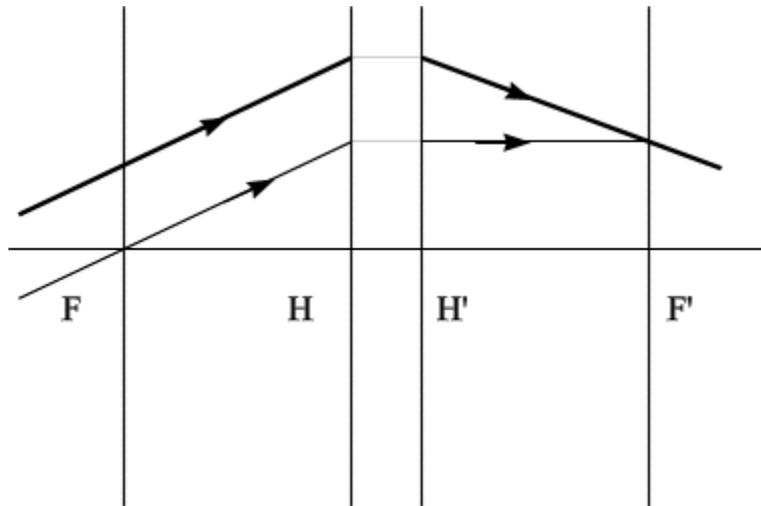


Рис. 10 Построение луча в положительной линзе

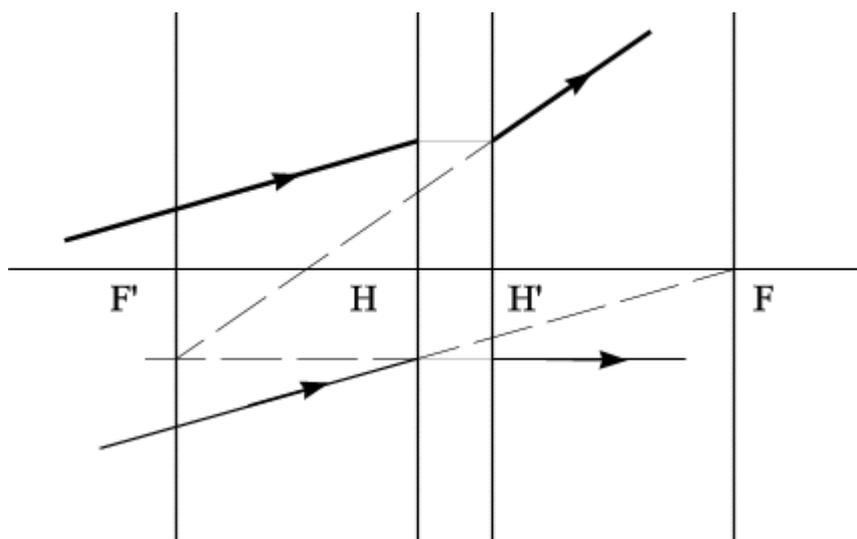


Рис. 11 Построение луча в отрицательной линзе

Второй способ построения луча

Основан на том же правиле, но действует от обратного.

1. Находим точку пересечения заданного луча с передней фокальной плоскостью.
2. Через эту точку проводим вспомогательный луч параллельно оптической оси. Преломленный луч пойдет через точку заднего фокуса.
3. По правилу, такие лучи пойдут параллельно друг другу. Из точки пересечения заданного луча с линзой строим преломленный луч параллельно вспомогательному лучу.

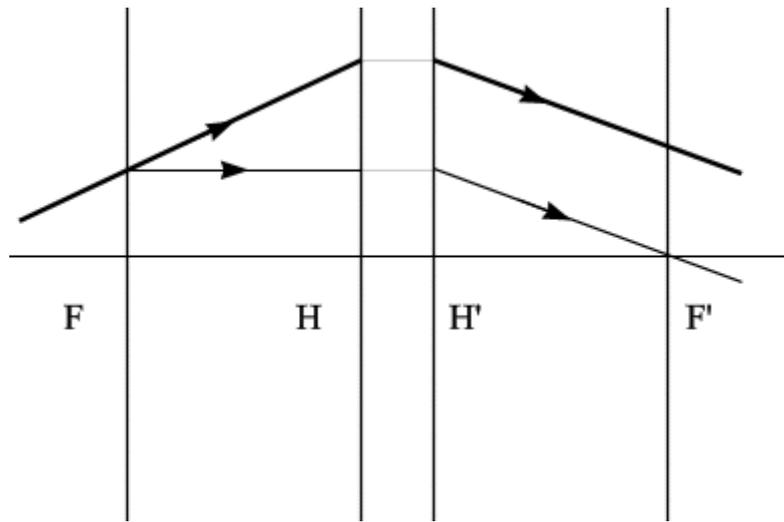


Рис. 12 Второй способ построения хода луча

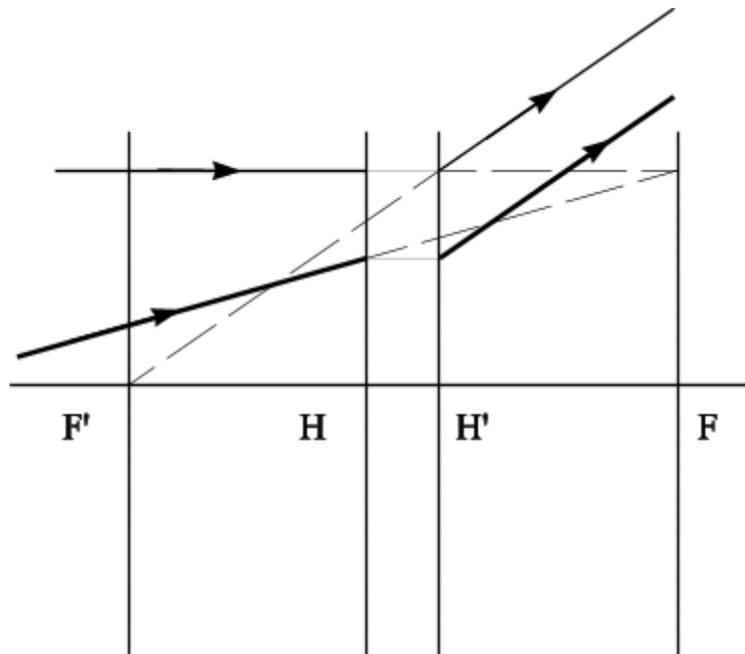


Рис. 13 Второй способ построения хода луча

Построение сложного изображения

Решение задач на построение сложного изображения сводится к более простой задаче и решается традиционным способом. Предмет, состоящий из нескольких точек, получается с помощью построения каждой из точек предмета по отдельности. Затем, соединяя точки предмета в соответствующей последовательности, получаем конфигурацию изображения.

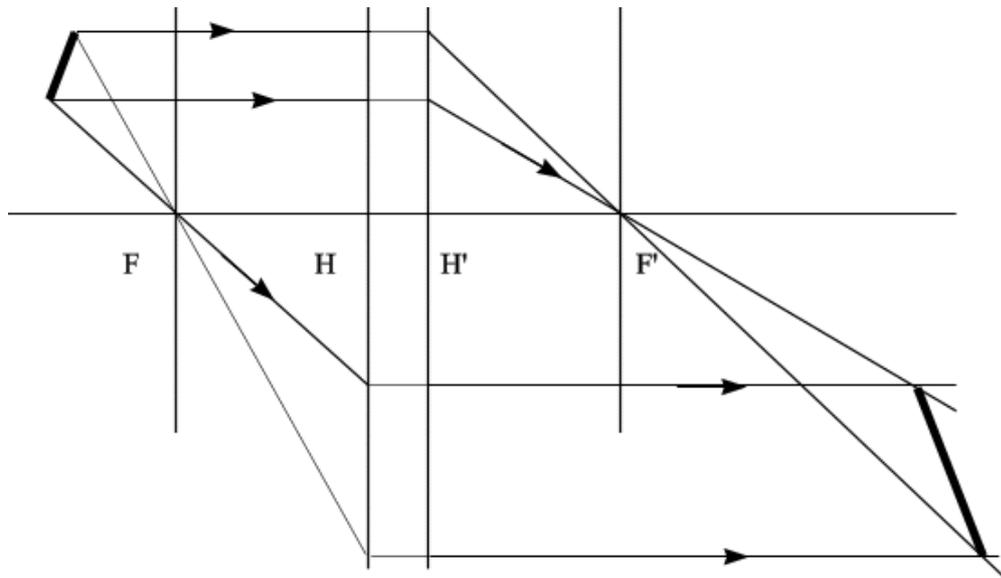
Задача

Построить изображение заданного предмета в положительной (собирающей) линзе.

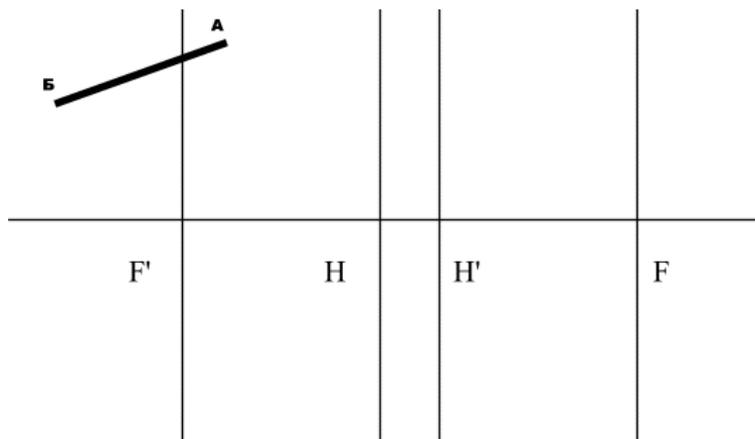
Решение:

Сначала строим изображение нижней точки предмета с помощью двух лучей, как обычно: первый луч проводим через фокус, второй – параллельно оптической оси.

Затем таким же образом строим изображение второй точки. Соединяя точки, полученные в пространстве изображений, получаем изображение заданного предмета.

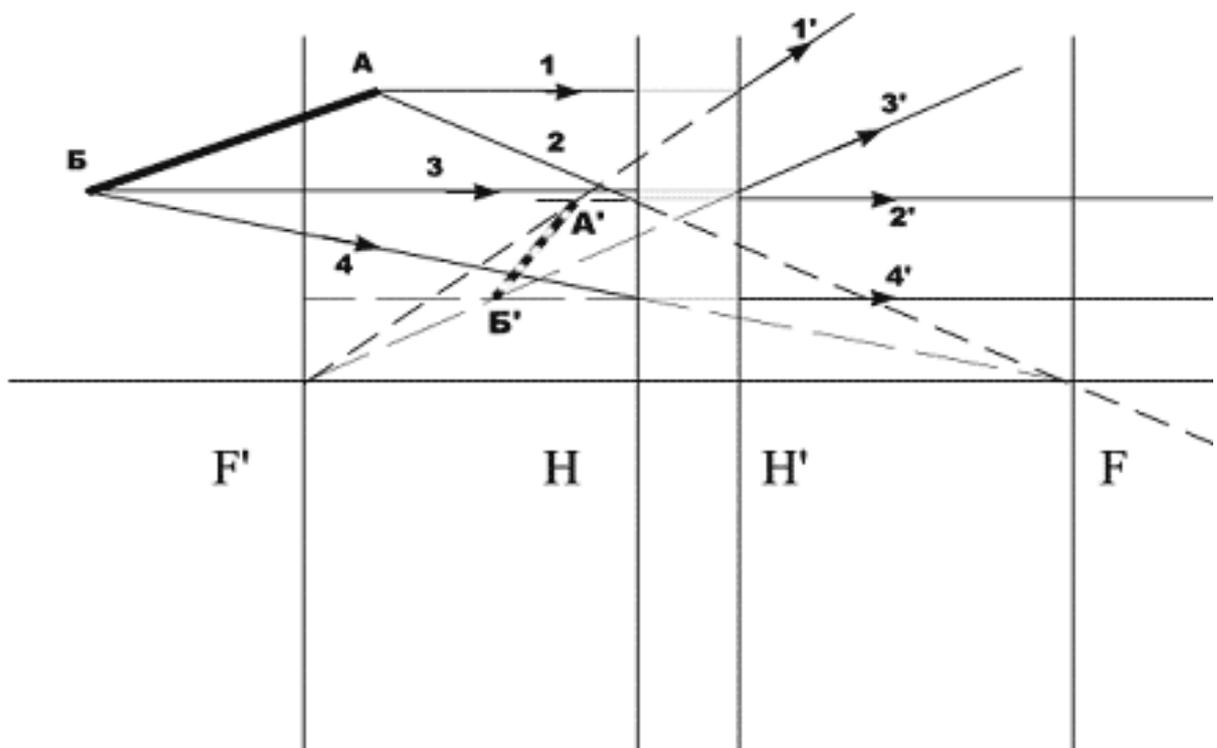


Задача



Решение:

Сначала строим изображение верхней точки предмета. Как и положено для рассеивающей линзы, пересекаться будут не сами лучи, а их продолжения. Затем строим изображение второй точки. Соединяя эти точки, получаем изображение предмета.



Построение предмета по заданному изображению

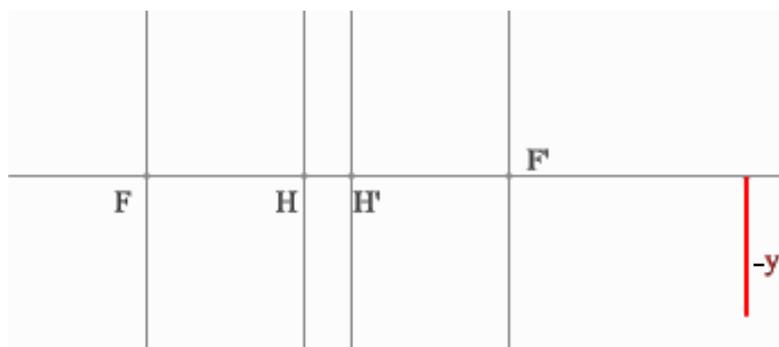
Построение предмета по изображению сводится к решению обратной задачи. Необходимы два луча, идущие через точку изображения. Пересечение этих лучей в пространстве предметов даст нам точку предмета.

Проводим луч через край изображения параллельно оптической оси. Преломленный луч пройдет через точку переднего фокуса.

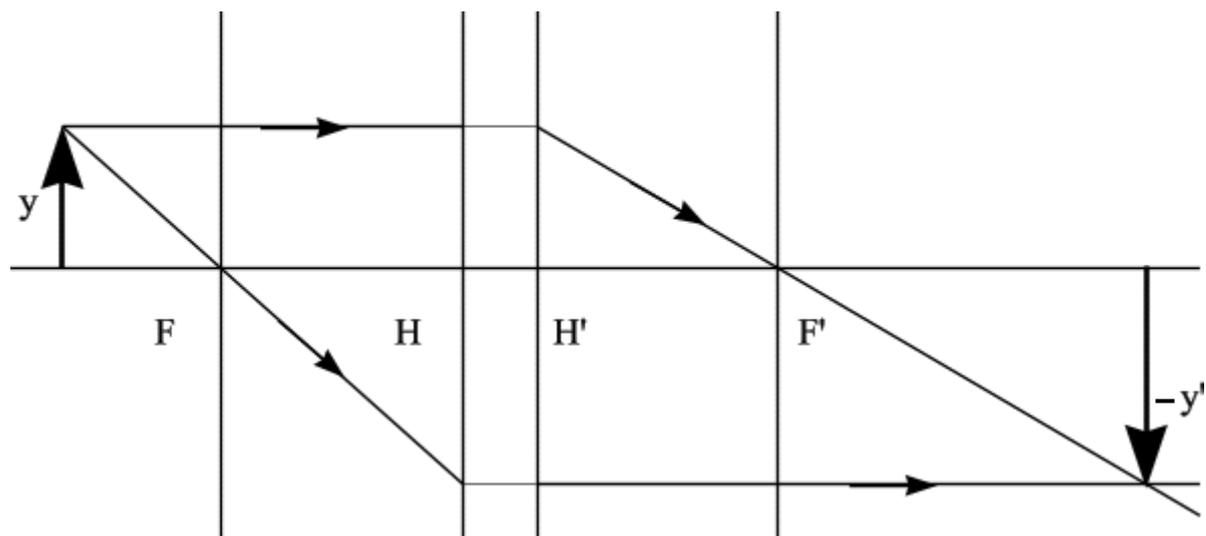
Проведем луч через край изображения и точку заднего фокуса. В пространстве предметов луч пойдет параллельно оптической оси. На пересечении построенных лучей находится искомое изображение точки предмета.

Задача

Положительная линза (построение предмета для действительного изображения)

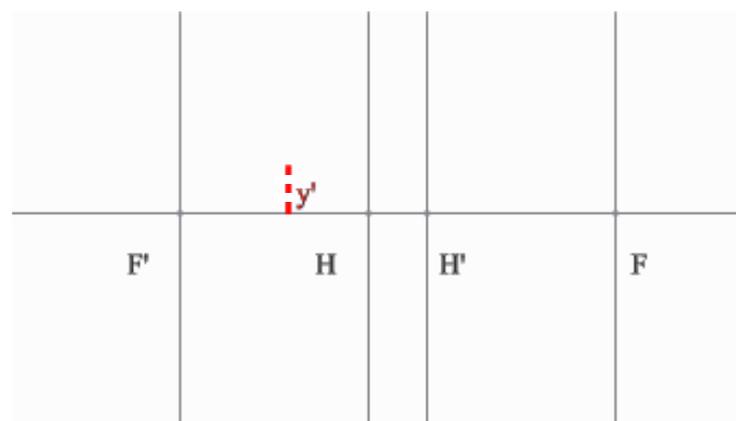


Решение:

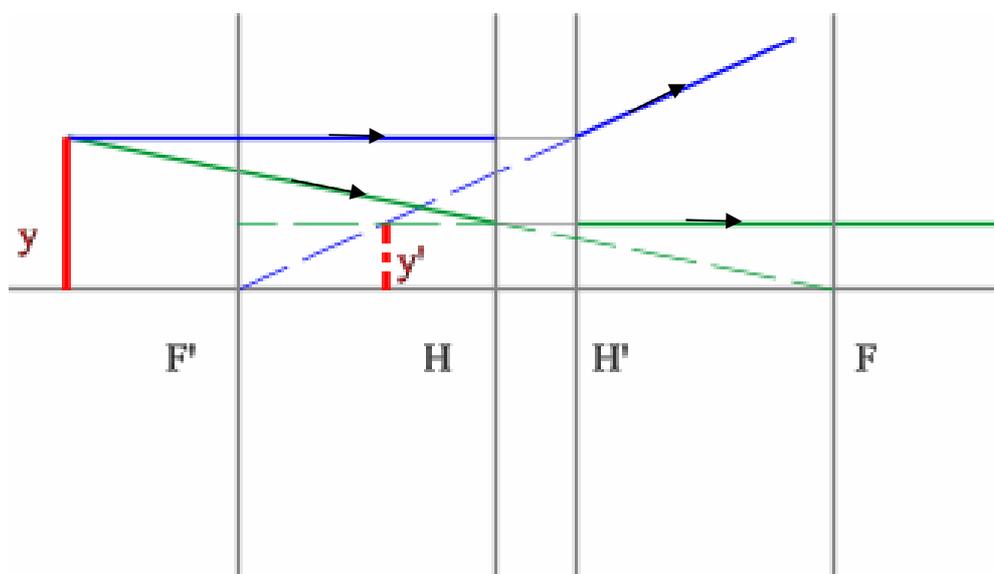


Задача

Построение предмета по мнимому изображению в отрицательной линзе.

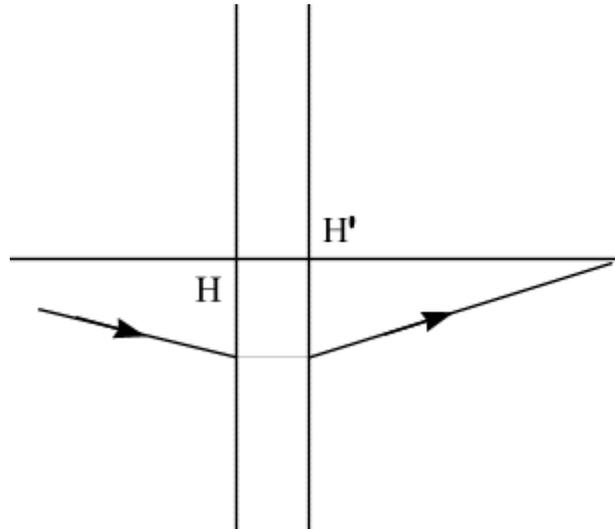


Решение:



Задача

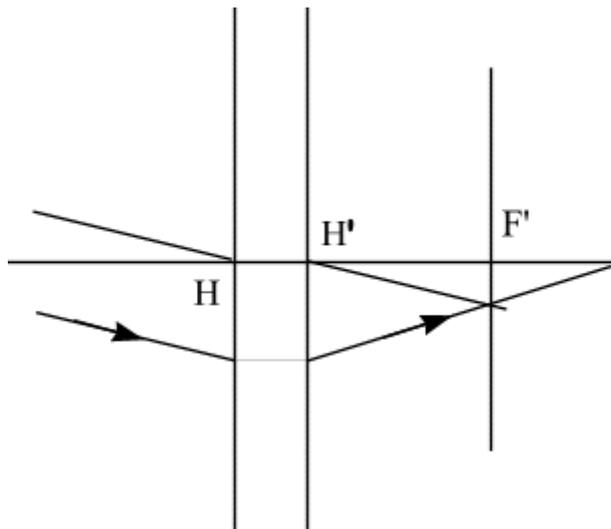
Определить положение фокальных плоскостей по заданному ходу луча. Система находится в однородной среде.



Решение:

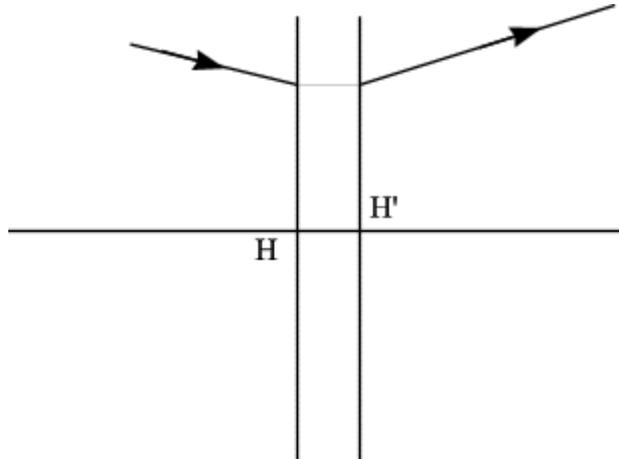
Строим луч, параллельный заданному лучу, через центр линзы. В пространстве изображений этот луч идёт под тем же углом.

Находим точку пересечения заданного и построенного лучей в пространстве изображений. По правилу, эта точка находится на задней фокальной плоскости системы. Значит, имеем право построить фокальную плоскость. Построение передней фокальной плоскости можно не производить, отложив полученное расстояние от передней главной плоскости.



Задача

Определить положение фокальных плоскостей по заданному ходу луча. Система находится в однородной среде.

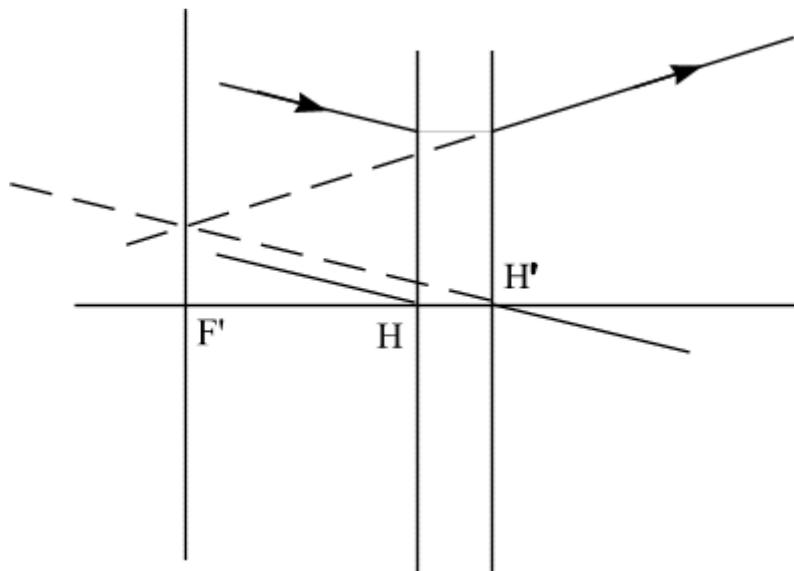


Решение:

Строим луч, параллельный заданному, в пространстве предметов.

Находим точку пересечения этого луча с заданным в пространстве изображений. Как видно из рисунка, пересекутся лишь продолжения лучей, что говорит о рассеивающем характере системы.

Через точку пересечения проходит задняя фокальная плоскость.



Задача

Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f'=100$ мм и экрана, на который проектируется изображение с пятикратным увеличением.

Решение

При проектировании линзой изображение на экране получается перевернутым, следовательно, $\beta = -5^x$.

