

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Лазерная техника и технология»

Н. К. Артюхина

РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и расчет оптических систем»
для студентов специальности
1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы
и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2019

УДК 535(075.8)
ББК 22.34я7
А86

Рецензенты:

Заведующий кафедрой электронной техники и технологии
Белорусского государственного университета информатики
и радиоэлектроники, канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*;
начальник конструкторско-исследовательского отдела
ОАО «Пеленг» *В. А. Марчик*

Артюхина, Н. К.

А86 Рабочая тетрадь для практических занятий: учебно-методическое пособие по дисциплине «Теория и расчет оптических систем» для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» / Н. К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2019. – 54 с. ISBN 978-985-583-496-1.

Учебно-методическое пособие составлено с учетом учебного плана для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы».

Пособие представлено как дидактический комплекс, основанный на модульных программах, состоящий из информационного блока и блока тестового контроля. Такая структура способствует поэтапному формированию индивидуальной деятельности студента.

В учебно-методическом пособии соединяются изложение основных положений дисциплины «Теория и расчет оптических систем»: понятия и свойства геометрической оптики, теория идеальной системы и основные принципы габаритного и абберационного расчета оптических визуальных систем (телескопической системы и микроскопа), их элементной базы с выработкой общих и профессиональных компетенций практических умений и навыков.

Издание предназначено для самостоятельной работы и может быть использовано в учебном процессе при подготовке студентов и магистрантов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» и родственных приборостроительных специальностей других вузов.

УДК 535(075.8)
ББК 22.34я7

ISBN 978-985-583-496-1

© Артюхина Н. К., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

Предисловие

Теория и расчет оптических систем – прикладная оптическая наука, изучающая принципы конструирования оптических систем и методы образования изображения и рассматривается как основная дисциплина, которая готовит специалистов оптического приборостроения и закладывает теоретический фундамент специальных инженерных знаний.

Учебно-методическое пособие «Рабочая тетрадь для практических занятий» по изучаемой дисциплине предназначено для организации самостоятельной работы студентов. Цель издания – обеспечить формирование творческих процессов, активных методов и технологий познавательной деятельности, способствовать повышению эффективности обучения студентов на основе индивидуализации.

Содержание учебно-методического пособия охватывает разделы курса «Теория и расчет оптических систем», которые необходимо тщательно изучить при подготовке к выполнению курсового проекта по дисциплине, а именно фундаментальные понятия, определения и законы геометрической оптики, свойства идеальной оптической системы, теоретические положения по расчету оптических визуальных систем. Содержит вопросы и задачи для самостоятельной работы по темам дисциплины, примеры вариантов решения задач, примеры вариантов тестов для текущего тестового контроля и рубежной аттестации, примеры индивидуальных графических заданий и вариантов их решений.

Представленное учебное издание включает информационный блок (ИБ) и блок контроля (ТБ), обеспечивает перспективность обучения с применением модульных программ.

МОДУЛЬ 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ОПТИКА НУЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ

ИБ1

А. Основой законов и зависимостей геометрической оптики является *принцип Ферма*: точка предмета изображается в виде точки, если оптические длины для всех лучей, связывающих точку предмета и ее изображение, минимальны и одинаковы.

Изображения

1. Действительные – образованы пересечением лучей, мнимые – продолжением лучей.
2. Увеличенные и уменьшенные.
3. Прямые и обратные.

Пучки лучей

1. Расходящиеся и параллельные (существуют в природе, воспринимаются глазом).
2. Сходящиеся (образованы оптическими системами).

Б. *Законы распространения света*

1. Закон прямолинейного распространения света.
2. Закон независимости распространения света.
3. Закон преломления $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$.
4. Закон отражения $-\varepsilon = \varepsilon'$.

В. *Явление полного внутреннего отражения* происходит при распространении света из более плотной среды в менее плотную ($n' < n$). При определенных значениях угла ε пучок света отражается от границы раздела двух сред; при угле ε_m (*предельный угол полного внутреннего отражения*) преломленный луч скользит вдоль границы раздела двух сред: $\sin \varepsilon_m = \frac{n'}{n}$.

Г. Для удобства чтения оптических схем приняты единые *правила знаков*. Положительное направление – распространение света слева направо.

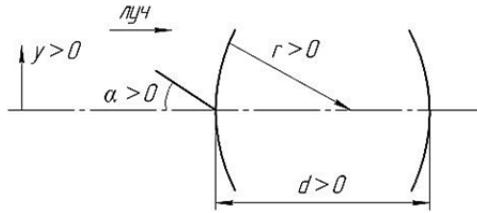


Рис. 1.1. Правило знаков

Д. Параксиальная область ОС – часть пространства вокруг оптической оси, внутри которого углы лучей с оптической осью и с нормальными к поверхностям настолько малы, что величины синусов и тангенсов можно заменить величинами углов в радианной мере. Лучи, идущие внутри этой области, называются *параксиальными*. Полный инвариант Лагранжа–Гельмгольца

$$n_1 y_1 \alpha_1 = n'_P y'_P \alpha'_P.$$

Частный инвариант Аббе

$$n \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{S'} - \frac{1}{r} \right).$$

Е. Нулевые лучи – фиктивные лучи, преломляющиеся на главных плоскостях, имеющие конечные высоты и отсекающие на ней такие же отрезки, что и параксиальные.

Расчет нулевых лучей через ОС с заданными радиусами

$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \cdot \alpha_k + h_k \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k}$	Уравнение углов
$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} \cdot d_k$	Уравнение высот
$r_k = \frac{h_k (n_{k+1} - n_k)}{n_{k+1} \cdot \alpha_{k+1} - n_k \alpha_k}$	Радиус поверхности

Нулевые лучи используют для расчета:

- фокусных расстояний f, f' ,
- вершинных отрезков S_F, S'_F ,
- заднего отрезка $S'_P = \frac{h_P}{\alpha_{P+1}}$.

Расчет нулевых лучей через ОС с известными оптическими силами Φ_K

$\alpha_{K+1} = -\frac{f_K}{f'_K} \alpha_K + \frac{h_K \Phi_K}{n_{K+1}}$	Формула углов
$\Phi_K = \frac{n_{k+1} \alpha_{k+1} - n_k \alpha_k}{h_k}$	Оптическая сила
$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} \cdot d_k$	Формула высот

Формулы верны для тонких компонентов и для компонентов с раздельными главными плоскостями $\Delta_{HH'} \neq 0$ (расстояния d_k отсчитываются от задней главной плоскости предшествующего до передней главной плоскости последующего компонента).

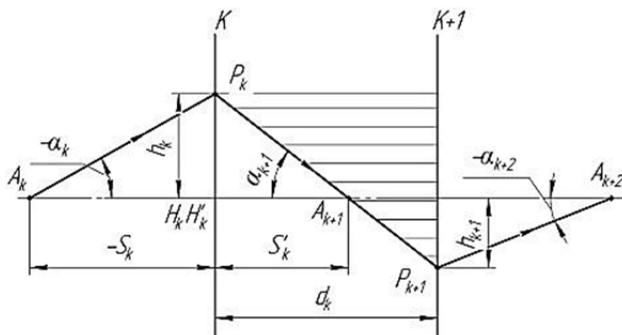


Рис. 1.2. Нумерация поверхностей

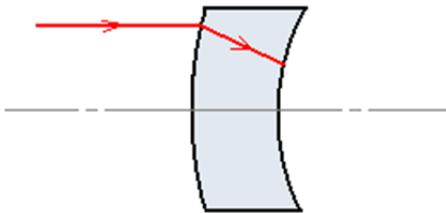
Задача 1.1. Показатель преломления алмаза $n = 2,417$. Определить предельный угол полного внутреннего отражения на границе алмаза с воздухом.

Решение. При переходе луча из более плотной среды в менее плотную преломленный луч отклоняется от нормали, т. е. $\epsilon' > \epsilon$. При увеличении угла падения наступит момент, когда $\sin \epsilon' = 1$, т. е. преломленный луч будет скользить по поверхности границы раздела ($\epsilon' = 90^\circ$). В этом случае предельный угол падения ϵ_m определяется по формуле для преломления луча из среды в воздух.

$$\sin \epsilon_m = \frac{1}{n} = \frac{1}{2,417} = 0,413736, \quad \epsilon_m = 24,44^\circ.$$

Ответ: $\epsilon_m = 24,44^\circ$.

Задача 1.2. Линза имеет следующие конструктивные элементы: $r_1 = 100$, $r_2 = 282,94$, $d = 10$, стекло К8 (λ_e). Определить ее переднее и заднее фокусные расстояния, когда первая среда – воздух, а последняя среда: а) воздух; б) вода (λ_e); в) иммерсионное масло (λ_e). Воспользовавшись формулами для расчета параксиального луча, объясните обнаруженную закономерность.



$$\begin{aligned} r_1 &= 100; \\ r_2 &= +282,94; \\ d &= 10; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_1 &= 1; \\ n_2 &= 1,5183; \\ n_3 &= 1; 1,33; 1,515. \end{aligned}$$

Решение. Расчет нулевого луча (полученные величины в мм);

1. $\alpha_1 = 0;$
 $\alpha_2 = 0,3421;$ $h_1 = 100;$ $f' = 292,94;$ $-\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$
 $\alpha_3 = 0,3421;$ $h_2 = 96,58;$ $f = -292,94;$
2. $f' = 292,94;$ $f = -219,76;$
3. $f' = 292,94;$ $f = -193,36.$

Объяснение:

Формула для паракиального луча: $\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = \frac{n' - n}{r}$.

Предмет расположен на бесконечности

$$S_1 = \infty; \quad \frac{n'_1}{S'_1} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1}; \quad \frac{S'_1}{n'_1} = \frac{r_1}{1,5183 - 1}; \quad S'_1 = \frac{100 \cdot 1,5183}{0,5183} = 292,94 \text{ мм};$$

Имеем $S_2 = 282,94$ мм – предмет в центре второй поверхности

$$\frac{1}{S'_2} - \frac{1,5183}{282,94} = \frac{1 - 1,5183}{282,94} \Rightarrow S'_2 = 282,94; \quad S'_F = 282,94 \text{ мм}.$$

Доказательство основано на формулах:

$$S'_F = f'(1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1}) \quad f' = S'_F + S'_H.$$

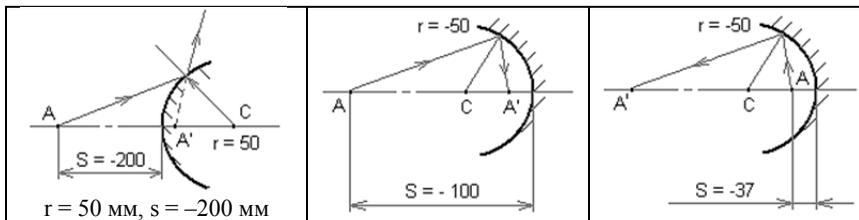
$$1. \quad \frac{1}{S'_2} = \frac{1}{282,94}$$

$$2. \quad \frac{1,33}{S'_2} = \frac{1,33 - 1,5183 + 1,5183}{282,94}; \quad S'_2 = 282,94 \text{ мм}.$$

$$3. \quad \frac{1,515}{S'_2} = \frac{1,515}{282,94}; \quad S'_2 = 282,94 \text{ мм}.$$

Ответ: $f' = 292,94$ мм; $f = -292,94$; $-219,76$; $-193,36$ мм.

