

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра общей физики

Ю.Д. Лантух, Е.В. Цветкова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки: 03.03.02 Физика, 08.03.01 Строительство, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Оренбург
2017

УДК 535.3(076.5)

ББК 22.34я7

Л 22

Рецензент – доцент, кандидат педагогических наук А.П. Русинов

Л 22 **Лантух, Ю.Д.**
Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз: методические указания /Ю.Д. Лантух, Е.В. Цветкова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2017. – 22 с.

Методические указания содержат методику выполнения лабораторной работы по оптике.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Физика» для обучающихся по программам высшего образования по направлениям подготовки: 08.03.01 Строительство, 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов и по дисциплине «Общий физический практикум» для обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

УДК 535.3(076.5)

ББК 22.34я7

© Лантух Ю.Д.,
Цветкова Е.В, 2017
© ОГУ, 2017

Содержание

1 Цель работы	4
2 Введение. Теоретическая часть.....	4
2.1 Основные законы оптики. Полное отражение	4
2.2 Тонкие линзы. Изображение предметов с помощью тонких линз	8
2.3 Аберрации оптических систем	14
2.3.1 Типы и причины аберраций	14
2.3.1.1. Сферическая аберрация.....	14
2.3.1.2 Дисторсия изображения.....	15
2.3.1.3 Хроматическая аберрация.....	16
3 Лабораторная установка.....	17
4 Экспериментальная часть.....	18
4.1 Определение фокусного расстояния собирающей линзы по формуле тонкой линзы.....	18
4.2 Определение увеличения собирающей линзы и её фокусного расстояния	19
4.3 Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы	20
5 Контрольные вопросы	22
Список использованных источников	22

Лабораторная работа № 220. Определение фокусного расстояния собирающей и рассеивающей линз

1 Цель работы

- 1 Ознакомиться с основными понятиями геометрической оптики.
- 2 Освоить навыки практической работы с линзами.
- 3 Определить фокусное расстояние собирающей и рассеивающей линз.

2 Введение

2.1 Основные законы геометрической оптики. Полное внутреннее отражение света.

Еще до установления природы света были известны следующие основные законы оптики: закон прямолинейного распространения света в оптически однородной среде; закон независимости световых пучков (справедлив только в линейной оптике); закон отражения света; закон преломления света.

Закон прямолинейного распространения света: свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их точечными источниками света (источники, размеры которых значительно меньше освещаемого предмета и расстояния до него). Тщательные эксперименты показали, однако, что этот закон нарушается, если свет проходит сквозь очень малые отверстия, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.

Закон независимости световых пучков: эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены. Разбивая световой поток на отдельные световые пучки (например, с помощью диафрагм), можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.

Если свет падает на границу раздела двух сред (двух прозрачных веществ), то падающий луч *I* (рисунок 1) разделяется на два – отраженный *II* и преломленный *III*, направления которых задаются законами отражения и преломления.

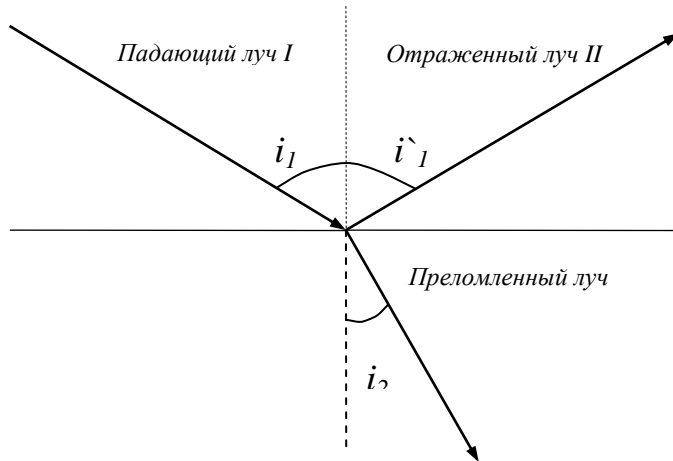


Рисунок 1

Закон отражения: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол i'_1 отражения равен углу i_1 падения:

$$i'_1 = i_1. \quad (1)$$

Закон преломления (закон Снеллиуса): луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} \quad (2)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Индексы в обозначениях углов i_1, i_1', i_2 указывают, в какой среде (первой или второй) идет луч. Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Абсолютным показателем преломления среды называется величина n , равная отношению скорости c электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости v в среде:

$$n = c/v. \quad (4)$$

$n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ (ε и μ – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости среды).

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (5)$$

Из симметрии выражения (5) вытекает обратимость хода световых лучей. Если обратить луч *III* (рисунок 1), заставив его падать на границу раздела под углом i_2 , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом i_1 , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча *I*.