Составим уравнения: $\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}$ $\frac{a'}{a} = -5 \Rightarrow a' = -5 \cdot a$

Полученное выражение подставим в уравнение: $\frac{1}{-5 \cdot a} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}$

$$\frac{-6}{-5 \cdot a} = \frac{1}{100} \Rightarrow a = -120 \text{ мм}$$

$$a' = -5 \cdot a \Rightarrow a' = 600 \text{ мм}$$

Ответ: $a = -120 \text{ мм}$, $a' = 600 \text{ мм}$

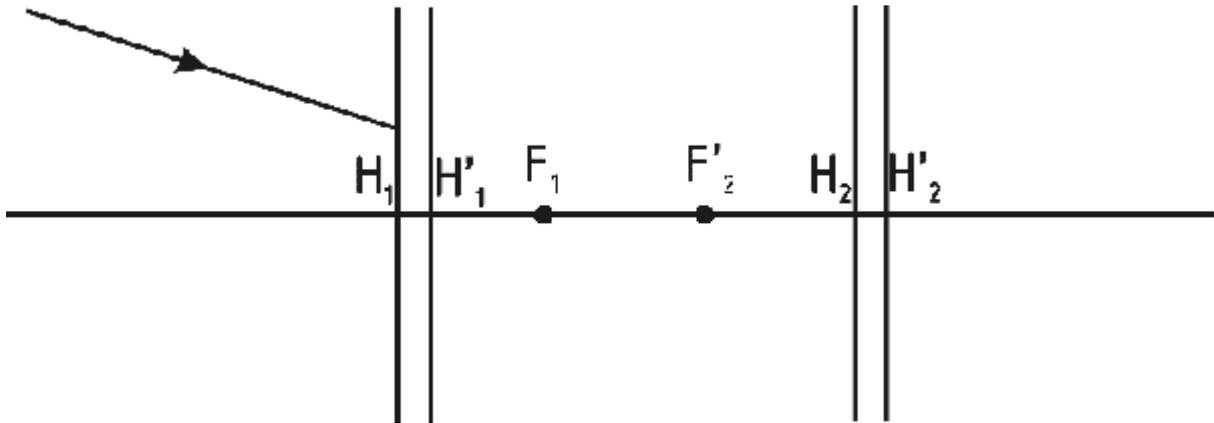
39. Линза имеет фокусное расстояние $f' = 80$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -40$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
40. Линза имеет фокусное расстояние $f' = 70$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -50$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
41. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -80$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -40$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
42. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -100$ мм. Предмет размером $y = 5$ мм расположен на расстоянии $a = -40$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
43. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -60$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -30$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
44. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -40$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -20$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
45. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -120$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -70$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
46. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -110$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -90$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
47. Линза имеет фокусное расстояние $f' = 90$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -70$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
48. Линза имеет фокусное расстояние $f' = 70$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -50$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
49. Линза имеет фокусное расстояние $f' = 50$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -30$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
50. Линза имеет фокусное расстояние $f' = -140$ мм. Предмет размером $y = 10$ мм расположен на расстоянии $a = -100$ мм от линзы. Определить положение и величину изображения графически и аналитически.
51. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:5, если фокусное расстояние объектива $f' = 300$ мм?

52. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:5, если фокусное расстояние объектива $f' = 200$ мм?
53. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:6, если фокусное расстояние объектива $f' = 300$ мм?
54. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:6, если фокусное расстояние объектива $f' = 200$ мм?
55. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:4, если фокусное расстояние объектива $f' = 300$ мм?
56. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:4, если фокусное расстояние объектива $f' = 200$ мм?
57. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:3, если фокусное расстояние объектива $f' = 150$ мм?
58. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:3, если фокусное расстояние объектива $f' = 200$ мм?
59. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:3.5, если фокусное расстояние объектива $f' = 150$ мм?
60. С какого расстояния необходимо сфотографировать чертеж, чтобы получить на негативе его копию в масштабе 1:5, если фокусное расстояние объектива $f' = 150$ мм?
61. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 130$ мм и экрана, на который проектируется изображение с пятикратным увеличением.
62. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 150$ мм и экрана, на который проектируется изображение с пятикратным увеличением.
63. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 100$ мм и экрана, на который проектируется изображение с пятикратным увеличением.
64. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 120$ мм и экрана, на который проектируется изображение с трёхкратным увеличением.

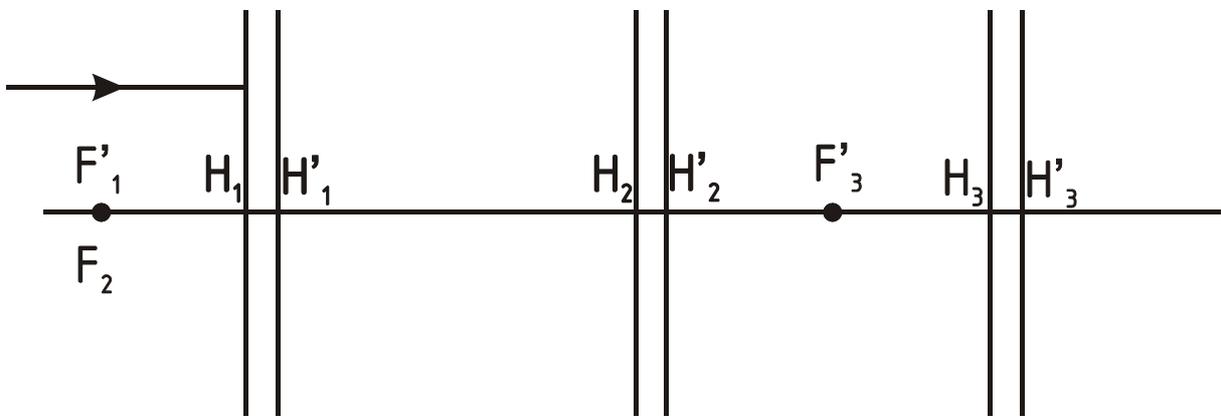
65. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 60$ мм и экрана, на который проектируется изображение с трёхкратным увеличением.
66. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 40$ мм и экрана, на который проектируется изображение с трёхкратным увеличением.
67. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 80$ мм и экрана, на который проектируется изображение с четырёхкратным увеличением.
68. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 90$ мм и экрана, на который проектируется изображение с пятикратным увеличением.
69. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 30$ мм и экрана, на который проектируется изображение с шестикратным увеличением.
70. Определить взаимное расположение предмета, линзы с фокусным расстоянием $f' = 110$ мм и экрана, на который проектируется изображение с трёхкратным увеличением.
71. Определить размер изображения, образованного объективом на экране, если предмет имеет размер $y = 30$ мм и находится перед объективом на расстоянии 110 мм, $f'_{об} = 100$ мм.
72. Определить размер изображения, образованного объективом на экране, если предмет имеет размер $y = 10$ мм и находится перед объективом на расстоянии 120 мм, $f'_{об} = 60$ мм.
73. Определить размер изображения, образованного объективом на экране, если предмет имеет размер $y = 20$ мм и находится перед объективом на расстоянии 60 мм, $f'_{об} = 40$ мм.
74. Определить размер изображения, образованного объективом на экране, если предмет имеет размер $y = 10$ мм и находится перед объективом на расстоянии 150 мм, $f'_{об} = 80$ мм.
75. Предмет имеет размер $y = 24$ мм, изображение $y' = -120$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 600 мм.
76. Предмет имеет размер $y = 10$ мм, изображение $y' = -40$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 500 мм.
77. Предмет имеет размер $y = 10$ мм, изображение $y' = -60$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 700 мм.

78. Предмет имеет размер $y=10$ мм, изображение $y'=-30$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 400 мм.
79. Предмет имеет размер $y=10$ мм, изображение $y'=-50$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 600 мм.
80. Предмет имеет размер $y=20$ мм, изображение $y'=-120$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 700 мм.
81. Предмет имеет размер $y=10$ мм, изображение $y'=-20$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 300 мм.
82. Предмет имеет размер $y=5$ мм, изображение $y'=-50$ мм. Определить фокусное расстояние тонкой линзы, если расстояние между предметом и изображением 1100 мм.
83. Предмет $y=10$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-40$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 260 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
84. Предмет $y=5$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-50$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 400 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
85. Предмет $y=10$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-70$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 700 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
86. Предмет $y=15$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-75$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 450 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
87. Предмет $y=5$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-80$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 480 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
88. Предмет $y=10$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-80$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 320 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
89. Предмет $y=15$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-90$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 180 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.
90. Предмет $y=5$ мм проецируется в виде действительного изображения $y'=-45$ мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 270 мм от линзы. Определить фокусное расстояние линзы.

91. Построить луч через всю систему.

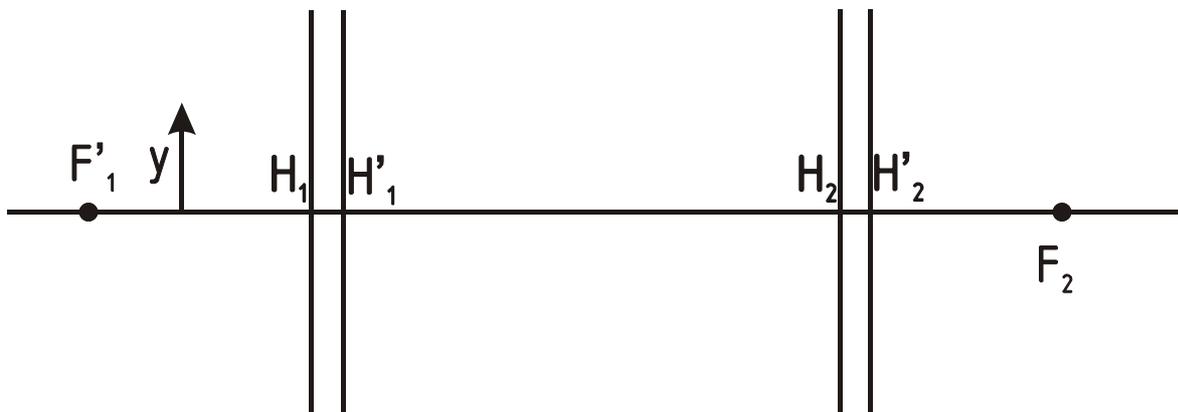


92. Построить луч через всю систему.

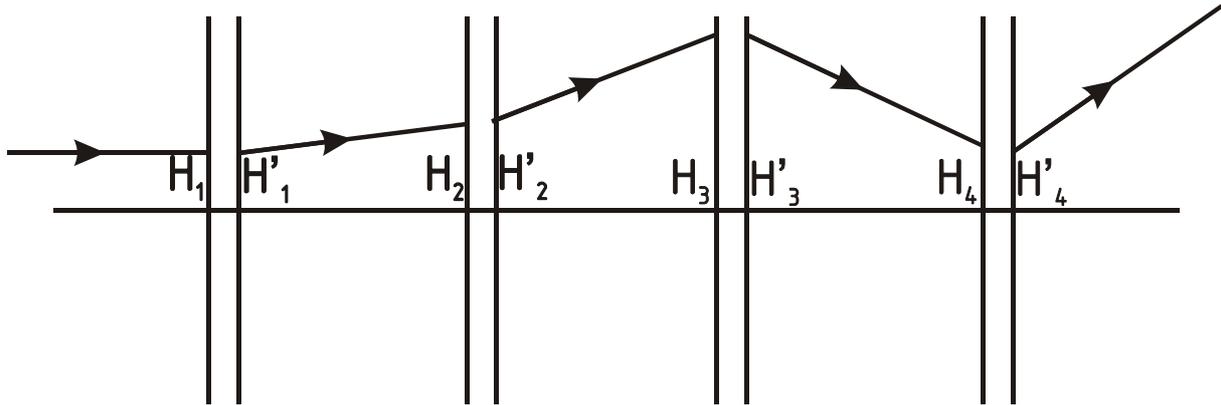


93.

Опред. y' -?

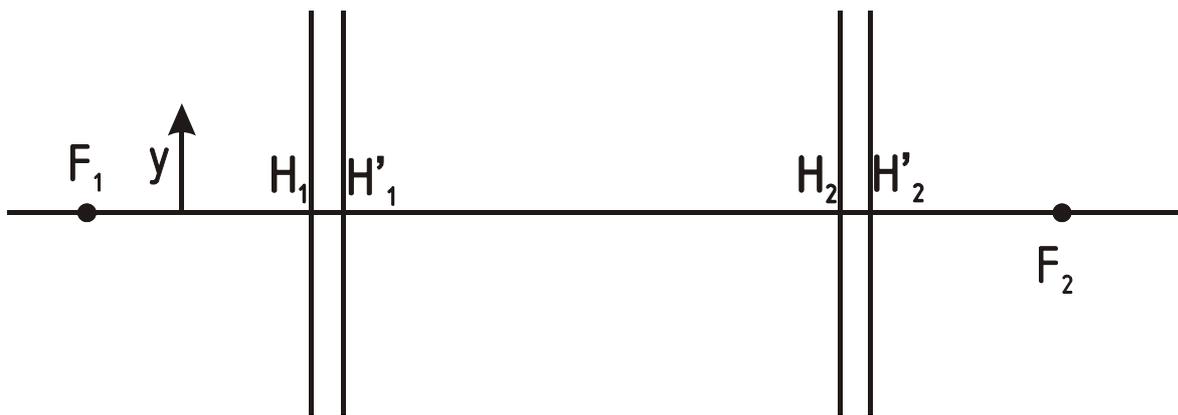


94. Определить положение фокусов каждой линзы системы.



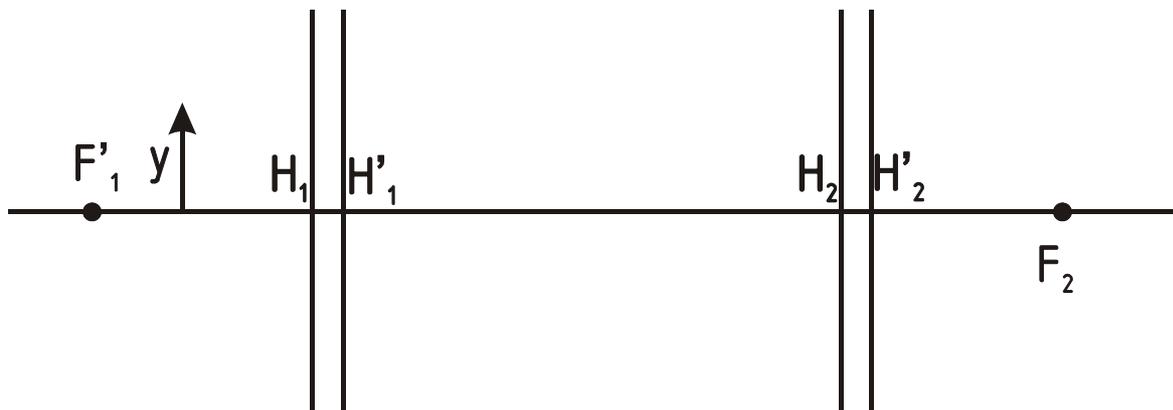
95.

Опред. y' -?

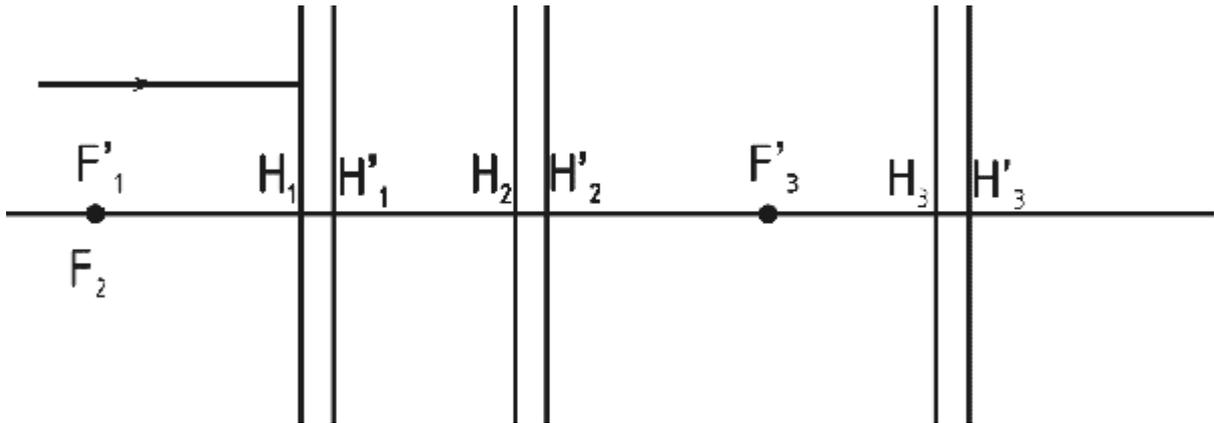


96.

Опред. y' -?

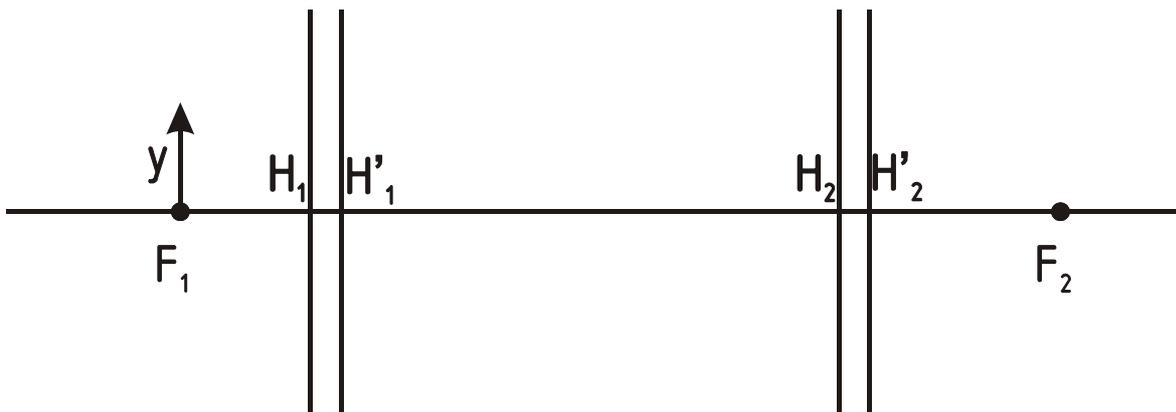


97. Построить луч через всю систему.



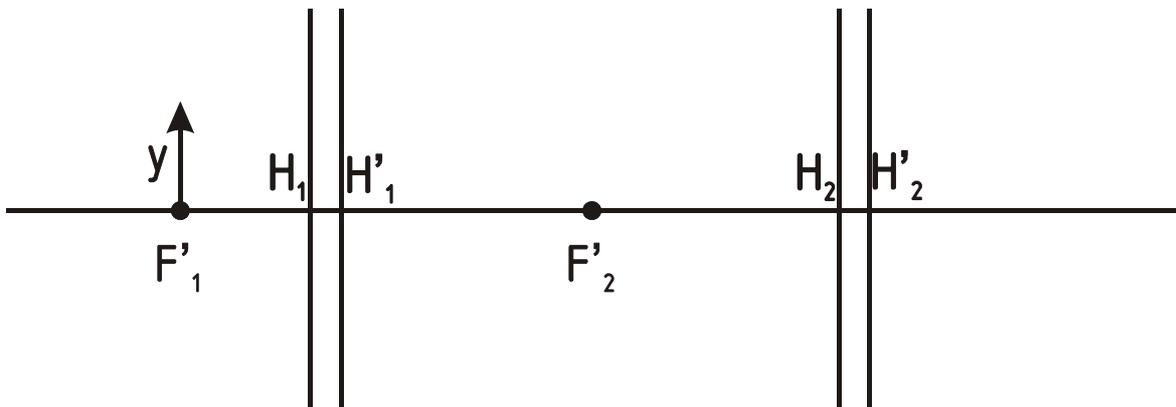
98.

Опред. y' -?



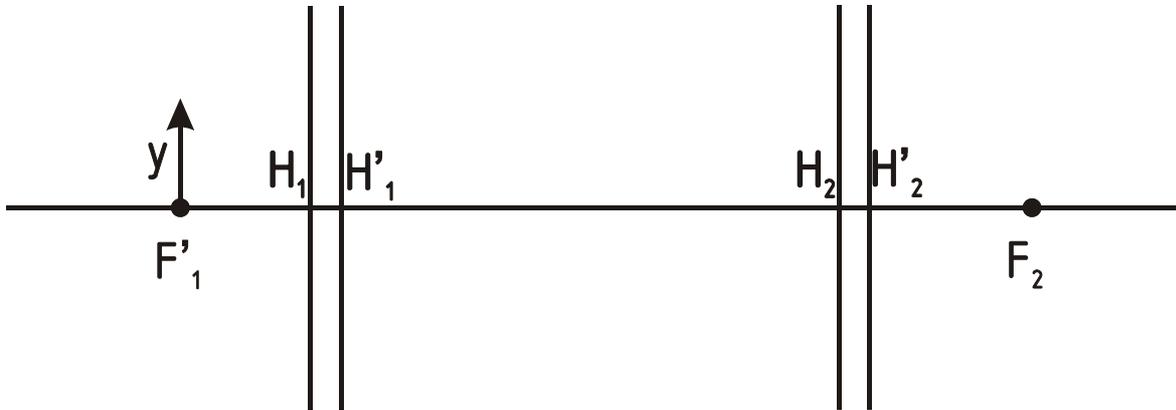
99.

Опред. y' -?



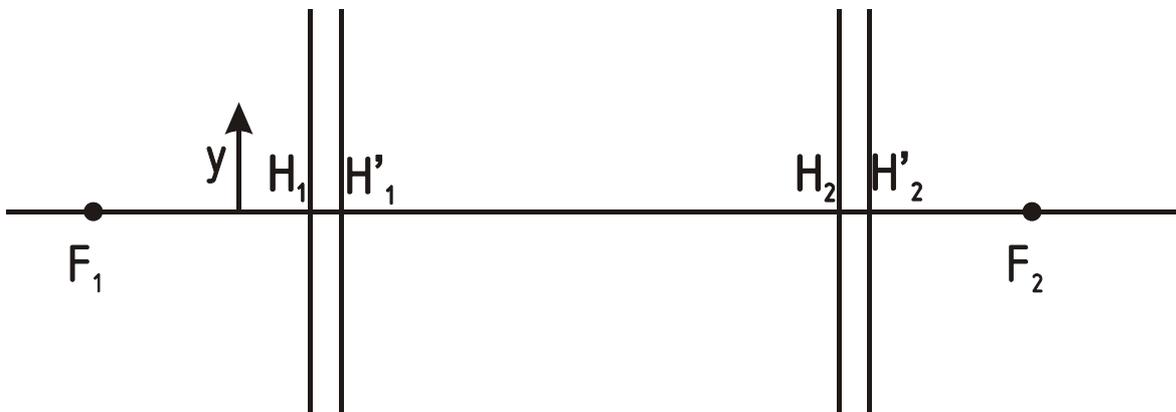
100.

Опред. y' -?

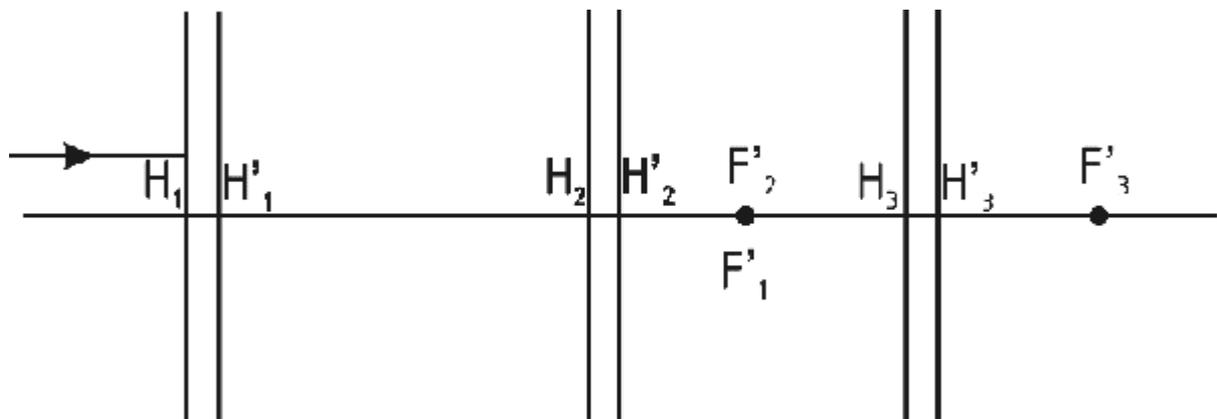


101.

Опред. y' -?

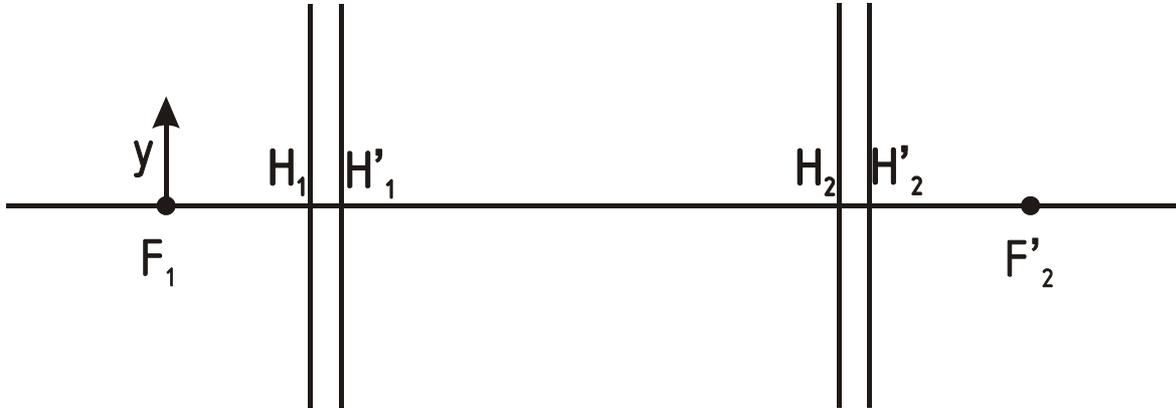


102. Построить луч через всю систему.



