

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

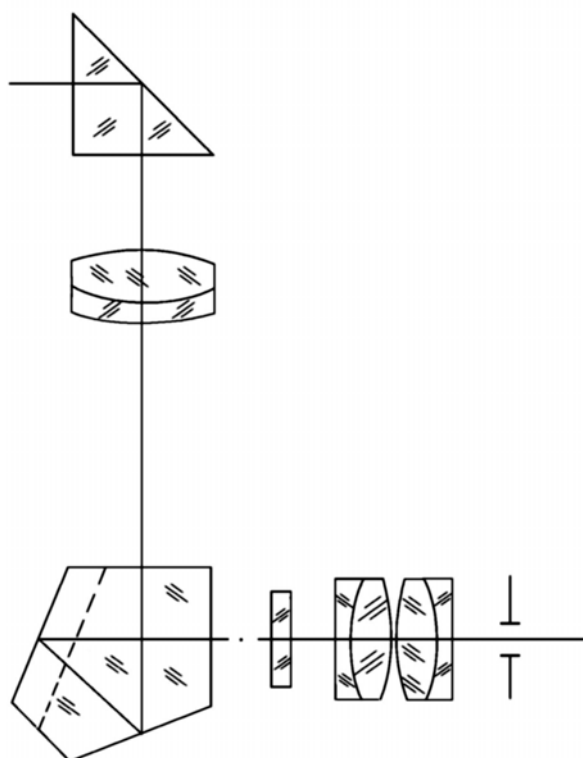
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ЧАСТЬ II

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ ПРОФЕССОРА ШЕХОНИНА А.А.



Санкт-Петербург
2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ЧАСТЬ II

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ПОД РЕДАКЦИЕЙ ПРОФЕССОРА ШЕХОНИНА А.А.



Санкт-Петербург
2003

Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривоустова Е.В.,
Ежова К.В.

Прикладная оптика. Часть 2. Учебно-методическое пособие под редакцией
профессора Шехонина А.А. – СПб: СПб ГУИТМО, 2003. – 77с.

В учебно-методическом пособии приводятся краткие теоретические сведения,
варианты индивидуальных заданий, указания по выполнению 7 лабораторных
работ на компьютерах по курсу «Прикладная оптика».

Для студентов направлений подготовки 551900 – Опотехника (бакалавр,
магистр) и 654000 – Опотехника (дипломированный специалист).

Методические указания подготовлены на кафедре Прикладной и компьютерной
оптики Санкт-Петербургского государственного университета
информационных технологий, механики и оптики.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и
опотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров
551900 – «Опотехника» и направлению подготовки дипломированных
специалистов 654000 – «Опотехника».

Рецензенты: д.т.н., проф. Путилин Э.С., кафедра ОТ СПбГУИТМО

д.т.н., проф. Демин А.В., ВНЦ ГОИ им С.И. Вавилова

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики
30 октября 2003 г., протокол № 3.

© Санкт-Петербургский государственный
университета информационных
технологий, механики и оптики, 2003

Введение

Пособие охватывает следующие разделы курса «Прикладная оптика»: «Проекционные системы», «Телескопические системы», «Оптические системы микроскопа» и «Системы преобразования лазерных пучков».

В пособии даются краткие теоретические положения, указания по выполнению 7 работ на компьютерах, варианты индивидуальных заданий, требования к оформлению работ.

На выполнение каждой работы требуется не менее 4 аудиторных часов.

Работа №1

«Синтез двухкомпонентной оптической системы в параксиальной области»

Цель работы: углубление теоретического материала и приобретение практических навыков определения обобщённых характеристик, принятых в программе «Opal» и оптических характеристик по ГОСТ 7226-76 для четырёх типов оптических систем.

1. Задание для работы

1.1. В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 1.1) определить конструктивные параметры компонентов. Компоненты считать однолинзовыми с одной плоской поверхностью (материал линзы – стекло К8).

1.2. Определить для системы в целом и для каждого ее компонента оптические характеристики по ГОСТ 7226-76, а также обобщенные оптические характеристики, принятые в программе «Opal».

2. Краткая теория

В зависимости от положений предмета и изображения все оптические системы можно разделить на 4 типа:

1) тип 00 – телескопическая система (предмет и изображение находятся в бесконечности);

2) тип 10 – микроскоп (предмет находится на конечном расстоянии, а изображение - в бесконечности);

3) тип 11 – проекционная система (предмет и изображение находятся на конечных расстояниях);

4) тип 01 – фотообъектив (предмет находится в бесконечности, а изображение на конечном расстоянии).

Рассмотрим основные закономерности каждого типа.

1. **Телескопические системы** (тип 00). В общем случае могут быть построены по схеме Галилея или по схеме Кеплера. Остановимся на системе Кеплера (рисунок 1.1). Система Кеплера состоит из двух положительных компонентов: объектива (тип 01) и окуляра (тип 10). В плоскости действительного промежуточного изображения установлена полевая деафрагма.

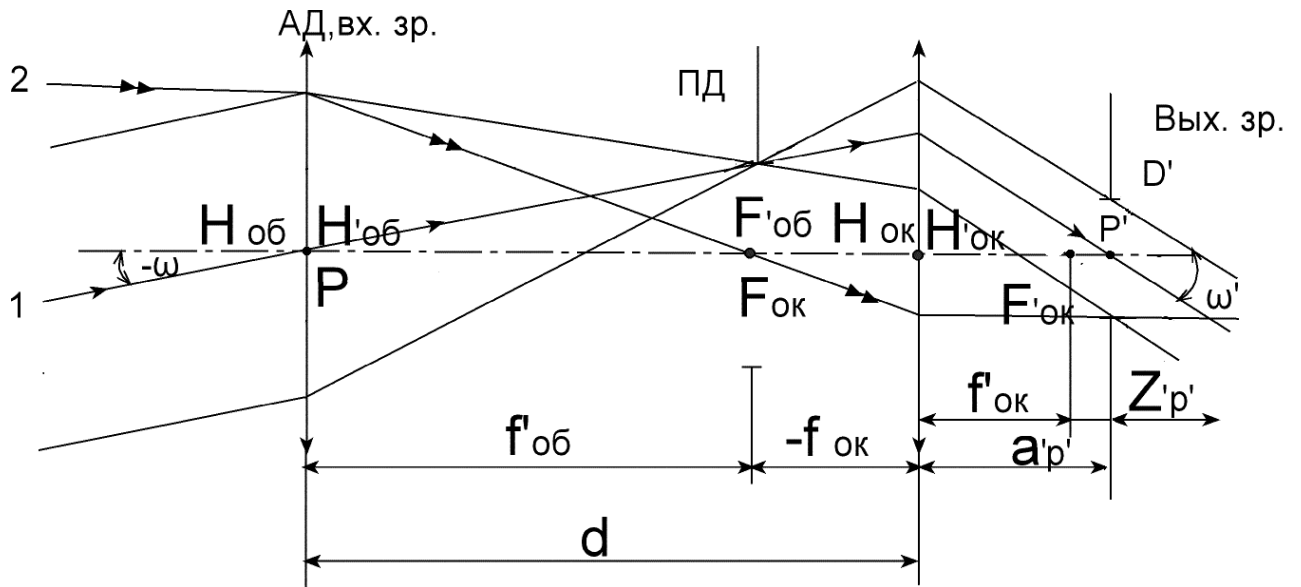


Рисунок 1.1. Телескопическая система по схеме Кеплера.

Основные оптические параметры:

- видимое увеличение Γ_T ;
- угловое поле в пространстве предметов $2\omega^\circ$;
- диаметр выходного зрачка D' , мм.

Видимое увеличение Γ_T можно определить из следующего выражения:

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{D}{D'}. \quad (1.1)$$

Фокусные расстояния объектива и окуляра можно определить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} d = f'_{об} + f'_{ок} \\ \Gamma_T = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \end{cases}, \quad (1.2)$$

где d – расстояние между задней главной плоскостью объектива и передней главной плоскостью окуляра.

Определив объектив и окуляр как отдельные плосковыпуклые линзы, можно рассчитать их конструктивные параметры по формуле:

$$r = f'(n - 1). \quad (1.3)$$

Толщину по оси определяют из условия конструктивно допустимого размера толщины по краю. Рекомендуются следующие соотношения между толщиной по оси d , толщиной по краю t и диаметром линзы D :

1) для положительных линз: $4d + 10t \geq D$, толщина по краю t должна быть не меньше $0,05D$;

2) для отрицательных линз: $12d + 3t$, толщина по оси должна быть не меньше $0,05D$.

Таким образом конструктивные параметры оптической системы можно представить следующим образом:

$r_1 = f'_{об} (n - 1)$		
	d_1	K8
$r_2 = \infty$		
	$d_2 = S'_{F'_{об}} - S_{F_{ок}}$	
$r_3 = \infty$		
	d_3	K8
$r_4 = -f'_{ок} (n - 1)$		

2. Оптическая система «микроскоп» (тип 10) может состоять из двух компонентов: объектива (тип 11) и окуляра (тип 10) (рисунок 1.2).

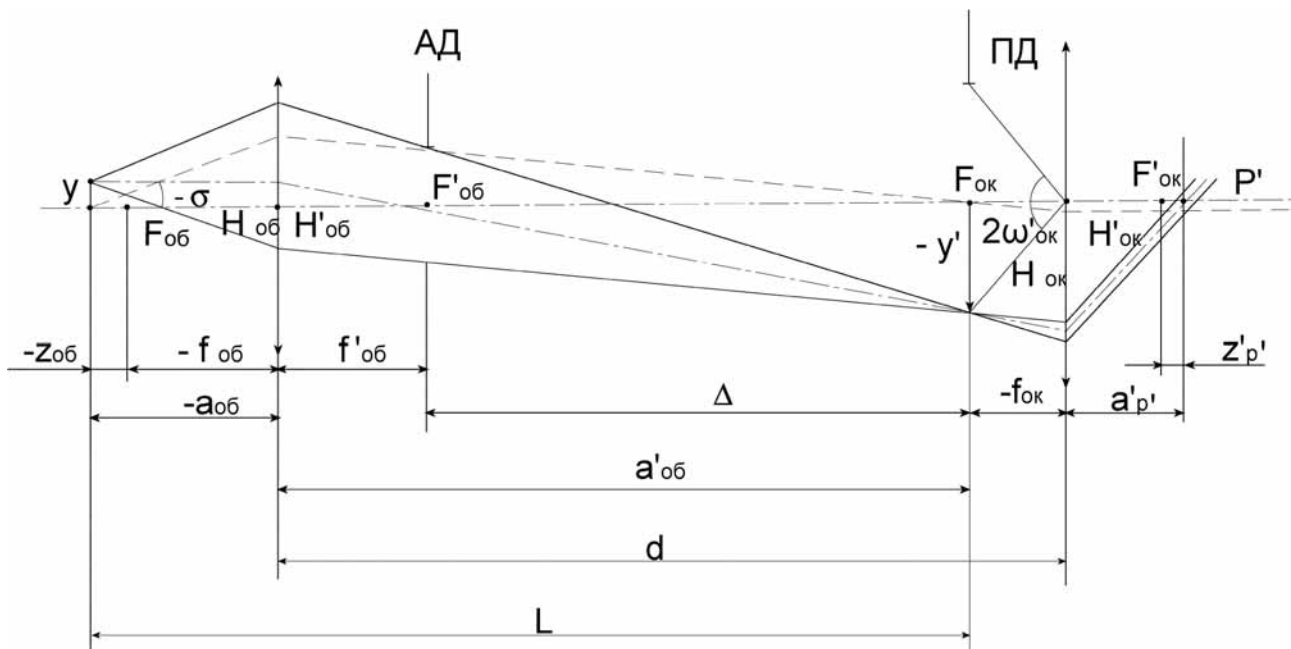


Рисунок 1.2. Оптическая схема микроскопа.

Основные оптические параметры:

- видимое увеличение $\bar{\Gamma}$;
- числовая апертура объектива в пространстве предметов A ;

- линейное поле в пространстве предметов $2y_{об}$, мм.

Видимое увеличение микроскопа, состоящего из объектива и окуляра, определяется формулой:

$$\bar{\Gamma} = \frac{250}{f'_M} = -\frac{\Delta 250}{f'_{об} f'_{ок}} = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок} = -\frac{500 A_{об}}{D'}, \quad (1.4)$$

$$\text{где } \Delta = d - f'_{об} - f'_{ок}, \quad (1.5)$$

f'_M , $f'_{об}$, $f'_{ок}$ - соответственно фокусные расстояния микроскопа, объектива, окуляра;

$\beta_{об}$ - линейное увеличение микроскопа;

$\Gamma_{ок}$ - видимое увеличение окуляра;

$A_{об} = n \sin \sigma_A$ - числовая апертура объектива в пространстве предметов;

D' - диаметр выходного зрачка микроскопа.

Линейное увеличение объектива определяется по формуле:

$$\beta_{об} = \frac{D_{плд}}{2y_{об}}, \quad (1.6)$$

где $2y_{об}$ - линейное поле объектива в пространстве предметов.

Отрезки $a_{об}$ и $a'_{об}$ можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} -a_{об} + a'_{об} = L \\ \beta_{об} = \frac{a'_{об}}{a_{об}} \end{cases}, \quad (1.7)$$

где L - расстояние между плоскостями предмета и изображения первого компонента.

Фокусное расстояние объектива определяется по формуле:

$$f' = \frac{a_{об} \cdot a'_{об}}{a_{об} - a'_{об}}. \quad (1.8)$$

Фокусное расстояние окуляра:

$$f'_{ок} = d - f'_{об} - \Delta, \quad (1.9)$$

где Δ - оптический интервал (расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра).

Определив объектив и окуляр как отдельные плосковыпуклые линзы можно рассчитать их конструктивные параметры по формуле:

$$r = f'(n - 1). \quad (1.10)$$

Толщину по оси определяют из условия конструктивно допустимого размера толщины по краю.

Таким образом, конструктивные параметры оптической системы можно представить следующим образом:

$r_1 = \infty$		
	d_1	K8
$r_2 = -f'_{об} (n - 1)$		
	$d_2 = d - S_{H_2}$	
$r_3 = \infty$		
	d_3	K8
$r_4 = -f'_{ок} (n - 1)$		

3. Микропроекционная система (тип 11) может состоять из двух компонентов: объектива (тип 11) и положительного проекционного окуляра (тип 11) (Рисунок 1.3).

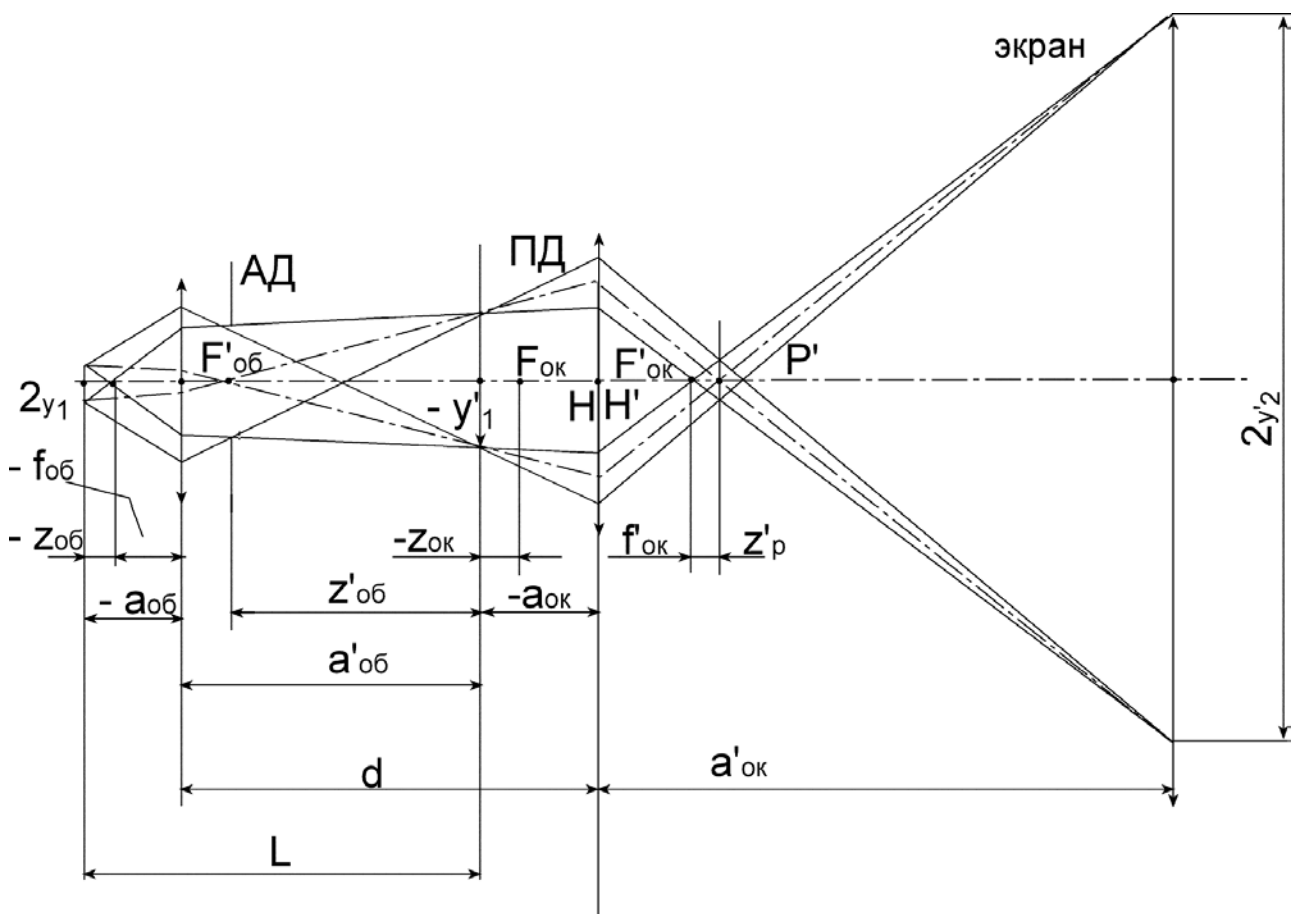


Рисунок 1.3. Оптическая схема микропроекционной системы.