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления n_1 (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления n_2 (оптически менее плотную) ($n_1 > n_2$), например, из стекла в воду, то, согласно (5),

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_2}{n_1} > 1$$

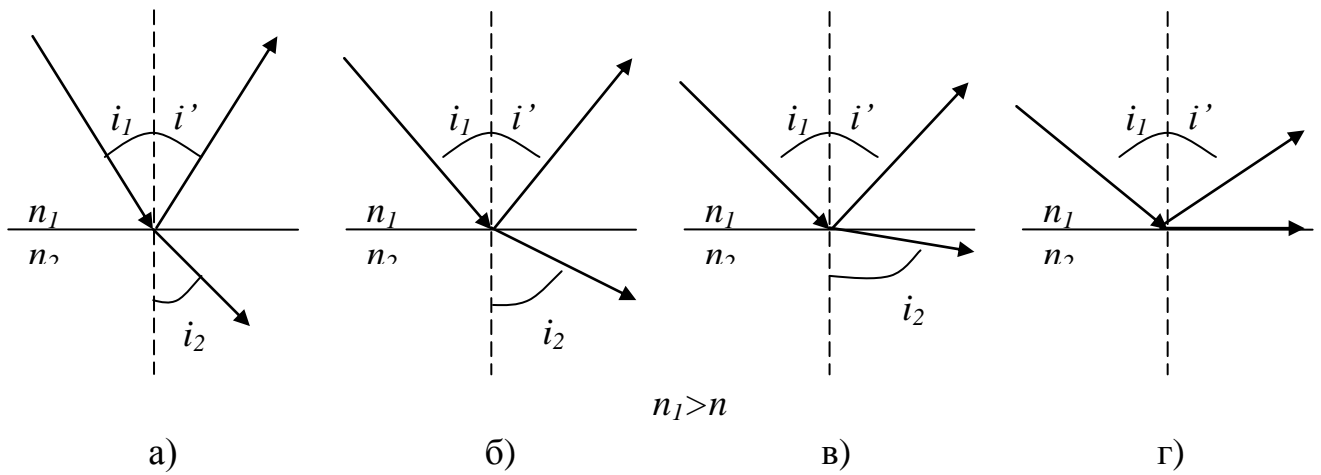


Рисунок 2

то преломленный луч удаляется от нормали и угол преломления i_2 больше, чем угол падения i_1 (рисунок 2. а). С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рисунки 2. б, в) до тех пор, пока при некотором угле падения ($i_1 = i_{np}$) угол преломления не окажется равным $\pi/2$. Угол i_{np} называется предельным углом. При углах падения $i_1 > i_{np}$ весь падающий свет полностью отражается (рисунок 2. г).

По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного – растет (рисунки 2. а – в). Если $i_1 = i_{np}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рисунок 2. г). Таким образом, при углах падения в пределах от i_{np} до $\pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы. Это явление называется полным внутренним отражением света.

Предельный угол i_{np} определим из формулы (5) при подстановке в нее $i_2 = \pi/2$. Тогда

$$\sin i_{np} = n_2 / n_1 = n_{21} \quad (6)$$

Уравнение (6) удовлетворяет значениям угла i_{np} при $n_2 \leq n_1$. Следовательно, явление полного отражения имеет место только при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную.

2.2. Тонкие линзы. Изображение предметов с помощью линз

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представления о световых лучах, называется геометрической оптикой. Под световыми лучами понимаются нормальные к волновым поверхностям линии, вдоль которых распространяется поток световой энергии. Геометрическая оптика, оставаясь приближенным методом построения изображений в оптических системах, позволяет разобрать основные явления, связанные с прохождением через них света, и является поэтому, основой теории оптических приборов.

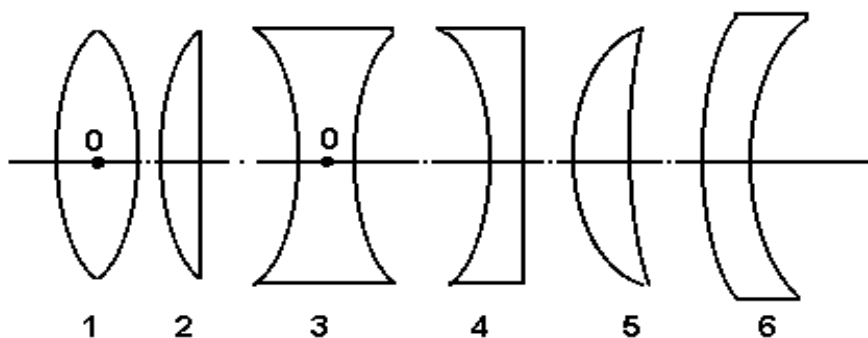


Рисунок 3

Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая иногда цилиндрическая, а вторая – сферическая или плоская), преломляющими световые лучи, способные формировать оптические изображения предметов. Материалом для линз служат стекло, кварц, кристаллы, пластмассы и т. п. По внешней форме (рисунок 3) линзы делятся на: 1) двояковыпуклые; 2) плосковыпуклые 3) двояковогнутые; 4) плосковогнутые 5) выпукловогнутые; 6) вогнуто-выпуклые. По оптическим свойствам линзы делятся на: собирающие и рассеивающие.