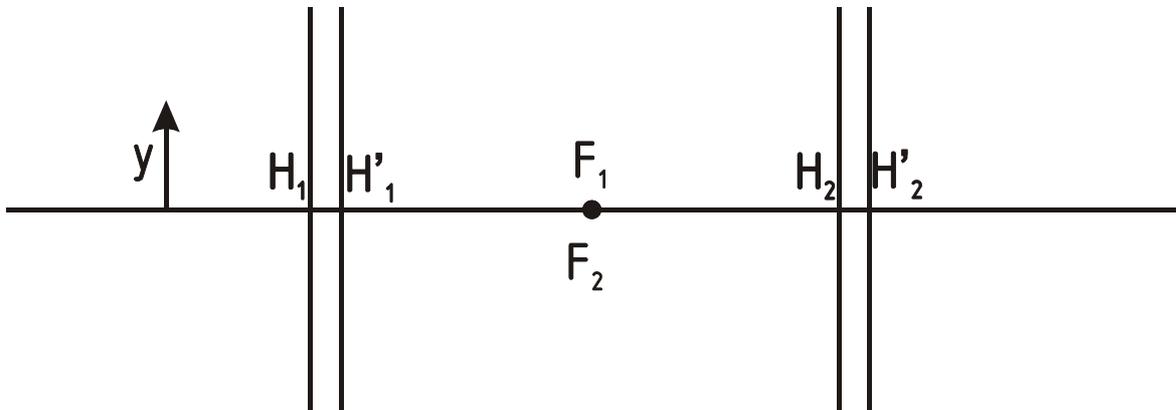
103.

Опред. y' -?

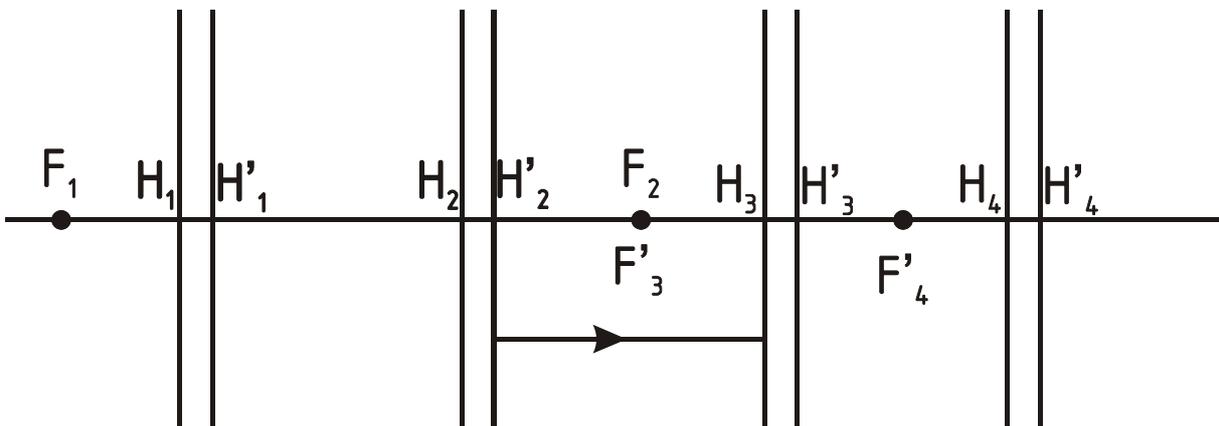


104.

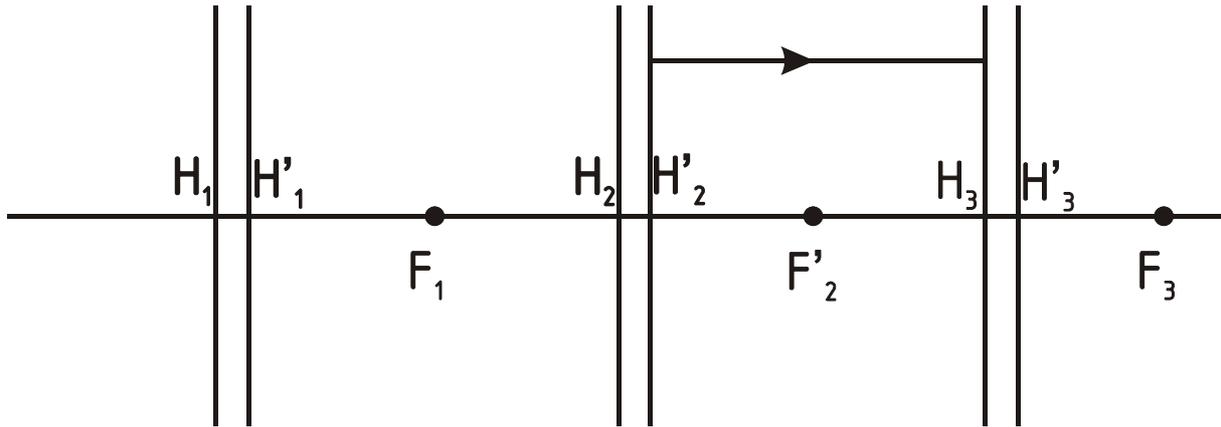
Опред. y' -?



105. Построить луч через всю систему.

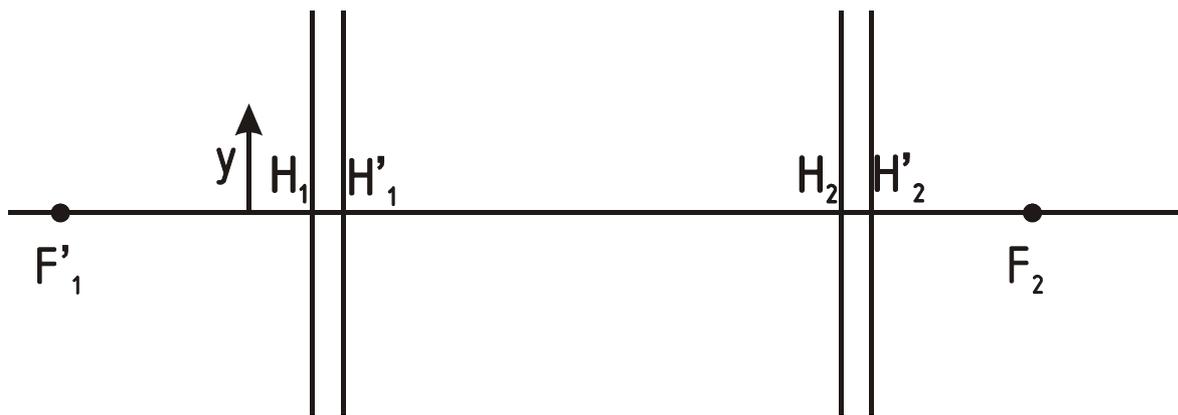


106. Построить луч через всю систему.



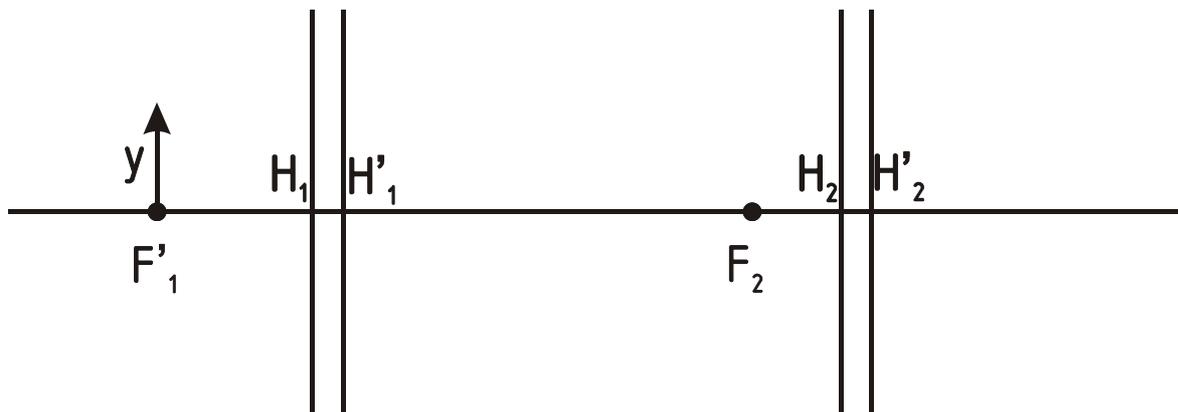
107.

Опред. y' -?



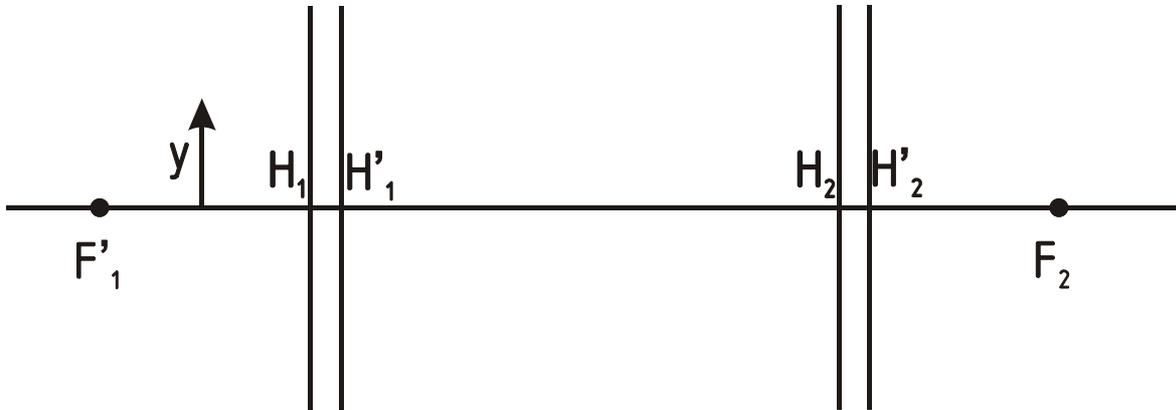
108.

Опред. y' -?



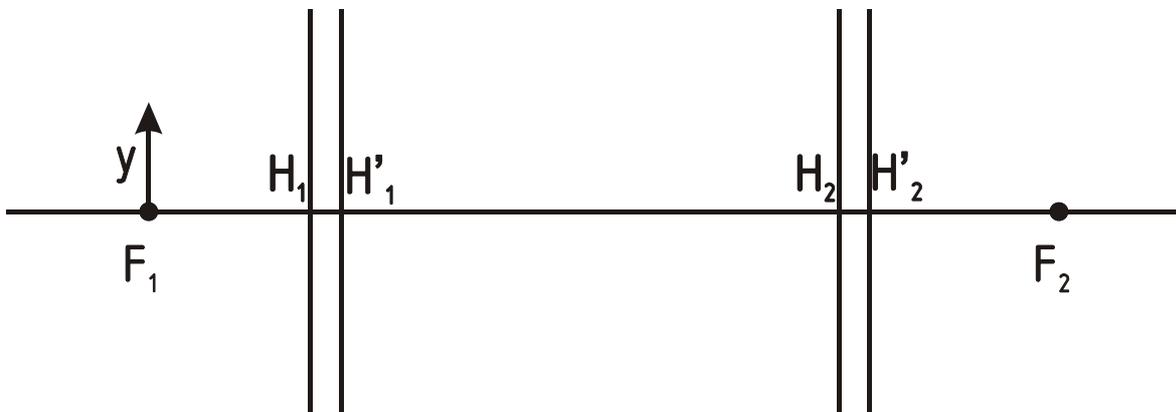
109.

Опред. y' -?

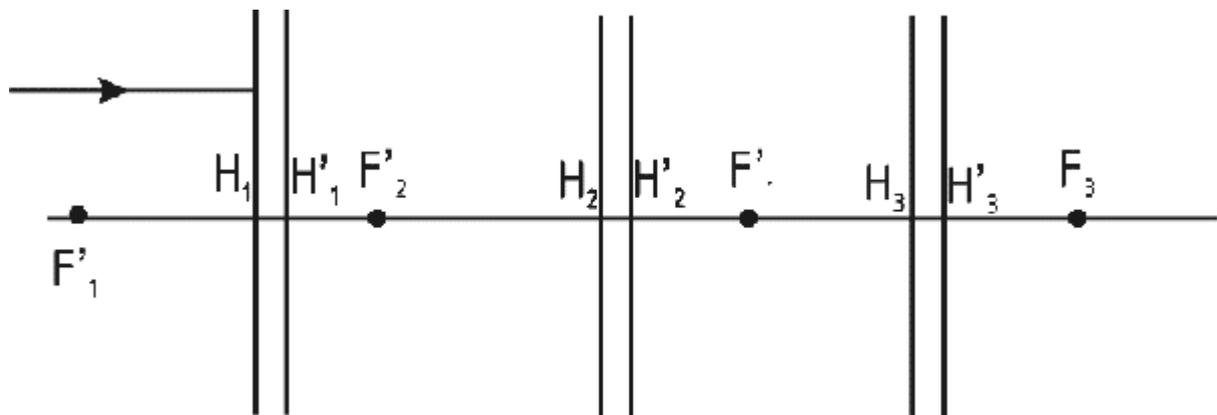


110.

Опред. y' -?

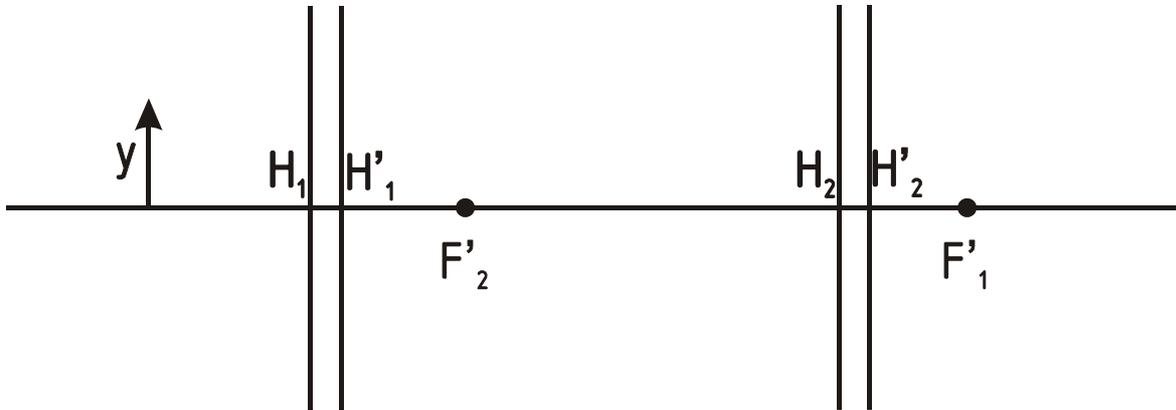


111. Построить луч через всю систему.



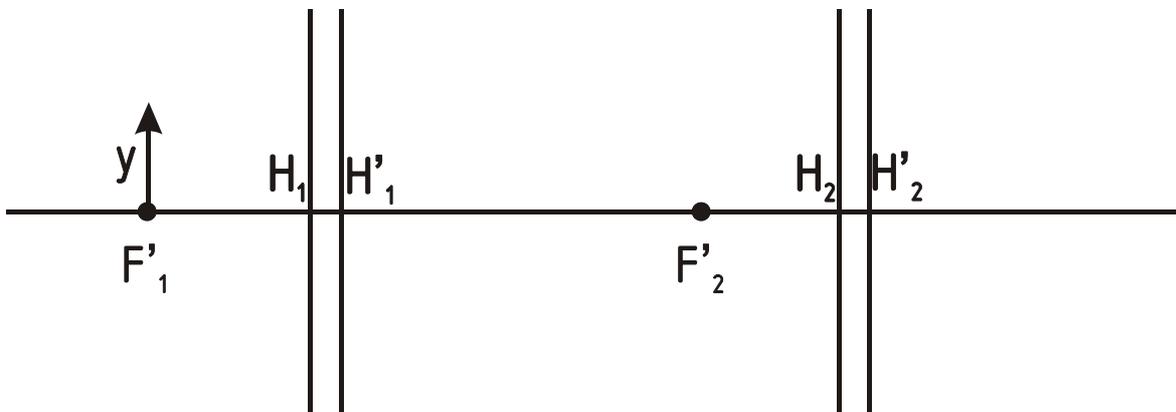
112.

Опред. y' -?

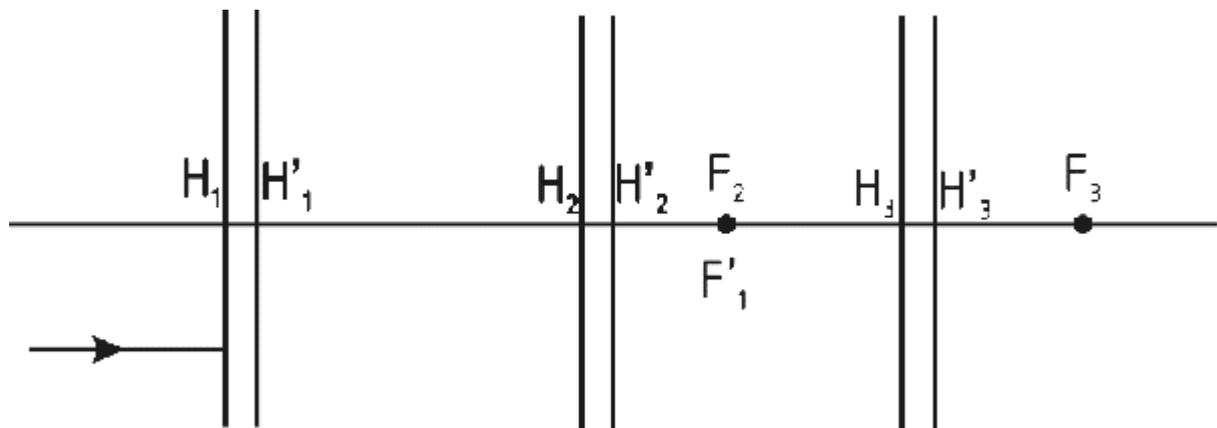


113.

Опред. y' -?

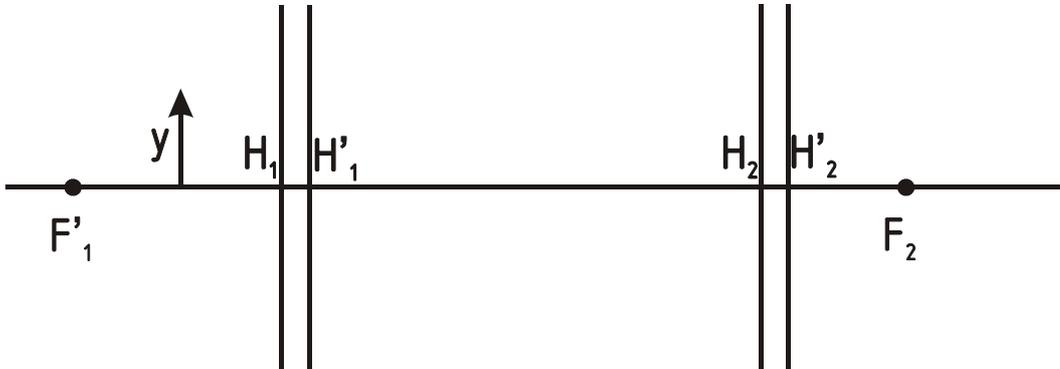


114. Построить луч через всю систему.



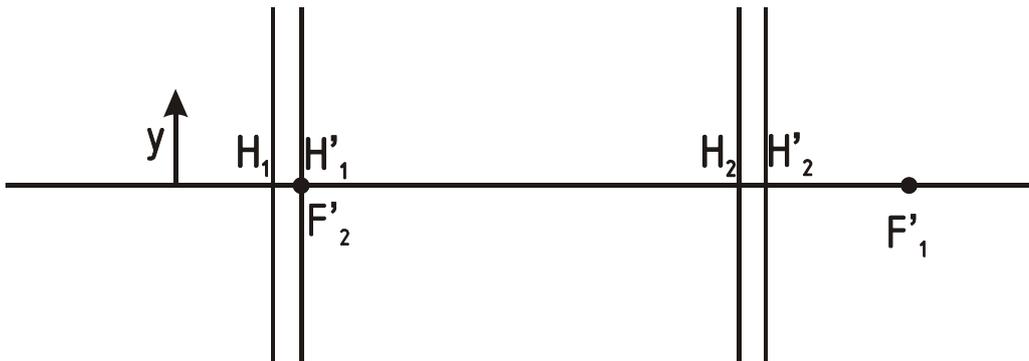
115.

Опред. y' -?

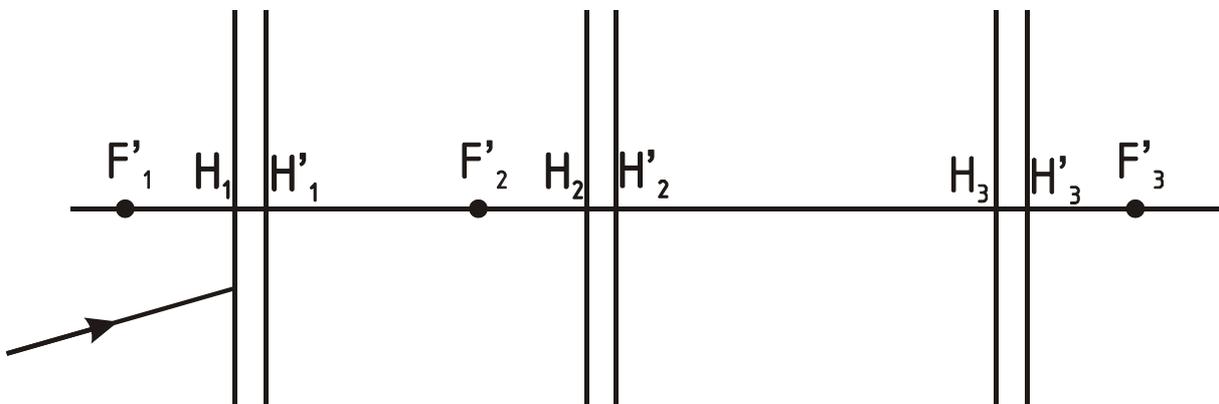


116.

Опред. y' -?

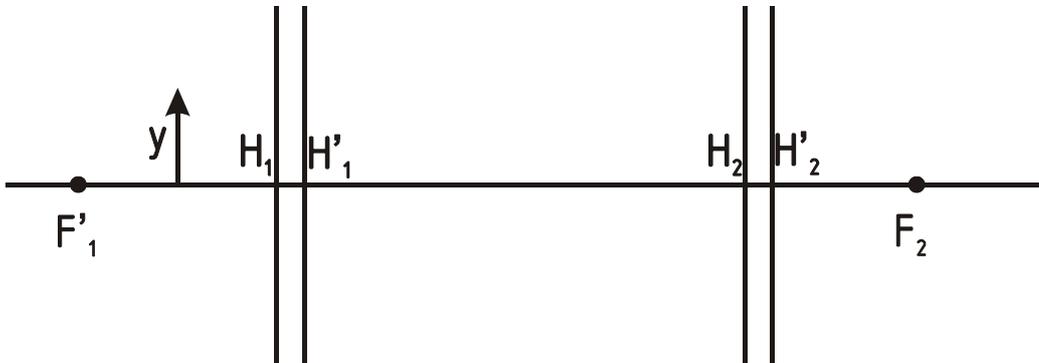


117. Построить луч через всю систему.



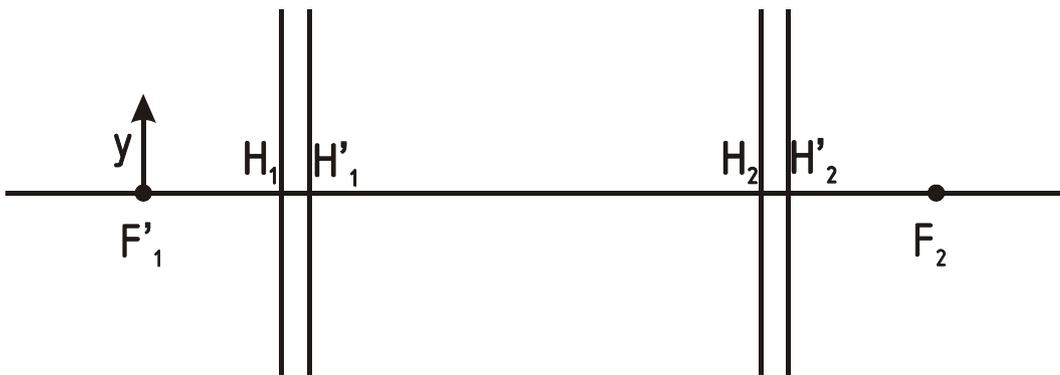
118.

Опред. y' -?



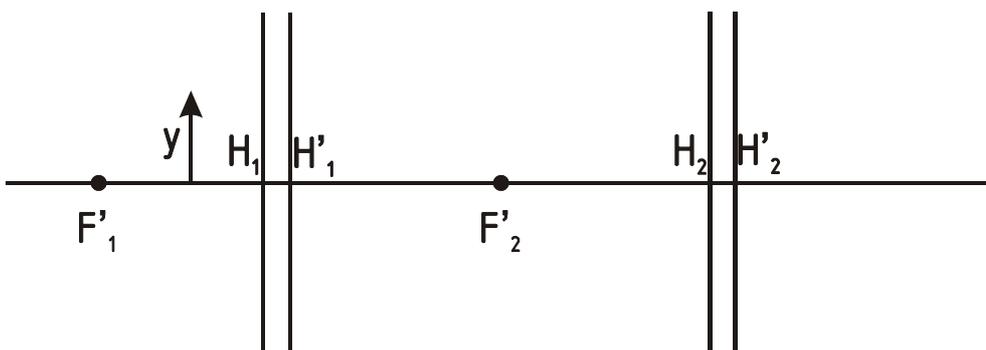
119.