Задача 1.3. Определить линейное увеличение оптической отражающей поверхности, находящейся в среде с показателем преломления $n = -n'$, если радиус кривизны равен r , а предмет находится на расстоянии S от поверхности, для следующих вариантов. Определить в каждом из вариантов положение точки изображения.



Решение. Инвариант Аббе $\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = \frac{n' - n}{r}$; для отражающей поверхности $n = -n'$ преобразуется к виду $\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2}{r}$;

а) задний отрезок $S' = \frac{rS}{2s - r}$. Расчет по формуле

$$S' = \frac{50 \cdot (-200)}{2(-200) - 50} = \frac{200}{9}, \quad S' = 22,2 \text{ мм.}$$

Линейное увеличение: $\beta = \frac{n}{n'} \cdot \frac{S'}{S}$.

$$\beta = \frac{200}{9} \cdot \frac{1}{200} = \frac{1}{9} \quad \beta = -\frac{S'}{S} = 0,111.$$

б) линейное увеличение через формулу инварианта Аббе

$$\beta = -\frac{r \cdot S}{2S - r} \cdot \frac{1}{S} = -\frac{r}{2S - r},$$

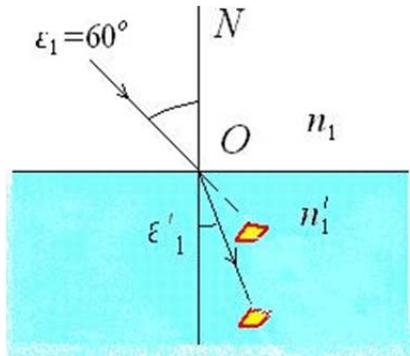
$$\beta = -\frac{-50}{2(-10) + 50} = -\frac{1}{3} \quad S' = -33,3; \quad \beta = -0,333.$$

$$\text{в) } \beta = -\frac{-50}{2(-37) + 50} = -\frac{25}{12} \quad S' = -77,08; \quad \beta = -2,08.$$

Ответ: $\beta = 0,111; -0,333; -2,08$. $S' = 22,2 \text{ мм}; -33,3 \text{ мм}; -77,08 \text{ мм}$.

Задача 1.4. 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. Таким образом, нам даны ε_1 и n .



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

$$\sin \varepsilon' = \sin \varepsilon / n';$$

$\sin \varepsilon' = \sin 60^\circ / 1,33 = 0,65$. Преломленный угол ε' равен $40^\circ 30'$.

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

Задача 1.5. Линза толщиной $d = 6$ мм, изготовленная из стекла ТК21, создает перевернутое изображение предмета размером $y'_2 = 0,6$ мм на расстоянии $S'_2 = 115$ мм. Предмет расположен перед линзой на расстоянии $S_1 = -60$ мм и имеет размер $y_1 = 0,3$ мм. Определить радиусы кривизны поверхности линзы в воздухе.

Решение. Линейное увеличение всей линзы $\beta = \frac{y'_2}{y_1} = -2^x$.

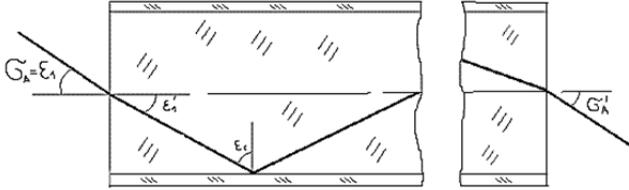
$$\text{Инвариант Аббе для 1-й поверхности } \frac{n}{S'_1} - \frac{1}{S_1} = \frac{n-1}{r_1}.$$

$$\text{Инвариант Аббе для 2-й поверхности } \frac{1}{S'_2} - \frac{n}{S_2} = \frac{1-n}{r_2}.$$

Связь отрезков $S_2 = S'_1 - d$ при этом используем формулу линейного увеличения через передний и задний отрезки:

$$\beta = \frac{S'_1 S'_2}{S_1 S_2} = -2 \rightarrow S'_1.$$

Задача 1.6. Определить угол σ_A , в пределах которого все лучи проходят через световод, испытывая полное внутреннее отражение. Входной торец перпендикулярен оптической оси.



При полном внутреннем отражении луча от границы между сердцевинной и оболочкой предельный угол ϵ_m определяется формулой

$$\sin \epsilon_m = \frac{n_0}{n_c}.$$

Преломление на торце световода описывается формулой:

$$n_1 \sin \epsilon_1 = n_c \sin \epsilon_1' \quad \text{или} \quad \sin \sigma_A = n_c \sin \epsilon_1',$$

так как $\sigma_A = \epsilon_1$ и $n_1 = 1$. Угол $\epsilon_1' = 90^\circ + \epsilon_c$, тогда $\sin \sigma_A = n_c \sin(90^\circ + \epsilon_c) = n_1 \sin \epsilon_1 = n_c \cos \epsilon_c = n_c \sqrt{1 - \sin^2 \epsilon_c}$.

Учитывая, что $\sin \epsilon_c = \sin \epsilon_m = \frac{n_0}{n_c}$, получаем $\sin \sigma_A = \pm \sqrt{n_c^2 - n_0^2}$.

Формула относится к лучам, лежащим в меридиональной плоскости, для волоконного световода со входным торцом, перпендикулярным оптической оси.

Ответ: $\sin \sigma_A = \pm \sqrt{n_c^2 - n_0^2}$.

1. Главные свойства и определение световых лучей.
2. Понятие центра и виды гомоцентрических пучков.
3. Какие точки называются сопряженными? Пример.
4. Понятие сопряженных отрезков, пример.
5. Какое изображение строит ОС, если из нее вышел расходящийся пучок лучей? Пояснить рисунком.
6. Какое изображение строит ОС, если из нее вышел сходящийся пучок лучей? Пояснить рисунком.
7. Правила знаков для линейных отрезков.
8. Правила знаков для углов.
9. Понятие меридиональной плоскости. Сколько таких плоскостей в центрированной ОС?
10. Можно ли получить на экране или зафиксировать на фотопленке мнимое изображение?
11. Что такое мнимое изображение? Может ли человек наблюдать мнимое изображение?
12. Какая оптическая система называется центрированной? Что называется оптической осью ОС?
13. Привести пример действительного и мнимого предмета (изобразить графически).
14. Привести пример действительного и мнимого изображения (изобразить графически).
15. Привести примеры практического использования явления полного внутреннего отражения.
16. Закон преломления. Показатель преломления.
17. Закон отражения.
18. Инвариант Аббе для сферической отражающей поверхности.
19. Инвариант Аббе для сферической преломляющей поверхности.
20. Нулевые лучи. Параметры и формулы расчета.
21. Полный инвариант Лагранжа–Гельмгольца.
22. Дать основные типы изображений.

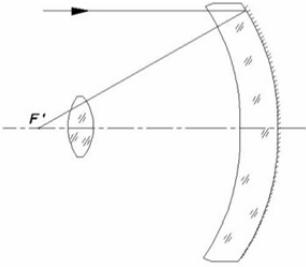
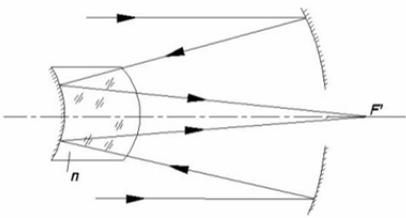
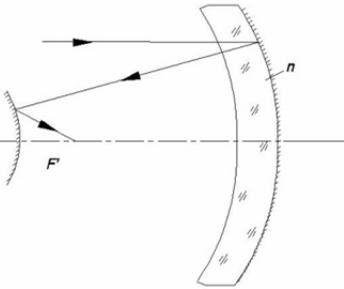
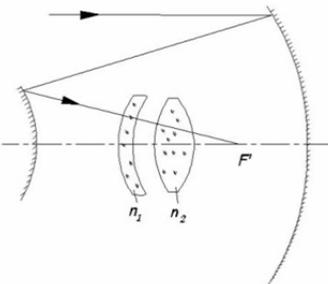
ТБ1

Задания на правило знаков

В заданной оптической схеме:

а) указать знаки r , d , n ;

б) сколько рабочих поверхностей в ОС?

1		
2		
3		
4		

5		
6		
7		
8		

Вопрос 1

Какие параметры нулевого луча входят в формулу уравнений углов и высот?

- α
- 2ω
- S'
- h
- d
- β

Ответ: h, α .

Вопрос 2

Когда начинается явление полного внутреннего отражения?

- Луч имеет угол преломления $\varepsilon' = 90^\circ$
- Луч имеет угол преломления $\varepsilon' = 0^\circ$
- Луч имеет угол преломления $\varepsilon' = -90^\circ$
- Луч имеет угол преломления $\varepsilon' = 45^\circ$

Ответ: Луч имеет угол преломления $\varepsilon' = 90^\circ$.

Вопрос 3

Какие лучи являются фиктивными?

- Параксиальные лучи
- Нулевые лучи
- Идущие по оптической оси

Ответ: Нулевые лучи.

Вопрос 4

Определить высоту h_2 точки пересечения луча со второй линзой и положение заднего фокуса для системы из двух тонких линз. Падающий луч параллелен оптической оси. Какое изображение?

- Изображение мнимое, $a'_f = -133$ мм
- Изображение действительное, $a'_f = 200$ мм
- Изображение действительное, $a'_f = 50$ мм
- Изображение мнимое, $a'_f = -10$ мм

Ответ: Изображение мнимое, $a'_f = -133$ мм.

МОДУЛЬ 2. ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОС. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

ИБ1

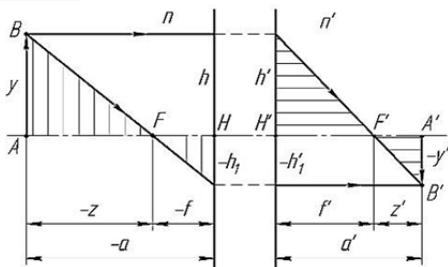


Рис. 2.1

Для ОС в воздухе $n = n' = 1$.

A и A' – осевые точки;
 B и B' – внеосевые точки.

Отрезки отсчитываются:
от фокусов – z и z' ,
от плоскостей H и H' – a , a' .
 y и y' – величины предмета и
изображения.

А. Кардинальные элементы

1. **Фокусы F и F'** (передний и задний) – точки на оптической оси, сопряженные с бесконечно удаленными точками, расположенными на той же оптической оси.