Линза называется тонкой, если ее толщина (расстояние между ограничивающими поверхностями) значительно меньше по сравнению с радиусами кривизны поверхностей, ограничивающих линзу. Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется главной оптической осью. Для всякой линзы существует точка, называемая оптическим центром линзы, лежащая на главной оптической оси и обладающая тем свойством, что лучи проходят сквозь нее не преломляясь. Для простоты оптический центр O (рисунок 4) линзы будем считать совпадающим с геометрическим центром средней части линзы (это справедливо только для двояковыпуклой и двояковогнутой линз с одинаковыми радиусами кривизны обеих поверхностей; для плосковыпуклых и плосковогнутых линз оптический центр O лежит на пересечении главной оптической оси со сферической поверхностью).

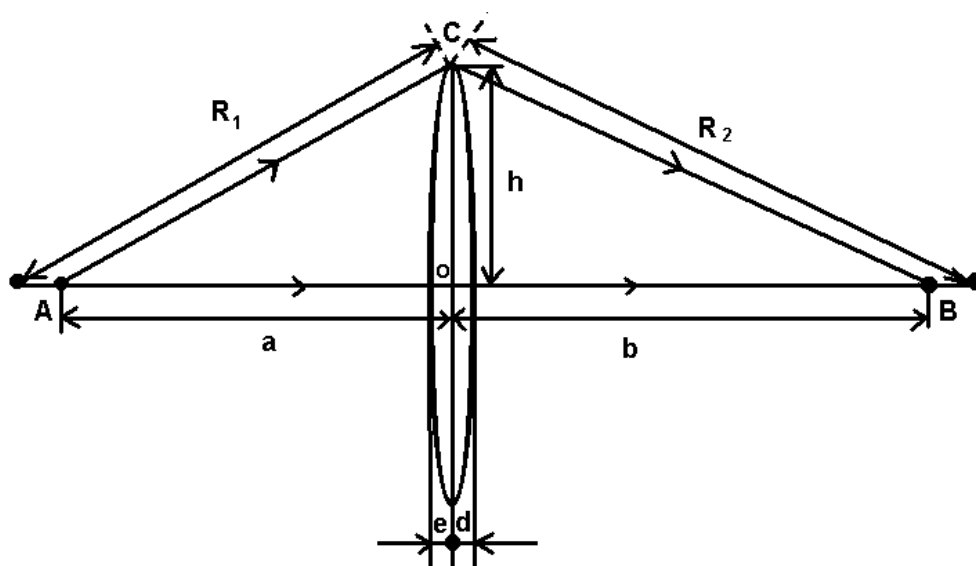


Рисунок 4

Для вывода формулы тонкой линзы – соотношения, связывающего радиусы кривизны R_1 и R_2 поверхностей линзы с расстояниями a и b от линзы до предмета и его изображения, – можно воспользоваться принципом Ферма (принципом наименьшего времени): действительный путь распространения света (траектория светового луча) есть путь, для прохождения которого свету требуется минимальное время по сравнению с любым другим мыслимым путем между теми же точками.

Формулу тонкой линзы также можно получить, последовательно применяя закон Снеллиуса для параксиальных пучков, преломляющихся на обеих поверхностях линзы:

$$(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (7)$$

Выражение (7) представляет собой *формулу тонкой линзы*. Радиус кривизны выпуклой поверхности линзы считается положительным, вогнутой – отрицательным.

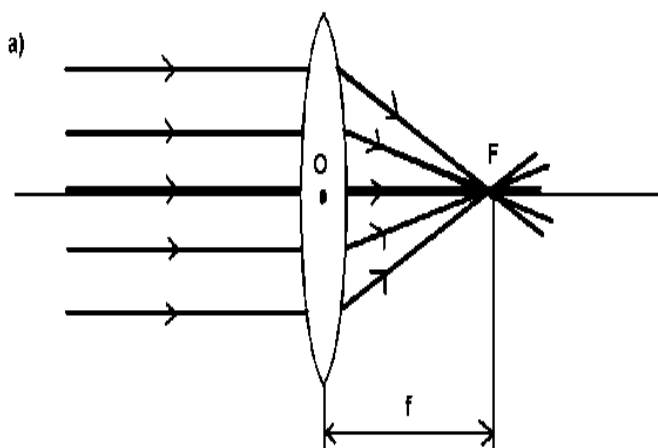
Если $a = \infty$, т. е. лучи падают на линзу параллельным пучком (рисунок 5. а), то

$$\frac{1}{b} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

Соответствующее этому случаю расстояние $b = OF = f$ называется фокусным расстоянием линзы:

$$f = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$$

Фокусное расстояние линзы зависит от относительного показателя преломления и радиусов кривизны.