Опред. y' -?



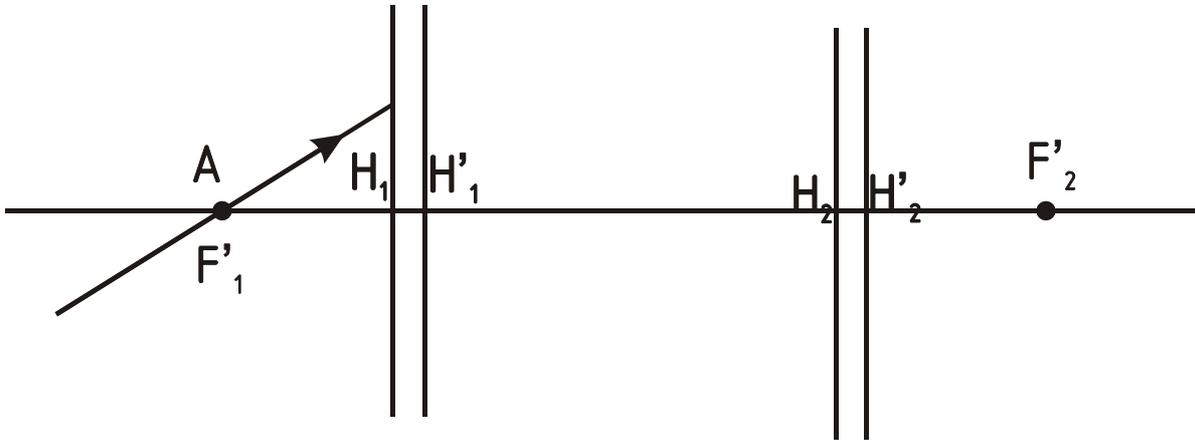
120.

Опред. y' -?



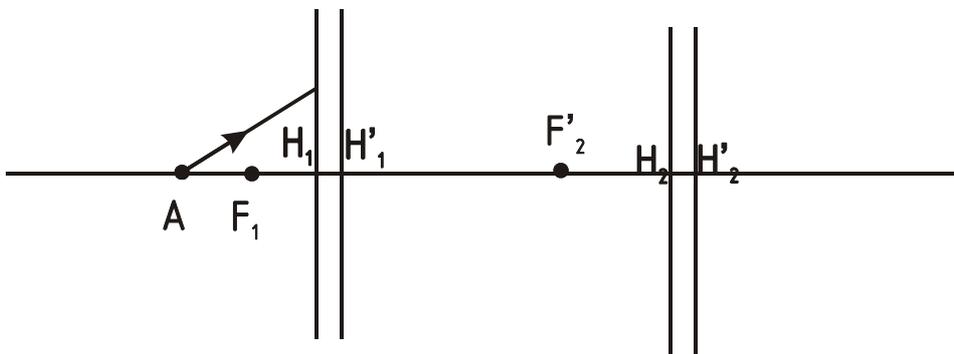
121.

Опред. (•) A' -?

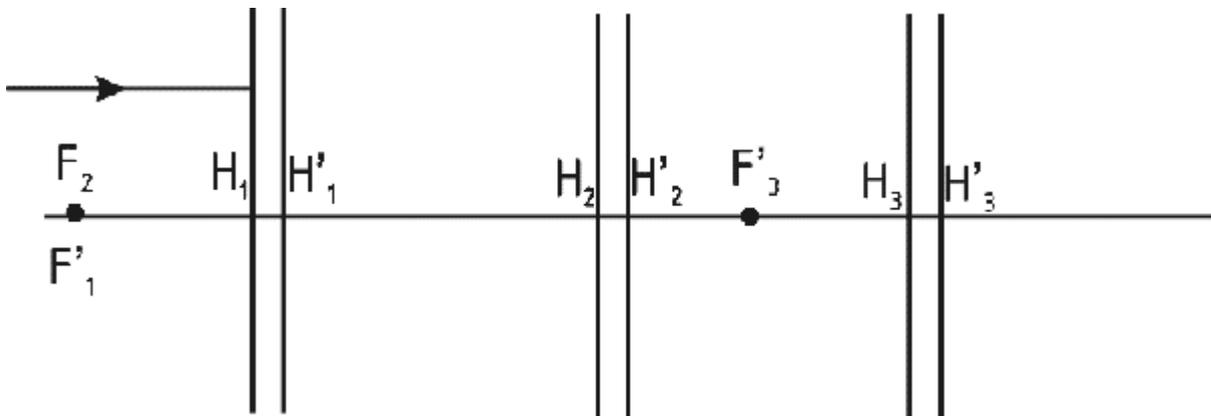


122.

Опред. (•) A' -?

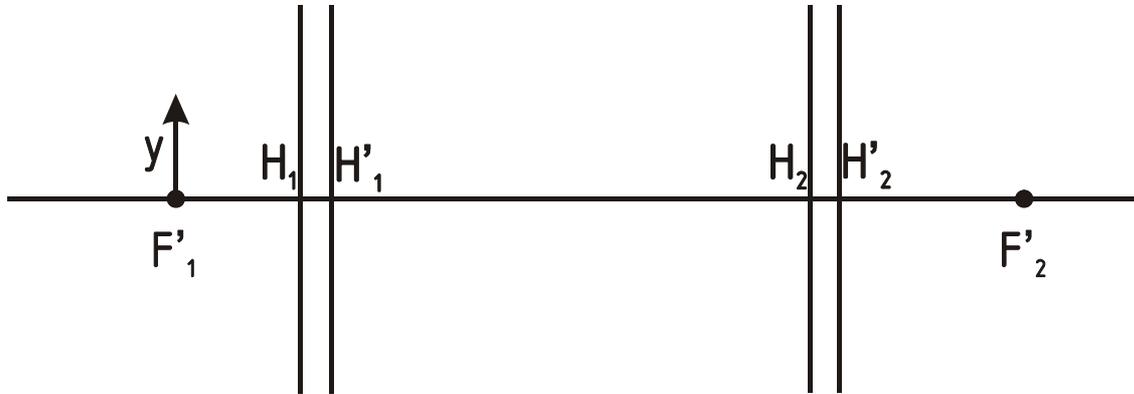


123. Построить луч через всю систему.

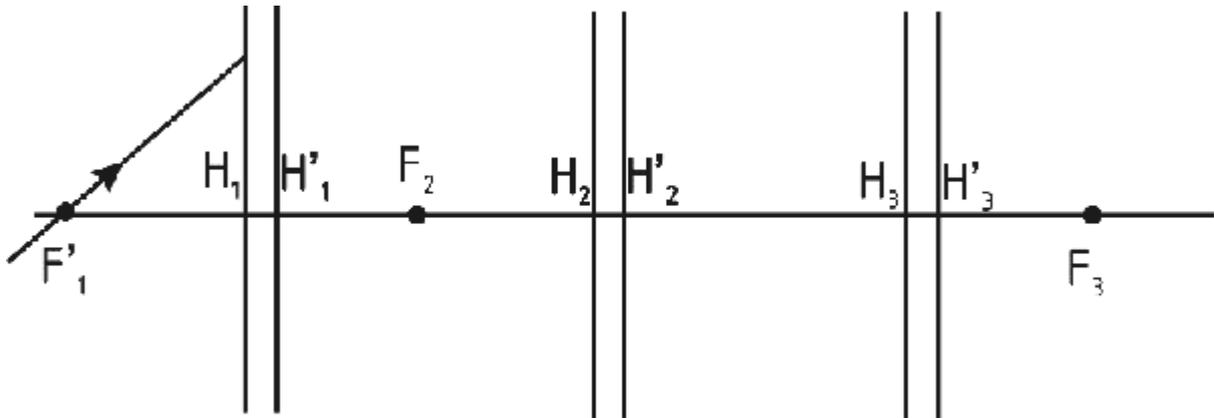


124. Построить изображение y' .

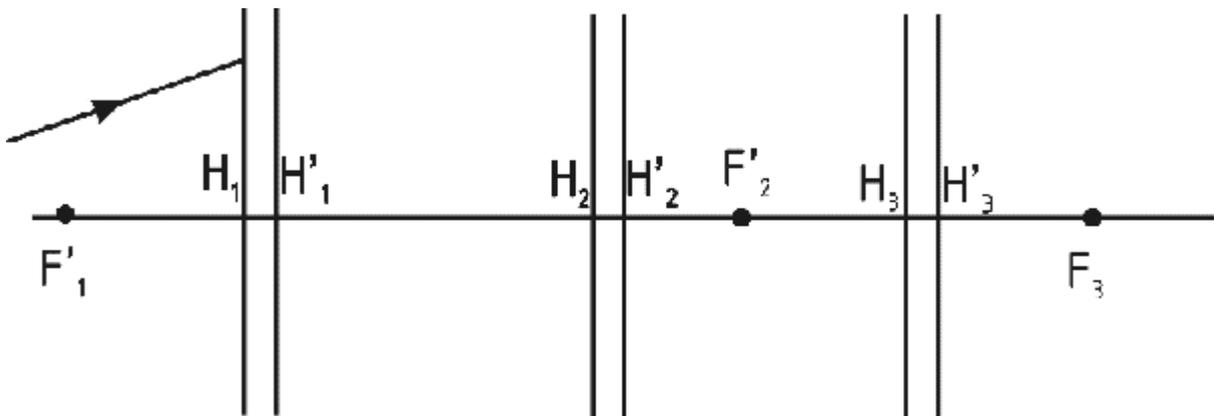
Опред. y' -?



125. Построить луч через всю систему.

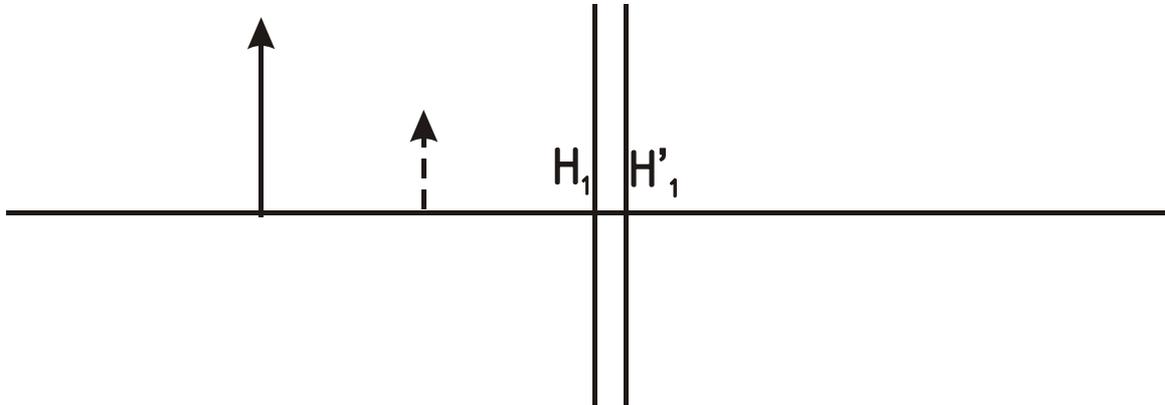


126. Построить луч через всю систему.



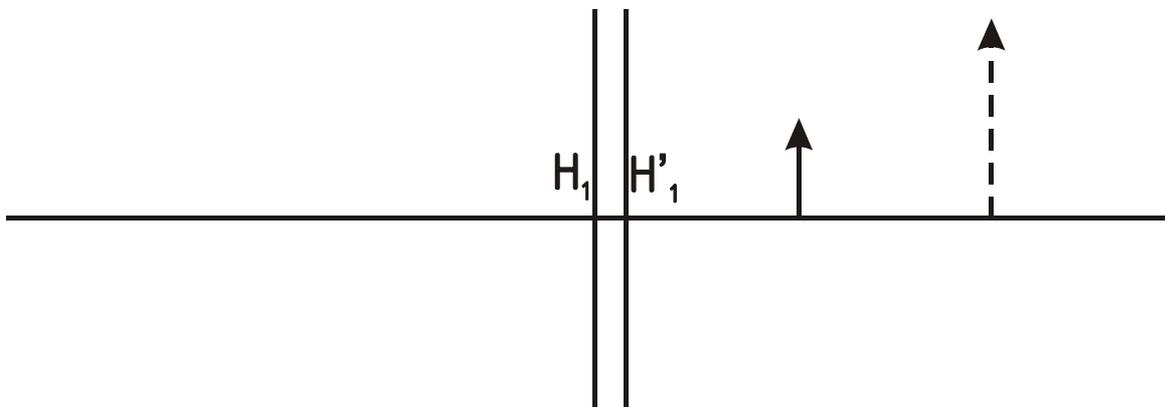
127. Определить положение фокусов линзы.

Опред. (•) F-? и (•)F'-?

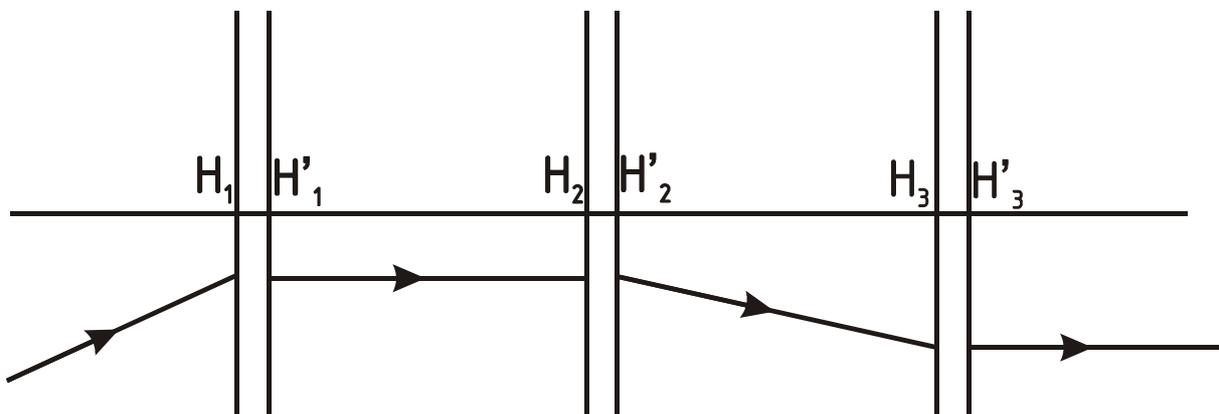


128. Определить положение фокусов линзы.

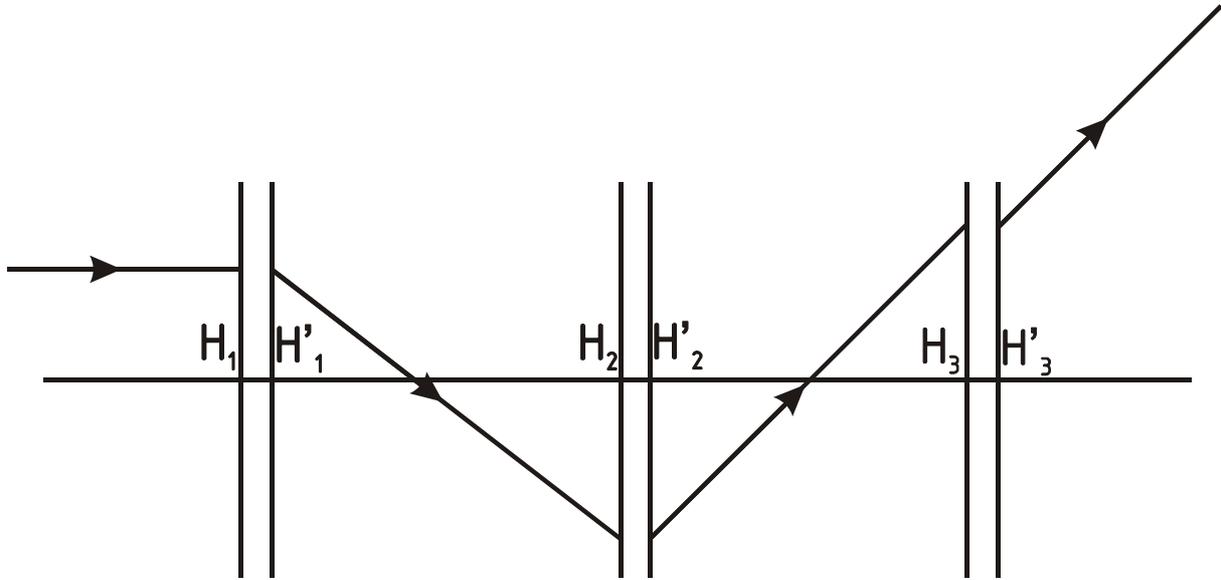
Опред. (•) F-? и (•)F'-?



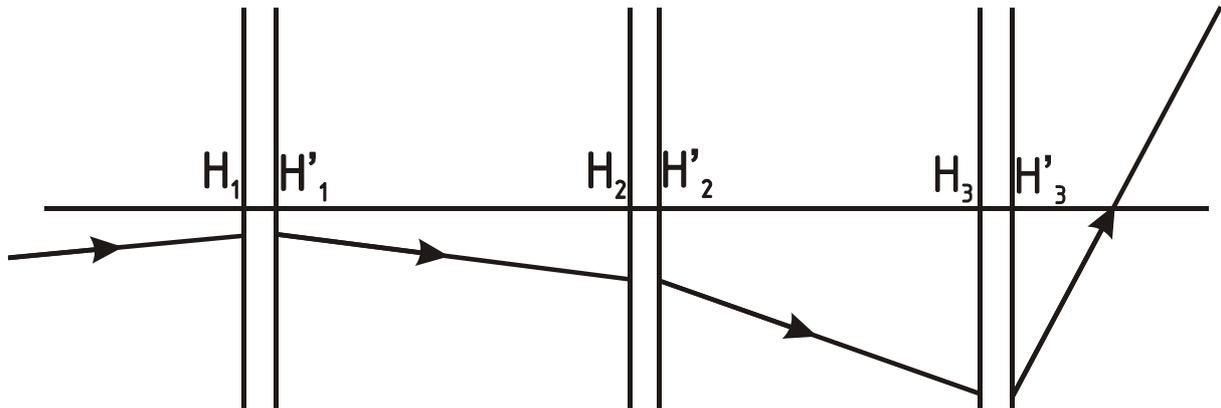
129. Определить положение фокусов каждой линзы.



130. Определить положение фокусов каждой линзы.

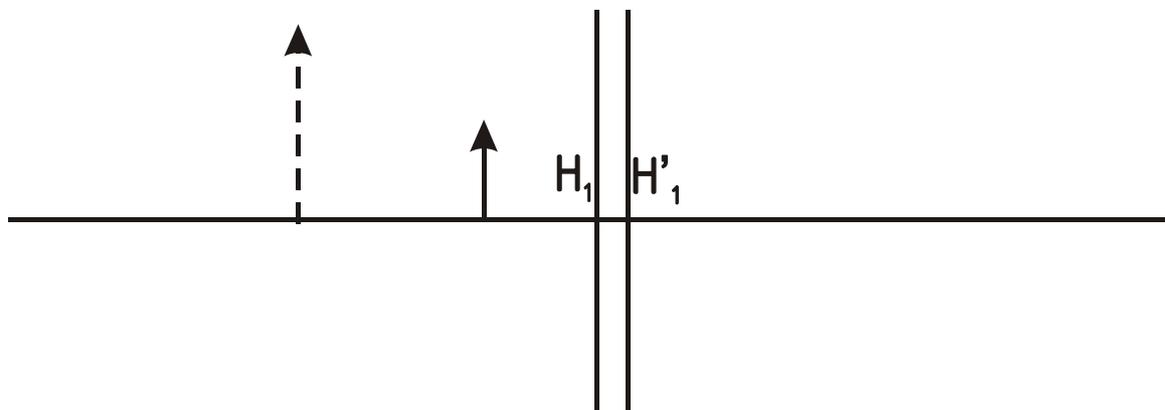


131. Определить положение фокусов каждой линзы.

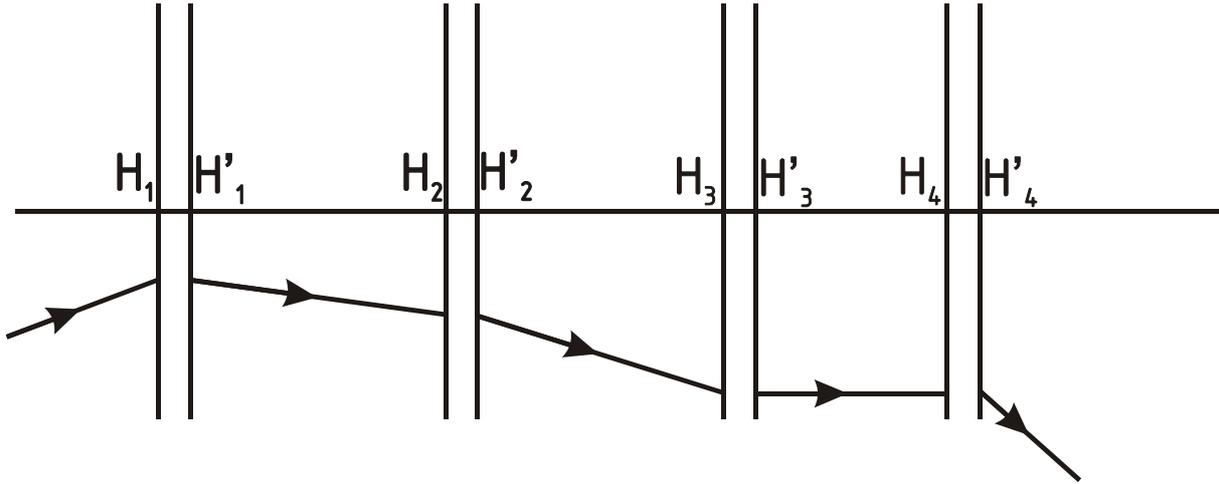


132. Определить положение фокусов линзы.

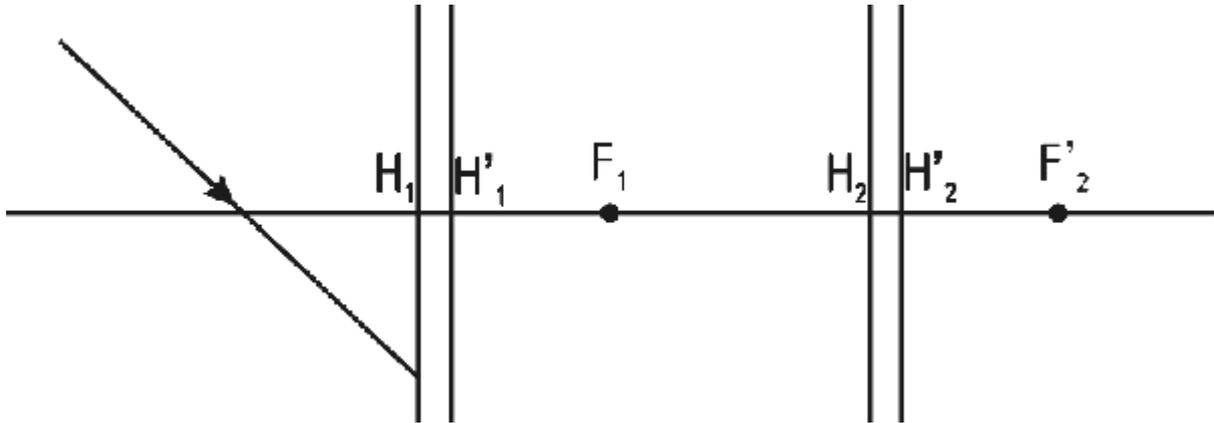
Опред. (•) F-? и (•)F'-?



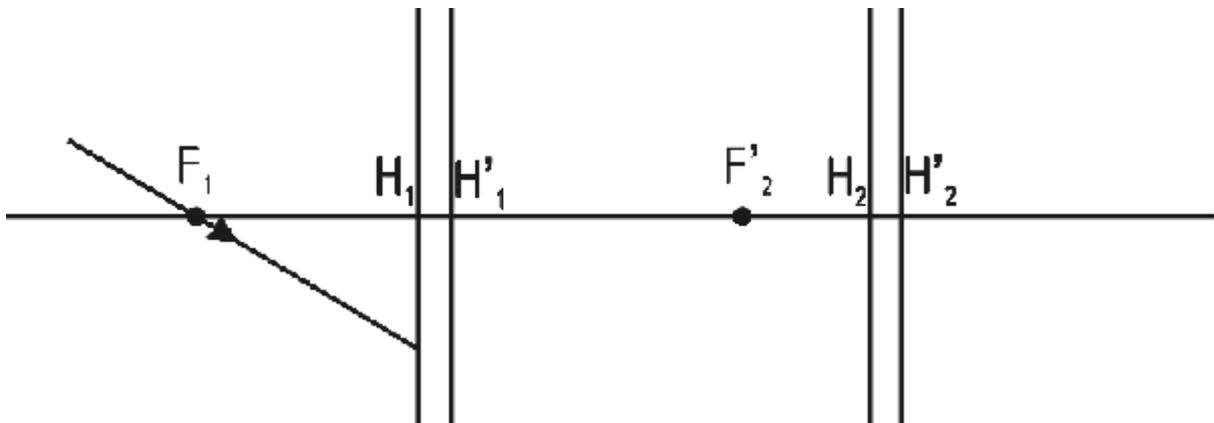
133. Определить положение фокусов каждой линзы.