Для всех ОС связь фокусных расстояний $-\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}$, в однородной среде $f' = -f$.

Оптическая сила $\Phi = \frac{n'}{f'}$, [дптр] при f' в [м].

2. **Передняя и задняя H и H'** – сопряженные главные точки на оптической оси, в которых линейное увеличение $\beta_{HH} = 1$.

Б. Увеличения ИОС

1. Линейное $\beta = \frac{y'}{y}$.
2. Угловое $\gamma = \frac{\text{tg}\sigma'}{\text{tg}\sigma}$, при $n = n'$ $\gamma\beta = 1$.
3. Продольное $\alpha = -\frac{f'}{f}\beta^2$; $\alpha = \frac{\beta}{\gamma}$, при $n = n'$ $\alpha = \beta^2$.
4. Для визуальных ОС видимое увеличение

$$\Gamma = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \frac{-f_1'}{f_2'} = \frac{D}{D'}$$

В. Основные соотношения между размерами предметов и изображений

1. Формула Ньютона $zz' = ff'$ при $n = n'$ $zz' = -f'^2$.
2. Формула Гаусса (отрезков) $\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$.
3. Линейное увеличение $\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{a'}{a} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{a'}{a}$; $\beta = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'}$.

Кардинальные элементы линзы в воздухе

Фокусное расстояние	$\frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2}$
Задний фокальный отрезок	$S'_F = f' \left(1 - \frac{n-1}{n \cdot r_1} d\right)$
Передний фокальный отрезок	$S_F = f \left(1 + \frac{n-1}{n \cdot r_2} d\right) = -f' \left(1 + \frac{n-1}{n \cdot r_2} d\right)$
Положение главных плоскостей от поверхностей линзы	$S_H = f \left(\frac{n-1}{n \cdot r_1}\right) d = -f' \frac{n-1}{n \cdot r_2} d$; $S'_H = -f' \left(\frac{n-1}{n \cdot r_1}\right) d$
Расстояние между главными плоскостями	$\Delta_{HH'} = d \left[1 - \frac{f'}{n} (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\right]$

Для тонкой линзы ($d = 0$):

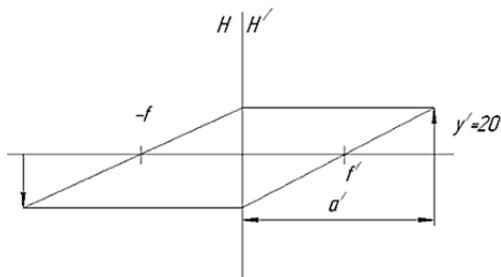
$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); \quad S'_{F'} = f'; \quad S_F = -f'.$$

ИБ2

Примеры решения задач

Задача 2.1. Определить положение и размер фотографируемого в воде предмета относительно тонкого фотообъектива с $f' = 50$ мм, если изображение размером 20 мм находится за ним на расстоянии $a' = 51,2$ мм. Какое расстояние необходимо установить по шкале дистанции?

Решение.



Уравнение Гаусса:

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'}.$$

Показатели преломления сред $n' = 1$, $n_{\text{воды}} = 1,33$.

После преобразований получим:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{-nf'}{a} = 1, \quad \frac{1}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{1}{f'} f = -f'h.$$

$$\frac{1}{51,2} - \frac{1,33}{a} = \frac{1}{50} \Rightarrow a = -2837,3 \text{ мм},$$

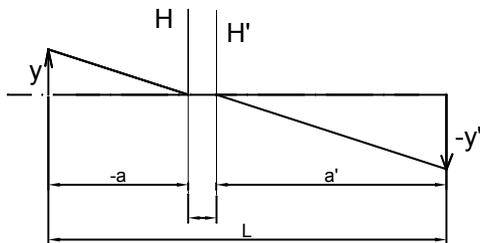
$$-\frac{y'}{y} = \frac{na'}{n'a} \quad y = -\frac{1,33 \cdot 51,2}{1 \cdot (-2837,3)} = 833,3 \text{ мм},$$

$$z' = 1,2; \beta = -\frac{z'}{f'} = -0,024^x \cdot y' = y \cdot \beta; y = \frac{y'}{\beta},$$

$$a = \frac{n \cdot a'}{\beta} = -2873,33; a_{\text{шк}} = \frac{a'}{\beta} = -2133,33.$$

Ответ: $y = 833,3$ мм.

Задача 2.2. Предмет размером 24 мм проецируется объективом увеличителя с негатива на фотобумагу в изображение размером 120 мм. Плоскость фотобумаги удалена от плоскости негатива на расстояние $L = 370$ мм. Определить фокусное расстояние объектива, если расстояние между его главными плоскостями равно $\Delta_{HH'} = 10$ мм. Какова будет погрешность в определении фокусного расстояния, если объектив считать тонким?



Решение. Линейное увеличение $\beta_{\text{об}} = y'/y = -120/24 = -5^x$.
 $\beta_{\text{об}} = a'/a$; отрезки связаны соотношением $a' - a + \Delta_{HH'} = L$.
 Решаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными.

$$-5a - a + 10 = 370,$$

$$-6a = 360, \quad a = -60 \text{ мм},$$

$$a' = L + a - \Delta_{HH'} = 370 - 70 = 300 \text{ мм},$$

$$f_{\text{об1}}' = a'/(1 - \beta_{\text{об}}) = 300/6 = 50 \text{ мм}.$$

При $\Delta_{HH'} = 0$ (тонкий объектив) формулы упрощаются.

Получим $L = a' - a$

$$-6a = 370, \quad a = -61,7 \text{ мм.} \quad a' = L + a = 370 - 61,7 = 308,3 \text{ мм.}$$

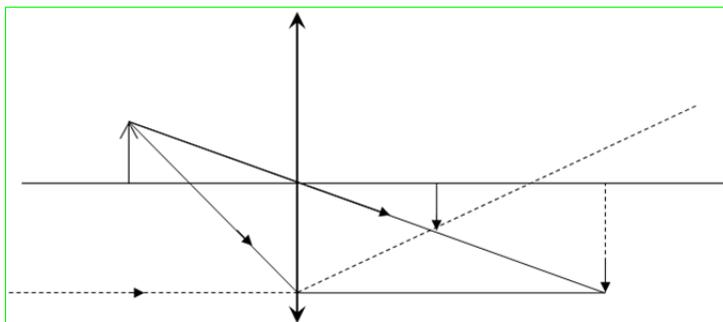
$$f_{\text{об2}}' = a' / (1 - \beta_{\text{об}}) = 308,3 / 6 = 51,39 \text{ мм,}$$

$$\Delta f' = f_{\text{об2}}' - f_{\text{об1}}' = 1,39 \text{ мм.}$$

Ответ: $f' = 50$ мм, если $\Delta_{\text{HH}'} = 0$, то $f' = 51,39$ мм; а $\Delta f' = 1,39$ мм.

Задача 2.3. Найти графически положение и величину изображения предмета $y = 20$ мм, лежащего на расстоянии $z_1 = 50$ мм от точки F_1 первой тонкой линзы. ОС состоит из двух тонких компонентов с фокусными расстояниями: $f_1' = 100$ мм; $f_2' = 200$ мм; расстояние между компонентами $d = 0$ мм. Графическое построение проверить аналитически.

Решение. Найдем положение и размер предмета графически. Сделать на рисунке соответствующие обозначения самостоятельно.



Сначала построим изображение предмета через первую линзу. Потом, считая это изображение предметом для второй линзы, построим изображение после второй линзы.

Получили: $a_2' = 115$ мм; $y'' = -15$ мм.

Проверим построение аналитически:

Запишем формулу Ньютона для первого компонента:

$$z_1 z_1' = -f_1'^2,$$

$$z_1' = \frac{f_1'^2}{z_1} = \frac{-10\,000}{-50} = 200 \text{ мм}, \quad a_1' = 300 \text{ мм}.$$

Изображение является предметом для второго компонента:

$$z_2 = -f_2 + a_2 = -f_2 + a_1' + d = -f_2 + f_1' + d + z_1'$$

$$z_2 = -200 + 100 + 0 + 200 = 500 \text{ мм}.$$

Формула Ньютона:

$$z_2 z_2' = -f_2'^2, \quad z_2' = \frac{-f_2'^2}{z_2} = \frac{-40\,000}{500} = -80 \text{ мм}.$$

Тогда $a_2' = f_2' + z_2' = 200 - 80 = 120 \text{ мм}$.

Линейное увеличение:

$$\beta = \beta_1 \beta_2,$$

$$\text{где } \beta_1 = \frac{a_1'}{a_1} = \frac{f_1' + z_1'}{f_1 + z_1} = \frac{300}{-150} = -2; \quad \beta_2 = \frac{a_2'}{a_2} = \frac{f_2' + z_2'}{f_2 + z_2} = \frac{120}{300} = 0,4.$$

Тогда $\beta = \beta_1 \beta_2 = 0,4 \cdot (-2) = -0,8$, $y'' = y\beta = 20 \cdot (-0,8) = -16 \text{ мм}$.

Ответ: $a_2' = 120 \text{ мм}$, $y'' = -16 \text{ мм}$.

Задача 2.4. Плосковыпуклая тонкая линза, изготовленная из стекла ЛК4, изображает предмет, находящийся перед ней на расстоянии 240 мм, за второй поверхностью на расстоянии 400 мм. Вычислить линейное увеличение, с которым действует линза, фокусное расстояние и оптическую силу.

Решение. Формула Гаусса для линзы в воздухе $\frac{1}{a'_1} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f'}$,

$$f' = 150 \text{ мм}, \quad \Phi = 6,6 \text{ дптр}, \quad \beta = -\frac{f'}{f'} \cdot \frac{a'}{a} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{a'}{a}; \quad \beta = \frac{400}{-240} = -1,67.$$

Ответ: $\Phi = 6,6$ дптр, $\beta = 1,67$ крат. Предмет перевернутый.

ИБЗ

Контрольные вопросы

1. Основные положения идеальной ОС.
2. Линейное увеличение идеальной ОС.
3. Кардинальные точки идеальной ОС.
4. Главные и фокальные плоскости идеальной ОС.
5. Фокусные расстояния и оптическая сила линзы.
6. Фокусные расстояния и оптическая сила сферического зеркала.
7. Положительные системы, расположение кардинальных точек.
8. Отрицательные системы, расположение кардинальных точек.
9. Формула Ньютона.
10. Формула Гаусса.
11. Инвариант Лагранжа–Гельмгольца.
12. Угловое увеличение. Узловые точки.
13. Продольное увеличение.
14. Связь между линейным, угловым и продольным увеличениями.
15. Формулы для расчета лучей через многокомпонентную ИОС: для предмета в бесконечности.
16. Формулы для расчета лучей через многокомпонентную ИОС: для предмета на конечном расстоянии.