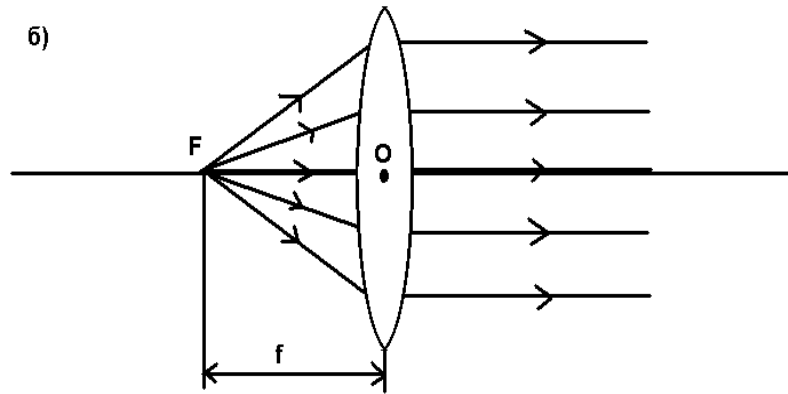


Рисунок 5

Если $b = \infty$, т. е. изображение находится в бесконечности и, следовательно, лучи выходят из линзы параллельным пучком (рисунок 5, б), то $a = OF = f$. Таким образом, фокусные расстояния линзы, окруженной с обеих сторон одинаковой средой, равны. Точки F, лежащие по обе стороны линзы на расстоянии, равном фокусному, называются фокусами линзы. Фокус – это точка, в которой после преломления собираются все лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси.

Величина

$$(n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{1}{f} = \Phi \quad (8)$$

называется **оптической силой линзы**. Её единица – диоптрия (дптр). **Диоптрия** – оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м: 1 дптр = 1/м.

Линзы с положительной оптической силой являются собирающими, с отрицательной – рассеивающими. Плоскости, проходящие через фокусы линзы перпендикулярно ее главной оптической оси, называются фокальными плоскостями. В отличие от собирающей, рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. В мнимом фокусе сходятся (после преломления) воображаемые продолжения лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси (рисунок б).

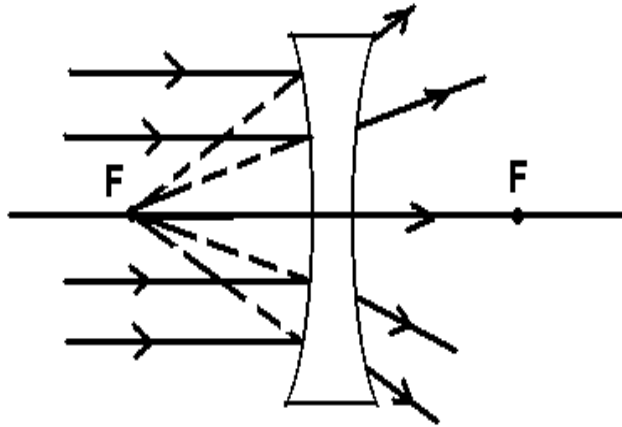


Рисунок 6

Учитывая (8), формулу линзы (7) можно записать в виде

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (9)$$

Для рассеивающей линзы расстояния f и b надо считать отрицательными.

Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих лучей:

- 1) луча, проходящего через оптический центр линзы и не изменяющего его направления;
- 2) луча, идущего параллельно главной оптической оси; после преломления в линзе этот луч (или его продолжение) проходит через второй фокус линзы;
- 3) луча (или его продолжения), проходящего через первый фокус линзы; после преломления в ней он выходит из линзы параллельно ее главной оптической оси.

Для примера приведены построения изображений с собирающей (рисунок 7) и с рассеивающей (рисунок 8) линзами: действительного (рисунок 7, а) и мнимого (рисунок 7, б) изображений – с собирающей линзой, мнимого – с рассеивающей.