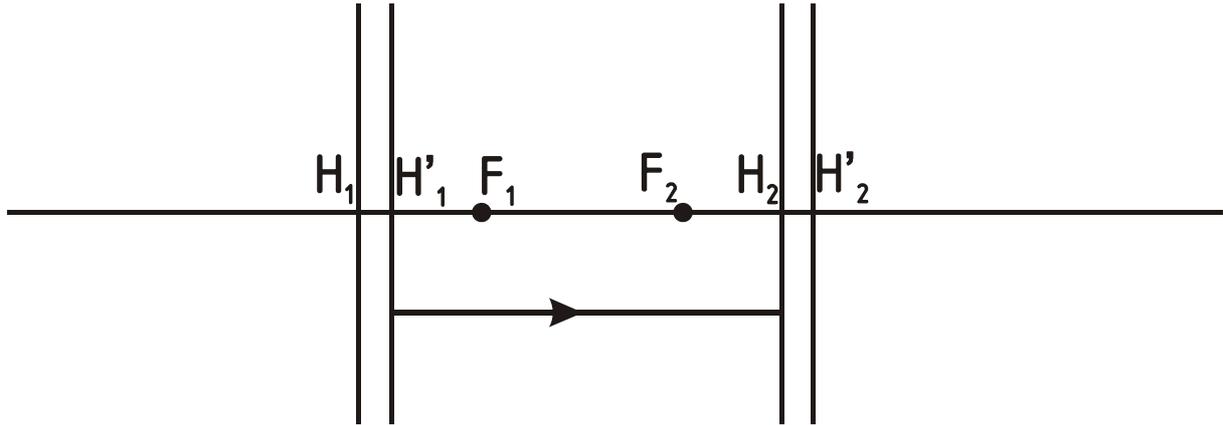
134. Построить луч через всю систему.



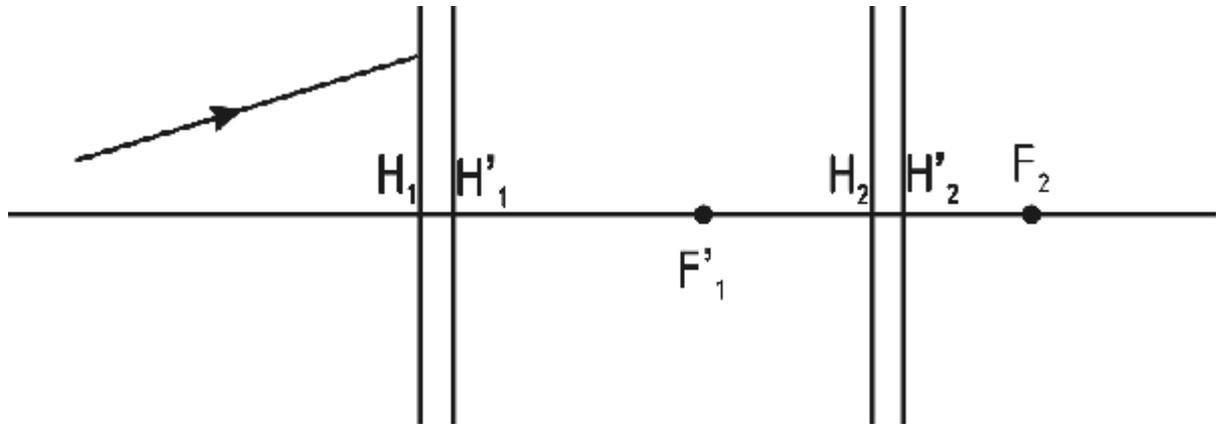
135. Построить луч через всю систему.



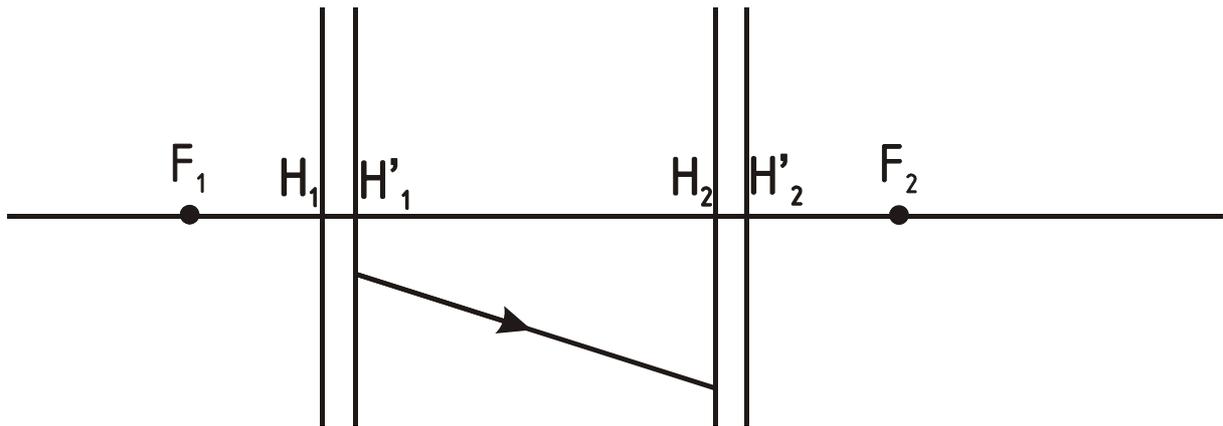
136. Построить луч через всю систему.



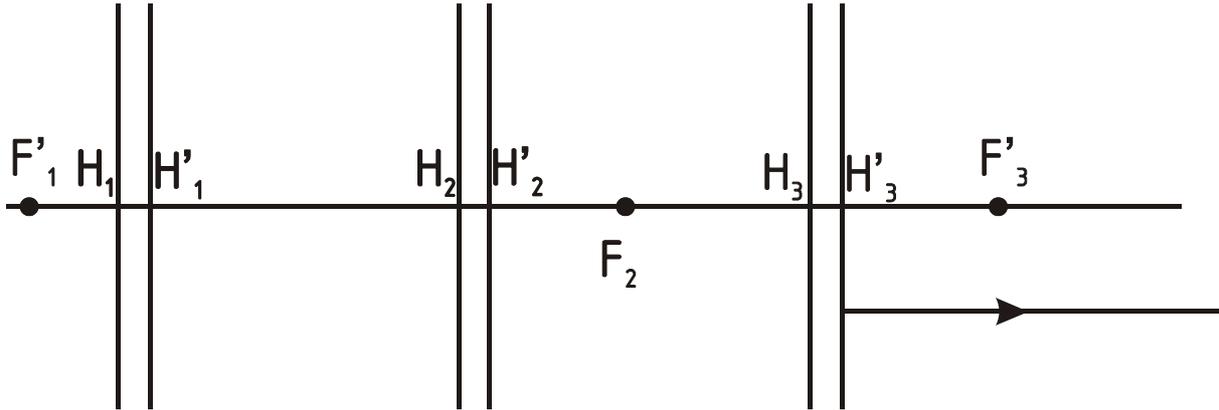
137. Построить луч через всю систему.



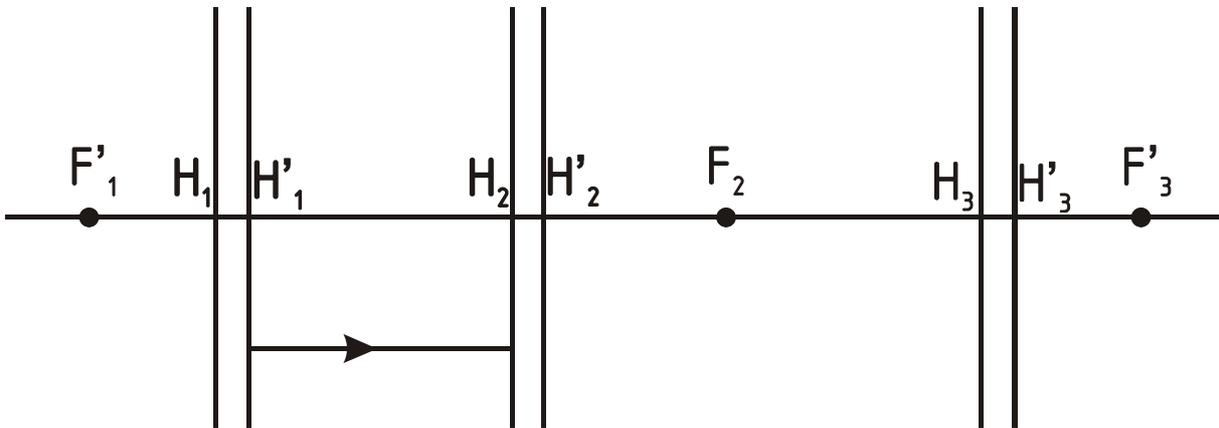
138. Построить луч через всю систему.



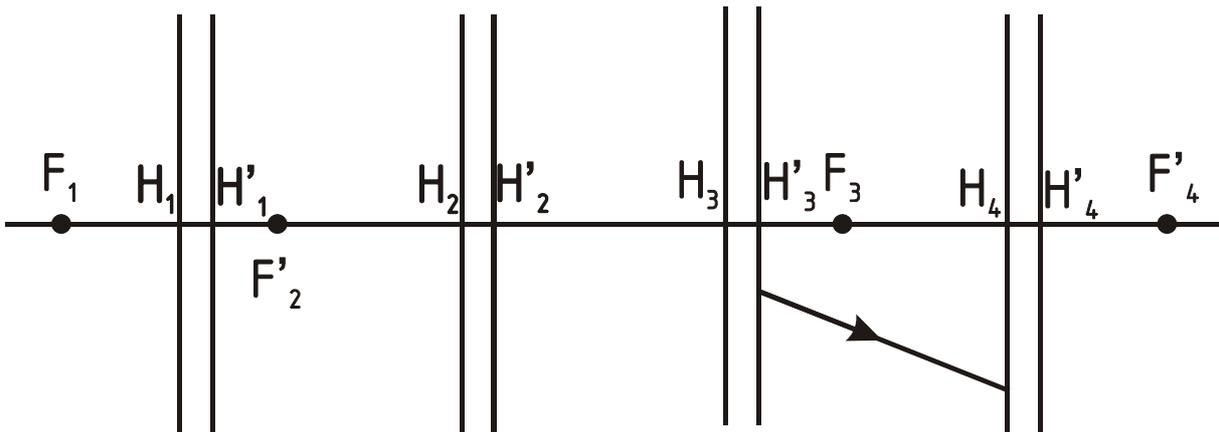
139. Построить луч через всю систему.



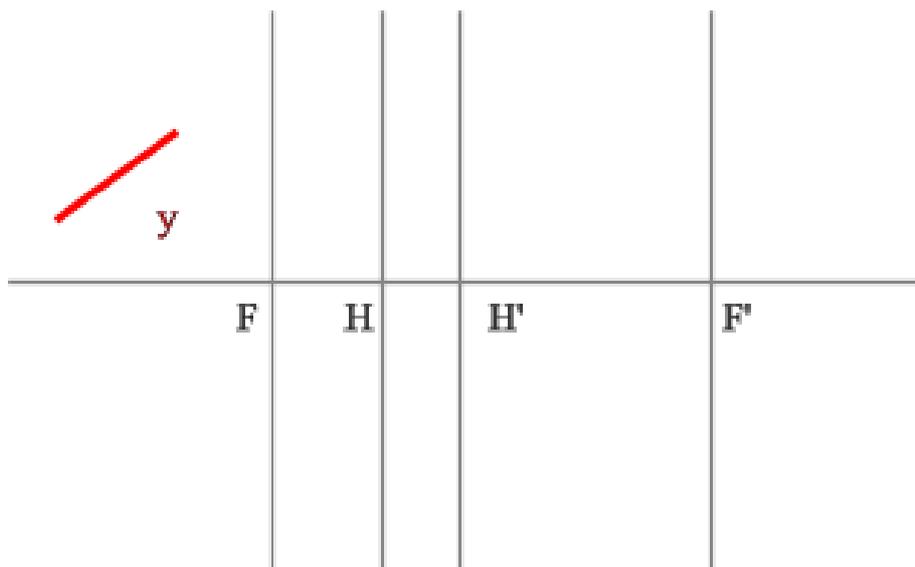
140. Построить луч через всю систему.



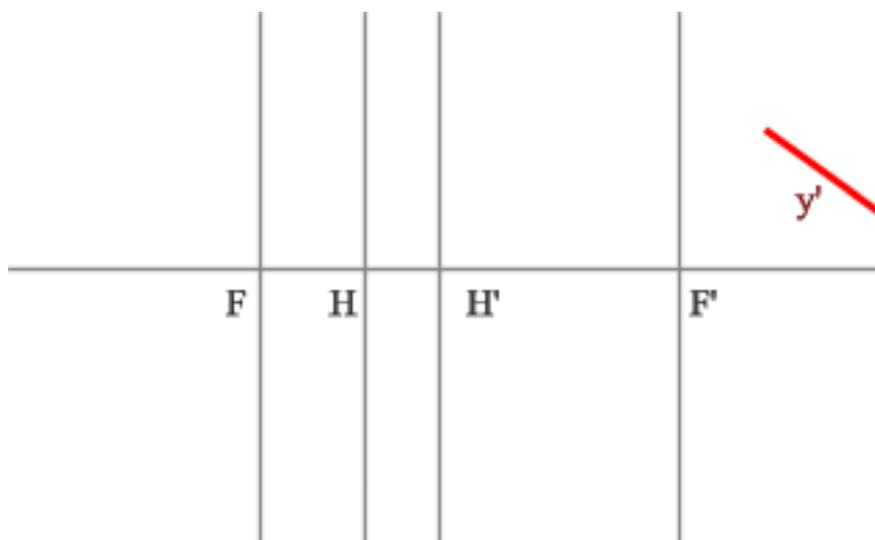
141. Построить луч через всю систему.



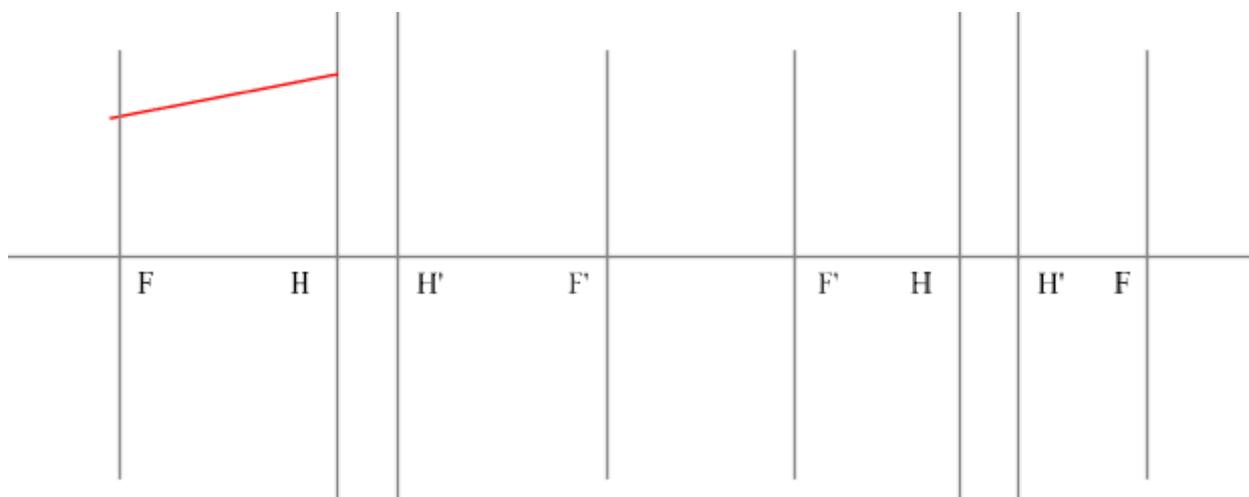
142. Построить изображение:



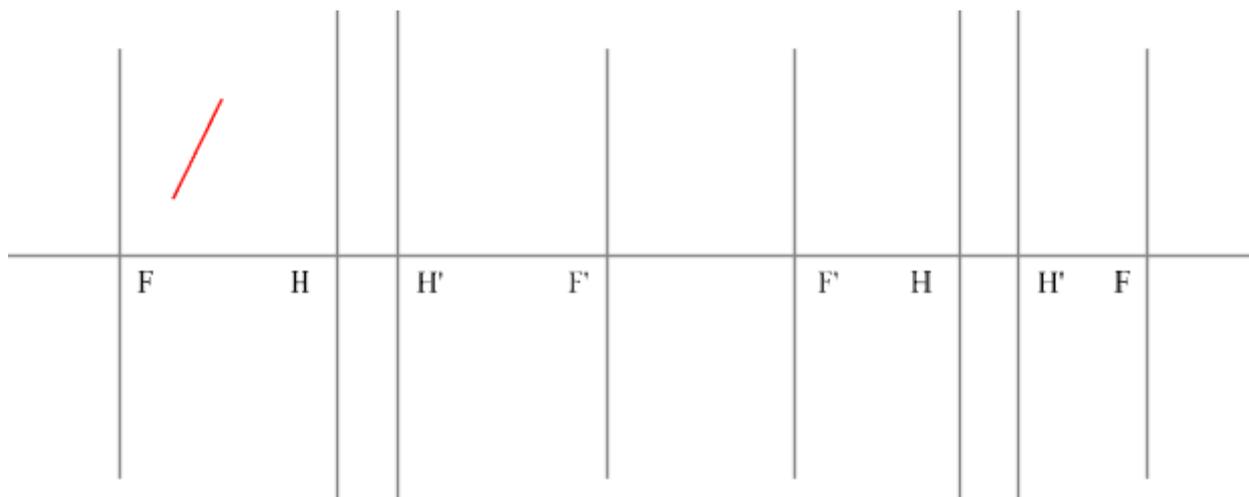
143. Найти предмет:



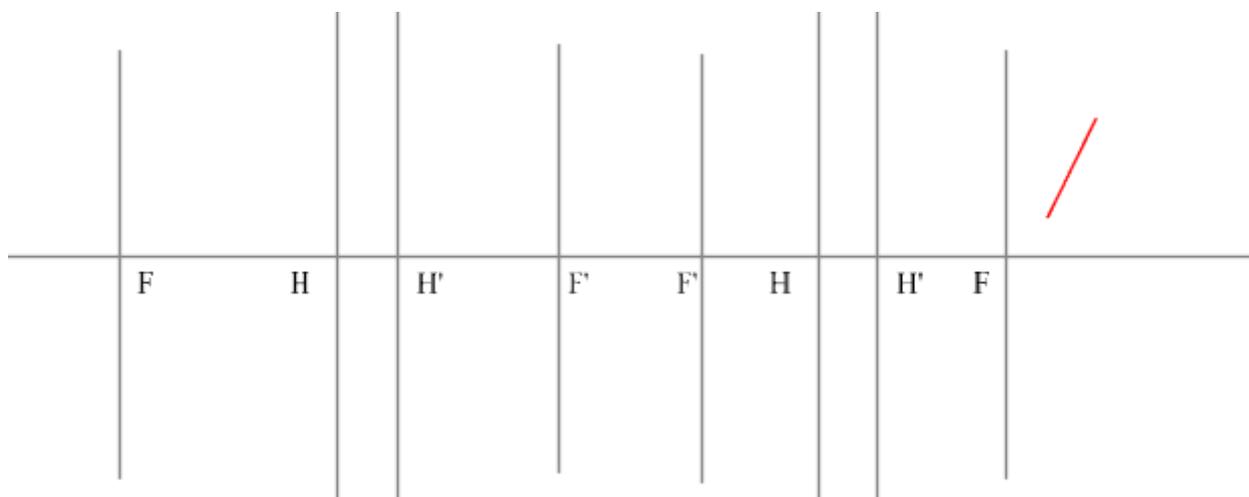
144. Достроить луч:



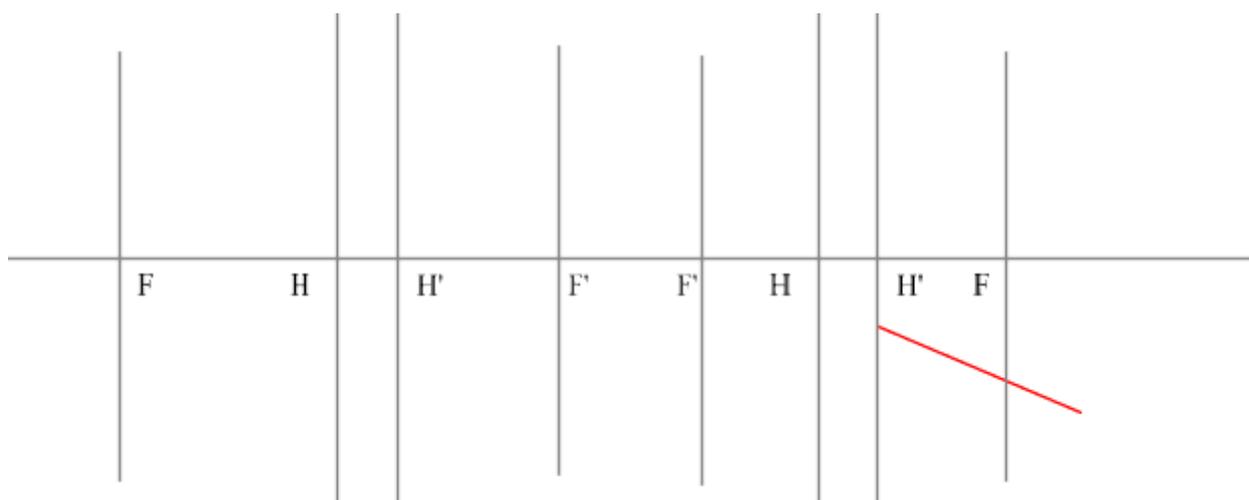
145. Построить изображение заданного предмета:



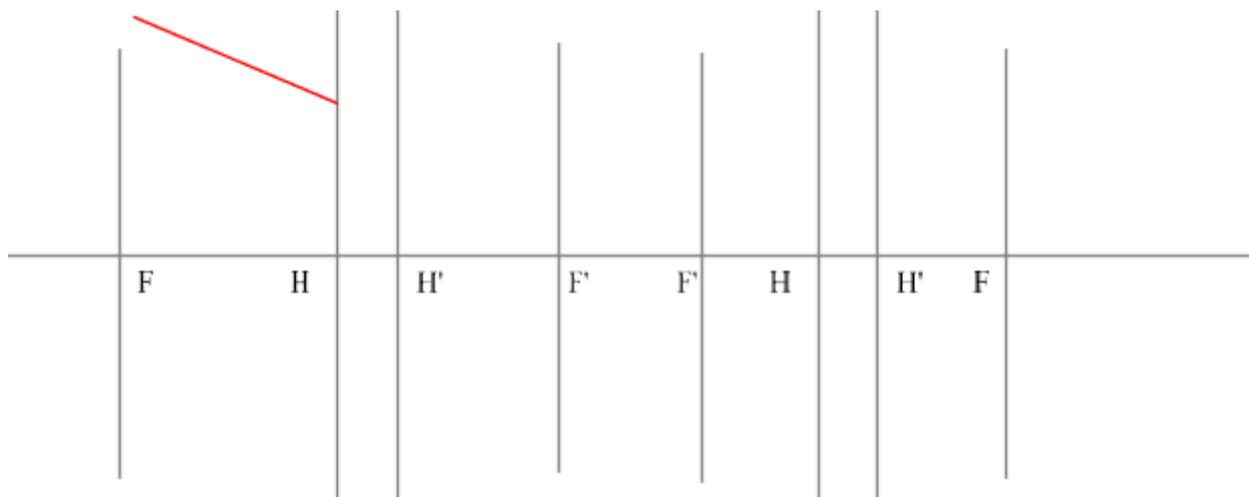
146. Дано изображение. Найти предмет.