ТБ1

Задания на построение изображений

Самостоятельно изучить. Построение изображения отрезка $y = AB$ (рис. 2.2), образуемого ОС из компонентов с положительным и отрицательным задним фокусным расстоянием. Свойства главных, узловых и фокальных точек используются для построения хода лучей. При определении хода заданного луча строят ход вспомогательных лучей, связанных с заданными лучами.

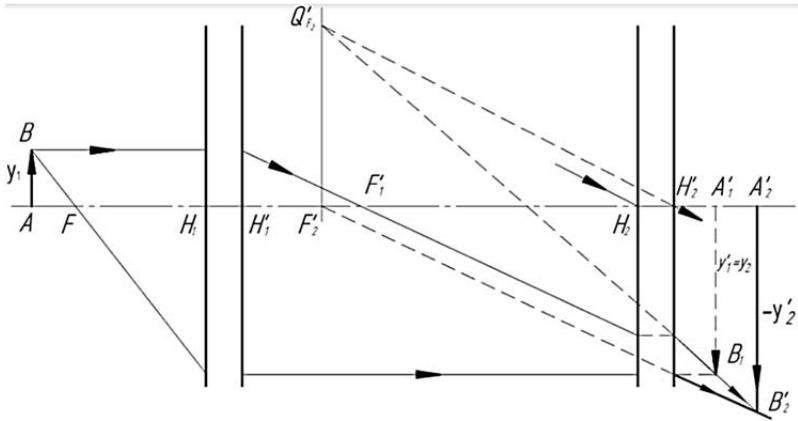


Рис. 2.2

Задание А. В таблице показаны четыре способа построения хода лучей для систем с положительным фокусным расстоянием, расположенных в однородной среде (заданный и вспомогательный лучи отмечены одной и двумя стрелками соответственно).

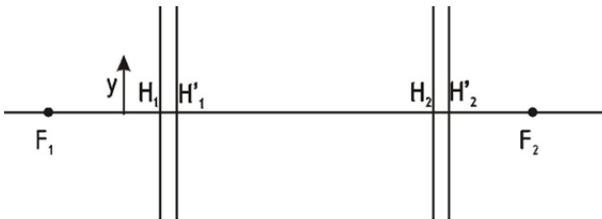
Дать аналогичные способы построения хода лучей для систем с отрицательным фокусным расстоянием.

1		
2		

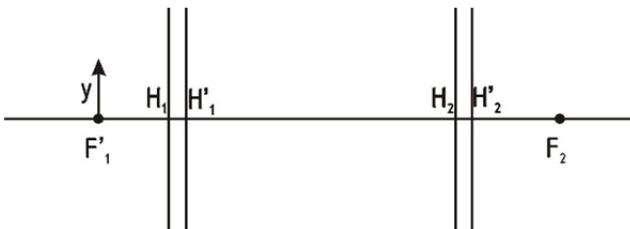
3		
4		

Задание Б. Определить графически величину изображения в ОС из двух компонентов.

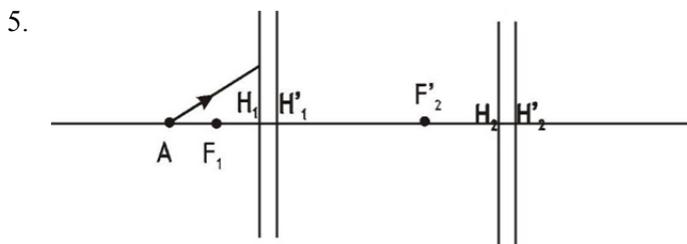
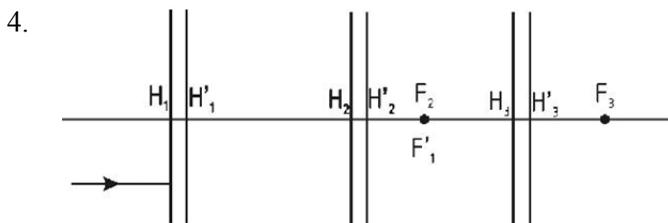
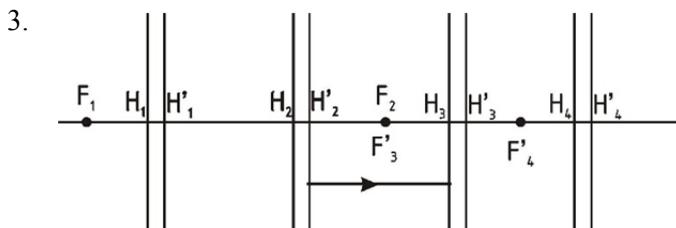
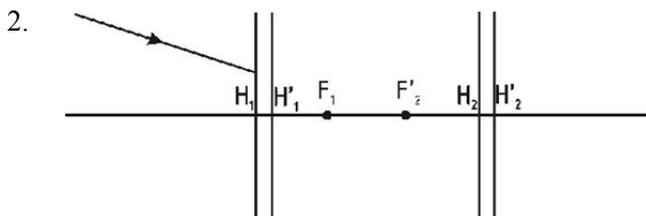
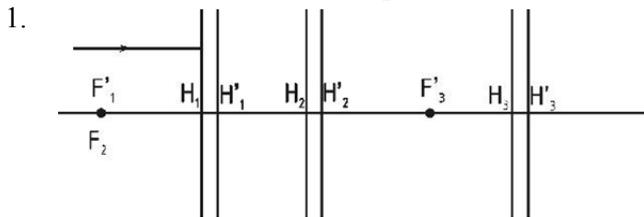
1.



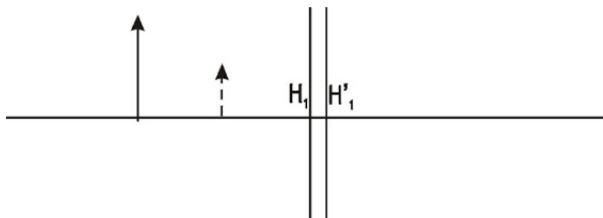
2.



Задание В. Построить ход луча через ОС из различного числа компонентов. Указать способы построения и число компонентов.



Задание Г. Найти графически точки фокусов в ОС.



ТБ2

Тестовые вопросы

Вопрос 1

Какие из перечисленных ниже характеристик являются кардинальными элементами ИОС?

- Фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости, главные точки, фокусные расстояния
- Фокусы, главные точки, линейное увеличение
- Фокальные плоскости, главные плоскости, фокусные расстояния
- Фокусы, главные точки, узловые точки
- Фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости, оптическая сила

Ответ: Фокусы, фокальные плоскости, главные плоскости, главные точки, фокусные расстояния.

Вопрос 2

Какое увеличение определяется формулой $\beta = \frac{y'}{y}$?

- Видимое увеличение
- Продольное увеличение
- Линейное увеличение
- Угловое увеличение

Ответ: Линейное увеличение.

Вопрос 3

Определить оптическую силу линзы, если $f = -10$ мм, $n = 1,33$, $n' = 1$.

- $\Phi = 100$ дптр
- $\Phi = 133$ дптр
- $\Phi = 0,1$ дптр
- $\Phi = 0,133$ дптр

Ответ: $\Phi = 133$ дптр.

Вопрос 4

Найти фокусное расстояние тонкого компонента в воздухе, если расстояние между предметом и изображением $L = 240$ и $\beta_0 = -2^x$.

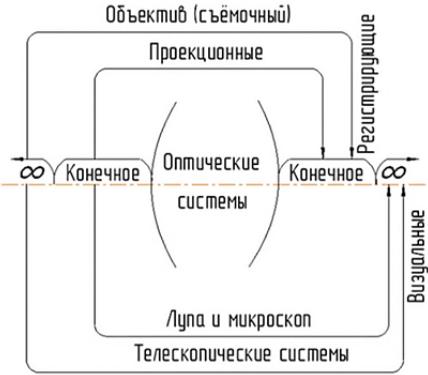
- 25 мм
- 50,33 мм
- 60 мм
- 80 мм

Ответ: 50,33 мм.

МОДУЛЬ 3. ЛУПА И МИКРОСКОП, ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ИБ1

Различают четыре основных типа оптических систем.



- 1 (∞ – Кон.) → Объектив (съёмочный)
- 2 (Кон. – Кон.) → Проекционные системы
- 3 (Кон. – ∞) → Лупа, микроскоп
- 4 (∞ – ∞) → Телескопические системы

Визуальные	
Микроскоп (лупа)	Телескопические системы
<p>Предмет $\rightarrow -a$; изображение $\rightarrow \infty$</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $\bar{\Gamma} = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок}$ – видимое увеличение 2. 2ω – линейное поле в пространстве предметов 3. D' – диаметр выходного зрачка 	<p>Предмет $\rightarrow \infty$; изображение</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $\bar{\Gamma}_T = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = -\frac{f'_1}{f'_2}$ – видимое увеличение 2. 2ω – угловое поле 3. D' – диаметр выходного зрачка 4. ψ – угловой предел разрешения 5. l – длина системы

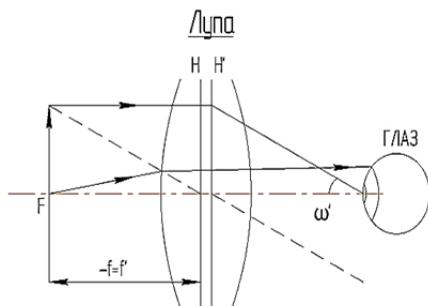


Рис. 3.1

А. Лупа (рис. 3.1) – оптическая система, состоящая из одной или нескольких линз, предназначенная для рассматривания глазом близко расположенных предметов.

Видимое увеличение лупы:

$$\bar{\Gamma} = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \frac{250}{f'}$$

Б. Микроскоп (рис. 3.2) – это сложная лупа; состоит из объектива и окуляра, служит для наблюдения за близко расположенными предметами.

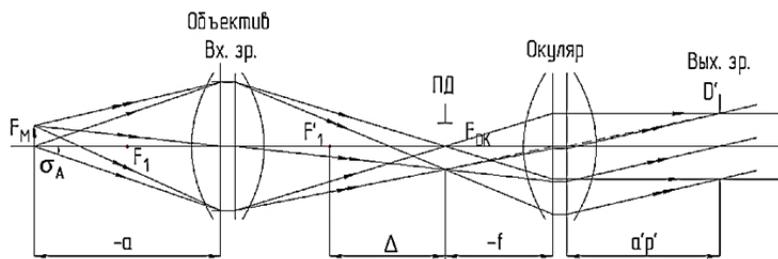


Рис. 3.2

Δ – оптический интервал (расстояние между $F'_{об}$ и $F_{ок}$).

$$\text{Видимое увеличение: } \bar{\Gamma} = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок} = \beta_{об} \frac{250}{f'_{ок}} = -\frac{250\Delta}{f'_{об} \cdot f'_{ок}} = -\frac{500A}{D'}$$

Полезное увеличение: $500A < \bar{\Gamma}_n < 1000A$, где $A = n \cdot \sin \sigma_A$ – числовая апертура.

$$\text{Наименьшее разрешаемое расстояние: } \delta = \frac{\lambda}{2A}$$

В. Телескопические системы (афокальные) – такие системы, которые служат для рассматривания глазом бесконечно расположенных предметов.