Основные оптические параметры:

- линейное увеличение β_M ;
- числовая апертура объектива в пространстве предметов A ;
- линейное поле в пространстве предметов $2y$, мм.

Линейное увеличение β_M определяется формулой:

$$\beta_M = \beta_{об} \beta_{ок} \cong \Gamma_M \cdot K \cong \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок} \cdot K, \quad (1.11)$$

где $\beta_{ок}$ - линейное увеличение окуляра, передающего изображение на конечное расстояние.

$$K = \frac{a'_{ок}}{250} - \quad (1.12)$$

коэффициент увеличения камеры ($a'_{ок}$ - расстояние от задней главной плоскости окуляра до экрана).

Отсюда следует, что линейное увеличение микроскопа при проекции отличается от его видимого увеличения при визуальном наблюдении множителем “ K ”.

$$\beta_{об} = -\frac{z'_{об}}{f'_{об}} = \frac{f'_{об}}{z_{об}} = \frac{y'_1}{y_1}, \quad (1.13)$$

$$\beta_{ок} = -\frac{z'_{ок}}{f'_{ок}} = \frac{f'_{ок}}{z_{ок}} = \frac{y'_2}{y'_1}. \quad (1.14)$$

Линейное изображение на экране:

$$2y'_2 = D_{ПД} \cdot \beta_{ок} = 2y_1 \cdot \beta_M. \quad (1.15)$$

Линейное поле в пространстве предметов:

$$2y_1 = \frac{D_{ПД}}{\beta_{об}}. \quad (1.16)$$

Отрезки $a_{об}$ и $a'_{об}$ можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} -a_{об} + a'_{об} = L \\ \beta_{об} = \frac{a'_{об}}{a_{об}} \end{cases}, \quad (1.17)$$

где L – расстояние между плоскостями предмета и изображения первого компонента.

Фокусное расстояние объектива определяется по формуле:

$$f'_{об} = \frac{a_{об} \cdot a'_{об}}{a_{об} - a'_{об}}. \quad (1.18)$$

Отрезки $a_{ок}$ и $a'_{ок}$ определяются по формуле:

$$a_{ок} = d - a'_{об}, \quad (1.19)$$

$$a'_{ок} = a_{ок} \cdot \beta_{ок}, \quad (1.20)$$

где d – расстояние между задней главной плоскостью объектива и передней главной плоскостью окуляра.

Фокусное расстояние окуляра определяется по формуле:

$$f'_{ок} = \frac{a_{ок} \cdot a'_{ок}}{a_{ок} - a'_{ок}}. \quad (1.21)$$

Определив объектив и окуляр как отдельные плосковыпуклые линзы можно рассчитать их конструктивные параметры по формуле:

$$r = f'(n - 1). \quad (1.22)$$

$r_1 = \infty$		
	d_1	K8
$r_2 = -f'_{об}(n - 1)$		
	$d_2 = S'_{об} - S_{ок} = d - S_{H_2}$	
$r_3 = \infty$		
	d_3	K8
$r_4 = -f'_{ок}(n - 1)$		

d_1 и d_3 определяют из условия конструктивно допустимого размера толщины по краю.

4. Оптическая схема фотообъектива (тип 01), состоящего из двух компонентов: первый компонент – положительный (тип 01), второй компонент - отрицательный (тип 11) (рисунок 1.4).

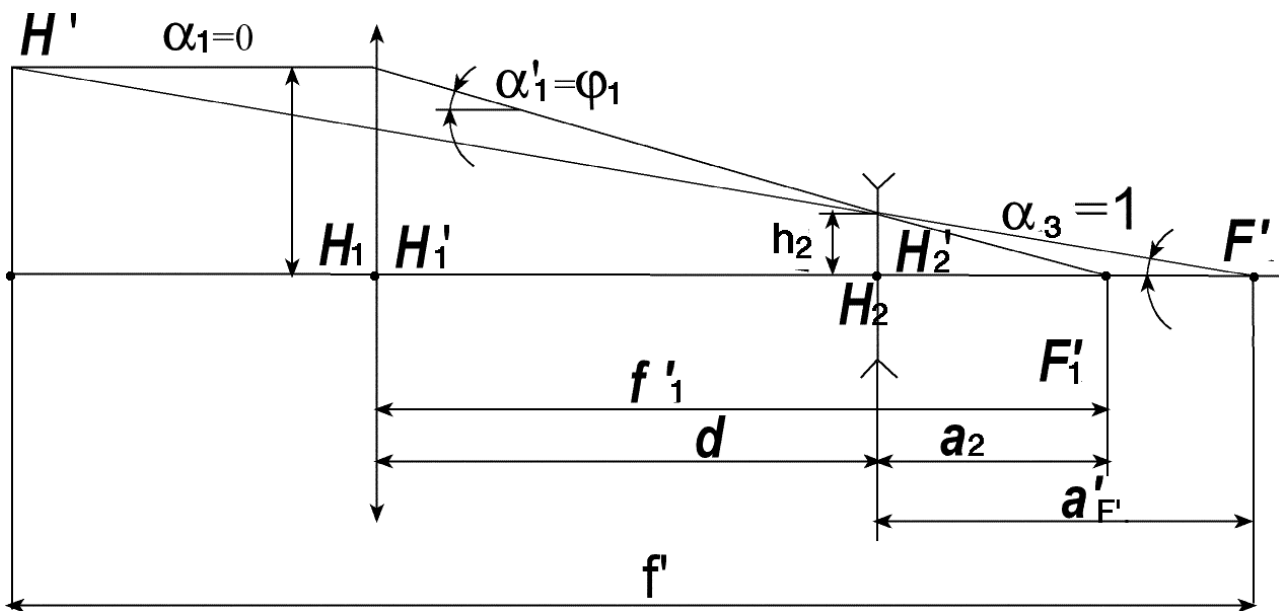


Рисунок 1.4. Оптическая схема фотообъектива.

Основные оптические параметры:

- фокусное расстояние f' , мм;
- относительное отверстие D/f' ;
- угловое поле в пространстве предметов $2\omega^\circ$.

Оптическая сила системы определяется по формуле:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d, \quad (1.23)$$

где d – расстояние между задней главной плоскостью первого компонента и передней главной плоскостью второго компонента.

Расстояние от задней главной плоскости второго компонента до заднего фокуса системы определяется по формуле:

$$a'_{F'} = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi}, \quad (1.24)$$

где d – расстояние между задней главной плоскостью первого компонента и передней главной плоскостью второго компонента.

$$\Phi = \frac{1}{f'} \text{ - оптическая сила всей системы.}$$

Фокусные расстояния первого и второго компонентов объектива можно определить из системы:

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d \\ a'_{F'} = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi} \end{cases} \quad (1.25)$$

Определив первый и второй компоненты как плосковыпуклые линзы можно рассчитать их конструктивные параметры по формуле:

$$r = f'(n - 1). \quad (1.26)$$

Таким образом, конструктивные параметры оптической системы можно представить следующим образом:

$r_1 = f'_1(n - 1)$		
	d_1	K8
$r_2 = \infty$		
	$d_2 = d + S'_{H'_1} - S_{H_2}$	
$r_3 = \infty$		
	d_3	K8
$r_4 = f'_2(n - 1)$		

d_1 и d_3 определяют из условия конструктивно допустимого размера толщин по краю (для первого положительного компонента) и по оси (для второго отрицательного компонента).

3. Указание по выполнению работы.

В программе «Орал» используются обобщенные характеристики оптической системы, а не оптические характеристики, принятые по ГОСТ 7226-76 (см. таблица 1.2), связь между ними приведена в таблице 1.3.

4. Оформление работы.

В отчете должны быть представлены:

- 5.1. Габаритный расчет оптической системы.
- 5.2. Оптическая схема системы с указанием положения предмета и изображения (компоненты представить их главными плоскостями).
- 5.3. Конструктивные параметры оптической системы.
- 5.4. Расчеты, выполненные по формулам идеальной оптической системы и результаты, полученные по программе «Орал».
- 5.5. Таблицы (см. таблицу 1.2) должны быть заполнены для системы в целом и для каждого ее компонента.

Таблица 1.1.

№№ вариантов	Положение плоскости предмета	Положение плоскости изображения	Обобщенные характеристики					Расстояние между компонентами	Линейное увеличение 1-го компонента	Расстояние между пл-ми предмета и изображения 1-го компонента	Линейное увеличение 2-го компонента	Расстояние от посл. комп-та до изображения
			Увеличение	Передняя апертура	Задняя апертура	Величина предмета	Величина изображения					
1	ближнее	дальнее		0.18		0.15		210.00	-40.00	190.00		
2	ближнее	дальнее		0.25		0.20		210.00	-8.00	190.00		
3	дальнее	дальнее	-3.50		2.50	3.00		112.50				
4	дальнее	ближнее	-500.00	4.00		1.30		100.00				30.00
5	ближнее	ближнее		0.20		0.10		207.00	-40.00	190.00	-10.00	
6	ближнее	ближнее	100.00	0.20		0.20		176.00		160.00	-5.00	
7	дальнее	дальнее	-4.00		2.50	3.0		125.00				
8	ближнее	дальнее		0.20		0.15		174.00	-30.00	160.00		
9	дальнее	ближнее	-400.00	20.00		8.00		150.00				100.00
10	дальнее	ближнее	-300.00	4.00		5.00		100.00				70.00
11	ближнее	дальнее		0.20		0.26		210.00	-7.00	190.00		
12	дальнее	дальнее	-4.40		2.00		16.30	120.00				
13	ближнее	ближнее	400.00	0.18		0.10			-25.00	160.00		220.00
14	ближнее	ближнее	350.00	0.20		0.10				190.00	-10.00	200.00
15	ближнее	дальнее		0.20		0.50		190.00	-6.00	160.00		
16	ближнее	дальнее		0.20		0.20		174.00	-6.00	160.00		
17	ближнее	дальнее			0.16		14.00	210.00	-30.00	190.00		

18	дальнее	дальнее	-4.20		2.50	3.00		130.00				
19	ближнее	дальнее		0.20		0.30		190.00	-7.00	160.00		
20	ближнее	дальнее		0.15		0.20		174.00	-7.00	160.00		
21	ближнее	дальнее		0.20		0.15		210.00	-25.00	190.00		
22	ближнее	дальнее		0.20		0.15		210.00	-30.00	190.00		
23	дальнее	дальнее	-3.50		2.00	3.30		112.50				
24	дальнее	ближнее	-600.00	5.00		2.30		100.00				70.00
25	ближнее	ближнее		0.13		0.15		207.00	-30.00	190.00	-10.00	
26	ближнее	ближнее	110.00	0.20		0.15		176.00		160.00	-5.00	
27	дальнее	дальнее	-5.00		2.00	2.30		125.00				
28	дальнее	дальнее	-4.20		2.00	3.00		150.00				
29	дальнее	ближнее	-450.00	5.00		5.00		110.00				100.00
30	дальнее	ближнее	-330.00	6.00		6.00		100.00				70.00
31	ближнее	дальнее		0.20		0.23		184.00	-7.00	160.00		
32	ближнее	дальнее		0.25		0.20		210.00	-8.00	190.00		
33	ближнее	ближнее	440.00	0.13		0.13			-25.00	160.00		220.00
34	ближнее	ближнее	325.00	0.20		0.12				190.00	-8.00	200.00
35	дальнее	дальнее	-4.00		2.20	6.00		140.00				
36	дальнее	дальнее	-4.60		2.40	8.00		160.00				
37	дальнее	дальнее	-5.00		1.90	10.00		180.00				
38	дальнее	ближнее	-350.00	22.00		8.00		150.00				70.00
39	дальнее	ближнее	-500.00	20.00		6.00		150.00				100.00

Таблица 1.2.

Тип системы	Положение плоскости предмета	Положение плоскости изображения	Обобщенные характеристики					Основные характеристики оптических систем по ГОСТ 7226-76				
			Увеличение	Передняя апертура	Задняя апертура	Величина предмета	Величина изоб-я	Видимое увеличение	Диаметр вх. зрачка	Диаметр вых. зрачка	Угловое поле в пр-ве предметов	Угловое поле в пр-ве изоб-ний
00	дальнее	дальнее	\bar{V}_0	\bar{A}_0	\bar{A}_0'	\bar{Y}_0	\bar{Y}_0'	Видимое увеличение	Диаметр вх. зрачка	Диаметр вых. зрачка	Угловое поле в пр-ве предметов	Угловое поле в пр-ве изоб-ний
01	дальнее	ближнее						Заднее фокусное расстояние	Диаметр вх. зрачка	Числовая апертура в пр-ве изоб-ний	Угловое поле в пр-ве предметов	Линейное поле в пр-ве изоб-ний
10	ближнее	дальнее						Видимое увеличение	Числовая апертура в пр-ве предметов	Диаметр вых. зрачка	Линейное поле в пр-ве предметов	Угловое поле в пр-ве изоб-ний
11	ближнее	ближнее						Линейное увеличение	Числовая апертура в пр-ве предметов	Числовая апертура в пр-ве изоб-ний	Линейное поле в пр-ве предметов	Линейное поле в пр-ве изоб-ний

Таблица 1.3.

Тип системы	Положение плоскости предмета	Положение плоскости изображения	Связь между обобщенными характеристиками и характеристиками по ГОСТ 7226-76				
			00	дальнее	дальнее	$\bar{V}_0 = \Gamma_T$	$\bar{A}_0 = \frac{D}{2}$
01	дальнее	ближнее	$\bar{V}_0 = -f'$	$\bar{A}_0 = \frac{D}{2}$	$\bar{A}'_0 = A'$	$\bar{Y}_0 = \omega$	$\bar{Y}'_0 = y'$
10	ближнее	дальнее	$\bar{V}_0 = \frac{\bar{\Gamma}}{250} = \frac{1}{f'}$	$\bar{A}_0 = A$	$\bar{A}'_0 = \frac{D'}{2}$	$\bar{Y}_0 = y$	$\bar{Y}'_0 = \omega'$
11	ближнее	ближнее	$\bar{V}_0 = \beta$	$\bar{A}_0 = A$	$\bar{A}'_0 = A'$	$\bar{Y}_0 = y$	$\bar{Y}'_0 = y'$

Работа №2

«Проекционная установка»

Цель работы: закрепление знаний теоретического материала и расчет проекционной установки с системой освещения.

1. Задание для работы

1.1. Исходя из заданных параметров всей системы, рассчитать оптические характеристики проекционного объектива и конденсора.

1.2. Подобрать из библиотеки оптических систем «Опал» объектив.

1.3. Произвести расчет проекционной части с определением световых диаметров линз и аберраций.

1.4. Рассчитать конденсор на минимум сферической аберрации с определением кружка рассеяния по программе «Опал».

1.5. Построить ход лучей.