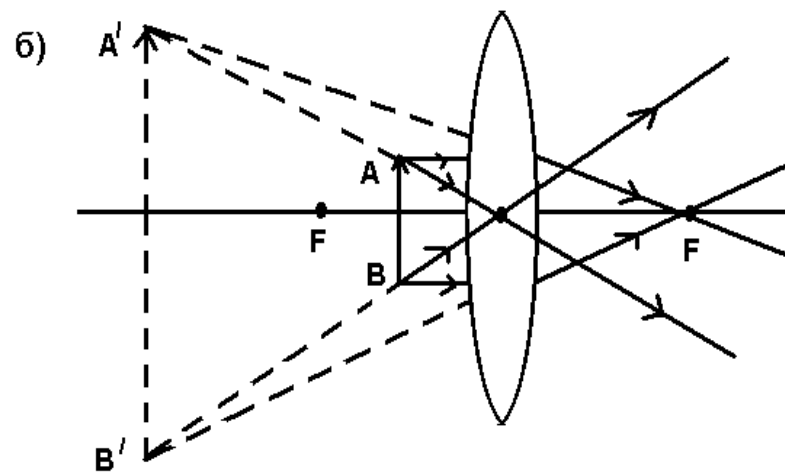
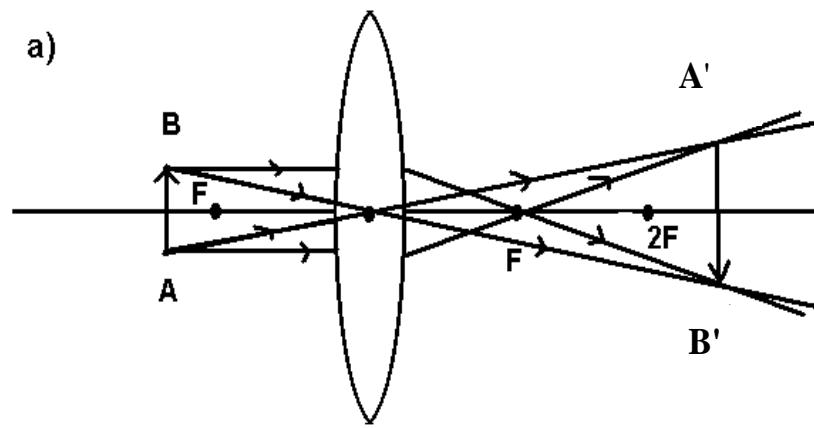


Рисунок 7

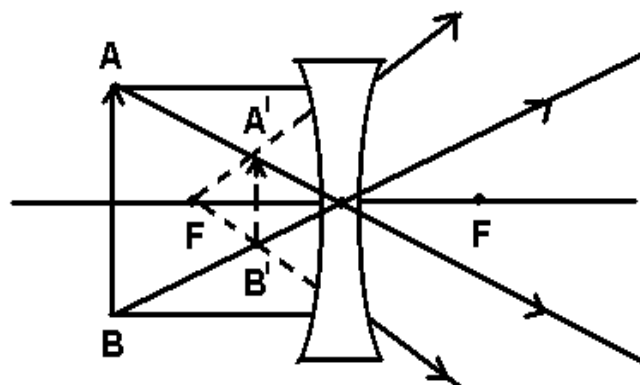


Рисунок 8

Отношение линейных размеров изображения и предмета $\beta = H/h$ называется линейным увеличением линзы. Отрицательным значениям линейного увеличения соответствует действительное изображение (оно перевернутое), положительным – мнимое изображение (оно прямое). Комбинации собирающих и рассеивающих линз применяются в оптических приборах, используемых для решения различных научных и технических задач.

2.3. Аберрации оптических систем

Аберрации – искажения изображения или погрешности (недостатки) линзовых систем.

Рассматривая прохождение света через преломляющие поверхности и линзы, мы предполагали, что лучи параксиальны (т.е. проходят близко к главной оптической оси), а показатель преломления материала линзы не зависит от длины волны падающего света. Так как в реальных оптических системах эти условия не выполняются, то в них возникают искажения изображения, вызванные несовершенством оптических систем, называемые аберрациями.

2.3.1. Типы и причины аберраций

2.3.1.1 Сферическая аберрация

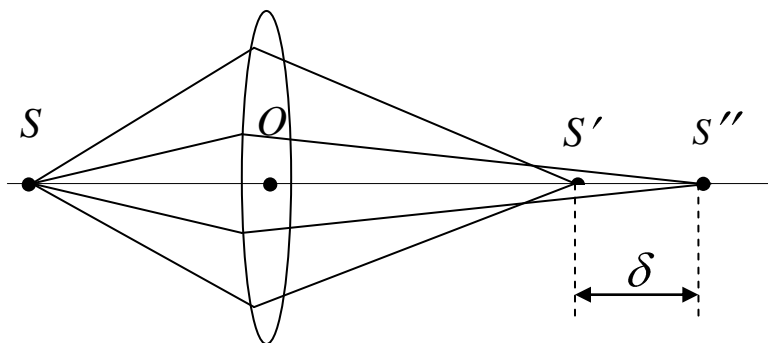


Рисунок 9

Причина: На линзу падает широко расходящийся (широкий) пучок; параксиальные и «внешние» лучи по разному преломляются линзой.