Видимое увеличение: $\Gamma_T = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = -\frac{f'_1}{f'_2}$, $|\Gamma_T| = \frac{D}{D'}$.

Длина системы $l = f'_1 + f'_2$.

Диаметр $D_{\text{пд}} = 2f'_1 \cdot \text{tg}\omega$; при виньетировании 50% $D_{\text{ок}} = 2l \cdot \text{tg}\omega$.

Расположение выходного зрачка: $\frac{1}{a'_{p'}} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{f'_2}$.

Система Кеплера (рис. 3.3) $\Gamma_T < 0$ (изображение обратное);

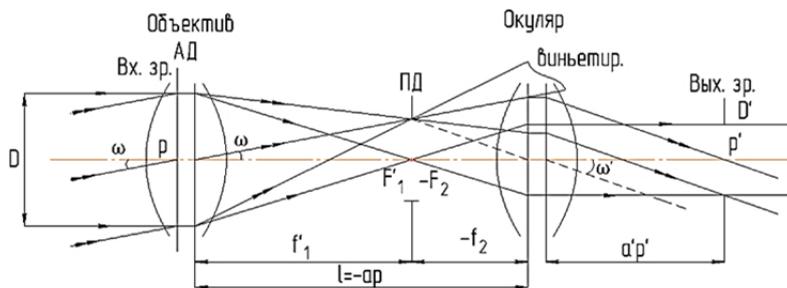


Рис. 3.3

Система Галилея (рис. 3.4) $\Gamma_T > 0$ (изображение прямое).

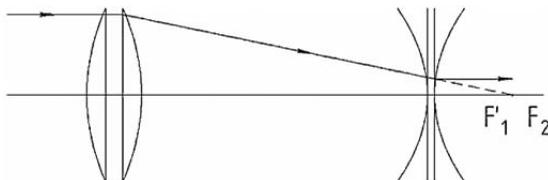


Рис. 3.4

Достоинства

Система Кеплера: наличие промежуточного изображения позволяет сделать систему измерительной; большое увеличение и угловое поле. Прямое изображение (система наблюдательная); большая светосила; малая длина.

Недостатки

Большая длина; малая светосила; необходимость применения дополнительных оборачивающих систем.

Малое увеличение (4^x-8^x) и угловое поле (2^0-6^0); виньетирование на краю; не может быть измерительной.

ИБ2

Примеры решения задач (микроскопы)

Задача 3.1. Для наблюдения объекта используется лупа с $f' = 25$ мм. Найти видимое увеличение лупы в случаях, когда зрачок глаза расположен:

- а) в задней фокальной плоскости,
- б) вблизи лупы.

Решение.

а) когда зрачок глаза расположен в задней фокальной плоскости, то видимое увеличение лупы находится по формуле

$$\Gamma_{\text{л}} = 250/f' = 250/25 = 10^x.$$

Ответ: 10^x .

- б) Если зрачок находится вблизи лупы, формула примет вид

$$\Gamma_{\text{л}} = 250/f' = 11^x.$$

Ответ: 11^x .

Задача 3.2. Микроскоп снабжен объективом с линейным увеличением $\beta_{\text{об}} = -40^x$ и окуляром с $f' = 25$ мм. При какой длине волны света λ возможно раздельное наблюдение двух точек, находящихся на расстоянии $\delta = 0,0005$ мм, если диаметр выходного зрачка микроскопа $D' = 0,8$ мм?

Решение. Применим расчетные формулы для микроскопа:

$$\delta = \lambda / (2 \cdot A), \quad \lambda = 2 \cdot \delta \cdot A; \quad D' = -500 \cdot A / \Gamma_{\text{м}}, \quad A = -D' \cdot \Gamma_{\text{м}} / 500;$$

$$\Gamma_{\text{м}} = \beta_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}}, \quad \Gamma_{\text{ок}} = 250 / f'_{\text{ок}}, \quad \Gamma_{\text{м}} = 250 \cdot \beta_{\text{об}} / f'_{\text{ок}}.$$

Найдем апертуру:

$$A = \frac{D' \cdot |\Gamma_M|}{500} = -\frac{0,8 \cdot 400}{500} = 0,64.$$

Вычислим длину волны:

$$\begin{aligned} \lambda &= -2 \cdot \delta \cdot D' \cdot \Gamma_M / 500 = -2 \cdot \delta \cdot D' \cdot \beta_{об} 250 / (500 \cdot f'_{ок}) = -\delta \cdot D' \cdot \beta_{об} / f'_{ок} = \\ &= -0,0005 \cdot 0,8 \cdot (-40) / 25 = 0,0005 \cdot 2 \cdot 0,64 = 640 \text{ нм} = 64 \cdot 10^{-5} \text{ мм}. \end{aligned}$$

Ответ: $\lambda = 64 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$.

Задача 3.3. В микроскопе используется окуляр с видимым увеличением $\Gamma_{ок} = 10^x$ и угловым полем за окуляром $2\omega' = 30^\circ$. Определить увеличение микроскопа и линейное поле при работе с объективами $10 \times 0,30$; $40 \times 0,65$.

Характеристики объективов: 1) $\beta_{об} = 10$; $A = 0,30$; 2) $\beta_{об} = 40$; $A = 0,65$.

Решение. Найдем видимое увеличение микроскопа: $\Gamma_M = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}$:

1) $10 \cdot 10^x = 100^x$; 2) $40 \cdot 10^x = 400^x$.

Определим линейное поле зрения:

$$2y = \frac{D_{пл}}{\beta_{об}} = \frac{500 \cdot \text{tg}\omega'}{\beta_{об} \Gamma_{ок}} = \frac{500 \cdot \text{tg}\omega'}{\Gamma_M}$$

$$1) 2y = \frac{500 \cdot \text{tg}\omega'}{\Gamma_M} = \frac{500 \cdot \text{tg}15}{100} = 1,2 \text{ мм};$$

$$2) 2y = \frac{500 \cdot \text{tg}\omega'}{\Gamma_M} = \frac{500 \cdot \text{tg}15}{400} = 0,3 \text{ мм}.$$

Ответ: 1) $\Gamma_M = 100^x$; $2y = 1,2 \text{ мм}$; 2) $\Gamma_M = 400^x$, $2y = 0,3 \text{ мм}$.

Задача 3.4. В металлографическом микроскопе используются планпоchromаты с характеристиками:

1. $f' = 16$, $A = 0,30$;

2. $f' = 6,3$, $A = 0,65$;

3. $f' = 4$, $A = 0,85$, а также тубусная линза с $f' = 250$ мм и окуляр $\Gamma_{\text{ок}} = 10^{\times}$, $2y' = 18$ мм.

Найти диаметр выходного зрачка микроскопа и линейное поле.

Решение. Диаметр полевой диафрагмы определен величиной изображения перед окуляром: $D_{\text{пд}} = 2y' = 18$ мм.

Для 1-го объектива с тубусной линзой линейное увеличение равно $\beta_{\text{об}} = 15,6$. Увеличение микроскопа $\Gamma_{\text{м}} = \beta_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}} = 15,6 \cdot 10 = 156$.

1) диаметр выходного зрачка $D' = -500A / \Gamma_{\text{м}} = 0,96$ мм. Линейное поле $2y = D_{\text{пд}} / \beta_{\text{об}} = 1,15$ мм;

2) диаметр выходного зрачка $D' = -500A / \Gamma_{\text{м}} = 0,82$ мм. Линейное поле $2y = D_{\text{пд}} / \beta_{\text{об}} = 0,45$ мм;

3) диаметр выходного зрачка $D' = -500A / \Gamma_{\text{м}} = 0,68$ мм. Линейное поле $2y = D_{\text{пд}} / \beta_{\text{об}} = 0,29$ мм.

Ответ: $D' = 0,96; 0,82; 0,68$ мм, $2y = 1,15; 0,45; 0,29$ мм.

Задача 3.5. Найти видимое увеличение микроскопа, если оптическая длина тубуса $\Delta_0 = 140$ мм, видимое увеличение окуляра $\Gamma_{\text{ок}} = 10^{\times}$ и фокусное расстояние объектива $f'_{\text{об}} = 16$ мм.

Решение. Увеличение микроскопа $\Gamma_{\text{м}} = \beta_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}}$; линейное увеличение объектива при $f'_{\text{об}} = 16$ мм:

$$\beta_{\text{об}} = -\frac{\Delta_0}{f'_{\text{об}}} = -140 / 16 = -8,75,$$

тогда $\Gamma_{\text{м}} = -8,75 \cdot 10 = -87,5$.

Ответ: $\Gamma_{\text{м}} = -87,5$.

Задача 3.6. В микроскопе, видимое увеличение которого $\Gamma_{\text{м}} = -200^{\times}$, используется объектив с фокусным расстоянием $f'_{\text{об}} = 10$ мм и окуляр с фокусным расстоянием $f'_{\text{ок}} = 25$ мм. Определить оптическую длину тубуса Δ_0 .

Решение. Видимое увеличение окуляра

$$\Gamma_{\text{ок}} = \frac{250}{f'_{\text{ок}}} = \frac{250}{25} = 10^{\times}.$$

Видимое увеличение микроскопа $\Gamma_{\text{м}} = -200^{\times}$, определяется формулой:

$$\Gamma_{\text{м}} = \beta_{\text{об}} \cdot \Gamma_{\text{ок}}.$$

Имеем: $-200 = 10 \cdot \beta_{\text{об}}$, $\beta_{\text{об}} = \frac{-200}{10} = -20^{\times}$. Линейное увеличение

объектива $\beta_{\text{об}} = -\frac{\Delta_0}{f'_{\text{об}}}$.

Для фокусного расстояния $f'_{\text{об}} = 10$ мм.

$$\Delta_0 = -\beta_{\text{об}} \cdot f'_{\text{об}} = -(-20) \cdot 10 = 200 \text{ мм}.$$

Ответ: $\Delta_0 = 200$ мм.

ИБЗ

Примеры решения задач (телескопические системы – зрительные трубы)

Задача 3.7. Объектив зрительной трубы имеет фокусное расстояние $f'_1 = 300$ мм, относительное отверстие 1:8, поле зрения $2\omega = 1^{\circ}20'$. Фокусное расстояние окуляра $f'_2 = 10$ мм. Определить диаметры зрачков входа и выхода, диаметр диафрагмы поля зрения. Вычислить перемещение окуляра с сеткой нитей и угловое увеличение зрительной трубы при фокусировке ее на расстояние $a_1 = -3$ м, а также определить перемещение окуляра относительно сетки при рефракции $D = \pm 5$ дптр.