2. Краткая теория

Проекционные системы служат для получения на экране действительных изображений предметов, освещенных лучами источника света. Проекция прозрачных предметов в проходящем свете называется диапроекцией, а непрозрачных в отраженном – эпипроекцией. Изображение на экране должно иметь достаточную яркость. Из экспериментальных исследований установлено, что яркость экрана L при диапроекции должна быть от 20 до 50 кд/м^2 .

Яркость любого экрана зависит от его отражающей способности и освещенности. Для диффузно отражающего экрана:

$$L = \rho \frac{E}{\pi}, \quad (2.1)$$

где ρ - коэффициент отражения экрана (можно считать 0.8);

E - освещенность экрана.

Следовательно, освещенность экрана должна при диапроекции быть $80 \div 200 \text{лк}$.

Зная освещенность экрана и его площадь, можно определить световой поток Φ' , падающий на экран из проекционной системы и, с учетом коэффициента полезного действия всей установки, полный световой поток, который должен иметь источник равен:

$$\Phi_0 = (20 \div 100)\Phi' \quad (2.2)$$

Для того, чтобы использовать этот поток наиболее рационально, используют одну из двух схем:

- осветительная система образует изображение источника света в кадровом окне;
- осветительная система образует изображение источника света во входном зрачке проекционного объектива.

В первом случае на экране одновременно получают изображения диапозитива и источника света, поэтому тело накала в этом случае должно быть равномерно светящимся. Кроме того, в плоскости кадрового окна происходит концентрация энергии, что приводит к быстрому нагреву диапозитива. Все это ограничивает область применения этой схемы.

Рассмотрим подробно вторую схему (рисунок 2.1).

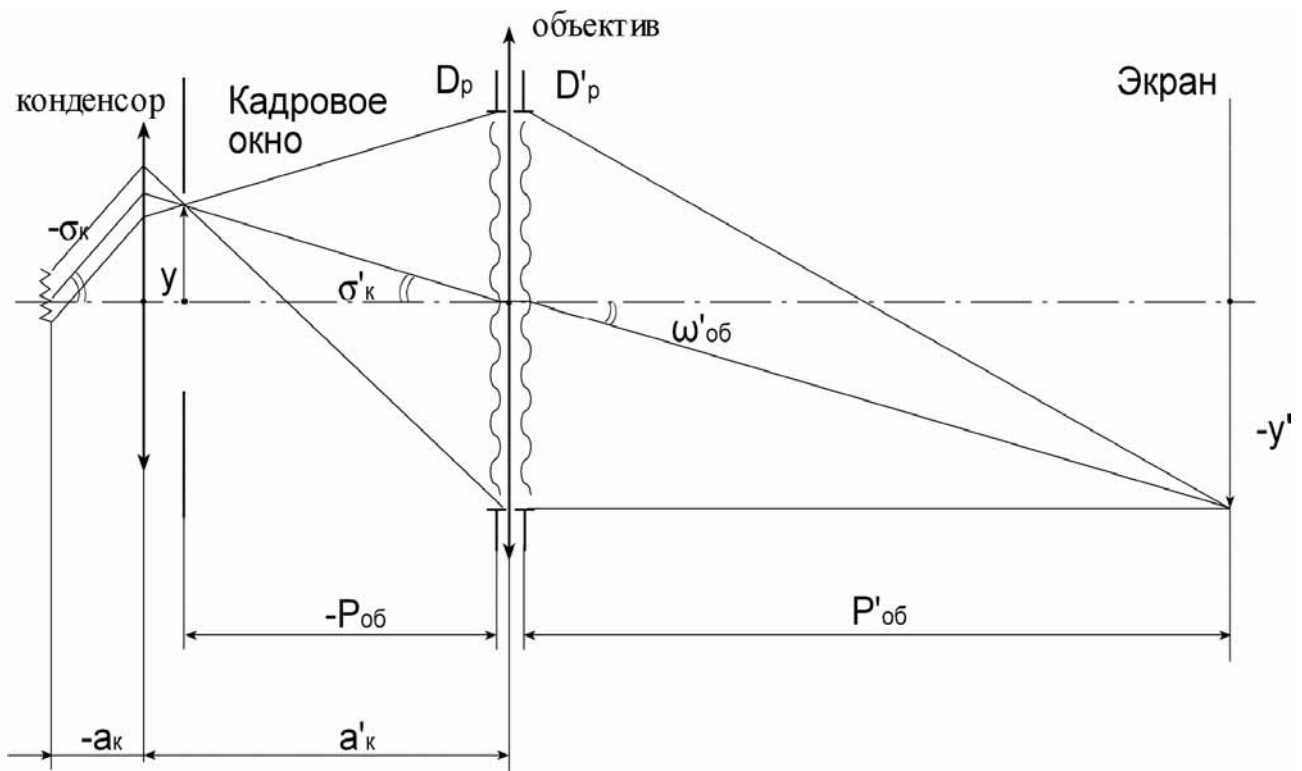


Рисунок 2.1. Принципиальная схема проекционной установки

В этом случае от каждой точки источника, независимо, насколько ярко она светится, свет равномерно освещает кадровое окно и попадает во входной зрачок проекционного объектива, что обеспечивает равномерность освещенности изображения. Методика расчета компонентов этой схемы изложена в указаниях к выполнению работы.

3. Указания к выполнению работы

Допустим, нужно рассчитать диапроеекционную установку для демонстрации слайдов $18\text{мм} \times 24\text{мм}$ на экран $1000\text{мм} \times 1500\text{мм}$ в помещении $l = (5000 \div 6000)\text{мм}$.

Известно, что при диапроеекции необходимо иметь на экране освещенность $E \approx 200\text{лк}$.

Такую освещенность обеспечит световой поток:

$$\Phi' = E \cdot S = 200 \cdot 1 \cdot 1,5 = 300\text{лм} \quad (2.3)$$

Следовательно, источник должен иметь полный световой поток:

$$\Phi_0 = (20 \div 100)\Phi' = (6000 \div 30000)\text{лм} \quad (2.4)$$

Из каталога проекционных ламп [3] находим лампу К12(110в \times 300вт) с полным световым потоком 6450лм, имеющую тело накала $8 \times 8,5$ и диаметр колбы 37мм. Габаритная яркость не дана. Рассчитываем ее по формуле:

$$\Phi = 2\pi L dS, \quad (2.5)$$

где L - габаритная яркость лампы;

dS - площадь тела накала в м^2 .

$$L \approx 15000000 \text{кд}/\text{м}^2 \quad (2.6)$$

При такой яркости источника для обеспечения необходимой освещенности надо иметь выходной зрачок проекционного объектива диаметром:

$$D'_p = 2p' \sqrt{\frac{E}{\tau \pi L}}, \quad (2.7)$$

где p' - расстояние от объектива до экрана;

E - заданная освещенность на экране;

τ - коэффициент пропускания объектива (принять $\tau = 0,8$);

L - яркость источника света.

В нашем случае:

$$D'_p = 2 \cdot 5250 \sqrt{\frac{200}{0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^7}} = 24,1\text{мм} \quad (2.8)$$

Исходя из габаритных характеристик:

$$\beta_{об} = \frac{y'}{y} = \frac{1500}{-24} = -62,5 \quad (2.9)$$

Но:

$$\beta = -\frac{z'_{об}}{f'_{об}} = -\frac{a'_{об} - f'_{об}}{f'_{об}} \quad (2.10)$$

Следовательно:

$$f'_{об} = \frac{a'_{об}}{1 - \beta_{об}} = \frac{5250}{1 - (-625)} = 82,68. \quad (2.11)$$

Таким образом, находим объектив с относительным отверстием:

$$D/f' = 24/82,68 = 1/3,5. \quad (2.12)$$

Угловое поле этот объектив должен иметь:

$$\text{tg} \omega' = \frac{l'}{p'}, \quad (2.13)$$

где l' - половина диагонали экрана.

$$\text{tg} \omega' = \frac{\sqrt{1000^2 + 1500^2}}{2 \cdot 5250} = 0,1717, \quad (2.14)$$

$$\omega' = 9^\circ 40', \quad 2\omega' = 19^\circ 20'.$$

Итак, необходим проекционный объектив со следующими характеристиками:

$$f' = 82 \text{ мм}, \quad 2\omega = 20^\circ, \quad D/f' = 1/3,5.$$

В библиотеке оптических систем «Опал» находим объектив «Триплет» со следующими характеристиками:

$$f' = 80 \text{ мм}, \quad 2\omega = 40^\circ, \quad D/f' = 1/3,5.$$

$S'_{F'}$	S_F	S_p	$S'_{p'}$
60,52	-58,3	23,2	-15,2

$$f'=80\text{мм} \quad 2\omega=40^\circ \quad D/f'=1/3,5 \quad S'_F=60,52 \quad S_F=-58,3$$

$$S'_P=-15,2 \quad S_P=23,2$$

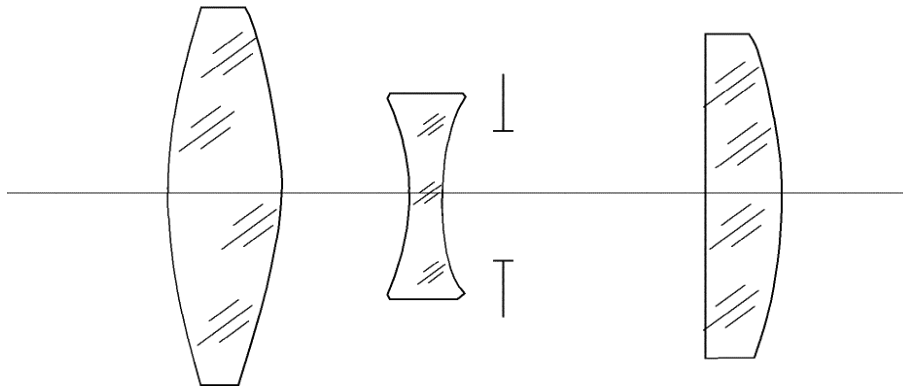


Рисунок 2.2. Объектив.

Теперь можем определить параметры проекционной части (с учетом того, что для проекции объектив необходимо перевернуть):

$$z'_{об} = -\beta f' = -(-62,5) \cdot 80 = 5000, \quad (2.15)$$

$$S' = z' + S'_F = 5000 + 58,3 = 5058,3, \quad (2.16)$$

$$p'_{об} = S' - S'_P = 5058,3 - (-23,2) = 5081,51, \quad (2.17)$$

$$z_{об} = -\frac{f}{\beta} = -\frac{-80}{-62,5} = -1,28, \quad (2.18)$$

$$-S = -S_F - z = 60,52 + 1,28 = 61,7, \quad (2.19)$$

$$-p_{об} = -S + S_P = 61,7 + 15,2 = 76,9. \quad (2.20)$$

Уточненный:

$$tg\omega = \frac{l}{p} = \frac{\sqrt{24^2 + 18^2}}{2 \cdot 76,9} = 0,195, \quad (2.21)$$

$$\omega_{об} = 11^\circ.$$

Итак, мы имеем все данные для расчета aberrаций проекционной части установки по программе «Опал» и оформления оптической схемы и можем приступить к расчету осветительной части проекционной установки – конденсора.

Для расчета конденсора мы знаем, что:

$$\sigma'_k = 11^\circ.$$

$$\beta_k = \frac{D_p}{-v}, \quad (2.22)$$

где D_p - диаметр входного зрачка проекционного объектива;
 v - меньшая сторона тела накала лампы.

$$\beta_k = \frac{24}{-8} = -3^\times. \quad (2.23)$$

Следовательно:

$$\sigma_k = \beta_k \cdot \sigma_k' \approx 30^\circ. \quad (2.24)$$

Суммарный угол охвата конденсора:

$$2(|\sigma_k| + |\sigma_k'|) = 82^\circ. \quad (2.25)$$

Известно, что при углах охвата конденсора $60^\circ \div 90^\circ$ необходим трехлинзовый конденсор. Причем в нашем случае $-S_k \geq 30\text{мм}$, т.к. диаметр лампы 37мм , а $S_k' \geq 90\text{мм}$, т.к. $-p_{об} = 76,9$

При расчете конденсора на минимум сферической аберрации принимаем силы линз одинаковыми и каждую линзу рассчитываем на минимум сферической аберрации. Тогда для нечетных углов нулевого луча с осью имеем формулу (при условии нормировки $\alpha_1 = \beta_k$, $\alpha' = 1$):

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + \frac{1 - \beta}{m}, \quad (2.26)$$

где t - порядковый номер линзы конденсора;

m - число линз конденсора;

β - увеличение конденсора.

Для четных углов:

$$\alpha_{2t} = \frac{(2n + 1)(\alpha_{2t-1} + \alpha_{2t+1})}{2(n + 2)}, \quad (2.27)$$

где n - показатель преломления стекла линз ($n = 1,5$).

Определив « α », можно рассчитать радиусы кривизны поверхностей конденсора по известной формуле:

$$r_{\dot{e}} = h_{\dot{e}} \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} \alpha_{k+1} - n_k \alpha_k}, \quad (2.28)$$

где h_k - высота нулевого луча на главной плоскости соответствующей поверхности рассчитывается по формуле:

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k, \quad (2.29)$$

где d_k - расстояние по оси между поверхностями, а первую высоту определяем из условия:

$$h_1 = S_1 \alpha_1 = -30 \cdot (-3) = 90. \quad (2.30)$$

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
-3	-2,667	-1,667	-1,143	-0,333	0,381	1

Принимаем:

$$d_1 = d_3 = d_5 = 6$$

$$d_2 = d_4 = 0,1$$

Тогда:

$$r_1 = 90 \frac{1,5 - 1}{1,5(-2,667) - 1(-3)} = -44,978,$$

$$h_2 = 90 - (-2,667) \cdot 6 = 106,002,$$

$$r_2 = 106,002 \frac{1 - 1,5}{1(-1,667) - 1,5(-2,667)} = -22,713,$$

$$h_3 = 106,002 - (-1,667) \cdot 0,1 = 106,169,$$

$$r_3 = 106,169 \frac{1,5 - 1}{1,5(-1,143) - 1(-1,667)} = -1117,6,$$

$$h_4 = 106,169 - (-1,143) \cdot 6 = 113,027,$$

$$r_4 = 113,027 \frac{1 - 1,5}{1(-0,333) - 1,5(-1,143)} = -40,907,$$

$$h_5 = 113,027 - (-0,333) \cdot 0,1 = 113,06,$$

$$r_5 = 113,06 \frac{1,5 - 1}{1,5 \cdot 0,381 - 1(-0,333)} = 62,499,$$

$$h_6 = 113,06 - 0,381 \cdot 6 = 110,774,$$

$$r_6 = 110,774 \frac{1 - 1,5}{1 \cdot 1 - 1,5 \cdot 0,381} = 129,258,$$

$$S'_e = \frac{h_{ин\bar{e}}}{\alpha_{ин\bar{e}}} = \frac{110,774}{1} = 110,774.$$

Если бы S'_κ получилось меньше 90мм, необходимо было бы провести расчет в обратном порядке, задав $h_{носл} = 90$.

В итоге получаем схему проекционной установки, приведенную на рисунке 2.3.

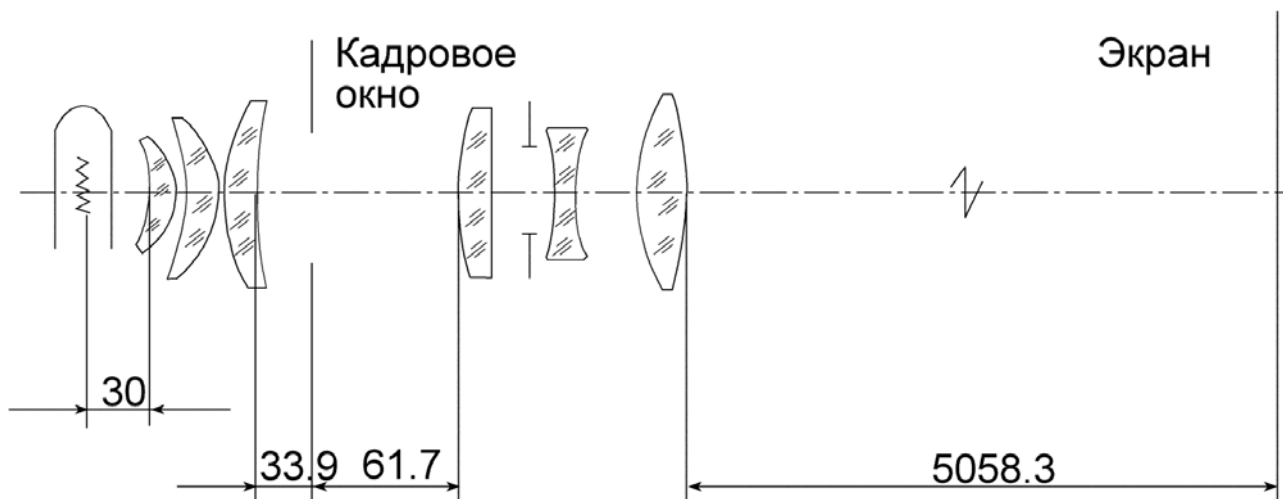


Рисунок 2.3. Схема проекционной установки

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

- 4.1. Расчеты, выполненные по формулам.
- 4.2. Схема проекционной установки с указанием положения источника, диапозитива, экрана.
- 4.3. Данные проверки расчетов на ПК.
- 4.4. Таблицы и графики аберраций.