Если расходящийся пучок света падает на линзу, то параксиальные лучи после преломления пересекаются в точке S' (на расстоянии OS' от оптического центра линзы), а лучи, более удалённые от оптической оси, - в точке S'' , ближе к линзе (рисунок 9). В результате изображение светящейся точки на экране, перпендикулярном оптической оси, будет в виде расплывчатого пятна. Этот вид погрешности, связанный со сферичностью преломлённых поверхностей, называется сферической aberrацией (хотя он характерен не только для сферических поверхностей). Количественной мерой сферической aberrации является отрезок $\delta = OS'' - OS'$. Применяя диафрагмы (ограничиваясь параксиальными лучами), можно сферическую aberrацию уменьшить, однако при этом уменьшится светосила линзы. Сферическую aberrацию можно практически устранить, составляя системы из собирающих ($\delta > 0$) и рассеивающих ($\delta < 0$) линз. Сферическая aberrация является частным случаем астигматизма.

2.3.1.2 Дисторсия изображения

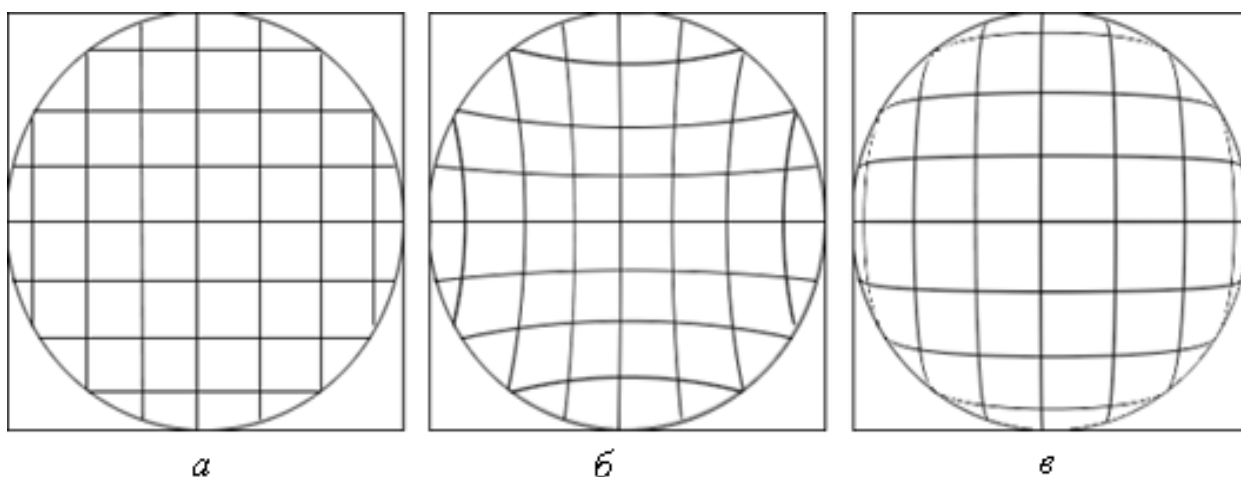


Рисунок 10

В случае, когда лучи, посылаемые предметом в систему, составляют большие углы с её оптической осью, изображение, даваемое даже узкими пучками, может не быть подобным предмету. Это обусловлено тем, что увеличение β такой системы при больших углах зависит от угла между осями пучка и системы и, следовательно, меняется от центра изображения к периферии. Типичные виды искажений изображения (дисторсии) приведены на рисунке 10: подушкообразная и бочкообразная дисторсии. Дисторсия особенно опасна в тех случаях, когда оптические системы применяются для фотографирования (аэрофотосъёмка, микроскопия) и т.д. Дисторсию устраняют соответствующим подбором составляющих частей оптической системы. (Например, две линзы с диафрагмой между ними). Оптическая система, свободная от дисторсии называется ортоскопической.

2.3.1.3 Хроматическая aberrация

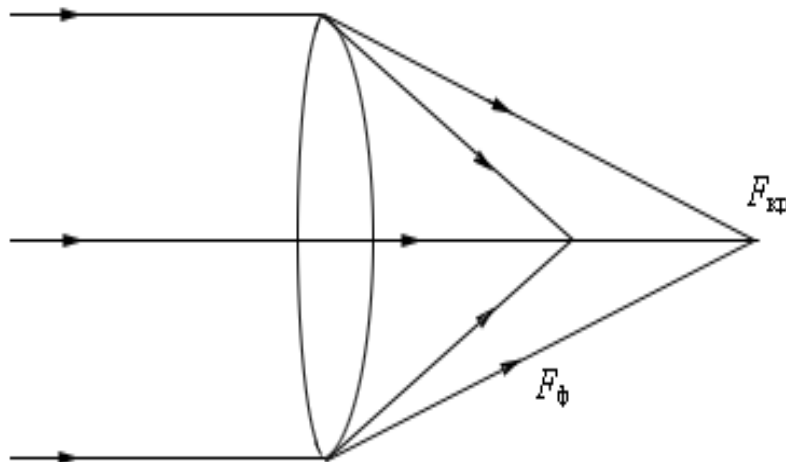


Рисунок 11

Из-за явления дисперсии (зависимости показателя преломления от длины волны) для данной линзы фокусы длин волн будут смещены друг относительно друга. В результате этого изображение белого пятна получается цветным – хроматическая aberrация. Хроматическая aberrация подобно сферической, количе-