Решение:

1. Угловое увеличение зрительной трубы

$$\gamma_0 = \Gamma_{\text{т}} = -\frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{300}{10} = -30^{\times}.$$

2. Диаметр входного зрачка объектива.

$$D = 300 \cdot \frac{1}{8} = 37,5 \text{ мм.}$$

3. Диаметр выходного зрачка зрительной трубы.

$$D' = -\frac{D}{\gamma_0} = 1,25 \text{ мм.}$$

4. Расстояние от задней фокальной плоскости окуляра до плоскости выходного зрачка

$$z'_p = -\frac{f'_2}{z_p} = \frac{f_2'^2}{f_1'} = 0,33 \text{ мм.}$$

5. Диаметр полевой диафрагмы

$$D_{\text{пд}} = 2 f_1' \text{tg} \omega = 2 \cdot 300 \cdot \text{tg} 10' = 7 \text{ мм.}$$

6. Перемещение окуляра с сеткой при фокусировке трубы на расстоянии $a_1 = -3$ м.

Из формулы отрезков (Гаусса)

$$a_1' = \frac{a_1 \cdot f_1'}{a_1 + f_1'} = \frac{-3000 \cdot 300}{-3000 + 300} = 333,33 \text{ мм;}$$

$$d = a_1' - f_1' = 333,3 - 300 = 33,33 \text{ мм.}$$

7. Угловое увеличение зрительной трубы при фокусировке ее на расстоянии $a_1 = -3$ м.

Рассчитаем по формулам хода нулевого луча его параметры с начальными условиями $\alpha_1 = 1$, $h_1 = 0$, тогда

$$\alpha_1' = 1, \quad h_2 = -d_1 - S_1' = -333,3,$$

$$\alpha_2' = \alpha_1' + \frac{h_2}{f_2'} = 1 - \frac{333,33}{10} = -32,33,$$

увеличение в зрачках равно угловому увеличению зрительной трубы при фокусировке на бесконечность

$$\gamma_0 = \gamma_{зр} = \frac{\alpha'_2}{\alpha_1} = -32^x, 33.$$

8. Перемещение окуляра относительно сетки при изменении рефракции $D = \pm 5$ дптр.

$$\Delta = \pm \frac{Df_2'^2}{1000} = \pm 0,5 \text{ мм.}$$

Ответ: $D = 37,5$ мм, $D' = 1,25$ мм, $D_{\text{пд}} = 7$ мм.

Задача 3.8. Выполнить габаритный расчет зрительной трубы, если точность визирования должна составлять $0,3''$.

Решение. Точность визирования выражается формулой $\varphi = p''/D$, где p'' – величина, зависящая от формы сетки и условий наблюдения.

При нормальных внешних условиях при наблюдении на марку с помощью биссектора $p'' = 20$. При этом диаметр выходного зрачка зрительной трубы составляет 1–2 мм. Примем $D' = 1,5$ мм. Диаметр входного зрачка

$$D = p''/\varphi'' = 67 \text{ мм.}$$

Видимое увеличение зрительной трубы

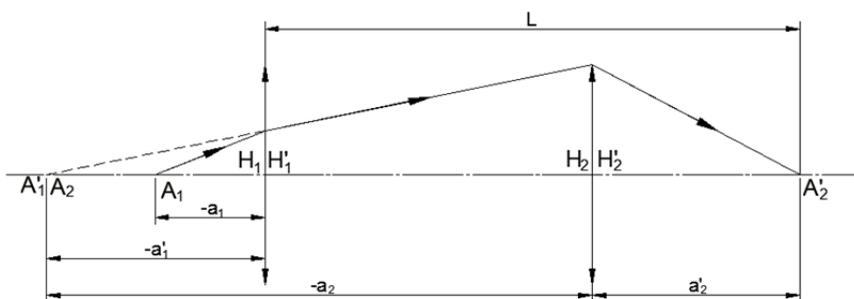
$$\Gamma_T = -\frac{f_1'}{f_2'} = -\frac{D}{D'} = -45^x.$$

Полагая фокусное расстояние окуляра равным $f_2' = 10$ мм, фокусное расстояние объектива $f_1 = -f_2 \cdot \Gamma = 450$ мм. Относительное отверстие объектива:

$$\frac{D}{f_1'} = \frac{67}{450} = 1/6,7.$$

Ответ: $D = 67$ мм, $\Gamma_T = -45^x$, $f_1 = 450$ мм.

Задача 3.9. В зрительной трубе с внутренней фокусировкой фокусное расстояние объектива $f = 150$ мм, расстояние между первым компонентом и плоскостью сетки $L = 195$ мм. Фокусировка осуществляется положительным компонентом, расстояние между вторым компонентом и плоскостью сетки при фокусировке трубы на бесконечность $a'_f = a'_2 = 15$ мм. Определить фокусные расстояния компонентов и расстояние между ними при фокусировке трубы на бесконечность и на минимальное расстояние.



Решение. Длина объектива

$$L = d_0 + a'_f,$$

откуда $d_0 = L - a'_f = 195 - 15 = 180$ мм.

Из формулы

$$a'_f = f' \cdot \left(1 - \frac{d_0}{f_1'}\right)$$

находим $f_1' = \frac{f' \cdot d_0}{f' - a'_f} = \frac{180 \cdot 150}{150 - 15} = 200$ мм.

Из формулы для фокусного расстояния двухкомпонентной системы

$$f' = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - d_0}$$

находим $f_2' = \frac{f_1' - d_0}{f_1' - f'} \cdot f' = \frac{200 - 180}{200 - 150} \cdot 150 = 60$ мм.

При линейном увеличении второго компонента $\beta_2 = -1$, имеем

$$a'_2 = 2f'_2, \quad a_2 = -a'_2 = -120 \text{ мм.}$$

Тогда

$$d_s = L - a'_2 = 195 - 120 = 75 \text{ мм;}$$

$$a'_1 = d_s - a_2 = 75 - 120 = -45 \text{ мм.}$$

Ответ: $f'_1 = 200$ мм, $f'_2 = 60$ мм, $d_0 = 180$ мм, $d_s = 75$ мм.

Задача 3.10. Рассчитать угловое поле системы Галилея, если $f'_{об} = 180$ мм, $f'_{ок} = 30$ мм, $a'_p = 20$ мм. На краю допустимо виньетирование 50 %, а диаметр объектива 60 мм и $D'_p = 5$ мм.

Решение. Определим видимое увеличение трубы

$$\Gamma_T = -f'_{об} / f'_{ок} = -180 / -30 = 6^x,$$

далее находим диаметр входного зрачка $D = D' \cdot \Gamma = 5 \cdot 6 = 30$ мм.

Найдем положение выходного зрачка относительно заднего фокуса окуляра: $Z'_{p'} = -a'_p - f'_{ок} = 20 - (-30) = 50$ мм.

Для определения положения a_p входного зрачка выполним расчет главного луча в обратном ходе.

Тогда:

$$Z_p = Z_{p_{ок}} = -Z'_{p'} = -50 \text{ мм.}$$

По формуле Ньютона найдем:

$$Z_{p'_{ок}} = -f'^2_{об} / Z_{p_{ок}} = -(-30)^2 / -50 = 18 \text{ мм.}$$

Но, так как фокусы $F_{ок}$ и $F'_{об}$ совпадают, то $Z_{p'_{ок}} = Z_{p_{об}}$, поэтому:

$$Z_{p'_{об}} = -f'^2_{об} / Z_{p_{об}} = -1800 \text{ мм.}$$

В прямом ходе лучей положение Z_p входного зрачка

$$Z_p = Z_{p_{об}} = -Z_{p'_{об}} = 1800 \text{ мм.}$$

Положение a_p входного зрачка относительно передней главной плоскости объектива: $a_p = Z_P + f_{об} = Z_P - f'_{об} = 1800 - 180 = 1620$ мм.

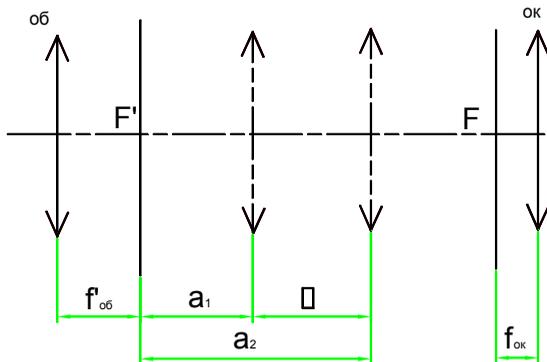
Из расчетной формулы диаметра объектива: $D_{об} = 2 \cdot a_p \cdot \operatorname{tg}\omega$ найдем угловое поле:

$$\operatorname{tg}\omega = D_{об}/2 \cdot a_p = 60/2 \cdot 1620 = 0,0185.$$

В угловой мере $2\omega = 2^\circ 21'$.

Ответ: $2\omega = 2^\circ 21'$.

Задача 3.11. В зрительной трубе ступенчатого переменного увеличения расстояние между задней фокальной плоскостью объектива и передней фокальной плоскостью окуляра сохраняется постоянным и равно $L = 600$ мм. Видимое увеличение изменяется при перемещении одной оборачивающей линзы. Определить положение линзы для двух вариантов увеличения, ее фокусное расстояние и величину перемещения Δ , если $f'_{об} = 75$ мм; $f_{ок} = 25$ мм; видимое увеличение для первого положения $\Gamma_1 = 6^x$.



Решение. $\Gamma_{зр.тр} = -f'_{об} / f_{ок} = -75 / 25 = -3^x$ – видимое увеличение зрительной трубы без оборачивающей линзы.

Найдем линейное увеличение оборачивающей линзы в первом варианте:

$$\beta_{л} = \frac{6^x}{-3^x} = -2^x.$$

Отсюда: $a'/a = -2$; $a' = -2a$. Учтем, что $-a + a' = 600$ мм, тогда $-3a = 600$ мм; $a_1 = -200$ мм; $a_1' = 400$ мм.

Найдем фокусное расстояние оборачивающей линзы:

$$f = a a'/a - a' = 400/3 = 133,33 \text{ мм.}$$

Из формулы Гаусса найдем второе положение линзы:

$$1/a' - 1/a = 1/f; \quad a' = 600 + a;$$

$$-600f = a^2 + 600a;$$

$$a^2 + 600a + 80\,000 = 0;$$

$$a_1 = -200; \quad a_1' = 400;$$

$$a_2 = -400; \quad a_2' = 200.$$

Ответ: $f = 133,33$ мм; $a_1 = -200$ мм; $a_2 = -400$ мм; $\Delta = 200$ мм.