5. Литература

1. Теория оптических систем. Заказов Н.Г. и др. М. Машиностроение, 1992г
2. Прикладная оптика. Дубовик А.С. и др. М. Недра 1992г
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов Панов В.А. и др. Л. Машиностроение 1980г.

6. Задание для работы

Таблица 2.1

№ вар.	Размер кадра	Увеличение	Расстояние между кадром и экраном (м)	$f_{об}$ (мм)	№ вар.	Размер кадра	Увели-чение	Расстояние между кадром и экраном (м)	$f_{об}$ (мм)
1	9x12	-50	10	-	31	9,45x7,05	-	10	60

2	9x12	-40	8	-	32	9,45x7,05	-50	-	70
3	18x24	-9	3	-	33	9,45x7,05	-60	-	80
4	18x24	-10	4	-	34	9,45x7,05	-70	-	90
5	18x24	-11	5	-	35	17x14	-9	2,5	-
6	18x24	-12	6	-	36	17x14	-10	3	-
7	18x24	-13	6	-	37	17x14	-11	3,5	-
8	9x12	-35	-	70	38	17x14	-12	4	-
9	9x12	-40	-	60	39	17x14	-13	4,5	-
10	9x12	-45	-	50	40	17x14	-14	5	-
11	7x7	-	9	45	41	17x14	-15	5,5	-
12	7x7	-	7	55	42	17x14	-16	6	-
13	9x12	-	3	50	43	17x14	-17	-	200
14	18x24	-14	4,0	-	44	17x14	-18	-	250
15	18x24	-15	4,0	-	45	17x14	-19	-	300
16	9x12	-20	-	70	46	17x14	-20	-	350
17	18x24	-16	4,5	-	47	200x200	-10	5	-
18	18x24	-17	5,0	-	48	200x200	-11	6	-
19	18x24	-18	5,0	-	49	200x200	-12	7	-
20	9x12	-20	-	70	50	200x200	-13	8	-
21	9x12	-25	-	60	51	200x200	-14	9	-
22	9x12	-30	-	70	52	200x200	-15	10	-
23	9x12	-50	-	100	53	200x200	-16	11	-
24	9x12	-40	-	120	54	90x120	-17	-	200
25	18x24	-19	5,5	-	55	90x120	-18	-	250
26	18x24	-20	6	-	56	100x100	-13	-	400
27	9,45x7,05	-	2	20	57	100x100	-14	-	350
28	9,45x7,05	-	3,5	30	58	100x100	-15	-	300
29	9,45x7,05	-	4	40	59	100x100	-16	-	250
30	9,05x7,05	-	4,5	50	60	100x100	-17	-	200

Работа №3

«Микроскоп (визуальная часть)»

Цель работы: Приобретение практических навыков габаритного и абберационного расчетов наблюдательной части микроскопа.

1. Задание для работы

1.1. Исходя из заданных характеристик визуальной части микроскопа необходимо выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний микроскопа, объектива, окуляра, а также (если потребуется) тубусной линзы, расстояний между главными плоскостями компонентов, числовой апертуры объектива, размеров и положения апертурной диафрагмы и выходного зрачка, определение размера полевой диафрагмы, линейного поля микроскопа, разрешающей способности и глубины резко изображаемого пространства.

1.2. По полученным данным подобрать объектив, окуляр, тубусную линзу из каталогов или из библиотеки оптических систем программы “ОПАЛ”.

1.3. Составить оптическую систему визуальной части микроскопа и определить расстояния между компонентами.

1.4. Выполнить построение хода апертурного, главного и двух наклонных лучей.

1.5. Определить абберации наблюдательной части микроскопа.

2. Краткая теория

Микроскоп предназначен для наблюдения и измерения мельчайших предметов или их деталей, неразличимых невооруженным глазом.

Микроскопы различных назначений состоят из следующих оптических частей:

- осветительной системы,
- визуальной, фотографической или проекционной.

Все объекты исследования под микроскопом можно разбить на две группы:

- прозрачные,
- непрозрачные.

Микроскопы для проходящего света применяются при работе с прозрачными объектами, а микроскопы для отраженного света – с непрозрачными объектами.

Осветительная система должна создать интенсивное и равномерное освещение всего поля микроскопа. Она состоит из (рисунок 3.1.):

1. источника света;
2. коллектора (осветительной линзы);
3. расположенной около коллектора ирисовой диафрагмы, служащей полевой диафрагмой;
4. конденсора.

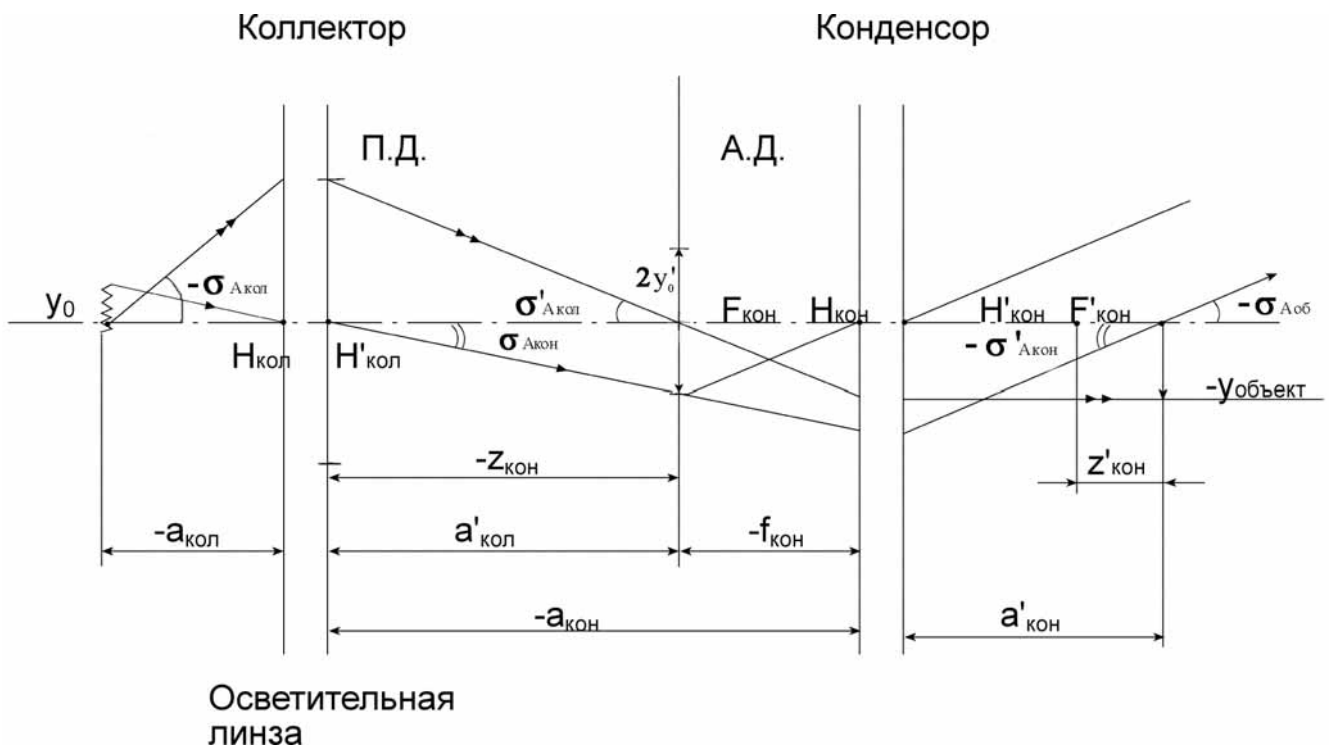


Рисунок 3.1. Ход лучей в осветительной части микроскопа в проходящем свете.

В передней фокальной плоскости конденсора находится вторая ирисовая диафрагма, служащая апертурной. Осветительная система микроскопа рассчитывается обычно по методу Келера. Коллектор изображает источник света в апертурную диафрагму. Конденсор проецирует полевую диафрагму в плоскость предмета. Выходящие из конденсора параллельные пучки лучей равномерно освещают предмет. Структура источника не воспроизводится на плоскости освещаемого предмета. Эта система позволяет, также, при помощи ирисовых диафрагм отдельно регулировать величину освещаемого поля и величину апертуры. Осветительная система по Келера создает у

освещаемого предмета телецентрический ход главного луча, что очень важно для измерительных микроскопов. Телецентрический ход лучей у предмета устраняет ошибку измерений, возникающую благодаря неточности наводки на резкость.

Числовые апертуры, а также размеры источника света и линейного поля объектива должны согласоваться друг с другом и удовлетворять условию:

$$y_0 \cdot A_{кол} = y_{об} \cdot A_{об} = y_{об} \cdot A'_{кон}, \quad (3.1)$$

где $2y_0$ – размер светящегося тела нити, мм;

$2y_{об}$ – размер освещаемого объекта, мм;

$A_{кол} = n \cdot \sin \sigma_{A_{кол}}$ – числовая апертура коллектора в пространстве предметов;

$A_{об} = n \cdot \sin \sigma_{A_{об}}$ – числовая апертура объектива в пространстве предметов;

$A'_{кон} = n' \cdot \sin \sigma'_{A_{кон}}$ – числовая апертура конденсора в пространстве изображений.

Исходными данными для расчета осветительной части являются: $A_{об}$, $2y_{об}$. Конденсор выбирается из каталога. Числовая апертура конденсора в пространстве изображений $A'_{кон}$ должна быть меньше апертуры объектива в пространстве предметов $A_{об}$.

Формулы для определения увеличения конденсора:

$$\beta_{кон} = -\frac{2y_{об}}{D_{ПД}} = -\frac{f_{кон}}{z_{кон}} = -\frac{z'_{кон}}{f'_{кон}} = -\frac{A_{кон}}{A'_{кон}} = -\frac{A_{кон}}{A_{об}}. \quad (3.2)$$

Расстояние от главной задней плоскости коллектора до апертурной диафрагмы выбирается в пределах $a'_{кол} = -z_{кон} = 200 \div 300 \text{ мм}$.

Определение диаметра апертурной диафрагмы:

$$D_{АД} = -2z_{кон} A_{кон} = -2f_{кон} A_{об} = 2y'_0. \quad (3.3)$$

Фокусное расстояние конденсора, в среднем, составляет $f'_{кон} = 10 \text{ мм}$ и изменяется от 7 до 20 мм.

Вычисление числовой апертуры коллектора:

$$A_{кол} = \frac{y_{об} A_{об}}{y_0}. \quad (3.4)$$

Определение линейного увеличения коллектора:

$$\beta_{кол} = -\frac{D_{АД}}{2y_0}. \quad (3.5)$$

Определение фокусного расстояния коллектора:

$$f'_{кол} = \frac{a'_{кол}}{1 - \beta_{кол}}. \quad (3.6)$$

Определение расстояния от переднего фокуса коллектора до светящегося тела лампы накала:

$$z_{кол} = \frac{f'_{кол}}{\beta_{кол}}. \quad (3.7)$$

Вычисление диаметра полевой диафрагмы коллектора:

$$D_{ПД} = -\frac{2y_{об}}{\beta_{кон}}. \quad (3.8)$$

Определение положения объекта относительно заднего фокуса конденсора:

$$z'_{кон} = -\beta_{кон} f'_{кон}. \quad (3.9)$$

Рассмотрим формирование изображения визуальной системой микроскопа, состоящей из объектива и окуляра (рисунок 3.2).

Предмет расположен перед передним фокусом объектива (вблизи него), в передней фокальной плоскости микроскопа. Увеличенное, действительное, перевернутое изображение предмета строится объективом в передней фокальной плоскости окуляра (глаз работает без аккомодации). Там же устанавливается полевая диафрагма (в отсчетном микроскопе – это измерительная шкала). Вследствие телецентрического хода главного луча в пространстве предметов, входной зрачок микроскопа находится в бесконечности. Объектив микроскопа создает изображение входного зрачка в своей задней фокальной плоскости. Здесь и помещается апертурная диафрагма микроскопа. В этом же месте возникает изображение апертурной диафрагмы осветительной системы и источника света.

Расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра Δ_0 называется оптической длиной тубуса микроскопа.

Из рисунка 3.2 видно, что фокусное расстояние микроскопа f'_i – величина отрицательная. Следовательно, визуальная часть микроскопа в отличие от лупы представляет собой отрицательную оптическую систему.

Основными характеристиками микроскопа являются: видимое увеличение \bar{G} , линейное поле $2y_{об}$, числовая апертура $A_{об}$. К остальным характеристикам относятся: линейный предел разрешения δ , диаметр выходного зрачка D' , глубина резко изображаемого пространства T .

Под видимым увеличением микроскопа понимают отношение тангенса угла, под которым видно изображение предмета через микроскоп, к тангенсу

угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения:

$$\overline{\Gamma} = \frac{tg\omega'}{tg\omega}. \quad (3.10)$$

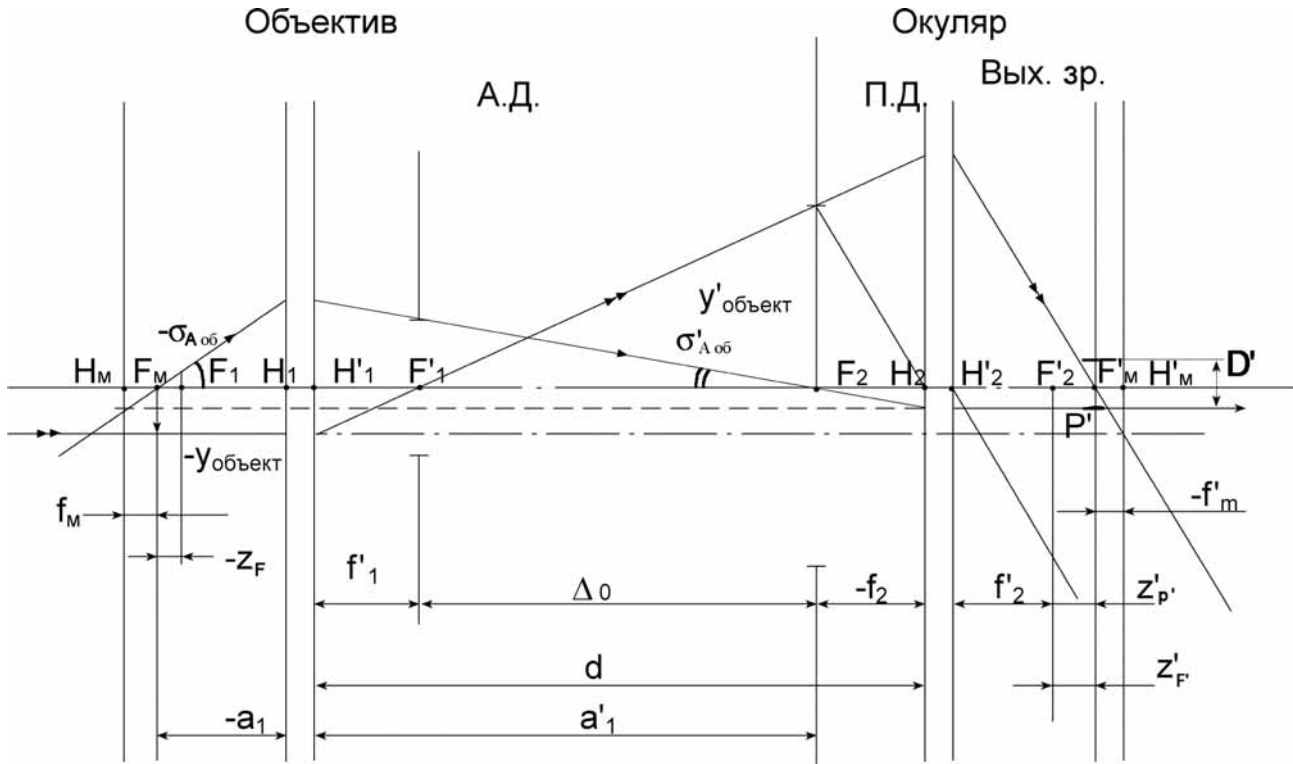


Рисунок 3.2. Ход лучей в наблюдательной системе микроскопа, состоящей из объектива и окуляра

Основные формулы для расчета

1. Видимое увеличение микроскопа:

$$\overline{\Gamma} = \frac{250}{f'_m} = -\frac{\Delta_0 \cdot 250}{f'_{об} \cdot f'_{ок}} = \beta_{об} \cdot \overline{\Gamma}_{ок} = \frac{500 \cdot A_{об}}{D'}, \quad (3.11)$$

где $\beta_{об}$ - линейное увеличение объектива;

$f'_{об}$ - фокусное расстояние объектива;

$f'_{ок}$ - фокусное расстояние окуляра;

$$\overline{\Gamma}_{ок} = \frac{250}{f'_{ок}} - \text{видимое увеличение окуляра.}$$

2. Линейное увеличение объектива:

$$\beta_{об} = -\frac{D_{ПД}}{2y_{об}} = \frac{A_{об}}{A'_{об}} = \frac{n \cdot \sin \sigma_{A_{об}}}{n' \cdot \sin \sigma'_{A_{об}}} = -\frac{\Delta_0}{f'_{об}} = \frac{a'_{об}}{a_{об}}. \quad (3.12)$$

3. Определение фокусного расстояния микроскопа f'_i , положения заднего фокуса микроскопа относительно заднего фокуса окуляра $z'_{F'}$ и положения переднего фокуса микроскопа относительно переднего фокуса объектива z_F .

$$f'_M = -\frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{\Delta_0}, \quad (3.13)$$

$$z'_{F'} = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0}, \quad (3.14)$$

$$z_F = \frac{f'_{об} \cdot f'_{ок}}{\Delta_0}, \quad (3.15)$$

где f'_{ii} – переднее фокусное расстояние объектива, в иммерсионных микроскопах $f'_{об} \neq -f'_{об}$.