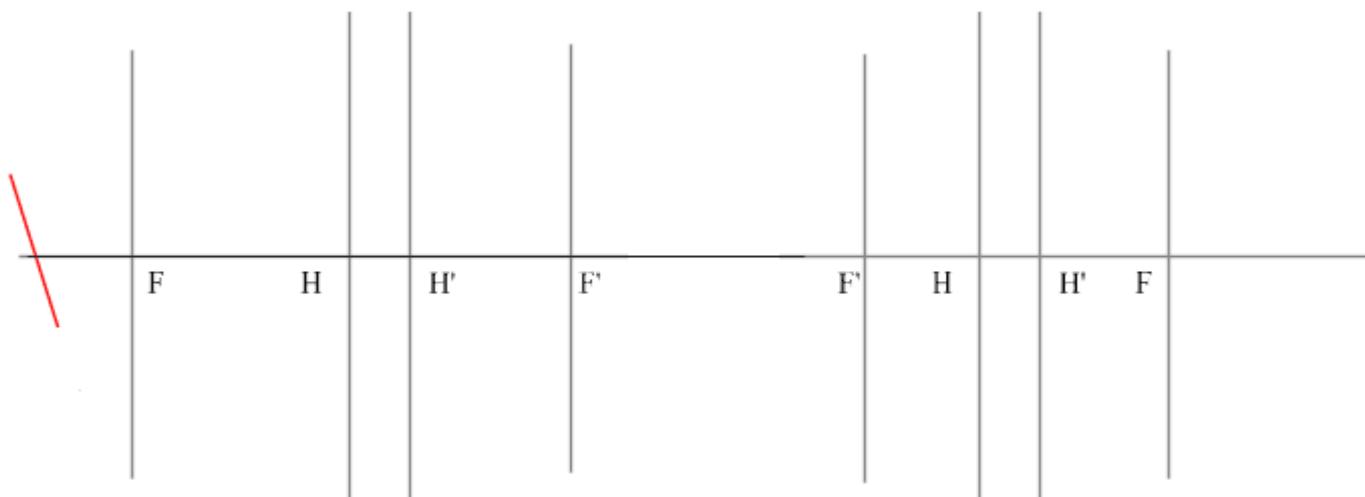
147. Достроить луч в пространстве предметов:



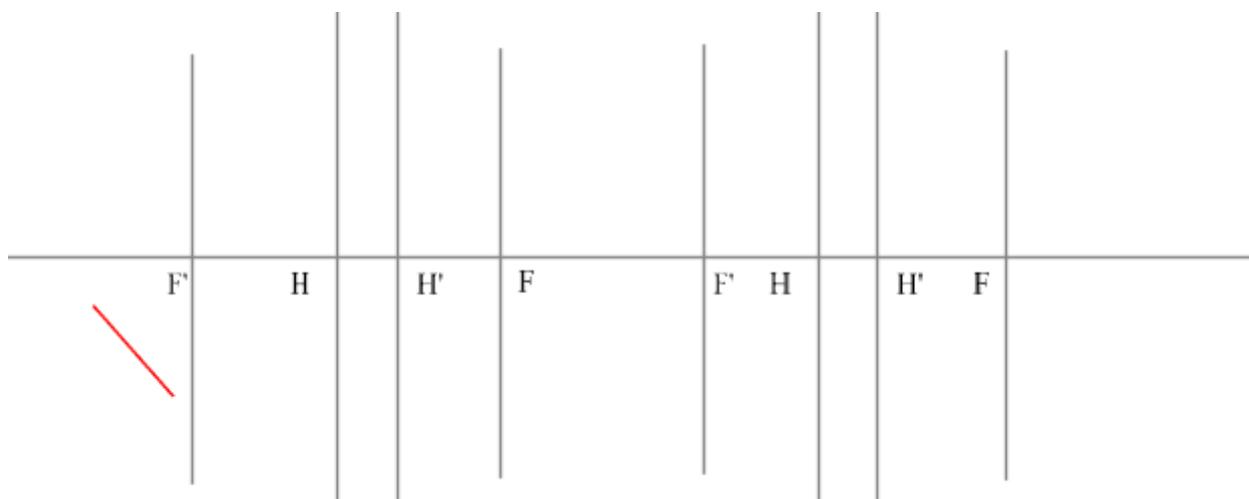
148. Построить ход луча:



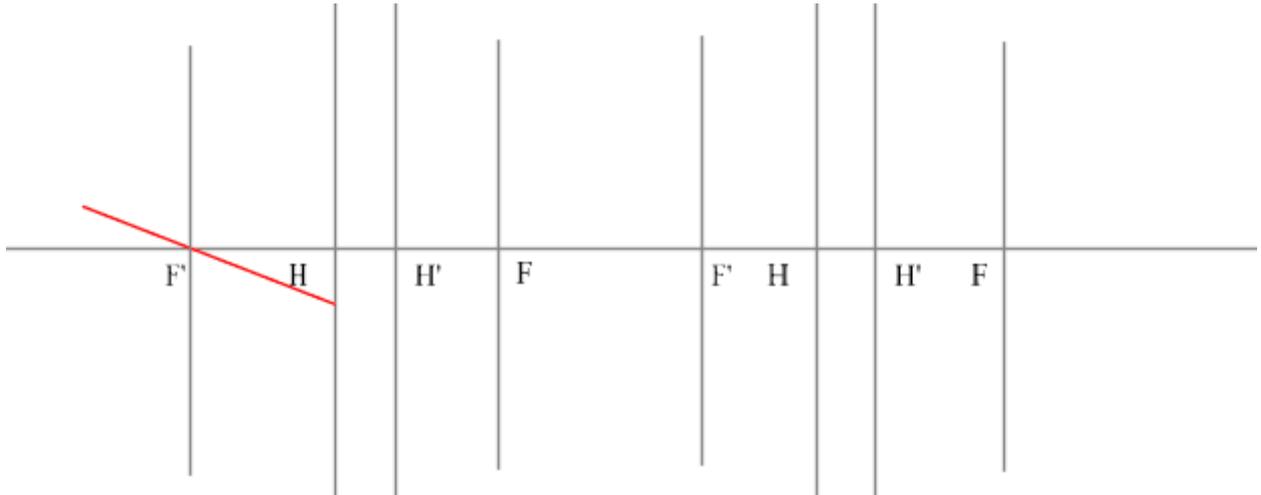
149. Построить изображение:



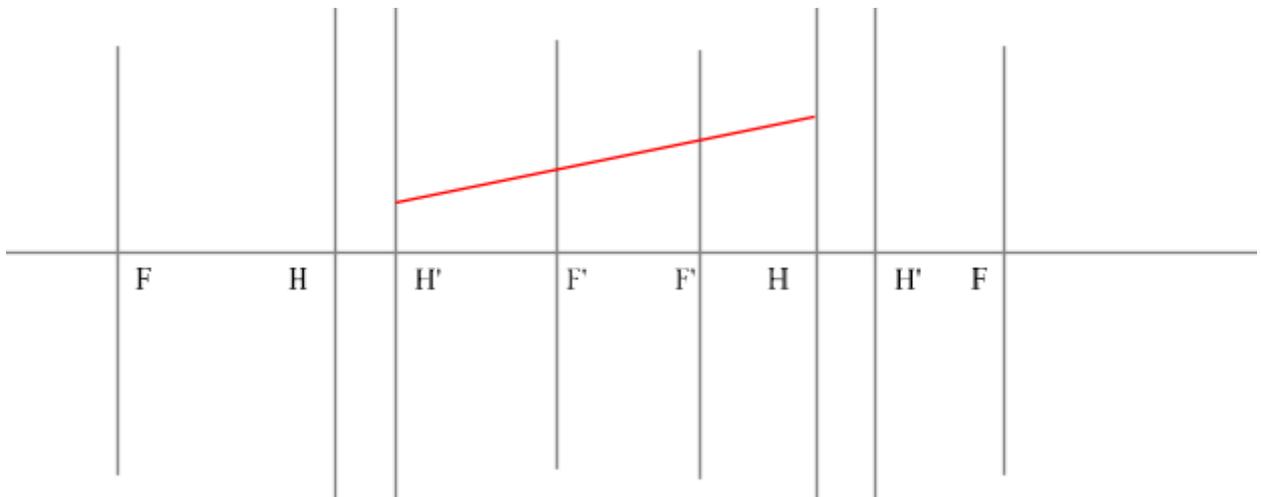
150. Построить изображение:



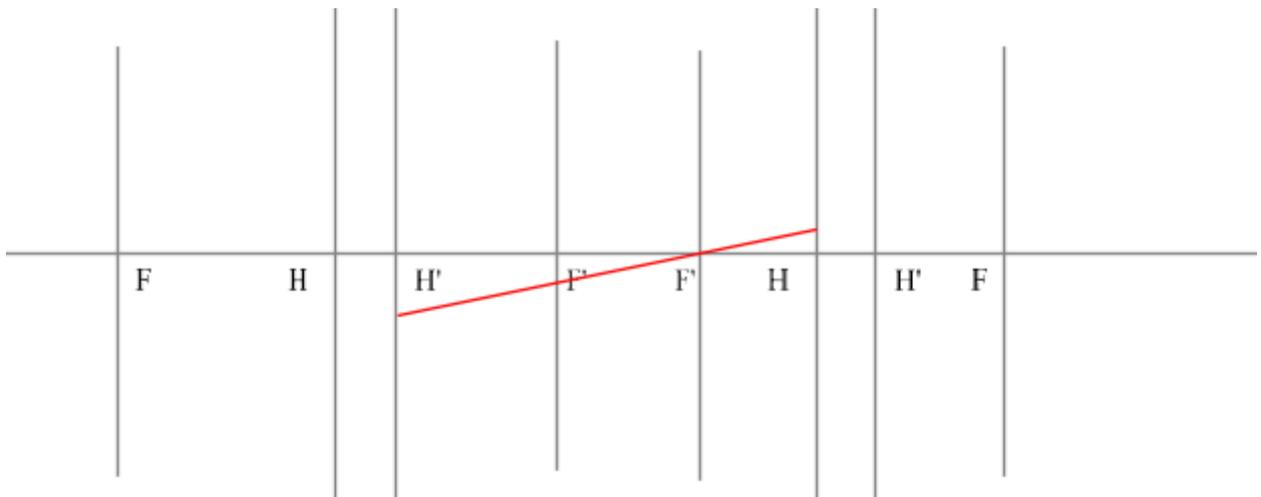
151. Построить ход луча:



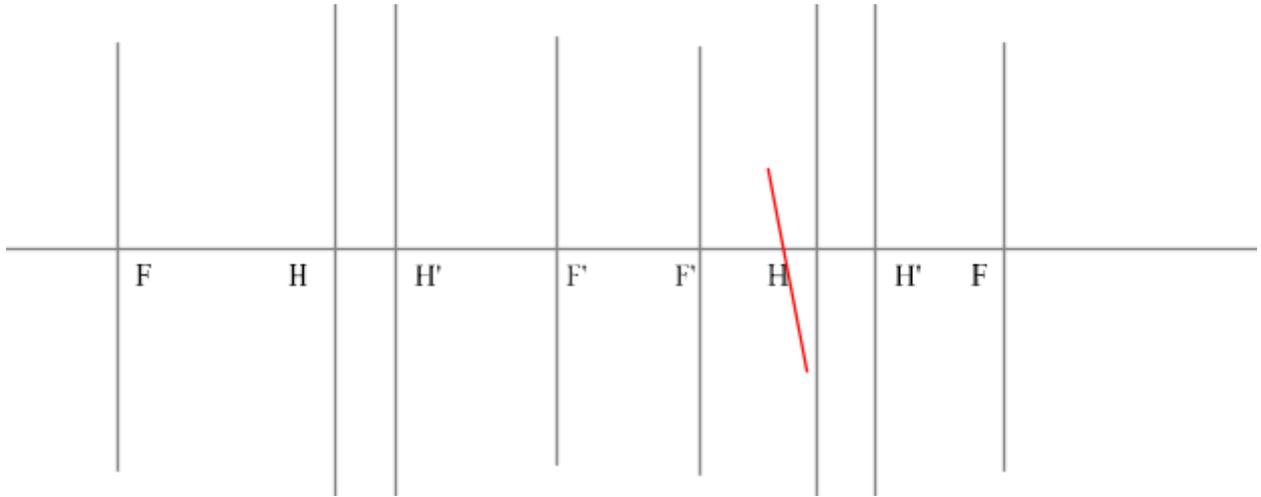
152. Достроить ход луча в пространстве предметов и изображений:



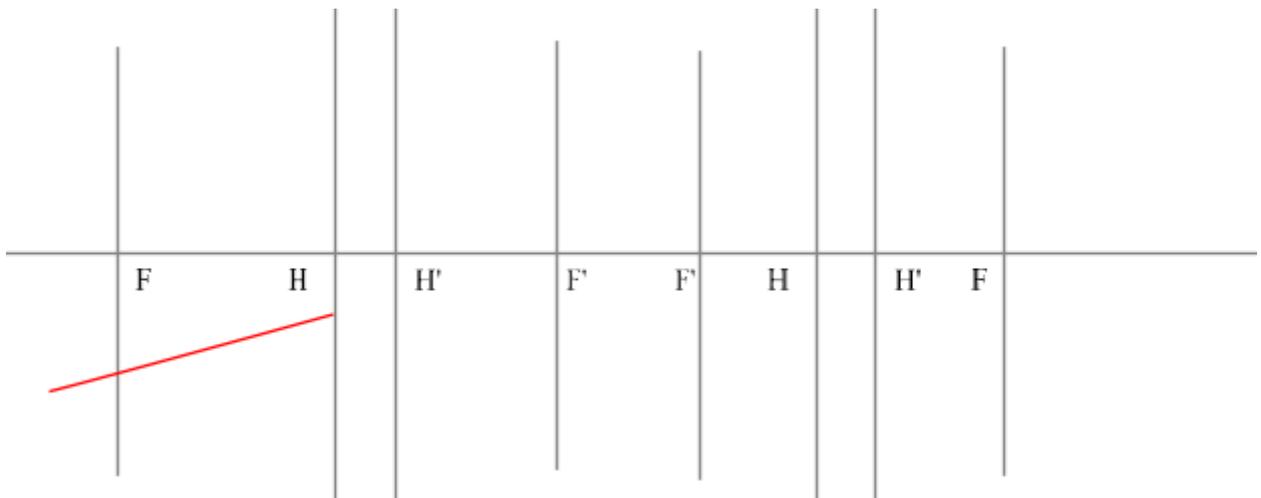
153. Достроить ход луча в пространстве предметов и изображений:



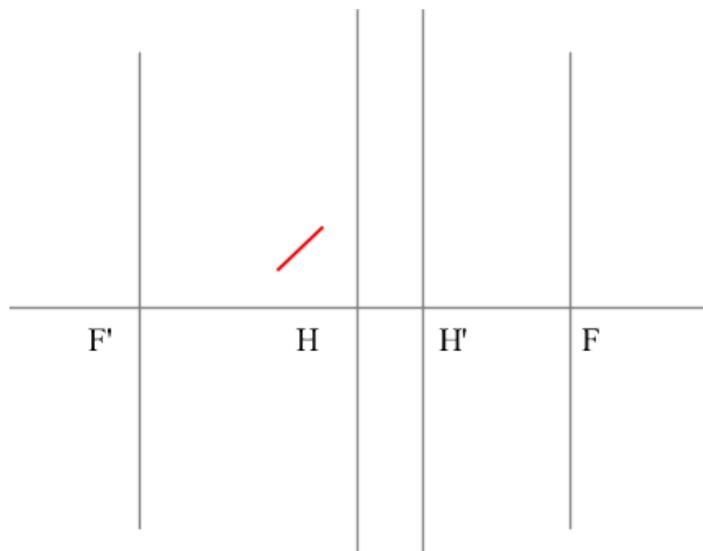
154. Задано промежуточное изображение (между первой и второй линзами). Построить сопряженные с ним объекты (в пространстве предметов и изображений):



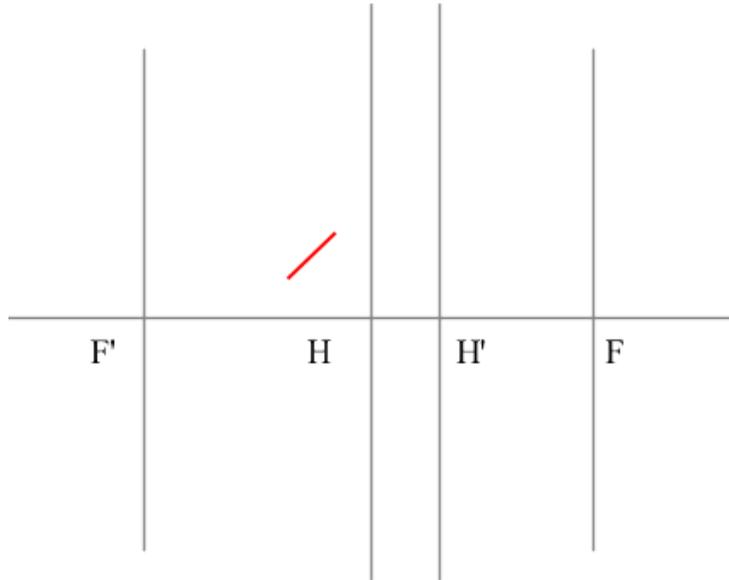
155. Построить ход луча:



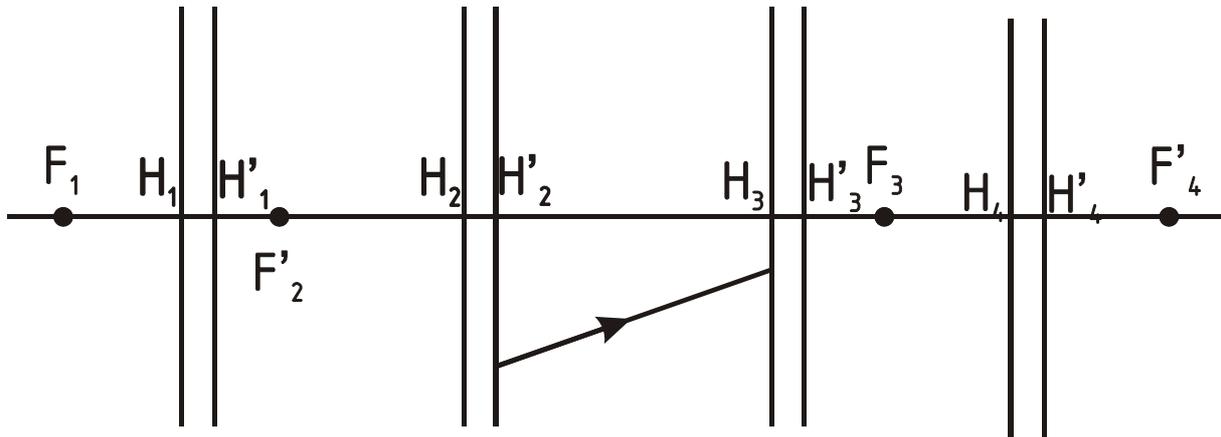
156. Построить изображение заданного предмета:



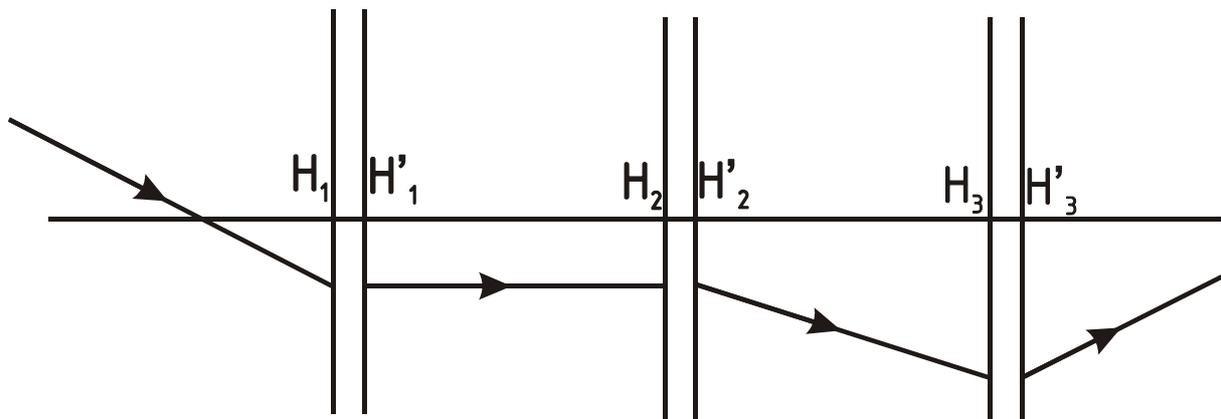
157. Построить предмет, дающий изображение, показанное на рисунке:



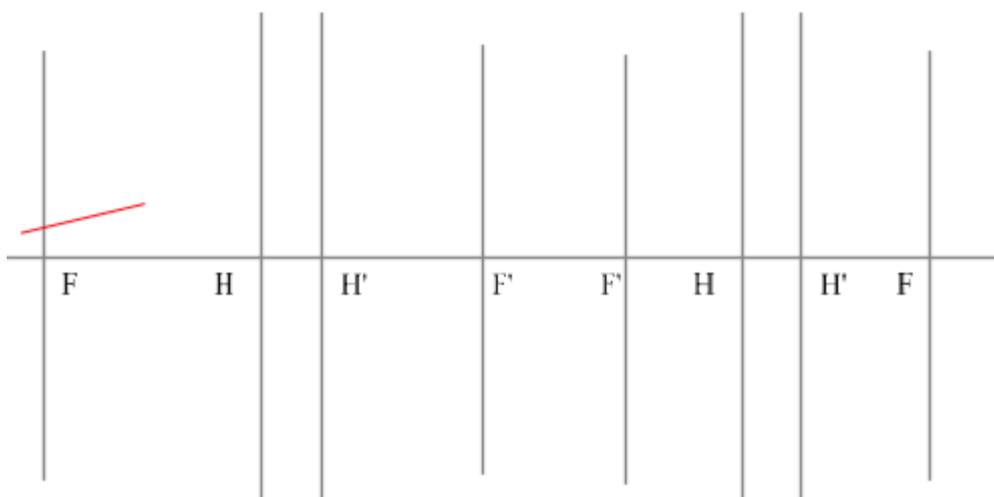
158. Построить луч через всю систему.



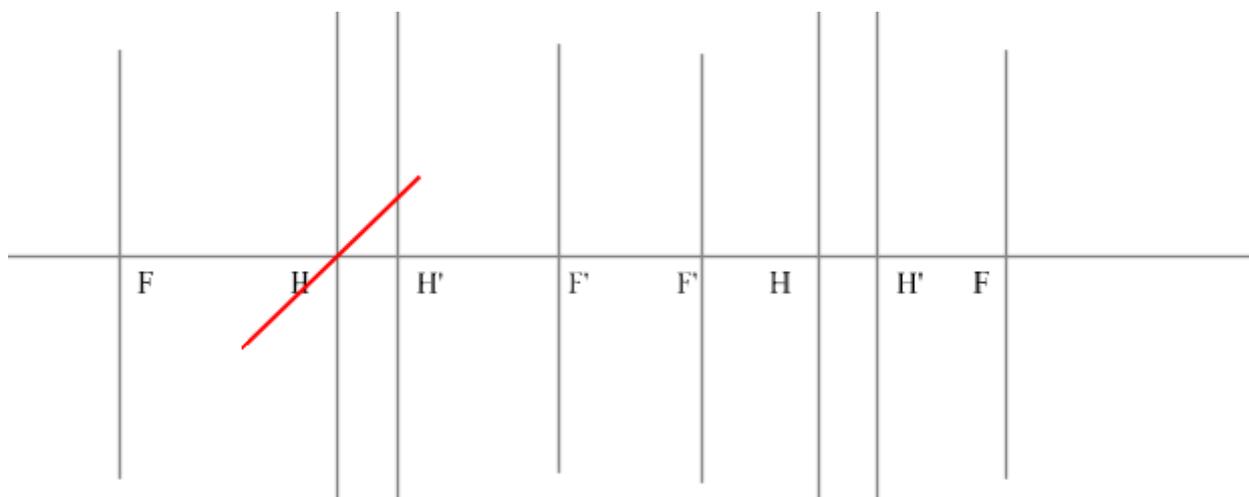
159. Определить положение фокусов каждой линзы.