ИБ4

Контрольные вопросы

Лупа и микроскоп

1. Оптическая система лупы.
2. Оптические характеристики лупы.
3. Апертурная диафрагма, входной и выходной зрачки лупы.
4. Ход осевого и внеосевого лучей в оптической схеме лупы.
5. Расчет поля зрения в лупе из условия виньетирования.
6. Типы луп и их конструкции.
7. Видимое увеличение лупы из условия аккомодации глаза.
8. Оптическая схема визуальной части микроскопа.
9. Формулы для габаритного расчета системы микроскопа.
10. Ограничение апертурных и полевых лучей в микроскопе.
11. Построить главную эквивалентную плоскость в микроскопе.
12. Формула разрешающей способности микроскопа. Полезное увеличение микроскопа.
13. Пути повышения разрешающей способности микроскопа.
14. Глубина изображаемого пространства в микроскопе.
15. Осветительные системы микроскопа.

16. Типы объективов микроскопа. Три примера.
17. Типы окуляров микроскопа. Три примера.
18. Оптическая длина тубуса микроскопа.
19. Ход лучей в осветительной части микроскопа, работающего в проходящем свете.
20. Формулы для расчета апертуры и линейного увеличения конденсора.
21. Когда применяется телецентрический ход лучей в пространстве предметов в микроскопе?

Телескопические системы

1. Назначение и виды телескопических систем.
2. Оптические схемы зрительной трубы Кеплера и Галилея.
3. Конструктивные условия образования телескопических систем.
4. Основные характеристики телескопической системы.
5. Формулы расчета видимого увеличения Γ_T . Связь видимого увеличения системы с линейным увеличением в зрачках.
6. Ограничение апертурных лучей.
7. Ограничение полевых лучей.
8. Разрешающая способность телескопической системы. Формула расчета из условий разрешения глазом. Полезное увеличение.
9. Схема хода лучей в трубе Кеплера с 50 % виньетированием.
10. Схема хода лучей в трубе Галилея, пояснить.
11. Типы оборачивающих систем. Три примера.
12. Коллектив. Расчет фокусного расстояния.
13. Фокусировка окуляра в телескопической системе при работе с близоруким глазом для заданной аметропии.
14. Наличие АД и ПД в трубах Кеплера и Галилея. Их конструктивное расположение.
15. Телескопическая система с призмёнными оборачивающими системами. Примеры.
16. Телескопическая система с одной оборачивающей линзой, работающей с масштабом $M = 1$.
17. Телескопическая система с двумя оборачивающими линзами, работающими с масштабом $M = 1$.
18. Расположение АД и ПД в схеме сложной телескопической системы с симметричной оборачивающей системой.

19. Назначение коллектива в схеме телескопической системы с симметричной оборачивающей системой.

20. Порядок расчета конструктивных элементов сложной зрительной трубы, имеющей коллектив и оборачивающую систему.

21. Аберрации объективов телескопических систем: а) осевого пучка; б) узкого внеосевого пучка; в) широкого внеосевого пучка.

22. Оптические характеристики двухлинзовых объективов телескопических систем.

23. Оптические характеристики окуляров телескопических систем.

ТБ1

Тестовые вопросы (микроскопы)

Вопрос 1

Микроскоп укомплектован объективом $10 \times 0,3$ (система без иммерсии), окуляром $\Gamma_{\text{ок}} = 16^{\times}$. Длина волны излучения $\lambda = 0,5$ мкм. Определить наименьшее разрешаемое расстояние, отнесенное к пространству изображений в угловой мере в минутах?

- 3'
- 8,2'
- 1,83'
- 1'

Ответ: 1,83'.

Вопрос 2

Где можно разместить стеклянную шкалу с делениями в измерительном микроскопе?

- В задней фокальной плоскости окуляра
- В передней фокальной плоскости объектива
- В задней фокальной плоскости объектива
- В передней фокальной плоскости окуляра

Ответ: В передней фокальной плоскости окуляра.

Вопрос 3

В микроскопе используется объектив $f'_{об} = 6,3$, $A_{об} = 0,65$ и конденсор с линейным увеличением $\beta_{кон} = -0,05$. Определить числовую апертуру конденсора $A_{кон}$.

- 0,65
- 0,0325
- 0,1
- 0,0325

Ответ: 0,0325.

Вопрос 4

Какое фокусное расстояние в миллиметрах должна иметь лупа, чтобы с ее помощью различать объекты порядка 30 мкм?

- $f' = 300$ мм
- $f' = 100$ мм
- $f' = 50$ мм

Ответ: $f' = 100$ мм.

Вопрос 5

При измерении оптических характеристик глаза оператор получил результат $f' = -18,7$ мм и $f' = 18,7$ мм. Такие результаты получились, потому что:

- Такое возможно при аккомодации глаза
- Данный глаз имеет дефекты
- Оператор ошибся
- Так и должно быть при нормальном зрении

Ответ: Оператор ошибся.

Вопрос 6

Ближняя точка ясного видения находится на расстоянии 500 мм перед глазом, а дальняя -2500 мм. Определить объем аккомодации этого глаза.

- 2 дптр
- 0,4 дптр
- 1,6 дптр
- 5 дптр

Ответ: 1,6 дптр.

Вопрос 7

Оптическая система, работающая в видимом диапазоне длин волн, имеет следующие характеристики: видимое увеличение $\Gamma = -250$, диаметр выходного зрачка $D' = 0,5$ мм, угловое поле в пространстве изображений $2\omega' = 40^\circ$. Укажите, к какому типу относится данная система.

- Микроскоп (предмет на конечном расстоянии, изображение в бесконечности)
- Проекционная ОС (предмет и изображение на конечном расстоянии)
- Фотографическая ОС (предмет в бесконечности, изображение на конечном расстоянии)
- Телескопическая ОС (предмет и изображение в бесконечности)

Ответ: Микроскоп.

ТБ2

Тестовые вопросы (телескопические системы)

Вопрос 1

Где можно разместить стеклянную плоскопараллельную пластину с делениями в зрительной трубе Кеплера?

- В задней фокальной плоскости окуляра
- В передней фокальной плоскости объектива
- В задней фокальной плоскости объектива
- В передней фокальной плоскости окуляра

Ответ: В задней фокальной плоскости объектива, в передней фокальной плоскости окуляра.

Вопрос 2

В телескопической системе используются объективы и окуляры со следующими характеристиками:

Объективы:

1) $f' = 50$ мм, $S'_F = 47,05$ мм, $S_F = -49,10$ мм.

2) $f' = 80$ мм, $S'_F = 75,04$ мм, $S_F = -79,03$ мм.

3) $f' = 140$ мм, $S'_F = 135,2$ мм, $S_F = -137,68$ мм.

Окуляры:

1) $f' = 20$ мм, $S'_F = 14,0$ мм, $S_F = -23,96$ мм.

2) $f' = 25$ мм, $S'_F = 19,0$ мм, $S_F = -28,96$ мм.

3) $f' = 30$ мм, $S'_F = 24,0$ мм, $S_F = -33,96$ мм.

Определите расстояние между компонентами и расположите их в последовательности возрастания.

40,56; 79,12; 141,11

71,01; 104; 169,16

70; 105; 170

67,05; 100,04; 165,2

Ответ: 71,01, 104, 169,16.

Вопрос 3

Какие из перечисленных ниже характеристик являются основными для телескопической системы?

Γ_T

2ω

S'_p

D

D

L

Ответ: Γ_T , 2ω , D .

Вопрос 4

По расчету получили объектив зрительной трубы со следующими характеристиками: $f'_{об} = 60$ мм, $D: f' = 1:4$, $2\omega = 8^\circ$.

В каталоге имеются три объектива:

1. $f'_{об} = 60$ мм, $D = 10$ мм, $2\omega = 8^\circ$.

2. $f'_{об} = 60$ мм, $D = 20$ мм, $2\omega = 8^\circ$.

3. $f'_{об} = 60$ мм, $D = 30$ мм, $2\omega = 8^\circ$.

С каким диафрагменным числом нужно выбрать объектив из каталога?

6

2

3

Ответ: 3.

Вопрос 5

Вычислить угловой предел разрешения зрительной трубы в секундах с видимым увеличением $\Gamma_T = 20^x$ и диаметром выходного зрачка $D' = 2$ мм, определяемый теорией дифракции.

5,0

3,5

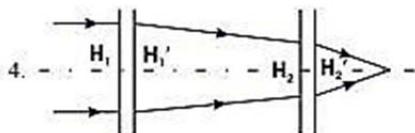
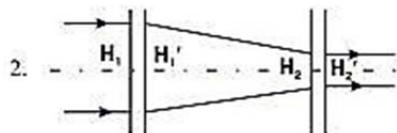
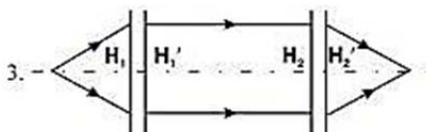
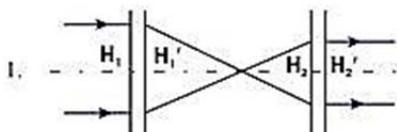
4,0

4,5

Ответ: 3,5.

Вопрос 6

На рисунке представлены четыре схемы ОС с ходом лучей. Укажите номер ОС, соответствующей зрительной трубе Галилея?



- 4
- 2
- 1
- 3

Ответ: 2.

ТБЗ

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Вариант 1

1. Рассчитать телескопические очки, образованные монокулярами, построенными по схеме Галилея с двухкратным увеличением, при длине системы $L = 25$ мм, $a'_p = 25$ мм (положение выходного зрачка относительно главной плоскости окуляра). Определить смещение окуляра, компенсирующего недостатки глаз, имеющих: а) дальнюю зоркость 3 дптр; б) близорукость -3 дптр.

2. В микроскопе используется окуляр с $f' = 25$, $2\omega' = 40^\circ$. Определить видимое увеличение и линейное поле микроскопа, если $\beta_{об} = -10^x$.

Вариант 2

1. Рассчитать угловое поле системы Галилея, если $f'_{об} = 180$ мм, $f'_{ок} = -30$ мм, $a'_p = 20$ мм (положение выходного зрачка относительно главной плоскости окуляра). На краю допустимо виньетирование 50 %, диаметр объектива 60 мм и $D'_p = 5$ мм.

2. $\Gamma_m = -200^x$, $f'_{об} = 10$ мм, $f'_{ок} = 25$ мм. Определить оптическую длину тубуса микроскопа. Показать схему с ходом оптических лучей.

Вариант 3

1. Объектив зрительной трубы имеет фокусное расстояние $f'_1 = 300$, относительное отверстие 1 : 8, поле зрения $2\omega = 1^\circ 20'$. Фокусное расстояние окуляра $f'_2 = 10$ мм. Определить диаметры зрачков входа и выхода, диаметр диафрагмы поля зрения и вычислить перемещение окуляра зрительной трубы при фокусировке ее на расстоянии $a_1 = -3000$ мм, а также определить перемещение окуляра относительно сетки при рефракции $D = \pm 5$ дптр.