4. Определение размера апертурной диафрагмы микроскопа:

$$D_{АД} = 2\Delta_0 \cdot \operatorname{tg}\sigma'_{A_{об}} \cong 2f'_{об} \cdot A_{об}, \quad (3.16)$$

где $\sigma'_{A_{об}}$ – апертурный угол объектива в пространстве изображения, причем:

$$\operatorname{tg}\sigma'_{A_{об}} = \frac{D'}{2f'_{ок}}. \quad (3.17)$$

5. Определение положения выходного зрачка микроскопа относительно заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{f'^2_{ок}}{\Delta_0}. \quad (3.18)$$

6. Определение линейного увеличения окуляра в зрачках:

$$\beta_{P_{ок}} = -\frac{D'}{D_{АД}} = -\frac{f'_{ок}}{\Delta_0}. \quad (3.19)$$

7. Определение числовой апертуры объектива в пространстве изображений:

$$A'_{об} = n' \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{D'}{2f'_{ок}}\right), \quad (3.20)$$

или:

$$A'_{об} = n' \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{D'_{АД}}{2\Delta_0}\right). \quad (3.21)$$

8. Определение диаметра полевой диафрагмы микроскопа:

$$D_{\text{пд}} = 2y'_{\text{об}} = 2y_{\text{об}} \cdot \beta_{\text{об}} = 2f'_{\text{ок}} \cdot \text{tg}\omega', \quad (3.22)$$

где $2\omega'$ - угловое поле микроскопа в пространстве изображений.

9. Определение разрешающей способности микроскопа в линейной мере:

$$\delta = \frac{\lambda}{2A_{\text{об}}}, \quad (3.23)$$

где λ – длина волны света в мм.

10. Определение глубины резко изображаемого пространства:

$$T = T_a + T_g = \frac{250}{\Gamma_m^2} + \frac{\lambda}{2A_{\text{об}}^2}, \quad (3.24)$$

где T_a - аккомодационная глубина;

T_g - волновая глубина.

Если изображение проецируется на экране или в плоскости полевой диафрагмы располагается сетка, то $T_a = 0$, тогда:

$$T = T_g = \frac{\lambda}{2A_{\text{об}}^2}. \quad (3.25)$$

Из условия полного использования глазом разрешающей способности микроскопа, полагая разрешающую способность глаза $\Psi'_{\text{зи}} = 2' \div 4'$, получаем следующее соотношение для полезного увеличения микроскопа:

$$500A_{\text{об}} \leq \Gamma_m \leq 1000A_{\text{об}}. \quad (3.26)$$

Применение микроскопов с увеличением, больше полезного, не выявляет новых подробностей предмета, но при этом требуется более точная фокусировка, т.к. глубина резко изображаемого пространства уменьшается.

Подставляя в последнее выражение $\Gamma_m = \frac{500A}{D'}$, получим, что диаметр выходного зрачка лежит в пределах:

$$0,5\text{мм} \leq D'_p \leq 1\text{мм}. \quad (3.27)$$

Отсюда следует, что диаметр выходного зрачка микроскопа меньше диаметра зрачка глаза.

Величина Δ_0 изменяется от 160мм до 200мм в зависимости от фокусного расстояния объектива. Для того, чтобы выдержать эти значения, положение объективов при их установке на прибор фиксируется нижним срезом тубуса микроскопа.

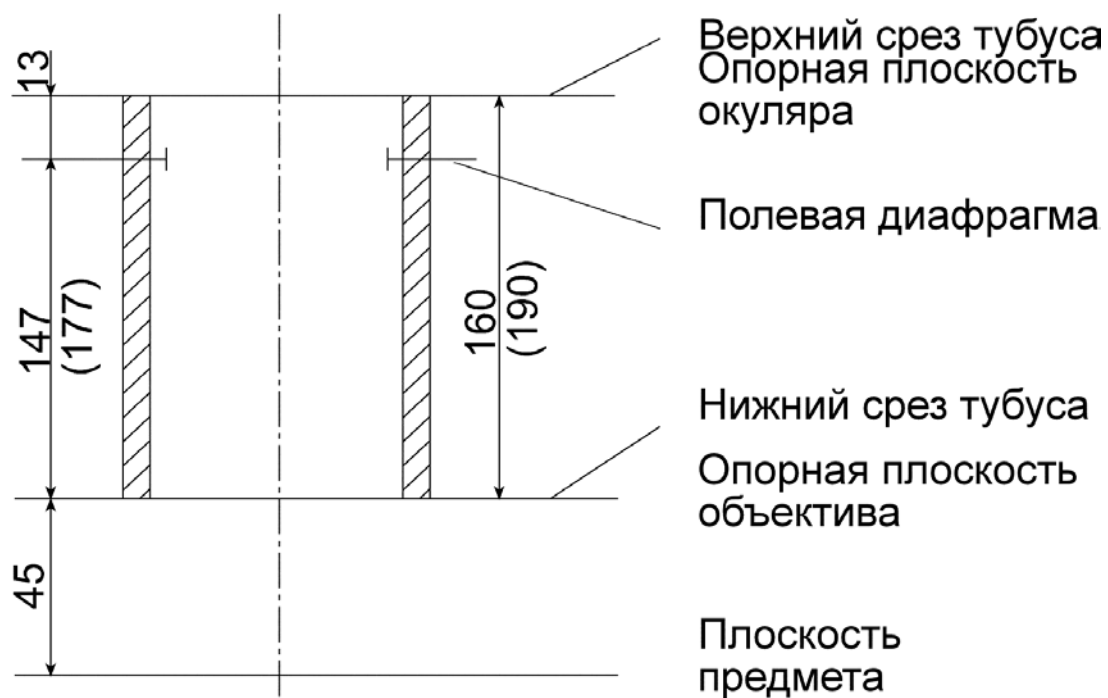


Рисунок 3.3. Схема тубуса упрощенного микроскопа.

Оправа окуляра опирается на верхний срез тубуса (рисунок 3.3). Расстояние от нижнего до верхнего среза тубуса называется механической длиной тубуса, которая стандартизована. Она равна 160мм для микроскопов, работающих в проходящем свете, и 190мм для микроскопов, работающих в отраженном свете. Остальные стандартные величины показаны на рисунке 3.3.

В комплект микроскопа входят наборы объективов и окуляров, позволяющие получать различные значения видимого увеличения микроскопа. На оправе объектива гравировается его линейное увеличение и числовая апертура, а на оправе окуляра – видимое увеличение. Тубус микроскопа (рисунок 3.3), в нижнюю часть которого ввертывается объектив, а в верхнюю – окуляр, имеет согласованные посадные размеры с оправками объективов и окуляров.

Увеличения объективов для проходящего и фокусные расстояния для отраженного света, для тубуса бесконечность, изменяются в геометрической прогрессии со знаменателем 1.6. Это соответствует ряду Ra5 (ГОСТ 6636-69). Номинальные значения видимых увеличений окуляров рекомендуется выбирать из ряда Ra10 и они соответствуют кратности: 4; 6.3; 10; 12.5; 16; 20; 25.

Известно также третья длина тубуса – бесконечность, встречающаяся в микроскопах, работающих в отраженном свете. В этом случае из объектива выходит параллельный пучок лучей, т.к. предмет расположен в передней

фокальной плоскости объектива (рисунок 3.4). Изображение расположено в задней фокальной плоскости тубусной линзы.

Тубусные линзы представляют собой двухлинзовый склеенный ахроматический объектив и имеют $f'_{м.л.} = 250; 190; 125\text{мм}$.

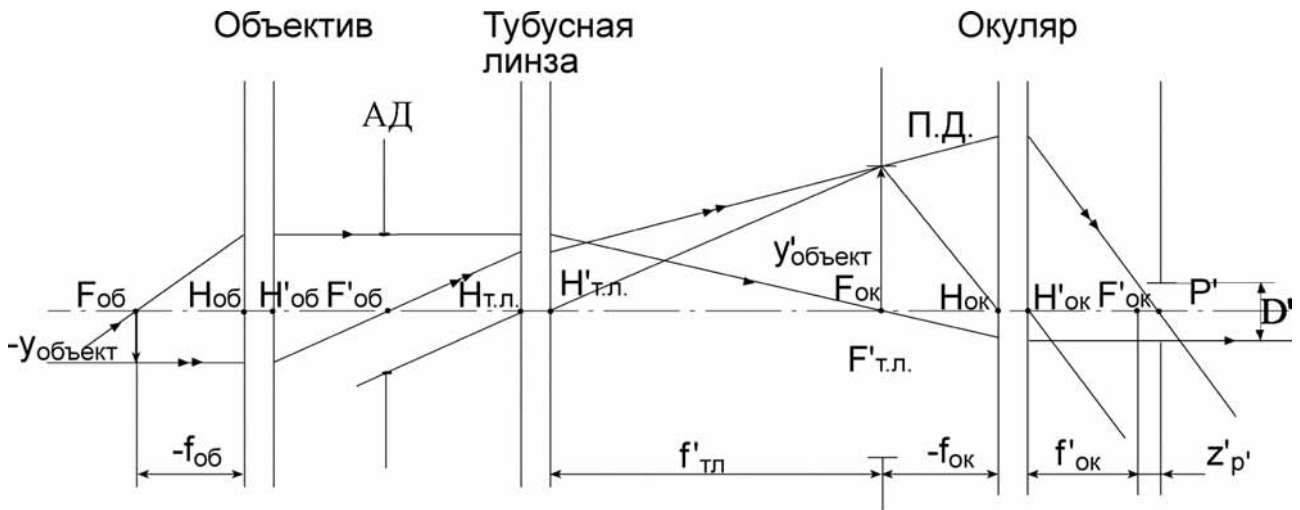


Рисунок 3.4. Ход лучей в наблюдательной части микроскопа, содержащей объектив с тубусом бесконечность.

Основные формулы для расчета

1. Линейное увеличение объективной части микроскопа, состоящей из объектива и тубусной линзы:

$$\beta_{об+т.л.} = -\frac{f'_{м.л.}}{f'_{об}} = -\frac{D_{ПД}}{2y_{об}}. \quad (3.28)$$

2. Видимое увеличение микроскопа:

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об+т.л.} \cdot \bar{\Gamma}_{ок} = -\frac{f'_{м.л.}}{f'_{об}} \cdot \bar{\Gamma}_{ок}. \quad (3.29)$$

3. Тубусная линза совместно с окуляром представляют собой телескопическую систему, видимое увеличение которой:

$$\bar{\Gamma}_{т.л.+окуляр} = -\frac{f'_{м.л.}}{f'_{ок}} = \frac{D_{АД}}{D'}. \quad (3.30)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{р'} = \frac{z_p \cdot f'^2_{ок}}{f'^2_{м.л.}}, \quad (3.31)$$

где z_p - расстояние от переднего фокуса тубусной линзы до апертурной диафрагмы.

Расстояние от апертурной диафрагмы до тубусной линзы колеблется от 0.05 до 0.75 фокусного расстояния линзы.

3. Указания по выполнению работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам рассчитать видимое увеличение микроскопа $\bar{\Gamma}$, числовую апертуру объектива $A_{об}$, разрешающую способность δ , диаметр выходного зрачка.

3.2. По апертуре $A_{об}$ выбирается микрообъектив. Если микрообъектив имеет конечную длину тубуса, то в каталоге указаны $\beta_{об}$, линейное поле объектива в пространстве предметов $2y_{об}$, линейное поле микроскопа в пространстве изображений $2y'_{об} = D_{пд}$, расстояние от первой поверхности объектива до плоскости предметов, расстояние от последней поверхности объектива до изображения.

В отчете представить конструктивные параметры объектива, параксиальные характеристики: $f'_{об}$, $S'_{F'}$, S_F , $S'_{H'}$, S_H и чертеж объектива с указанием отрезков S' и S .

3.3. Далее необходимо рассчитать диаметр апертурной диафрагмы $D_{ад}$; оптическую длину тубуса; видимое увеличение окуляра, его фокусное расстояние; увеличение окуляра в зрачках; удаление выходного зрачка.

3.4. По фокусному расстоянию окуляра $f'_{ок}$ и размеру полевой диафрагмы $D_{лд}$ выбрать из каталога окуляр визуальной части микроскопа.

В микроскопии применяются следующие типы окуляров: Гюйгенса, Кельнера, Аббе (ортоскопические), симметричные, широкоугольные, компенсационные.

Окуляры Гюйгенса и Кельнера применяются в микроскопах совместно с объективами ахроматами. Угловые поля $2\omega'$ и удаления выходных зрачков

$S'_{p'}$ этих окуляров соответственно $2\omega' = 30^\circ$ и $2\omega' = 40^\circ \div 50^\circ$, $S'_{p'} \cong \frac{f'_{ок}}{3}$ и

$$S'_{p'} = \frac{f'_{ок}}{2}.$$

Симметричные окуляры применяются в основном для микрофотографирования и реже для визуального наблюдения, для них $2\omega' = 40^\circ$, $S'_{p'} \cong 0,75f'_{ок}$. Окуляры Аббе (ортоскопические) применяются

совместно с объективами ахроматами средних апертур при больших увеличениях. Угловые поля этих окуляров $2\omega' = 40^\circ$ и $S'_{p'} \cong 0,75f'_{ок}$. Для компенсации хроматизма увеличения объективов апохроматов с плоским полем применяются компенсационные окуляры. Фокусное расстояние окуляра не пересчитывается. Поэтому при несоответствии рассчитанного фокусного расстояния с фокусным расстоянием из каталога, необходимо уточнить видимое увеличение микроскопа по формуле:

$$\bar{\Gamma} = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}, \quad (3.32)$$

$$\text{где } \Gamma_{ок} = \frac{250}{f'_{ок \text{ из каталога}}}. \quad (3.33)$$

В отчете представить чертеж окуляра с указанием отрезков $S'_{F'}$ и S'_F , положения и размера полевой диафрагмы, конструктивные и параксиальные характеристики окуляра.

3.5. При расчете визуальной части микроскопа с тубусной линзой по апертуре $A_{об}$ выбирают микрообъектив с тубусом бесконечность. Для такого объектива известны фокусное расстояние $f'_{об}$, линейное поле в пространстве предметов $2y_{об}$, расстояние от первой поверхности до плоскости предметов.