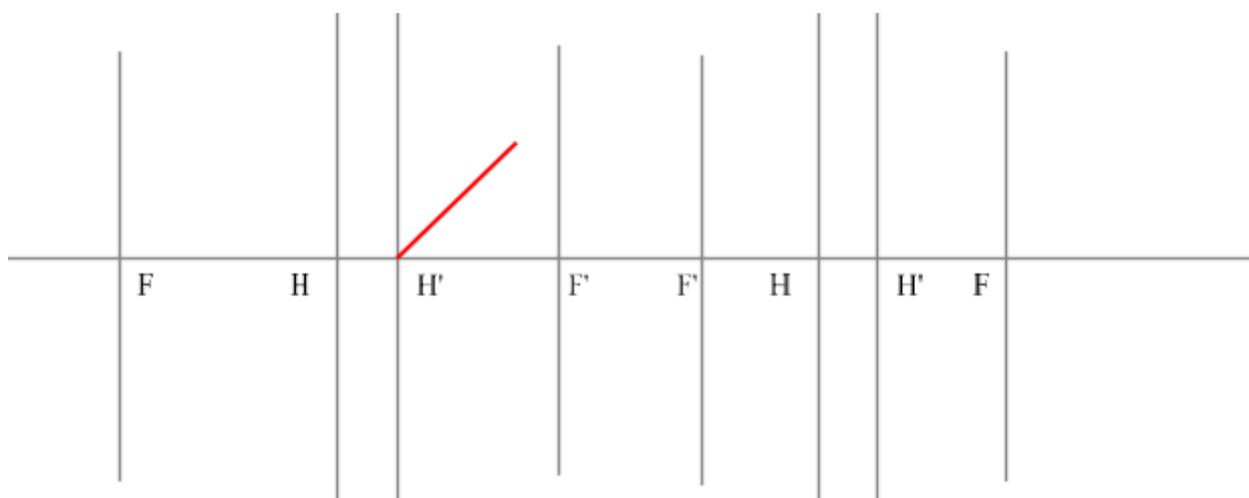
160. Построить изображение:



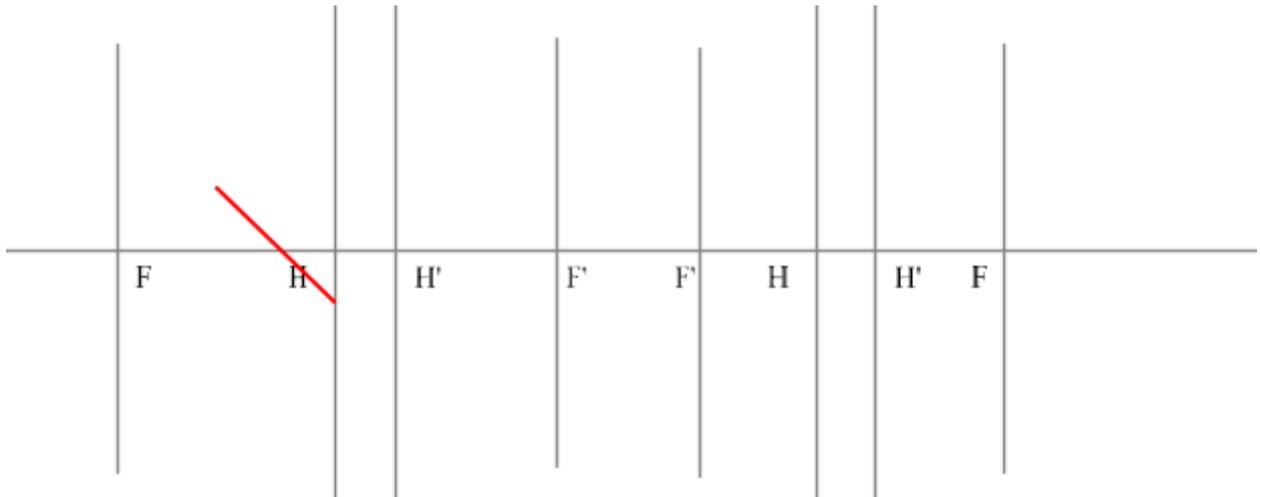
161. Построить изображение:



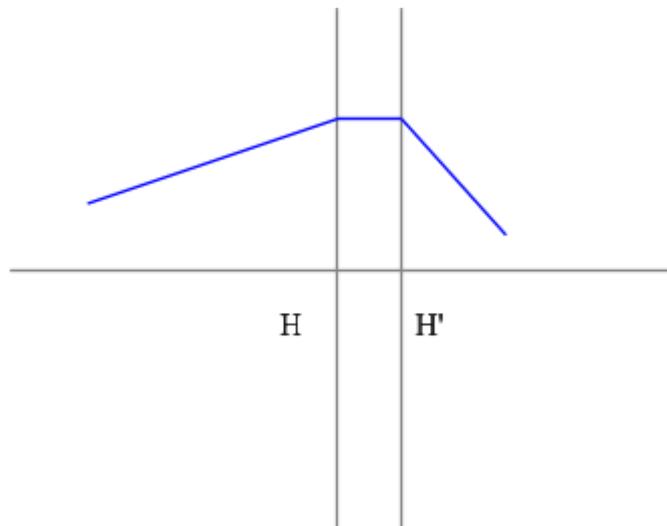
162. Построить изображение предмета, показанного на рисунке:



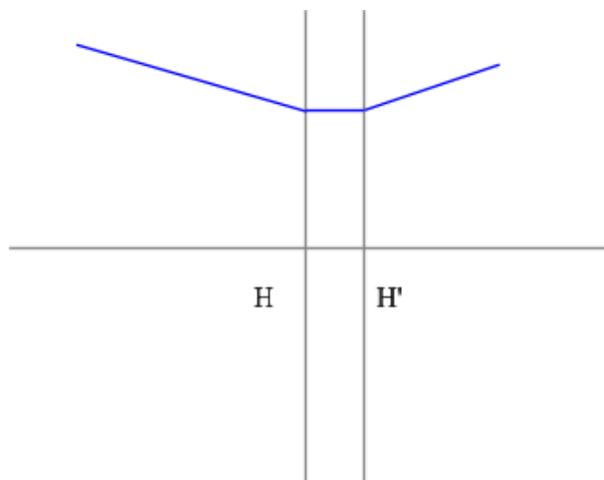
163. Построить изображение:



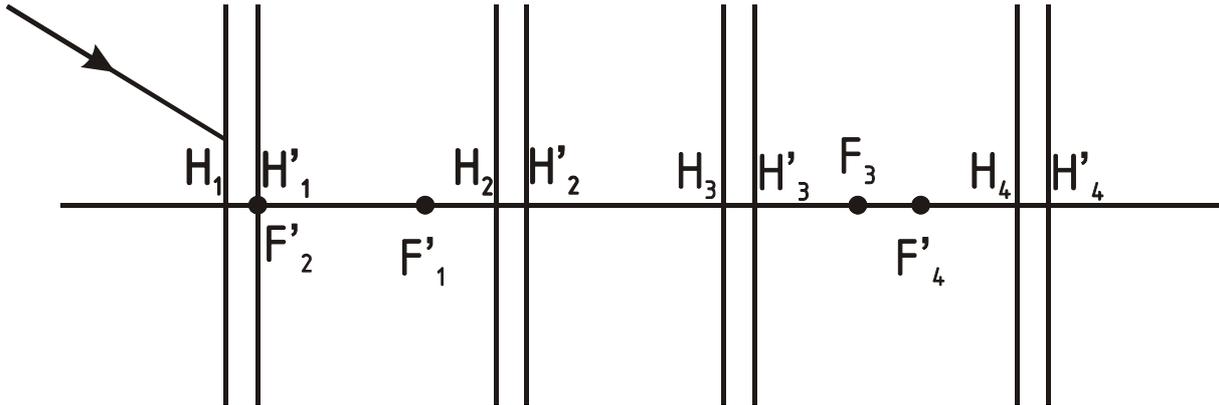
164. Определить положение фокальных плоскостей для линзы, находящейся в однородной среде:



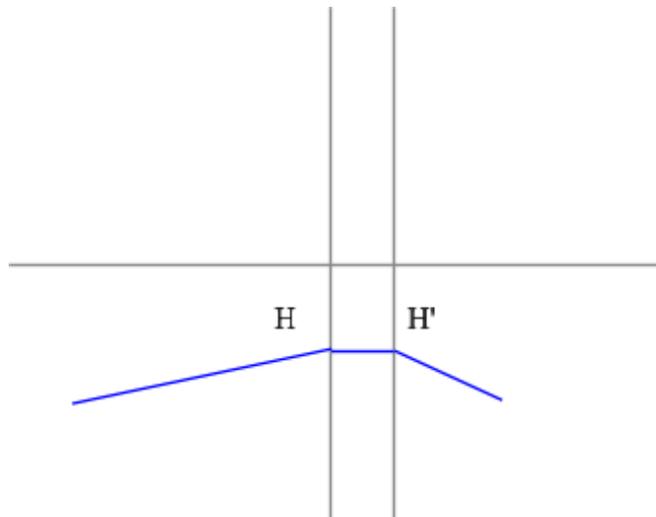
165. Определить положение фокальных плоскостей для линзы, находящейся в однородной среде:



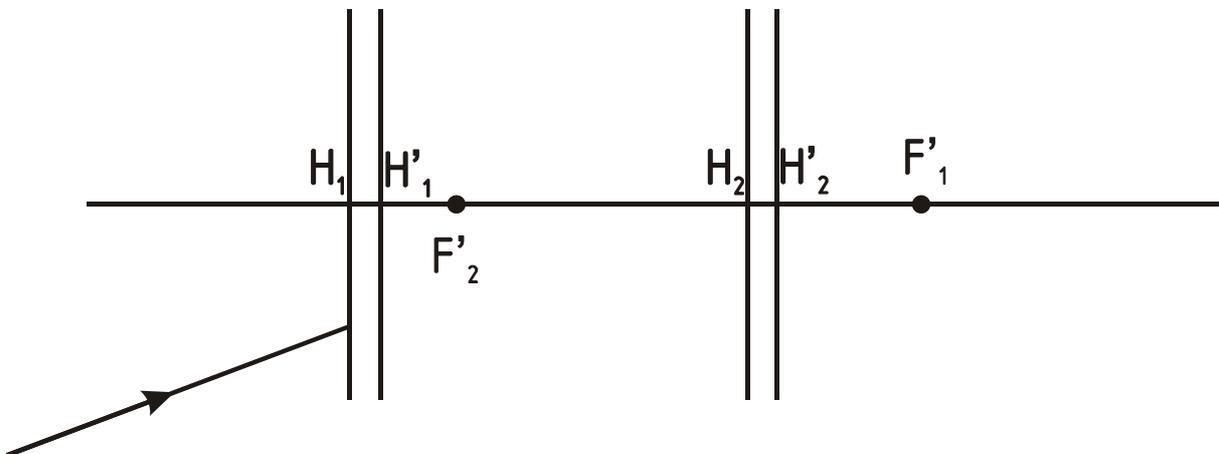
166. Построить луч через всю систему.



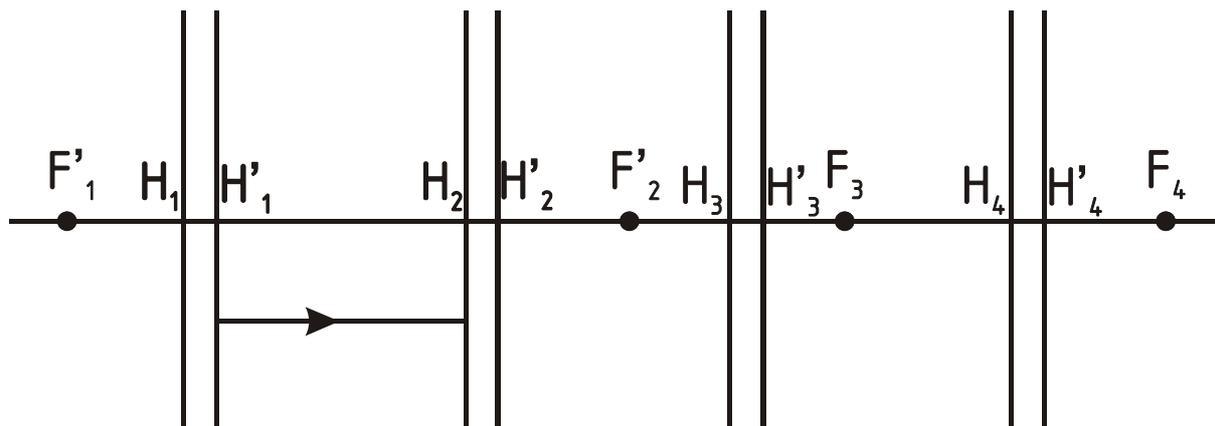
167. Определить положение фокальных плоскостей для линзы, находящейся в однородной среде:



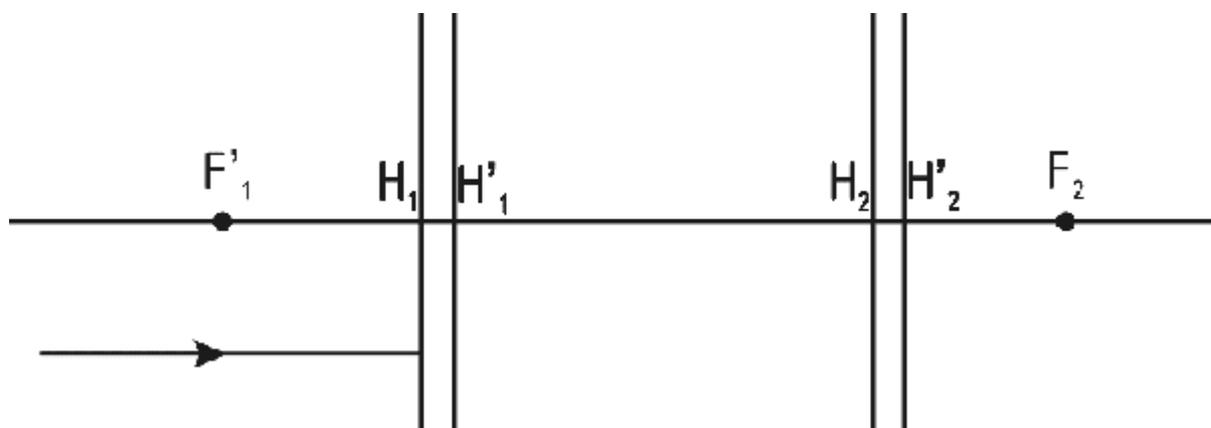
168. Построить луч через всю систему.



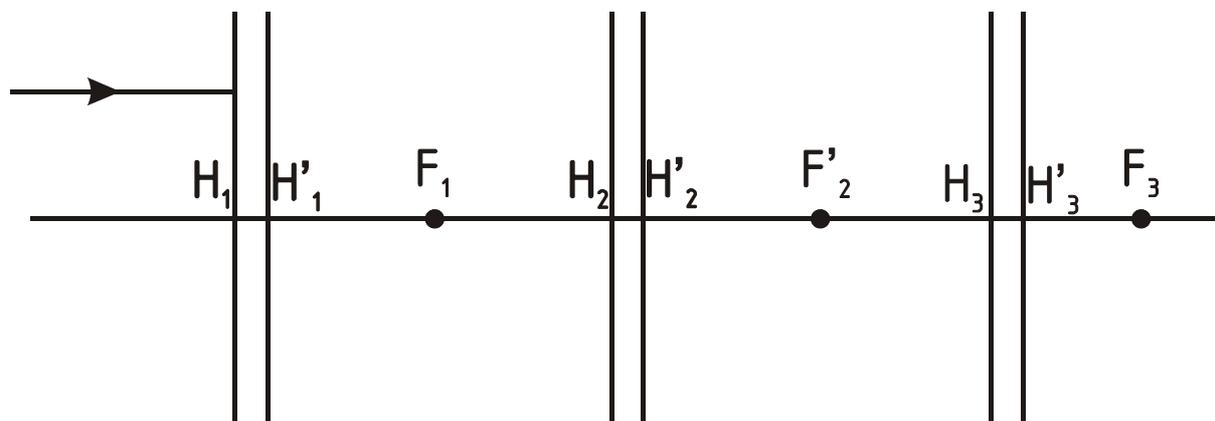
169. Построить луч через всю систему.



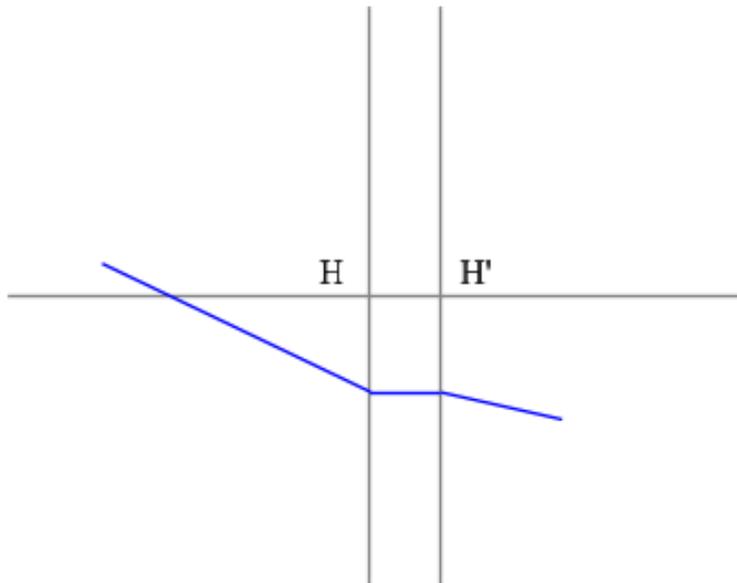
170. Построить луч через всю систему.



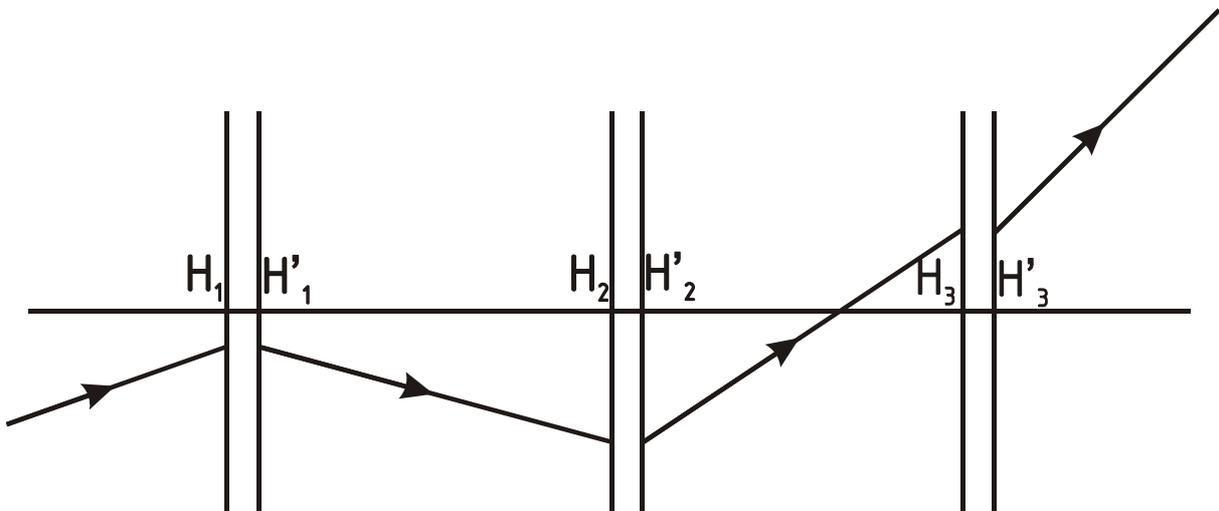
171. Построить луч через всю систему.



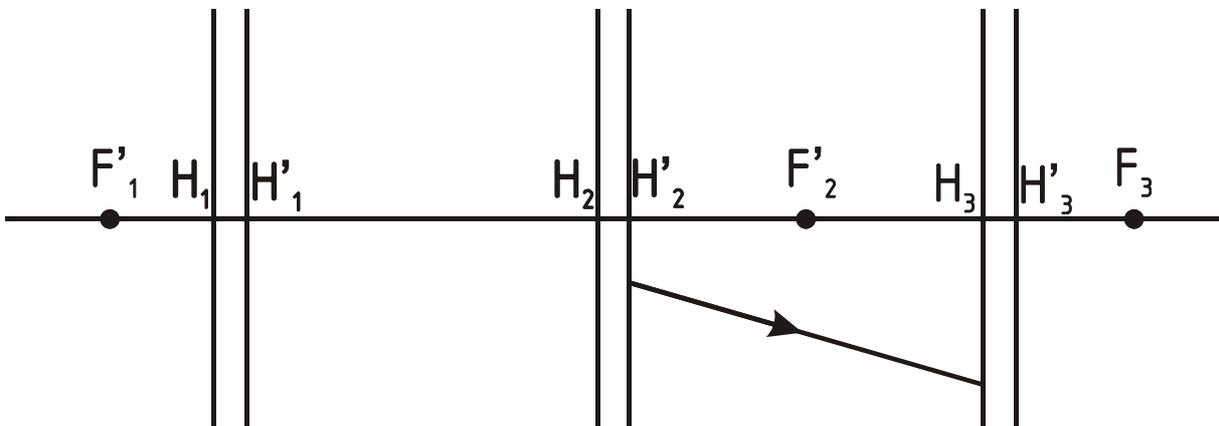
172. Определить положение фокальных плоскостей для линзы, находящейся в однородной среде:



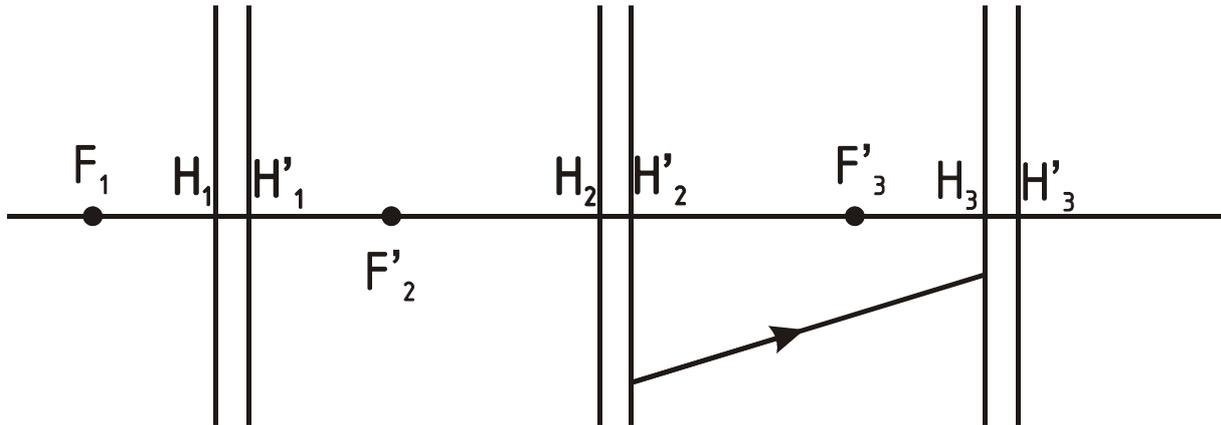
173. Определить положение фокусов каждой линзы.



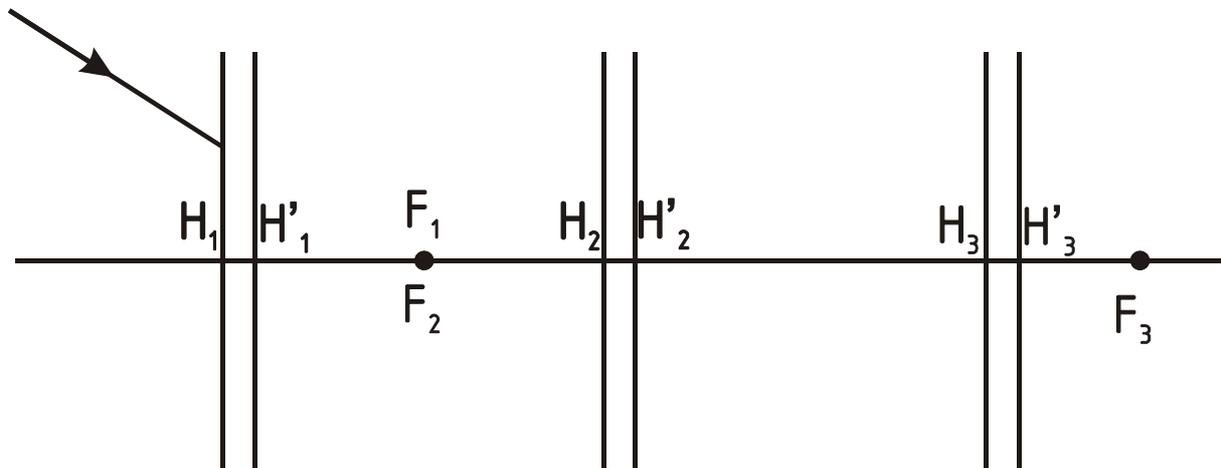
174. Построить луч через всю систему.



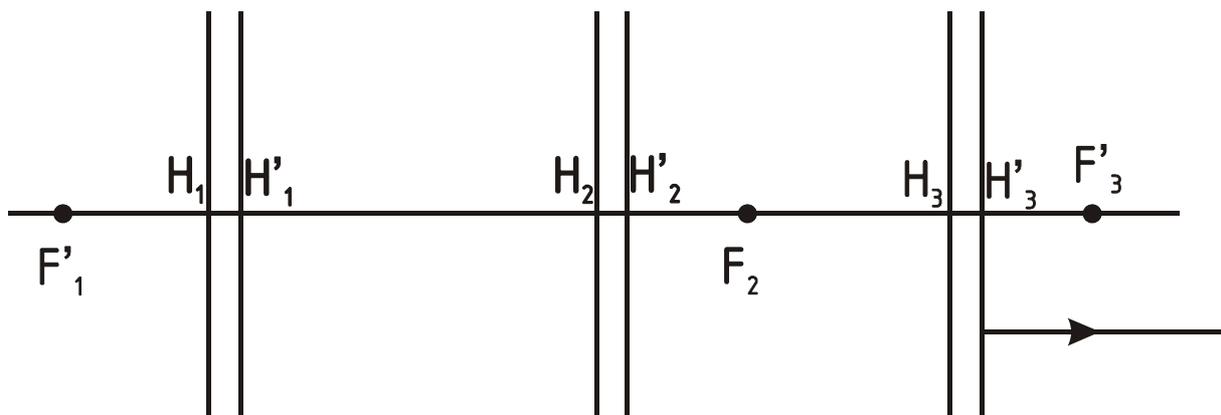
175. Построить луч через всю систему.



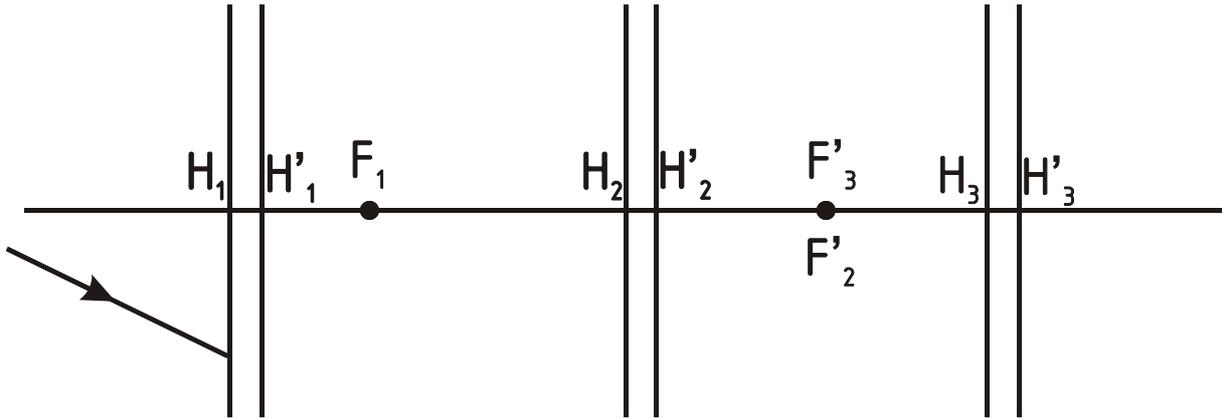
176. Построить луч через всю систему.