2. В микроскопе $\Gamma_m = -150^x$ используется объектив $f'_1 = 10$ мм и окуляр $f'_2 = 25$ мм. Каково будет видимое увеличение микроскопа, если оптическую длину тубуса Δ_0 увеличить (уменьшить) на 30 мм?

Вариант 4

1. Зрительная труба Кеплера имеет $f'_{об} = 100$ мм и световой диаметр объектива $D_{об} = 30$ мм. Найти величину зрачка выхода и его удаление от задней главной плоскости окуляра зрительной трубы, если $f'_{ок} = 10$ мм. Входной зрачок совпадает с объективом.

2. Определить фокусное расстояние объектива микроскопа, имеющего $\Gamma_m = -400$, $f'_{ок} = 25$. Расстояние между предметом и его изображением после микрообъектива 180 мм.

Вариант 5

1. Бинокль имеет видимое увеличение $\Gamma_T = 7,5^x$, угловое поле $2\omega = 8^\circ$, диаметр выходного зрачка $D' = 5$ мм. Определить размеры линейного поля и линейный предел разрешения, которые обеспечивает бинокль или система бинокля с глазом, предметов, удаленных на расстояние $p = -4$ км.

2. Для наблюдения объекта используется лупа с $f' = 25$ мм. Найти Γ в случаях, когда зрачок глаза расположен: а) в задней фокальной плоскости; б) вблизи лупы.

Вариант 6

1. В зрительной трубе $f'_{об} = 150$ мм, фокусное расстояние симметричной оборачивающей системы $f'_3 = f'_4 = 200$ мм, воздушный промежуток между оборачивающими компонентами $d_3 = 80$ мм. Каким должно быть фокусное расстояние коллектива зрительной трубы, если главный луч с целью уменьшения ошибок оборачивающей системы пересекает оптическую ось в середине промежутка d_3 ? Входной зрачок на первом компоненте.

2. В микроскопе используется окуляр $\Gamma_{ок} = 10^x$, $2\omega' = 30^\circ$. Определить Γ_m и $2u$ при работе с объективом $10 \times 0,30$, $40 \times 0,65$.

Вариант 7

1. Фокусное расстояние объектива земной зрительной трубы $f'_1 = 150$ мм, а оборачивающей линзы $f'_3 = 50$ мм. Определить фо-

кусное расстояние коллектива f'_2 и длину трубы, если увеличение оборачивающей линзы $\beta = -1^x$, а всей системы $\Gamma = 6^x$. Построить ход лучей через системы, $t = 0$.

2. Определить глубину резко изображенного пространства металлографического микроскопа, имеющего комплект микрообъективов $f' = 16$, $A = 0,3$; $f' = 6,3$, $A = 0,65$; $f' = 2,5$, $A = 1,25$, тубусной линзой $f' = 250$ и окуляром $\Gamma = 16^x$: а) при наблюдении шлифа; б) при проекции на экран.

Вариант 8

1. В зрительной трубе Галилея $\Gamma = 2,5^x$, $2\omega = 5^\circ$, $D' = 3$ мм, $a'_p = 15$ мм (положение выходного зрачка относительно главной плоскости окуляра), $L = 36$ мм. Вычислить $f'_{об}$, $f'_{ок}$, $2\omega'$, D , a_p , $D_{об}$ при виньетировании $K\omega = 0,5$.

2. Какой наибольшей величины объект можно рассматривать при постоянном оптическом тубусе микроскопа с увеличением $\Gamma_m = 400^x$ и окуляром 10^x , поле зрения которого $2y' = 14$ мм?

Вариант 9

1. В трубе Галилея фокусное расстояние объектива $f'_{об} = 90$ мм, окуляра $f'_{ок} = -30$ мм. Определить расстояние L при установке окуляра на -5 дптр, $t' = 25$ (положение выходного зрачка).

2. Рассчитать среднюю геометрическую глубину резкости лупы ЛАН-25^x, если диаметр зрачка глаза изменяется в пределах 2–4 мм и глаз наблюдателя нормальный.

Вариант 10

1. Угловое увеличение теодолита равно 30^x , диаметр входного зрачка $D = 60$ мм. Определить угловой предел разрешения прибора и вычислить минимальный размер деления сетки, которые можно будет различить при измерении расстояний 3 км.

2. Для микропроекции применяется объектив с увеличением 8^x , фокусным расстоянием $f'_{об} = 18$ мм. Определить взаимное расположение предмета, объектива, окуляра и экрана при увеличении на экране проектора 100^x , если угловое увеличение окуляра 5^x . Показать графически ход апертурных и главных лучей.

Вариант 11

1. Объектив зрительной трубы, предназначенный для наблюдения ИСЗ имеет фокусное расстояние $f' = 1000$ мм. Определить размер ПД, при котором в поле зрения трубы будут одновременно видны два спутника, если расстояние между ними 5 км. Удаление спутников от поверхности Земли 200 км, наблюдение ведется в зените.

2. Определить числовую апертуру коллектора микроскопа, в котором используется лампа ОП8-9 с размером проекции светящегося тела $1,7 \times 1,7$ мм. В микроскопе применен объектив $10 \times 0,30$ с линейным полем $2y = 1,8$ мм.

Вариант 12

1. Вычислить угловой предел разрешения зрительной трубы $\Gamma = 8^x$ и $D' = 4$ мм: а) по теории дифракции; б) из возможностей глаза.

2. Для рассматривания предметов малых размеров применяется лупа Стенхопа, представляющая собой положительную концентрическую линзу с $r_1 = 2/3 d$. Определить f' – фокусное расстояние; S_F, S_F' – положение фокальных плоскостей, r_1, r_2 – радиусы кривизны поверхностей. $\Gamma = 25^x, n = 1,5183$.

Вариант 13

1. Доказать теоретически, что коллектив не вносит влияния на величину видимого увеличения телескопической системы.

2. Для микропроекции применяется объектив с увеличением 8^x , фокусным расстоянием $f'_{об} = 18$ мм. Определить взаимное расположение предмета, объектива, окуляра и экрана при увеличении на экране проектора 100^x , если угловое увеличение окуляра 5^x . Показать графически ход апертурных и главных лучей.

Вариант 14

1. В зрительной трубе ступенчатого переменного увеличения расстояние между фокальными плоскостями объектива и окуляра сохраняется постоянным и равно $L = 600$ мм, а изменение увеличений достигается двумя положениями одной оборачивающей линзы. Определить положение линзы в обоих вариантах увеличения, фокусное расстояние, величину перемещения ее Δ , если $f'_{об} = 75$ мм, $f'_{ок} = 25$ мм, одно из увеличений $\Gamma_1 = 6^x$.

2. Микроскоп снабжен объективом с линейным увеличением $\beta_{об} = -40^x$ и окуляром $f' = 25$ мм. При какой длине волны света λ возможно раздельное наблюдение двух точек, находящихся на расстоянии $\delta = 0,0005$ мм, если диаметр выходного зрачка микроскопа $D' = 0,8$ мм.

Вариант 15

1. Определить положение входного зрачка в телескопической системе длиной 150 мм, построенной по схеме Кеплера, если фокусное расстояние объектива $f'_{об} = 120$ мм, удаление выходного зрачка $S'_{p'} = 35$ мм, задний фокальный отрезок окуляра $S'_{F'} = 30$ мм и сферическая aberrация в зрачках $\Delta z'_{p'} = -2$ мм.

2. В биологическом микроскопе используются объектив $40 \times 0,65$ и окуляры $6,3^x$, $2y' = 22$ мм, 10^x , $2y' = 18$ мм. Определить диаметр выходного зрачка микроскопа и линейное поле.

Список использованных источников

1. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов [и др.]; под общ. ред. В. А. Панова. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
2. Артюхина, Н. К. Теория и расчет оптических систем: учебное пособие для вузов: в 2 ч. / Н. К. Артюхина. – Минск: БНТУ, 2004. – Ч. 1. – 134 с.
3. Вычислительная оптика: справочник / М. М. Русинов [и др.]; под общ. ред. М. М. Русинова. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 742 с.
4. Запрягаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М.: Логос, 2000. – 581 с.
5. Сборник задач по теории оптических систем / Л. Н. Андреев [и др.]; под общ. ред. Л. Н. Андреева. – М.: Машиностроение, 1987. – 188 с.
6. Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Прикладная оптика»: учебно-методическое пособие для вузов: в 2 ч. / Г. И. Цуканова [и др.]; под общ. ред. А. А. Шехонина. – СПб.: НИУ ИТМО, 2009. – Ч. 1. – 122 с.
7. Тульева, Н. Н. Прикладная оптика и светотехника: опорный конспект лекций / Н. Н. Тульева. – СПб.: ГУКИТ, 2001. – 34 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры основных марок стекла

Марка стекла	Показатель преломления		Средняя дисперсия $n_{F'} - n_{C'}$
	n_e	n_D	
ЛК6	1,4721	1,4704	0,00708
ЛК7	1,4846	1,4828	0,00732
К8, К108	1,5183	1,5163	0,00812
К100	1,5237	1,5215	0,0088
БК6, БК106	1,5421	1,5399	0,00913
БК8, БК108	1,5489	1,5467	0,00877
БК10, БК110	1,5713	1,5688	0,01024
ТК2, ТК102	1,5749	1,5724	0,01005
ТК14, ТК114	1,6155	1,6130	0,01020
ТК16, ТК116	1,6152	1,6126	0,01059
ТК21, ТК121	1,6600	1,6568	0,01299
ТК23	1,5915	1,5891	0,00970
КФ4	1,5203	1,5181	0,00886
БФ12, БФ112	1,6298	1,6259	0,01622
БФ16	1,6744	1,6709	0,01435
БФ24	1,6386	1,6344	0,01750
ЛФ5, ЛФ105	1,5783	1,5749	0,01409
Ф1	1,6169	1,6128	0,01681
Ф101	1,6179	1,6138	0,01681
Ф6	1,6170	1,6031	0,01611
ТФ1, ТФ101	1,6622	1,6475	0,01940
ТФ3	1,7232	1, 7172	0,02469
ТФ5, ТФ105	1,7617	1,7550	0,02788

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Модуль 1. Основные положения геометрической оптики.	
Оптика нулевых лучей	4
Тестовый контроль	13
Модуль 2. Теория ИОС. Построение изображений.....	16
Тестовый контроль	22
Модуль 3. Лупа и микроскоп. Телескопические системы.....	28
Тестовый контроль	42
Контрольная работа.....	47
Список использованных источников.....	52
Приложение.....	53

Учебное издание

АРТЮХИНА Нина Константиновна

**РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ
ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Теория и расчет оптических систем»
для студентов специальности
1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы
и системы»

Редактор *В. И. Акулёнок*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 12.12.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,20. Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 100. Заказ 753.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.