Тубусная линза выбирается из каталога двухлинзовых объективов по относительному отверстию, угловому полю, фокусному расстоянию. Относительное отверстие ее не превышает, как правило, 1:10. Угловое поле определяется по формуле:

$$tg\omega_{м.л.} = \frac{D_{пд}}{2f'_{м.л.}} = \frac{y'_{об}}{f'_{м.л.}}. \quad (3.34)$$

Входным зрачком для тубусной линзы является апертурная диафрагма визуальной части микроскопа. Расстояние от апертурной диафрагмы до тубусной линзы колеблется от 0.05 до 0.75 фокусного расстояния линзы.

3.6. В микроскопах средних и больших увеличений, содержащих сложные объективы, апертурной диафрагмой служит оправа одной из последних линз объектива или специальная диафрагма, устанавливаемая между последней линзой и задним фокусом объектива. В микроскопах малых увеличений с простыми объективами, а также в визирных микроскопах, применяемых в геодезических и контрольно-измерительных приборах, апертурной диафрагмой является оправа объектива. В отсчетных микроскопах апертурная диафрагма устанавливается в задней фокальной плоскости объектива, что обеспечивает

телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов. Это ослабляет влияние параллакса на точность измерений.

3.7. Далее необходимо определить все расстояния между компонентами и представить оптическую схему визуальной части упрощенного микроскопа. На этом чертеже необходимо указать также основные характеристики: $\bar{\Gamma}$ - видимое увеличение, $2y_{об}$ - линейное поле микроскопа в пространстве предметов, $A_{об}$ - числовая апертура, S'_p - удаление выходного зрачка от последней поверхности окуляра.

3.8. По программе «Опал» определяются aberrации объектива и окуляра в обратном ходе, и в отчете приводятся таблицы и графики aberrаций.

4. Задания для работы

№ варианта	Числовая апертура, $A_{об}$	Разрешающая способность, δ (мм)	Видимое увеличение, $\bar{\Gamma}$	Фокусное расстояние тубусной линзы, $f'_{т.л.}$ (мм)
1	0,1	-	-	-
2	0,2	-	-	-
3	0,3	-	-	-
4	0,4	-	-	-
5	0,5	-	-	-
6	0,6	-	-	-
7	0,7	-	-	-
8	0,8	-	-	-
9	0,9	-	-	-
10	1,0	-	-	-
11	1,1	-	-	-
12	1,2	-	-	-
13	0,1	-	-50^X	-
14	0,2	-	-100^X	-
15	0,3	-	-150^X	-
16	0,4	-	-200^X	-
17	0,5	-	-250^X	-
18	0,6	-	-300^X	-

19	0,7	-	-350 ^x	-
20	-	-	-400 ^x	-
21	-	-	-450 ^x	-
22	-	-	-500 ^x	-
23	-	0,0025		
24	-	0,0018		
25	-	0,0014		
26	-	0,0011		
27	-	0,0009		
28	-	0,00078		
29	-	0,00068		
30	-	0,00061		
31	-	0,00055		
32	-	0,0005		
33	-	0,00045		
34	-	-	-200 ^x	250
35	-	-	-220 ^x	250
36	-	-	-250 ^x	190
37	-	-	-270 ^x	190
38	-	-	-300 ^x	190
39	-	-	-350 ^x	190

Работа №4

«Микропроекционная система»

Цель работы: закрепление знаний теоретического материала и расчет микропроекционной установки без системы освещения.

1. Задание для работы

1.1. Исходя из заданных параметров всей системы, рассчитать оптические характеристики микрообъектива и окуляра.

1.2. Подобрать из библиотеки оптических систем «Опал» микрообъектив и окуляр.

1.3. Составить оптическую систему микропроекционной установки, определив расстояние между компонентами, положение апертурной и полевой диафрагм, выходного зрачка системы.

1.4. Определить световые диаметры микрообъектива и окуляра и выполнить построение хода апертурного, главного и крайних лучей наклонного пучка.

1.5. Определить aberrации микропроекционной системы.

2. Краткая теория

Микропроекционные системы используются для получения изображения микрообъектов на экране или их фотографирования. При этом для получения достаточно яркого изображения объект должен быть освещен мощным источником света. На рисунке 4.1. приведена принципиальная схема микропроекционной установки.

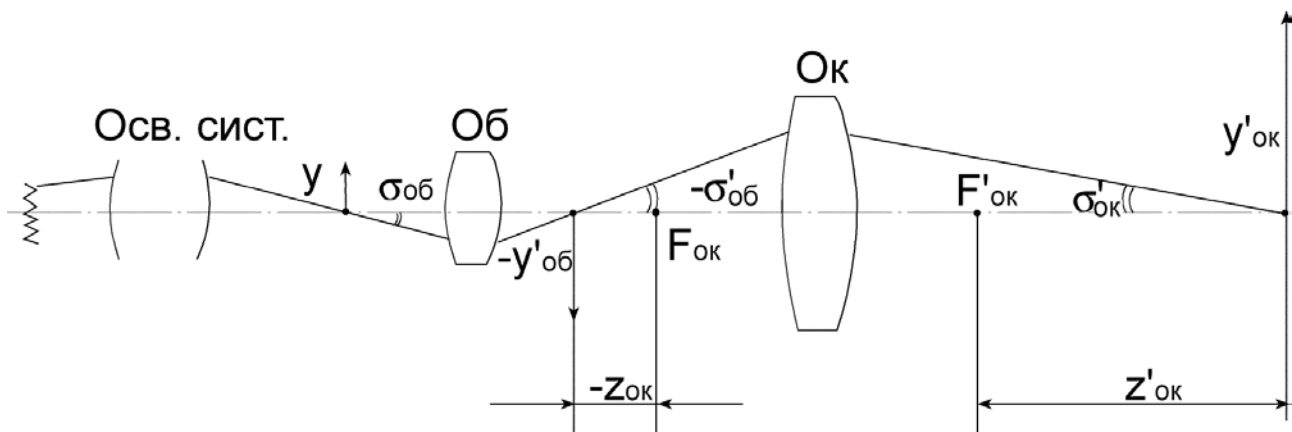


Рисунок 4.1. Принципиальная схема микропроекционной установки.

Объект с помощью осветительной системы освещается источником света, имеющим большую яркость. Методика расчета этой системы та же, что и для визуального микроскопа.

Изображение $y'_{об}$ предмета y , создаваемое объективом, переносится окуляром на экран размером $y'_{ок}$.

Так как экран находится на конечном расстоянии, окуляр необходимо выдвинуть из тубуса микроскопа на величину $z_{ок}$. При этом общее увеличение на экране:

$$\beta_M = \beta_{об} \cdot \beta_{ок}, \quad (4.1)$$

где $\beta_{ок} = \frac{f'_{ок}}{z_{ок}}$.

Расстояние от заднего фокуса окуляра до экрана:

$$z'_{ок} = -\beta_{ок} f'_{ок}. \quad (4.2)$$

Из закона синусов:

$$\beta = \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'}, \quad (4.3)$$

находим:

$$\sin \sigma'_{ок} = \frac{\sin \sigma_{об}}{\beta_M}, \quad (4.4)$$

где $\sin \sigma$ - числовая апертура объектива.

Освещенность на экране можно определить по формуле:

$$E = \tau \pi L \sin^2 \sigma'_{ок}, \quad (4.5)$$

или:

$$E = \tau \pi L \frac{\sin^2 \sigma_{об}}{\beta_M^2}, \quad (4.6)$$

где τ - коэффициент пропускания системы.

Из последней формулы и следует, что при больших увеличениях надо брать мощные источники света и микрообъективы с большой апертурой.

Разрешающая способность микропроекционной установки на экране может быть определена как:

$$\delta' = \delta_{об} \cdot \beta_M = \frac{\lambda}{2A} \beta_M, \quad (4.7)$$

или в линиях на миллиметр:

$$N = \frac{1}{\delta'} = \frac{2A}{\lambda \beta_M}. \quad (4.8)$$

При этом предполагается, что окуляр не ухудшает качество изображения. Наличие аберраций в окуляре снижает разрешающую способность на экране.

Если на место экрана поставить фотопленку, то можно сфотографировать объект. Время выдержки определяется освещенностью изображения и светочувствительностью фотопленки.

Для получения высокого качества применяются планахроматические и планapoхроматические объективы и специальные проекционные и фотографические окуляры с плоским полем изображения.

3. Указания по выполнению работы

Исходя из полученного варианта задания необходимо рассчитать недостающие характеристики:

- Размер предмета или изображения;
- Увеличение объектива, окуляра или всей микропроекционной установки;
- Необходимую апертуру микрообъектива.

При подборе компонентов из библиотеки оптических систем «Опал» необходимо помнить, что при выборе объектива с апертурой меньше необходимой не получается требуемое разрешение, а при неоправданном увеличении апертуры объектив приходится выбирать с большим увеличением, что приводит к уменьшению линейного поля.

При аберрационном расчете микропроекционной установки необходимо обратить внимание на то, что у сильных микрообъективов задний фокус, как правило, находится внутри последнего компонента и там не может находиться апертурная диафрагма, роль которой в этом случае выполняет оправа последней линзы объектива.

4. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- 4.1. Расчеты, выполненные по формулам;
- 4.2. Схема микропроекционной установки с указанием положения объекта, экрана, полевой и апертурной диафрагм;
- 4.3. Данные расчетов на ПК;
- 4.4. Таблицы и графики аберраций.

5. Литература

1. Теория оптических систем. Заказнов Н.П. и др., М., Машиностроение, 1992г.
2. Прикладная оптика. Дубовик А.С. и др., М., Недра, 1992г.
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Панков В.А. и др., Л., Машиностроение, 1980г.
4. Методические указания по габаритному расчету и выбору компонентов оптической системы микроскопа. Л., ИТМО, 1990г.

6. Задания для работы

Таблица 4.1

№ вар.	Размер экрана или фотошленки, мм ²	Апертура объектива	Размер изображ. после объектива, мм.	Увеличение установки	Увеличение объектива	Увеличение фотоокуляра	Фокусное расстояние объектива, мм.
1	24x36	0.3	15	-	-	-	-
2	∅ 180	-	-	100 ^X	-	10 ^X	-
3	90x120	0.4	10	-	-	-	-
4	∅165	-	11	-	20 ^X	-	-
5	∅100	-	12	180 ^X	-	-	-
6	24x36	-	15	-	40 ^X	-	-
7	-	-	11	120 ^X	10 ^X	-	-
8	-	0.5	18	200 ^X	-	-	-
9	∅180	-	18	-	20 ^X	-	-
10	∅150	0.4	10	100 ^X	-	-	-
11	-	-	-	-	20 ^X	9 ^X	-
12	-	0.75	-	-	-	8 ^X	-
13	-	0.4	-	-	-	7 ^X	-
14	-	0.2	-	-	-	11 ^X	-
15	∅150	0.2	-	-	-	12 ^X	-
16	-	0.4	-	-	-	13 ^X	-
17	∅130	-	-	100 ^X	-	10 ^X	-
18	90x125	-	-	-	3.5 ^X	-	-
19	∅200	-	-	-	6.3 ^X	-	-

20	Ø210	-	-	-	6.1 ^X	-	-
21	-	-	-	-	6.3 ^X	-	-
22	-	0.75	-	-	40 ^X	10 ^X	-
23	-	-	-	200 ^X	-	10 ^X	23
24	-	0.5	-	150 ^X	-	-	14
25	-	0.65	-	-	-	15 ^X	17
26	-	0.4	-	200 ^X	-	-	7
27	Ø190	0.5	-	220 ^X	-	-	-
28	-	0.4	-	-	-	5	-
29	-	0.2	-	180 ^X	-	-	25
30	-	0.5	-	210 ^X	-	-	16
31	-	0.4	-	200 ^X	-	-	8
32	-	0.25	-	210 ^X	-	-	20
33	Ø200	0.65	-	-	-	-	6.3
34	Ø130	0.2	-	-	-	-	10
35	100x120	0.2	-	-	-	-	12.5
36	120x150	0.1	-	-	-	-	32
37	90x130	0.1	-	-	-	-	40
38	-	0.3	-	210 ^X	-	-	20
39	24x36	0.4	15	-	-	-	-
40	Ø200	-	-	100 ^X	-	-	-
41	100x120	0.4	10	-	-	-	-
42	Ø165	-	11	-	20 ^X	-	-
43	Ø110	-	15	180 ^X	-	-	-
44	24x36	-	11	-	40 ^X	-	-
45	-	-	11	130 ^X	15 ^X	-	-
46	-	0.5	15	210 ^X	-	-	-
47	Ø190	-	16	-	20 ^X	-	-
48	Ø155	0.4	12	120 ^X	-	-	-
49	-	-	-	-	20 ^X	9 ^X	-
50	-	0.75	-	-	-	8 ^X	-

Работа №5

«Простая телескопическая система»

Цель работы: приобретение практических навыков габаритного расчета и анализа аберраций простой зрительной трубы.

1. Задание для работы

В соответствии с индивидуальным заданием (таблицы 5.1 и 5.2) необходимо:

1.1. Исходя из заданных характеристик телескопической системы, выполнить габаритный расчет, который включает в себя определение фокусных расстояний объектива и окуляра, длины трубы, угловых полей в пространстве предметов и изображений, размеров входного и выходного зрачков, их положений в системе, размеры полевой диафрагмы, диаметров объектива и окуляра, размеров граней призмы.

1.2. По полученным данным подобрать объектив и окуляр из каталогов оптических систем программы «ОПАЛ».

1.3. Составить телескопическую систему и определить расстояния между компонентами.

1.4. Выполнить построение хода апертурного, главного и двух наклонных лучей.

1.5. Определить аберрации простой зрительной трубы.

2. Краткая теория

Телескопические системы, или зрительные трубы составляют большую группу оптических приборов: астрономических наблюдательных телескопов, геодезических, стереоскопических, контрольно-измерительных приборов, биноклей, прицелов, дальномеров и т.п.

Телескопическая система предназначена для наблюдения удаленных предметов. Пучки лучей, входящие в телескопическую систему, можно принять за параллельные, т.к. входные зрачки значительно меньше расстояний до предметов, наблюдаемых в эти приборы. Поэтому числовая апертура в пространстве предметов равна нулю:

$$A = n \cdot \sin|\sigma_A| = 0. \quad (5.1)$$

Телескопическая система работает непосредственно с глазом наблюдателя. Для устранения напряжения аккомодации необходимо, чтобы изображение, создаваемое системой, находилось на бесконечности. Поэтому числовая апертура в пространстве изображений также равна нулю:

$$A' = n' \cdot \sin|\sigma_A'| = 0. \quad (5.2)$$

Выходящие пучки лучей должны быть параллельными.

Простые зрительные трубы состоят из двух компонентов: объектива и окуляра.

Для того, чтобы параллельный пучок лучей, попавший в телескопическую систему, вышел из нее параллельным необходимо совместить задний фокус объектива с передним фокусом окуляра. При этом оптический интервал Δ - расстояние между точкой F'_1 заднего фокуса объектива и точкой F_2 переднего фокуса окуляра – равнялся нулю:

$$\Delta = 0. \quad (5.3)$$

В системах с таким ходом лучей фокусное расстояние равно бесконечности, а оптическая сила равна нулю, и они также называются афокальными. Телескопические системы можно использовать не только для наблюдения удаленных предметов, но и в качестве коллимирующих систем для формирования излучения лазеров, а также как устройство для изменения увеличений (вращающиеся телескопические системы).

Для телескопической системы видимое Γ_T , линейное β , угловое γ и продольное α увеличения являются постоянными величинами, не зависящими от положения предмета и связанными друг с другом следующими зависимостями:

$$\beta = \frac{n}{n' \Gamma_T} = const \quad (5.4)$$

$$\gamma = \Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = const \quad (5.5)$$

$$\alpha = \frac{n}{n' \Gamma_T^2} = const \quad (5.6)$$

При видимом увеличении $\Gamma_T \neq 1$ происходит искажение видимого через зрительную трубу оптического изображения, т.к. увеличение $\beta \neq \alpha$. При $\Gamma_T > 1$ продольное увеличение $\alpha < \beta$, и пространственное изображение будет представляться сжатым в осевом направлении. Такое искажение перспективы есть результат невыполнения условия естественного впечатления $\Gamma_T = 1$. При этом условии $\beta = \alpha$ и искажение отсутствует. Простые телескопические системы, выполненные по схемам Кеплера и Галилея, представлены на рисунке 5.1.