ственно характеризуется продольной хроматической aberrацией (отрезок $F_{\phi}F_{кр}$ — разность фокусов для фиолетовых и красных лучей). Так как сорта стёкол обладают различной дисперсией, то, комбинируя собирающие и рассеивающие линзы у различных стёкол, можно совместить фокусы двух (ахроматы), трёх (апохроматы) различных цветов, устранив тем самым хроматическую aberrацию (рисунок 11). Системы, исправленные на сферическую и хроматическую aberrации называются апланатами.

Системы, исправленные на сферическую, хроматическую aberrации и астигматизм называются анастигматами.

3 Лабораторная установка



Лабораторная работа выполняется на установке, состоящей из:

- 1) оптической скамьи с линейкой (цена деления линейки 1 мм);
- 2) комплекта линз (две собирающие, одна рассеивающая);
- 3) осветителя с регулятором яркости, шкала которого является «предметом» в данной работе. Цена деления шкалы осветителя равна 0,2 мм;
- 4) экрана с линейкой.

4 Экспериментальная часть

4.1 Определение фокусного расстояния собирающей линзы по формуле тонкой линзы.

1. Установить собирающую линзу между осветителем и экраном.
2. Включить осветитель. Регулятор яркости установить в среднее положение.
2. Получить чёткое изображение предмета (шкала осветителя) на экране.
3. Измерить расстояние a_1 от линзы до предмета и расстояние b_1 от линзы до изображения на экране (рисунок 12).

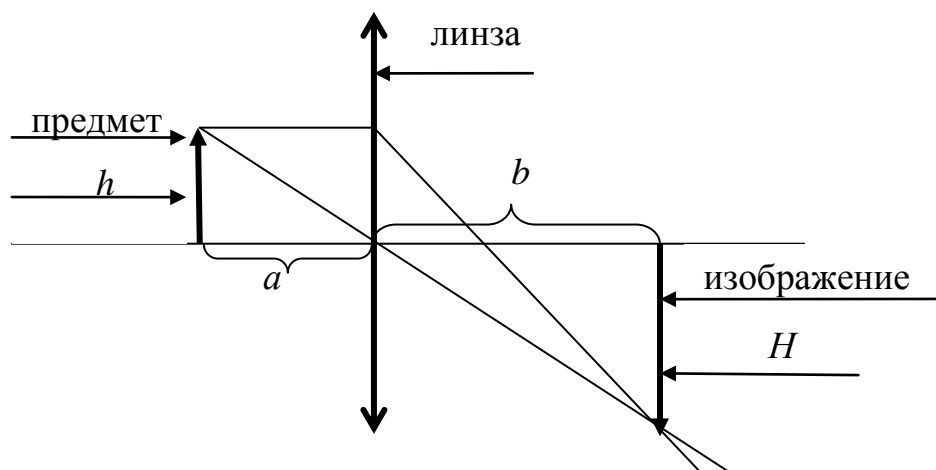


Рисунок 12

4 По формуле (10) рассчитать фокусное расстояние линзы f_1 :

$$f_1 = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (10)$$

5 Изменить расстояние между предметом и экраном. Изменяя новые расстояния: a_2 - от линзы до предмета и b_2 - от линзы до изображения на экране, рассчитать фокусное расстояние f_2 по формуле (10).

6 Вновь изменить расстояние между предметом и экраном и по определенным расстояниям a_3 и b_3 рассчитать фокусное расстояние f_3 по формуле (10).

7 Определить среднее фокусное расстояние $\bar{f} = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3}$. Данные занести в таблицу 4.1

8 Определить погрешности измерения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ по формуле (11) и среднюю погрешность измерения $\bar{\sigma}$ по формуле (12):

$$\sigma_1 = |f_1 - \bar{f}|, \sigma_2 = |f_2 - \bar{f}|, \sigma_3 = |f_3 - \bar{f}| \quad (11)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (12)$$

Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	f_1	f_2	f_3	\bar{f}	σ_1	σ_2	σ_3	$\bar{\sigma}$
$\beta =$			$f_p =$										
$f_\beta =$													

Все величины в таблице представить в метрах.

4.2 Определение увеличения собирающей линзы и её фокусного расстояния.

1 Установить осветитель на отметке 22 см.

2 Установить собирающую линзу на отметке 45 см.