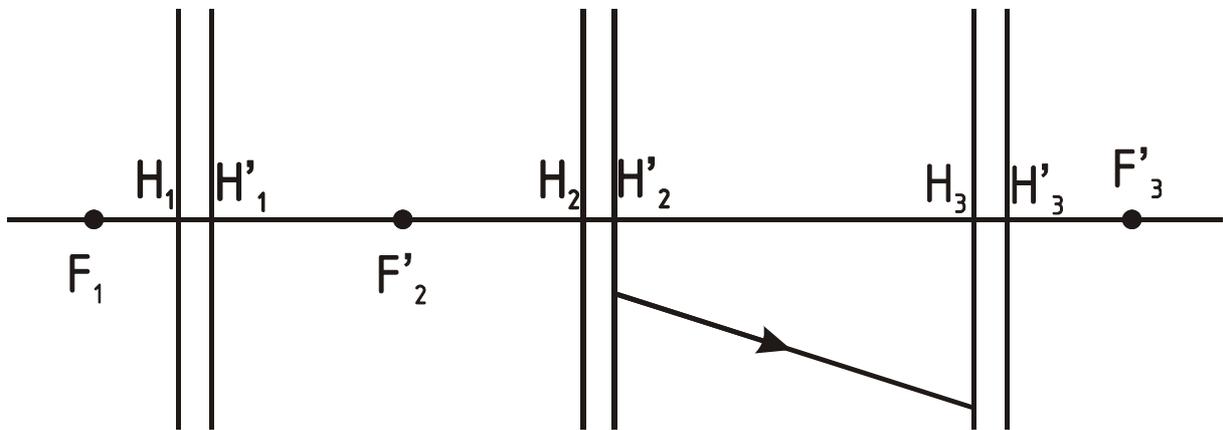
177. Построить луч через всю систему.



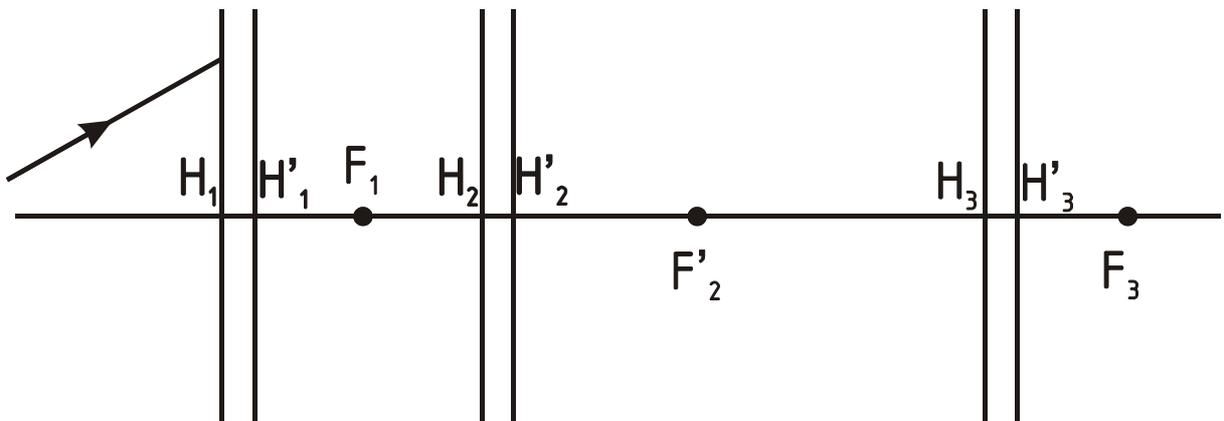
178. Построить луч через всю систему.



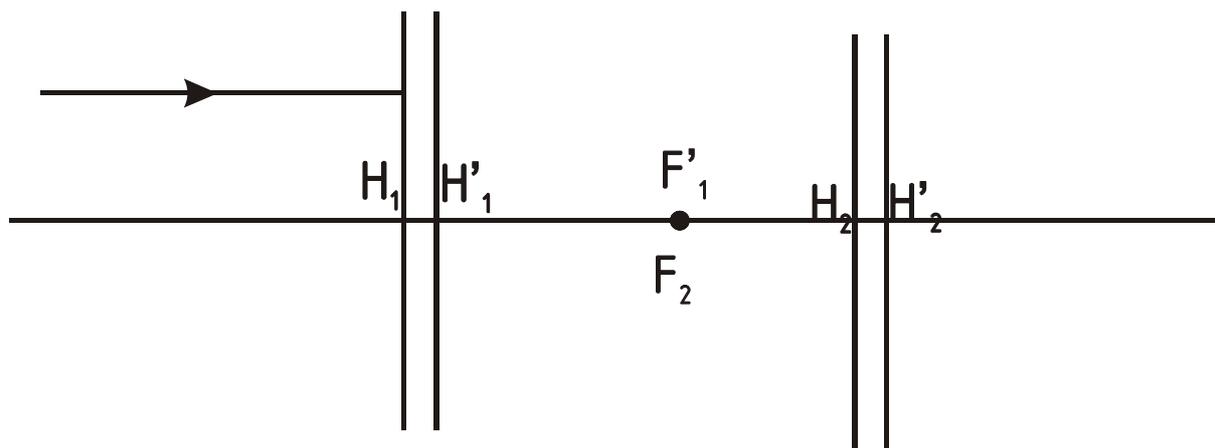
179. Построить луч через всю систему.



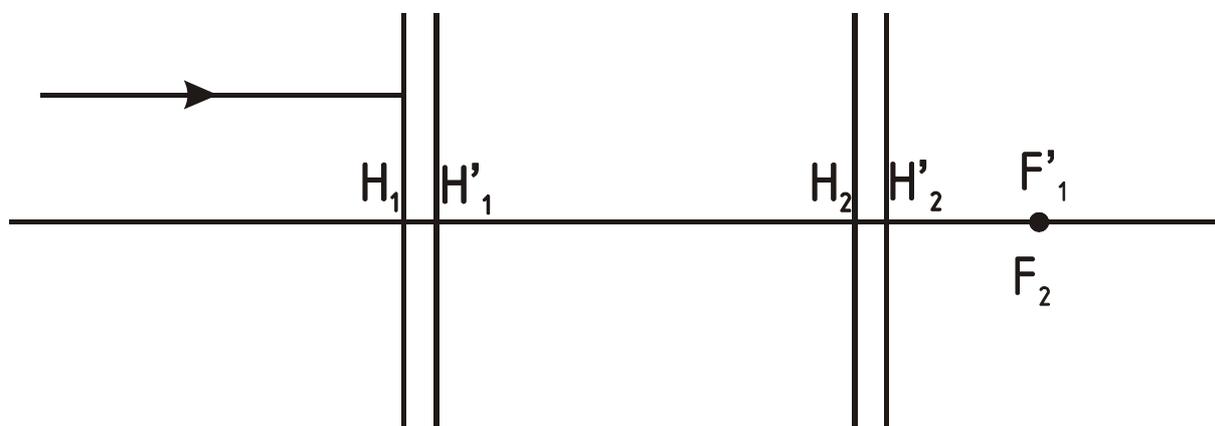
180. Построить луч через всю систему.



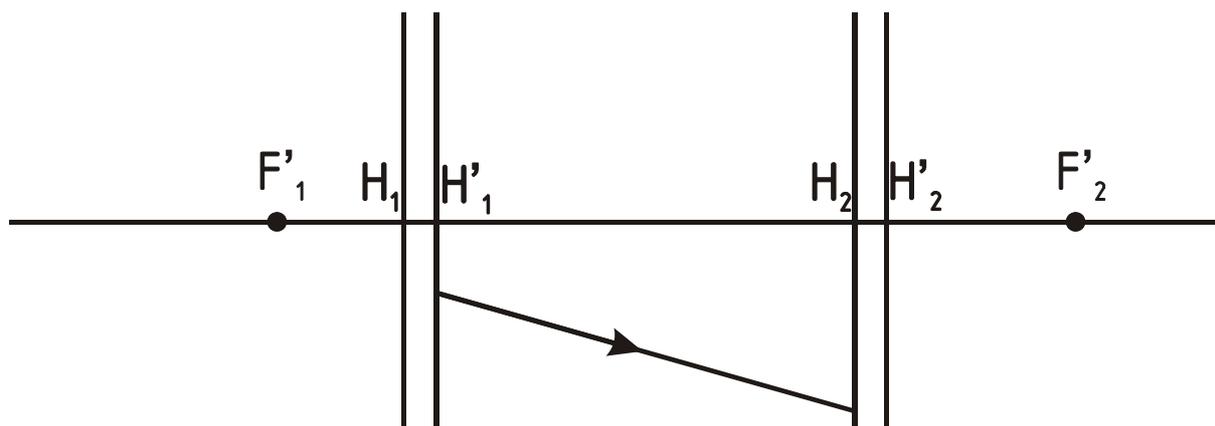
181. Построить луч через всю систему.



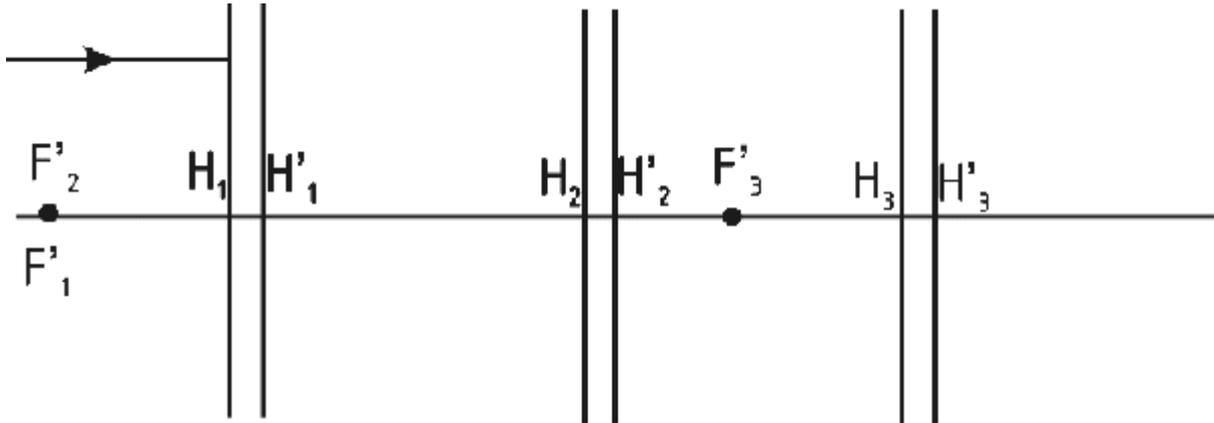
182. Построить луч через всю систему.



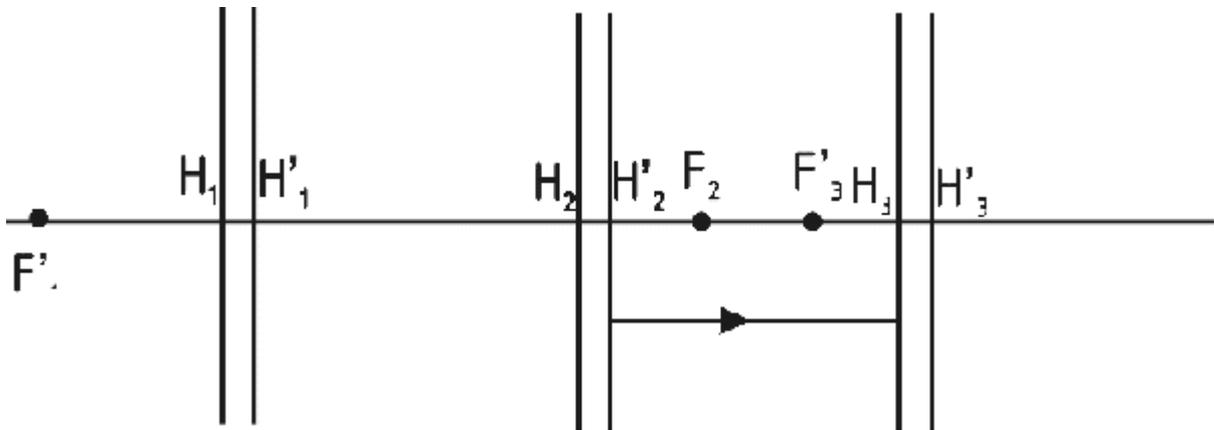
183. Построить луч через всю систему.



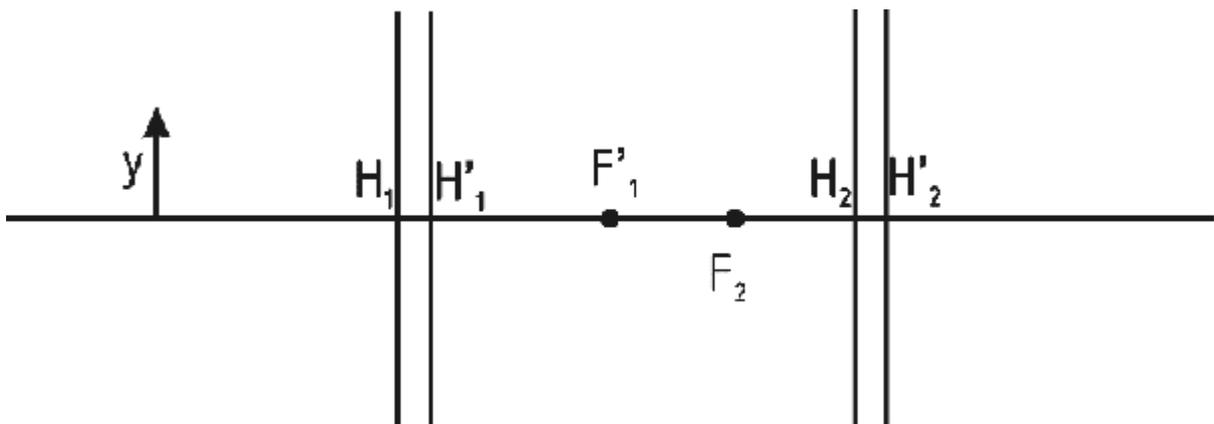
184. Построить луч через всю систему.



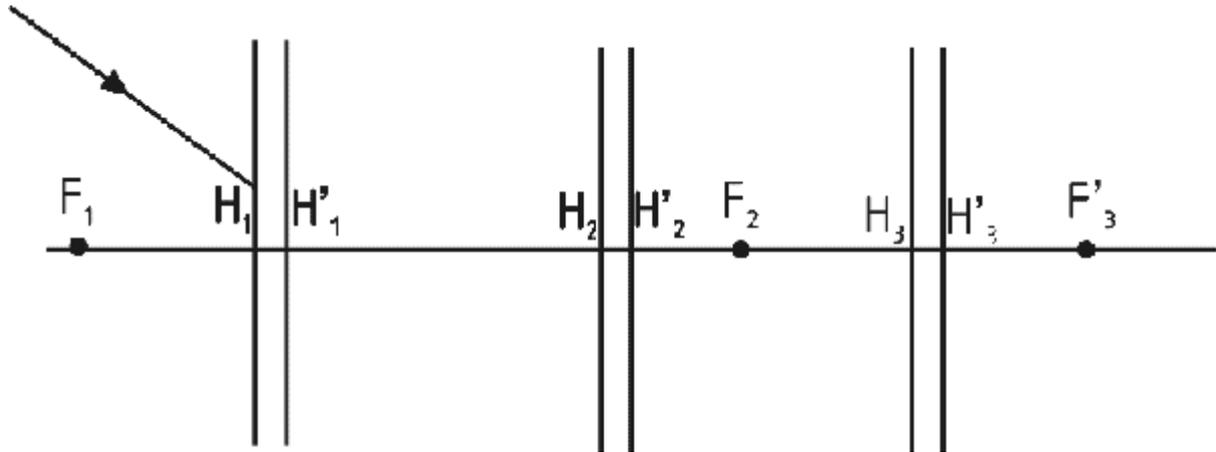
185. Построить луч через всю систему.



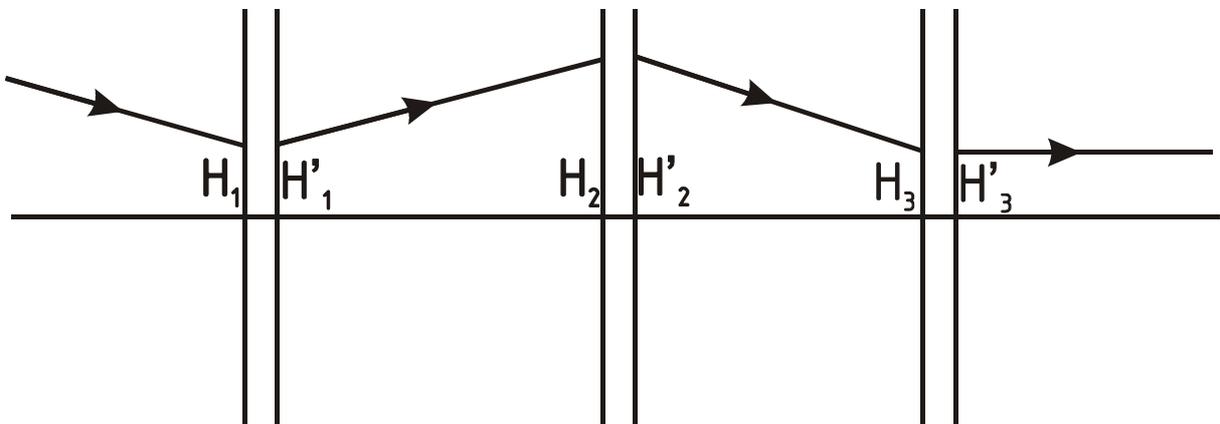
186. Построить изображение y' .



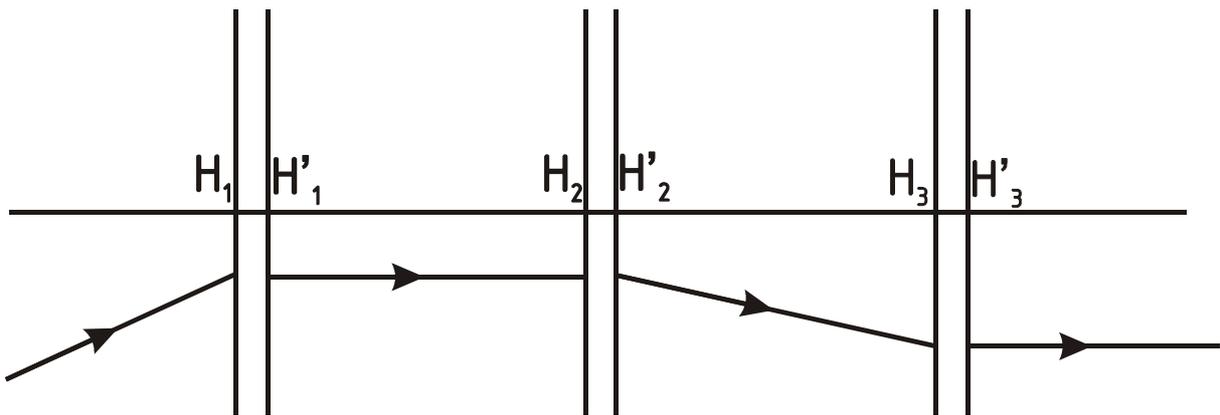
187. Построить луч через всю систему.



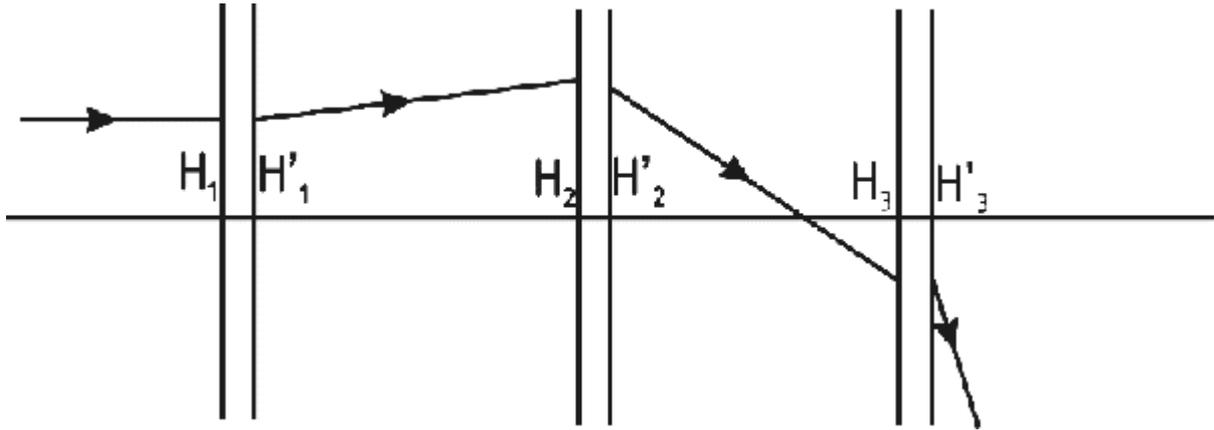
188. Определить положение фокусов каждой линзы.



189. Определить положение фокусов каждой линзы.

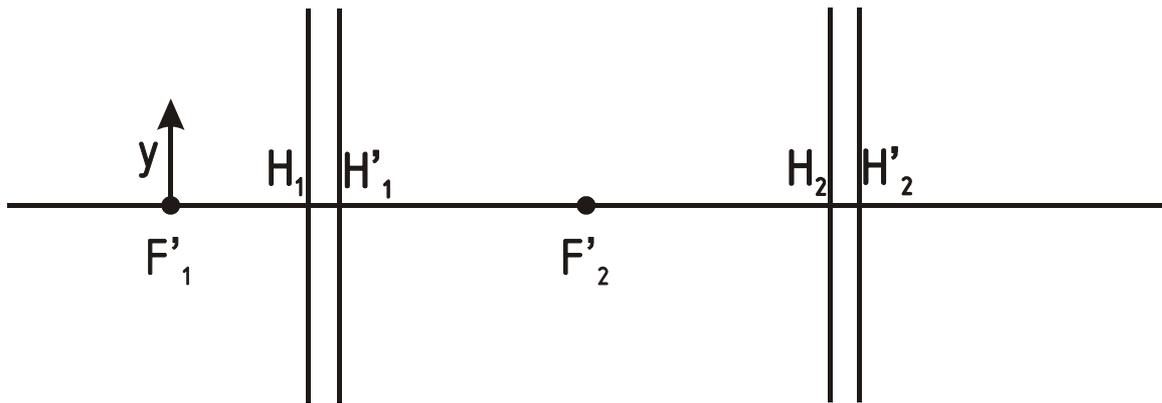


190. Определить положение фокусов каждой линзы.

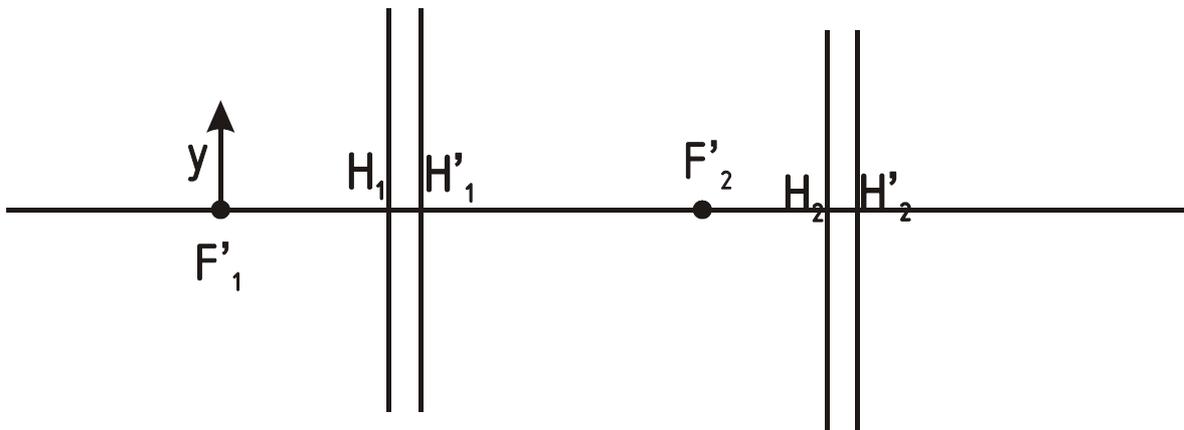


191.

Опред. y' -?



192. Построить изображение заданного предмета



Заключение

В учебно-методическом пособии по дисциплине “Геометрическая оптика” рассмотрены аспекты организации самостоятельной работы студентов. Приведены рекомендации для преподавателя. Особое внимание уделено практическим занятиям, приведены примеры решения задач, ссылки на теоретический материал и варианты индивидуальных заданий.

Представленные задачи могут быть использованы на практических занятиях и для самостоятельной работы обучающихся.

Литература

Основная литература

1. Основы оптики. Конспект лекций. / А.А. Шехонин – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 172 с.
2. Основы оптики. Электронный учебник. / Т.В. Иванова, А.А. Шехонин – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.

Дополнительная литература

3. Бутиков, Е.И. Оптика / Е.И. Бутиков. – СПб: Издательство «Лань» – СПб, 2008.
4. Варданын, В.А. Физические основы оптики [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.А. Варданын. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 272 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/106868>. — Загл. с экрана.
5. Вычислительная оптика: справочник. / М.М. Русинов [и др.]. - 2-е изд. – СПб: ЛКИ, 2008. – 424 с.
6. Дичберн, Р. Физическая оптика / Р. Дичберн. - М.: Наука, 1965. – 524
7. Джерард, А. Введение в матричную оптику / А. Джерард, Дж. М. Берч. - М.: Мир, 1978. – 342 с.
8. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев– Изд. 4-е, стер . – СПб: Издательство "Лань", 2008. – 446 с.
9. Зверев, В.А. Основы вычислительной оптики [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.А. Зверев, И.Н. Тимощук, Т.В. Точилина.— Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 356 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/108450>. — Загл. с экрана.
10. Ишанин, Г.Г. Источники излучения: учеб. пособие / Г.Г. Ишанин, В.В. Козлов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – 395 с.
11. Можаров, Г.А. Основы геометрической оптики / Г.А. Можаров. – М.: Издательский дом ЛОГОС, 2006. – 280 с.
12. Стафеев, С.К. Основы оптики / С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башнина. – СПб: Питер, 2006. – 336 с.
13. Шепелев, А.В. Оптика / А.В. Шепелев. – М: УРСС, 2000. – 80 с.
14. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. - М.: Техносфера, 2006. – 424 с.

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49