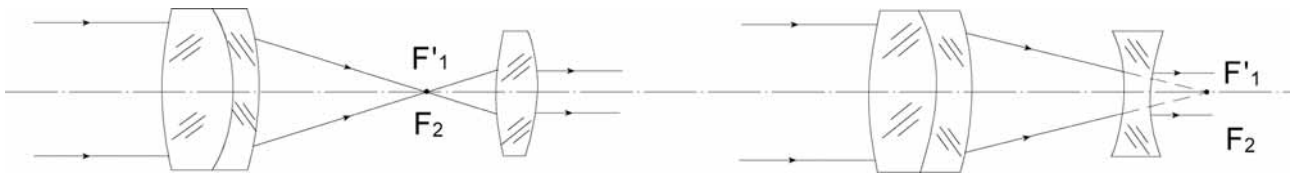


Рис. 5.1. Схема простых телескопических систем. а) Зрительная труба Кеплера. б) Зрительная труба Галилея.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение Γ_T , угловое поле в пространстве предметов 2ω , диаметр выходного зрачка D' . другими важными характеристиками являются длина системы, удаление выходного зрачка a'_p , (или от последней поверхности окуляра S'_p), коэффициент виньетирования, угловая разрешающая способность φ .

Габаритный расчет трубы Кеплера

В телескопической системе Кеплера фокусные расстояния объектива и окуляра положительные ($f'_1 > 0$, $f'_2 > 0$), поэтому видимое увеличение $\Gamma_T = -\frac{f'_1}{f'_2} < 0$ и изображение перевернутое. Труба Кеплера имеет действительное промежуточное изображение, расположенное в задней фокальной плоскости объектива и совпадающей с ней передней фокальной плоскостью окуляра. В этой же плоскости расположено визирное устройство (сетка, шкала), оправа которой служит полевой диафрагмой. Достоинством зрительной трубы Кеплера является использование сетки с делением и отсутствие виньетирования.

Апертурная диафрагма совпадает с оправой объектива или вынесена вперед, там же расположен входной зрачок. Положение выходного зрачка определяется ходом главного луча, а его размер – ходом апертурного луча. В визуальных телескопических системах глаз наблюдателя совмещен с выходным зрачком системы. На рисунке 5.2 представлена оптическая схема с ходом лучей трубы Кеплера из тонких компонентов при двух положениях входного зрачка.

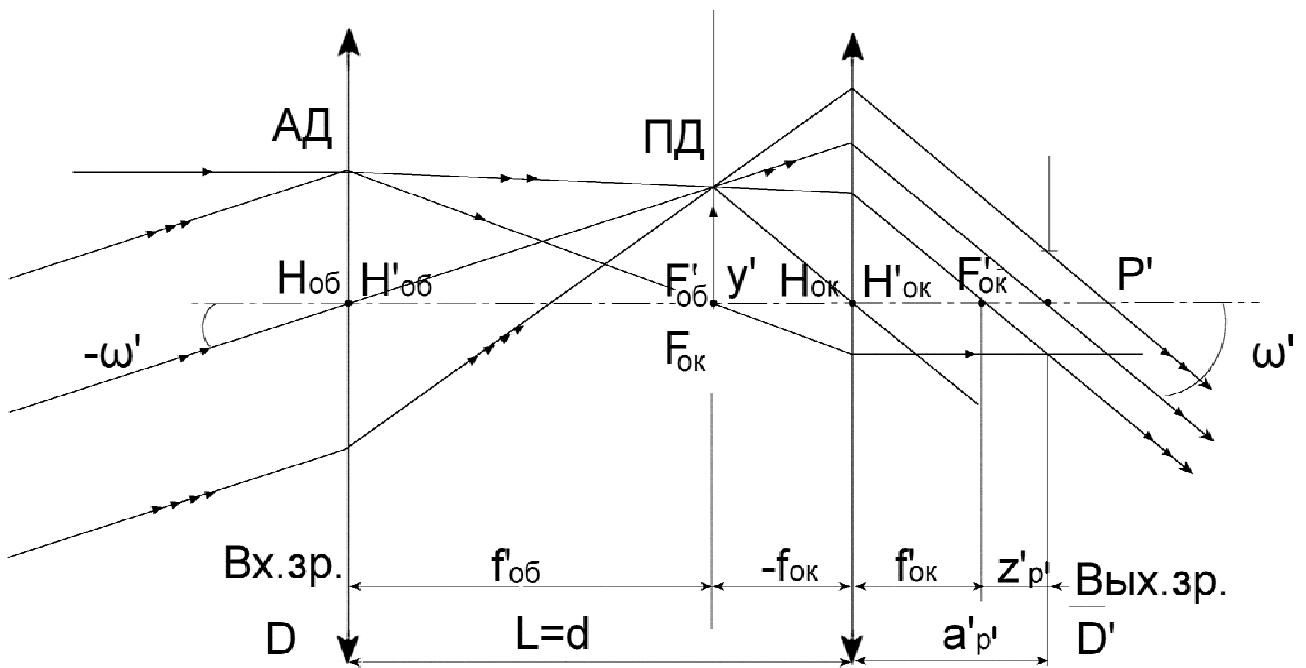


Рис. 5.2. а) Ход лучей в трубе Кеплера при $a_p = 0$.

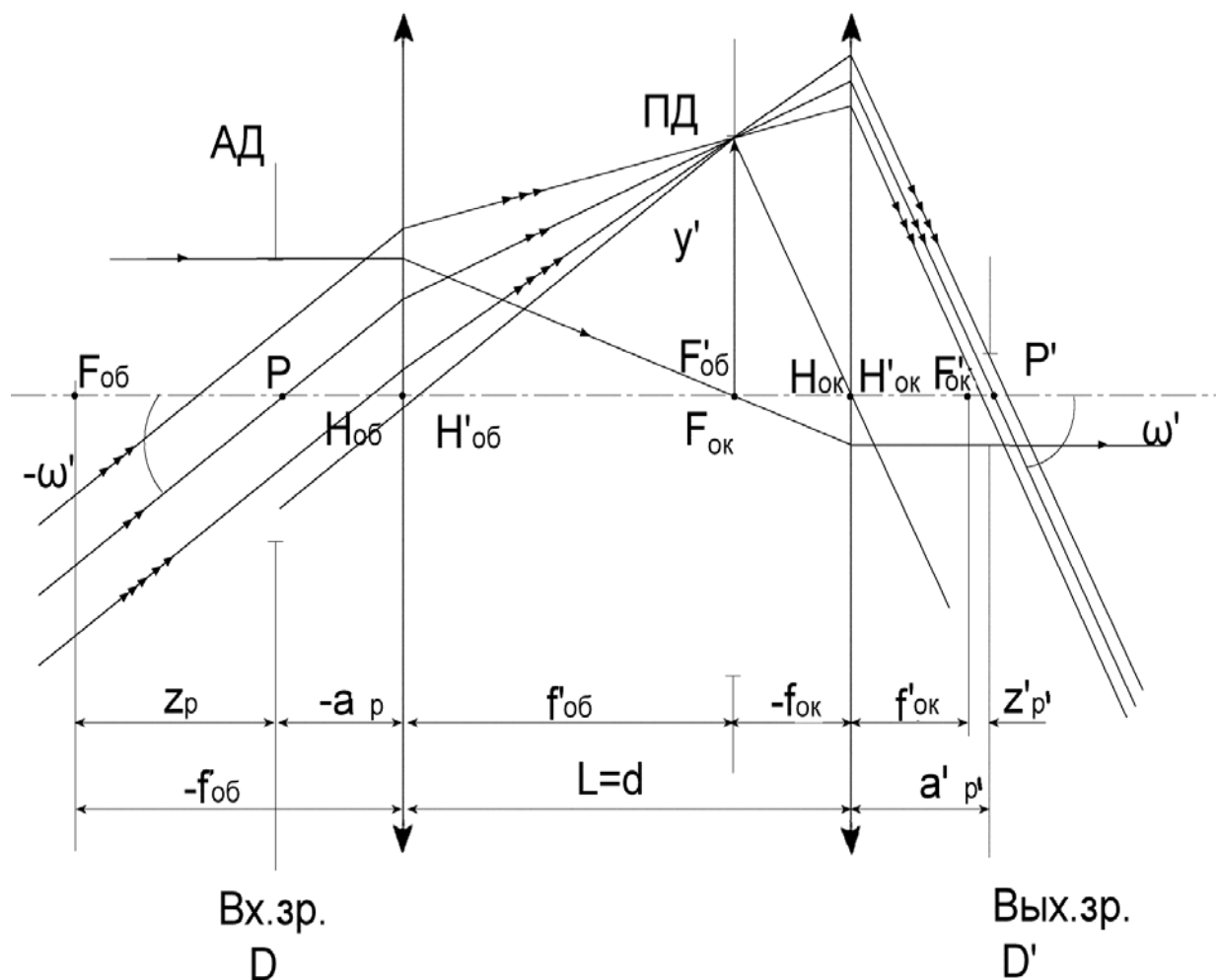


Рис. 5.2. б) Ход лучей в трубе Кеплера при $a_p \neq 0$ и виньетировании 50%.

Основные формулы для габаритного расчета трубы Кеплера

1. Видимое увеличение:

$$\Gamma_T = \frac{tg\omega'}{tg\omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (5.7)$$

2. Расстояние между компонентами:

$$d = f'_1 + f'_2. \quad (5.8)$$

3. Размер полевой диафрагмы:

$$D_{пл} = 2f'_1 \cdot tg\omega = 2f'_2 \cdot tg\omega'. \quad (5.9)$$

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

$$z'_{p'} = \frac{z_p}{\Gamma_T^2}. \quad (5.10)$$

где z_p - расстояние входного зрачка от переднего фокуса объектива.

Затем определяем удаление выходного зрачка от совмещенных главных плоскостей окуляра $a'_{p'}$:

$$a'_{p'} = f'_2 + z'_{p'}. \quad (5.11)$$

5. Определение диаметров объектива и окуляра:

$$D_{об} = 2(a_p tg\omega + m), \quad (5.12)$$

$$D_{ок} = 2(a'_p tg\omega' + m'), \quad (5.13)$$

где a_p - расстояние от совмещенных главных плоскостей объектива до входного зрачка;

m - ордината крайнего луча наклонного пучка лучей во входном зрачке

m' - ордината крайнего луча наклонного пучка лучей в выходном зрачке

При этом коэффициент виньетирования определяется выражением:

$$R_V = \frac{D - \bar{D}}{D}, \quad (5.14)$$

где D - диаметр входного зрачка;

\bar{D} - ширина наклонного пучка лучей, измеренная в плоскости входного зрачка.

$$\bar{D} = 2m, \quad (5.15)$$

$$|\Gamma_T| = \frac{m}{m'}. \quad (5.16)$$

6. Разрешающая способность в радианах, согласно дифракционной теории, определяется выражением:

$$\varphi = \frac{1,22\lambda}{D}. \quad (5.17)$$

Если принять $\lambda = 0,000556 \text{ м}$ и осуществить переход от радиан к секундам, то:

$$\varphi = \left(\frac{140}{D} \right)'' . \quad (5.18)$$

В этом случае контраст между дифракционными изображениями точек составляет 22,5%. Этот критерий используется для приборов серийного и массового изготовления. По астрономическому критерию глаз способен различать контраст порядка 5%, тогда:

$$\varphi = \left(\frac{120}{D} \right)'' . \quad (5.19)$$

Последняя формула используется для определения разрешающей способности точных приборов.

7. Угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза:

$$\varphi_{\text{эл}} = \frac{60''}{\Gamma_T}. \quad (5.20)$$

8. Необходимое перемещение окуляра для компенсации недостатков зрения:

$$\Delta = \frac{f_2'^2}{\frac{1000}{A_D} + z'_{p'}}, \quad (5.21)$$

где A_D - аметропия глаза в диоптриях;

$z'_{p'}$ - расстояние от заднего фокуса окуляра до глаза.

Далее рассмотрим телескопическую систему Галилея. Фокусное расстояние объектива в трубе Галилея положительное ($f'_1 > 0$), а фокусное расстояние окуляра отрицательное ($f'_2 < 0$), видимое увеличение

$\Gamma_T = -\frac{f'_1}{f'_2} > 0$ и система дает прямое изображение.

Апертурной диафрагмой в системе «Труба + глаз» является зрачок глаза наблюдателя. Он же является выходным зрачком системы. Поскольку в

трубе нет действительного промежуточного изображения, то отсутствует полевая диафрагма, и, следовательно, нет визирного устройства – сетки с делениями. Поэтому такую телескопическую систему можно использовать в театральных, туристических биноклях, в качестве коллимирующих систем лазерного излучения (обратные системы).

На рисунке 5.3 представлена оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

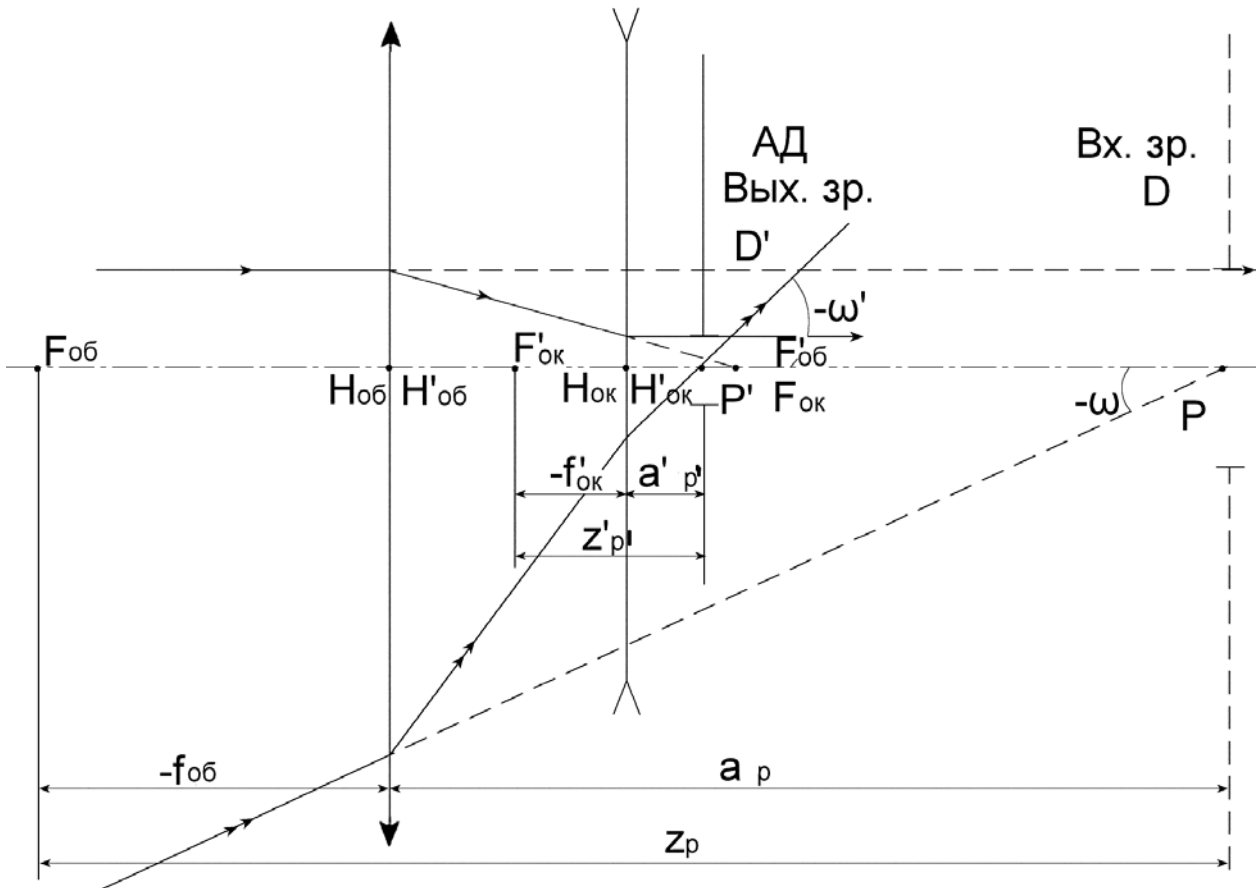


Рис. 5.3. Оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

Размер и положение зрачка глаза наблюдателя определяют размер и положение апертурной диафрагмы. Отрезок $a'_{p'}$ является исходным данным для габаритного расчета трубы Галилея.

Положение входного зрачка a_p находим по формуле:

$$a_p = a'_{p'} \Gamma_T^2 + f'_1 (\Gamma_T - 1). \quad (5.22)$$

Из формулы следует, что входной зрачок мнимый и всегда располагается за телескопической системой.