3 Перемещением экрана добиться увеличенного изображения предмета (примерно на отметке 83 см.).

4 Определить увеличение, даваемое линзой по формуле (13):

$$\beta = \frac{H}{h} \quad (13)$$

где H – размер изображения, h – размер предмета (рисунок 12). Рассчитать увеличение из сравнения длины отрезков на шкале осветителя и их увеличенных изображений на экране. Принять во внимание, что расстояния на шкале осветителя между обозначенными цифрами делениями равно 1 см.

5 Определить фокусное расстояние линзы по формуле (14):

$$f_{\beta} = \frac{b}{1+\beta} \quad (14)$$

Данные занести в таблицу 4.1.

4.3 Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы

Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы следует воспользоваться оптической схемой, представленной на рисунке 13.

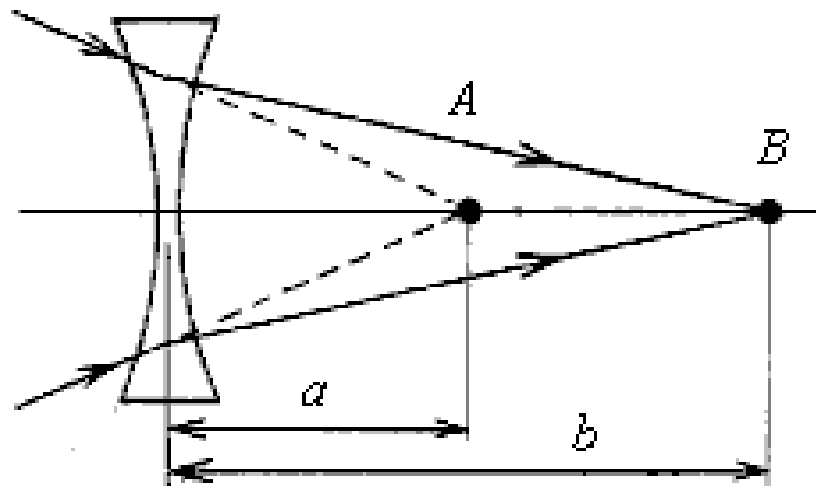


Рисунок 13

Фокусное расстояние f_p определим по смещению точки фокусировки сходящейся волны (рисунок 13). Измерив координаты линзы, прежней точки фокусировки A и

новой точки фокусировки В, найдем фокусное расстояние по формуле линзы, в которой нужно изменить знак перед "a":

$$\frac{1}{f_p} = \frac{1}{b} - \frac{1}{a}, \quad (15)$$

Для рассеивающей линзы получим $f_p < 0$.

- 1 Получить сходящийся пучок с помощью собирающей линзы. Для этого:
 - Установить осветитель на отметке 22 см.
 - Установить собирающую линзу на отметку 67 см. При этом рейтер держателя линзы развернуть так, чтобы фиксирующие винты были обращены в сторону осветителя.
 - Экран установить на отметку 81 см.
- 2 Отвести экран, поставить рассеивающую линзу за собирающей линзой на отметку 74 см.
- 3 Придвигая экран на отметку примерно 87,5 см., получить чёткое изображение предмета.
- 4 Определить фокусное расстояние рассеивающей линзы по формуле (16):

$$f_p = \frac{ab}{a-b} \quad (16)$$

Данные занести в таблицу 4.1.

Сравнить значения f_β и \bar{f} , полученное в п. 4.1.

Сделать вывод по работе.

5 Контрольные вопросы

- 1 Основные законы геометрической оптики.
- 2 При каком условии наблюдается полное внутреннее отражение света?
- 3 В чем заключается физический смысл абсолютного показателя преломления среды?
- 4 Что такое относительный показатель преломления?
- 5 Тонкая линза. Формула тонкой линзы.
- 6 Формула оптической силы линзы.
- 7 Как осуществляется построение изображения предметов в линзах?
- 8 Как определяется фокусное расстояние собирающей и рассеивающей линз.
- 9 Аберрации. Виды аберраций.
- 10 Причины аберраций.

Список использованных источников

1 Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений / Т.И. Трофимова. – 20-е изд., стер.- Москва: Академия, 2014. – 560 с.: ил.- (Высшее профессиональное образование).- Предм. указ.: с. 537-549. – ISBN 978-5-4468-0627-0.

2 Летута, С. Курс физики: оптика [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов инженерно-технических направлений подготовки / С. Летута, А. Чакак ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет», Физический факультет. - Оренбург: ОГУ, 2014. – Режим доступа:
http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=259245.

3 Гольдин, Л.Л. Лабораторные занятия по физике: учебное пособие / Л.Л. Гольдин, Ф.Ф. Игошин, С.М. Козел и [др].; Под редакцией Гольдина Л.Л. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 704 с.