Угловое поле в трубе Галилея ограничивается виньетирующей диафрагмой, роль которой выполняет оправка объектива. В зависимости от

степени виньетирования угловое поле в пространстве предметов можно рассчитать по следующим формулам:

а) при отсутствии виньетирования:

$$tg\omega = \frac{\frac{D_{об} - D}{2}}{a_p}; \quad (5.23)$$

б) при виньетировании 50%:

$$tg\omega = \frac{D_{об}}{2a_p}; \quad (5.24)$$

в) при виньетировании 100%:

$$tg\omega = \frac{\frac{D_{об} + D}{2}}{a_p}. \quad (5.25)$$

При виньетировании 50% диаметры объектива и окуляра определяются выражениями:

$$D_{об} = D_{ок} = 2a_p \cdot tg\omega, \quad (5.26)$$

$$D_{ок} = 2a'_p \cdot tg\omega'. \quad (5.27)$$

3. Указания для выполнения лабораторной работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам рассчитать фокусные расстояния объектива f'_1 и окуляра f'_2 , угловые поля в пространстве предметов 2ω и изображений $2\omega'$, положения и размеры входного и выходного зрачков (a_p , D , a'_p , D').

Определить длину системы d , размер полевой диафрагмы (в трубе Кеплера) D_{IA} , относительное отверстие объектива D/f'_1 , угловой предел разрешения, определяемый дифракцией, и угловой предел разрешения, учитывающий свойства глаза, диаметры объектива и окуляра.

4.1. По фокусному расстоянию объектива f'_1 , относительному отверстию D/f'_1 и угловому полю 2ω подобрать объектив. В качестве объективов в простых зрительных трубах часто используются склеенные объективы. Конструктивные данные этих объективов можно найти в книге М.М. Русинова «Габаритные расчеты оптических систем», а также в

«Методических указаниях по габаритному расчету и выбору компонентов телескопических систем» Л., 1989, ИТМО.

Двухлинзовые склеенные объективы с различными фокусными расстояниями целесообразно применять при следующих относительных отверстиях:

f'_1 , мм	100	≤ 300	≤ 500	≤ 1000
D/f'_1 , не более	1:4	1:5	1:6	1:10

Угловое поле объектива не превышает $10-12^\circ$ при малых фокусных расстояниях и $7-10^\circ$ при больших.

Из каталога следует выбирать объективы с тем же относительным отверстием, что и расчетное, или же с несколько большим.

Угловое поле выбранного объектива должно быть равно или больше рассчитанного углового поля.

Фокусное расстояние выбранного объектива обычно не совпадает с рассчитанным, поэтому делают пересчет объектива. Для этого определяют коэффициент пересчета $K_{пер}$, равный отношению фокусного расстояния рассчитанного объектива к фокусному расстоянию объектива каталога:

$$K_{пер} = \frac{f'_{расчет}}{f'_{каталог}} \quad (5.28)$$

Величины радиусов, толщин, фокусных расстояний, отрезков S_H , $S'_{H'}$, S_F и $S'_{F'}$ умножаются на этот коэффициент. Желательно, чтобы коэффициент был в пределах от 0,5 до 2,5.

Расстояние до входного зрачка S_p у выбранного объектива должно быть равным или большим, чем у рассчитанного объектива. Следует также сравнить световые диаметры объектива из каталога и рассчитанного. Световой диаметр выбранного объектива должен быть больше или равен диаметру расчетного объектива.

Конструктивные данные и чертеж объектива с указанием фокусных расстояний, отрезков S_H , $S'_{H'}$, S_F и $S'_{F'}$, главных плоскостей, расстояний между ними приводится в отчете.

5.1. Окуляр. При расчете зрительной трубы Кеплера окуляры выбирают из каталога по угловому полю $2\omega'$ и фокусному расстоянию.

Угловое поле $2\omega'$ окуляра каталога должно равняться или быть немного больше $2\omega'$ расчетного.

Если рассчитанное фокусное расстояние окуляра отличается от стандартного, то для данной лабораторной работы необходимо произвести пересчет окуляра с учетом коэффициента пересчета $K_{пер}$ (см. пункт 3.2)

Конструктивные данные и чертеж окуляра с указанием фокусных расстояний, отрезков S_H , S'_H , S_F и S'_F , главных плоскостей, расстояний между ними приводятся в отчете.

6.1. При расчете трубы Галилея входной зрачок расположен за телескопической системой и является мнимым. Так как в каталоге ограничен выбор объективов с вынесенным входным зрачком, то условие $a_{Р_{каталог}} \geq a_{Р_{расчет}}$ выполнить трудно. В этом случае можно выбрать объектив с большим относительным отверстием, чтобы диаметр выбранного объектива был равен или больше диаметра рассчитанного объектива.

Отрицательную линзу, используемую в качестве окуляра трубы Галилея, следует рассчитать самостоятельно. Зная диаметр окуляра, нужно задать толщину линзы равной или большей, чем $0,1D$. Линзу можно выполнить из стекла К8, при этом ее форма – плосковогнутая, либо двояковогнутая $r_1 = -r_2$. Радиусы кривизны и положения главных плоскостей определяется по формулам:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}, \quad (5.29)$$

$$S'_F = f' \left(1 - \frac{(n-1)d}{nr_1}\right), \quad (5.30)$$

$$S_F = -f' \left(1 + \frac{(n-1)d}{nr_2}\right), \quad (5.31)$$

$$S'_H = S'_F - f', \quad (5.32)$$

$$S_H = S_F - f. \quad (5.33)$$

7.1. С учетом виньетирования, заданного в работе, выполняется ход лучей на миллиметровой бумаге в масштабе. Построить следует апертурный, главный и два наклонных луча.

8.1. Расчет призм.

Призма или призмные системы вводятся в простую зрительную трубу Кеплера для получения прямого изображения, сокращения габаритов оптической системы, компенсации вращения изображения, получения заданного угла между оптическими осями объектива и окуляра, который должен обеспечить удобное положение головы наблюдателя.

Особенность габаритного расчета оптической системы с призмами состоит в том, что необходимо определить положение и габариты призм. Для этого необходимо: 1) найти задний фокальный отрезок объектива S'_{F_1} ; 2) световой диаметр объектива; 3) размер полевой диафрагмы; 4) передний фокальный отрезок окуляра S_{F_2} и фокусное расстояние окуляра; 5) учесть, что в процессе расчета призмы заменяются эквивалентными плоскопараллельными пластинами, которые затем редуцируются, т.е. заменяются эквивалентными воздушными пластинами, причем:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n}. \quad (5.34)$$

Такие замены возможны, если первая и последняя грани призмы перпендикулярны к оптической оси;

Положение призмы в заданном коническом пучке зависит от различных конструктивных требований.

Для получения наименьших габаритов призмы ее нужно помещать ближе к узкой части светового конуса. Когда призма создает перископичность, ее положение определяется необходимостью обеспечения значения перископичности. Заднюю грань призмы не следует располагать слишком близко к передней фокальной плоскости окуляра, т.к. все дефекты стекла (пузыри, мелкие царапины, пылинки) видны и мешают наблюдению. Оптимальное положение призмы, определяемое отрезком z , будет таким, при котором ее последняя поверхность размещается перед окуляром так, что изображение поверхности в поле окуляра получается вне пределов аккомодации глаза наблюдателя:

$$z \geq 0,01 f_2'^2 \quad (5.35)$$

Выбрав положение выходной грани, проводят вспомогательную прямую под углом γ к оси до пересечения с краем пучка лучей (рисунок 5.4). Угол γ находим по формуле:

$$\text{tg} \gamma = \frac{n}{2k}, \quad (5.36)$$

где n – показатель преломления стекла призмы;

k – коэффициент, характеризующий тип призмы, он определяется из справочника.

Добавляя 1 ÷ 2 мм на крепление и юстировку призмы, проводят прямую, определяющую положение входной грани призмы. Диаметр призмы снимаем с чертежа. Затем определяем длину хода луча в призме:

$$d = d = k \cdot D_{\text{призмы}} \quad (5.37)$$

Ширина редуцированной воздушной пластины равны:

$$d_{\text{возд}} = \frac{d}{n} \quad (5.38)$$

Ее сравнивают для проверки с толщиной пластинки, измеренной по чертежу.

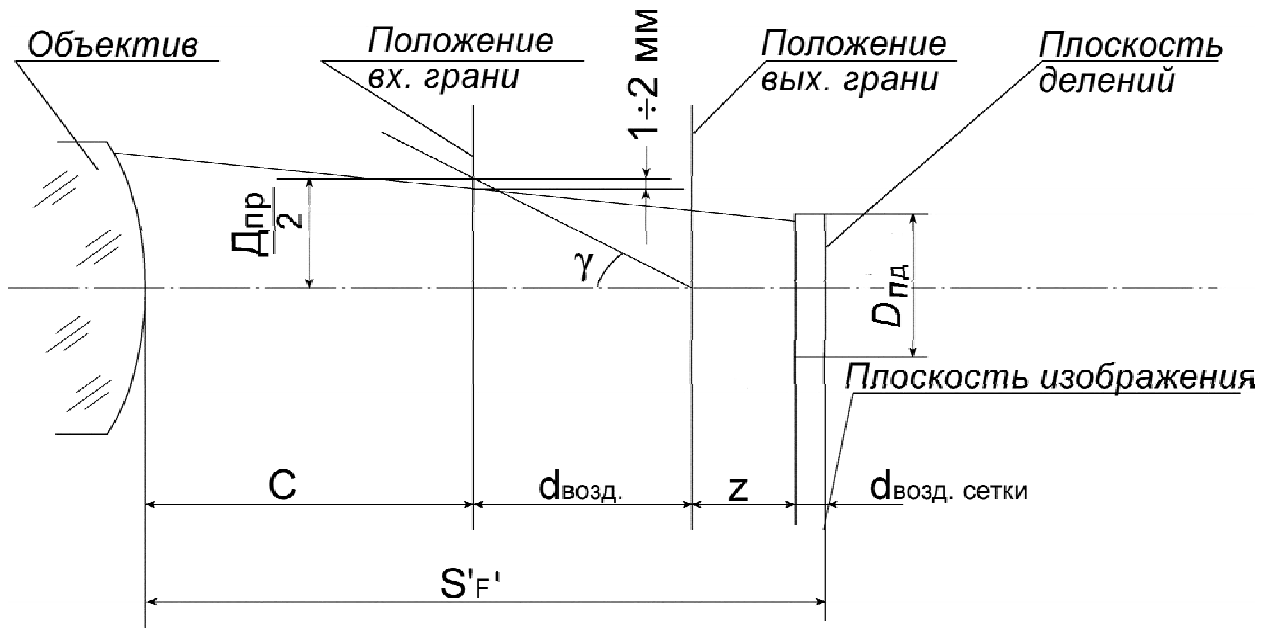


Рисунок 5.4. Определение размеров граней призмы.

Расстояние от последней поверхности объектива до входной грани призмы определяется по формуле:

$$c = S'_{F_1} - d_{\text{возд.сетки}} - z - d_{\text{возд}} \quad (5.39)$$

Если изображение находится на первой поверхности сетки (т.е. плоскость делений на 1-ой поверхности), отрезок определяется, по формуле:

$$c = S'_{F_1} - z - d_{\text{возд}} \quad (5.40)$$

Как только будут определены диаметры пучков, которые должны пропустить призмы, остальные размеры отражательных призм определяются из справочника. Затем дается чертеж призмы со всеми размерами.

9.1. Далее необходимо определить все расстояния между компонентами системы и представить оптическую схему простой зрительной трубы. Пример оформления оптической схемы показан на рисунке 5.5.

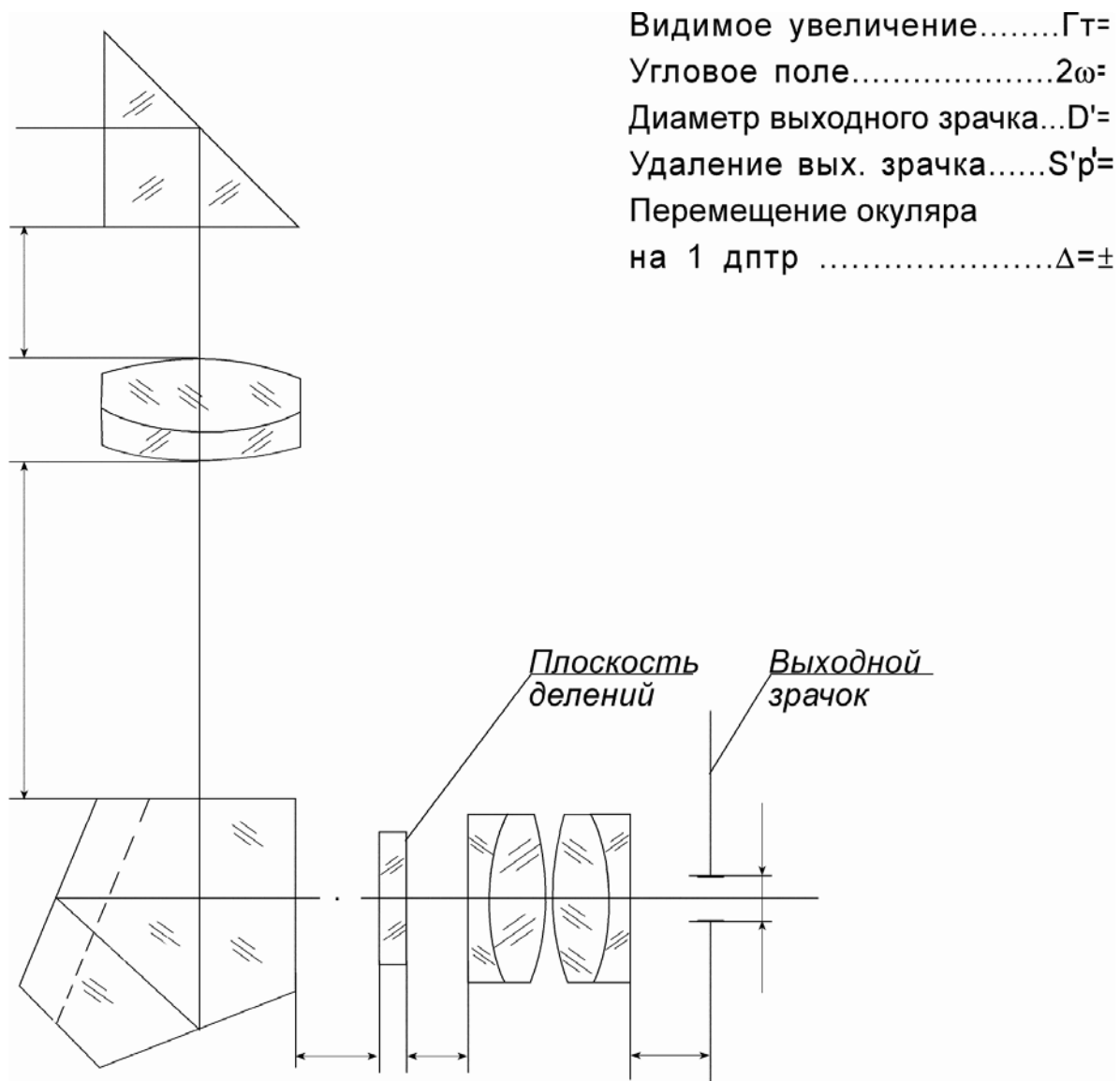


Рисунок 5.5. Оптическая схема зрительной трубы Кеплера.

10.1. По программе автоматизированного расчета оптики «ОПАЛ» определяются aberrации всей зрительной трубы, приводятся таблицы (таблица 5.3 – 5.6) и графики aberrаций (рисунок 5.6 - 5.8.).

Таблица 5.3

Аберрации точки на оси

m отн	e				F'		C'		$S'_{F'} - S'_{C'}$ дптр
	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	W дл. волн	η %	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	$\Delta S'$ дптр	$\Delta \sigma'$ в угл. мере	
1.000	-0.381	-2'31"	-	0.323	-1.079	-7'07"	0.125	0'49"	-1.204
0.707	-0.188	-0'53"	-	0.160	-0.879	-4'06"	0.313	1'28"	-1.192
0.000	0	0	-	0	-0.684	0	0.497	0	-1.181

Таблица 5.4

Аберрации точки вне оси

ω	S_p	$S'_{p'}$	ω'_{zl}	L'_m	L'_s	$\Delta \%$	$\omega'_{F'} - \omega'_{C'}$
-11°	107.0	6.734	-28° 58' 23"	2.010	-1.486	9.531	1'04"
-8°	107.0	6.959	-20° 57' 00"	1.155	-0.745	4.751	0'25"
0°	107.0	7.069	0	0.000	0.000	0	0'0"

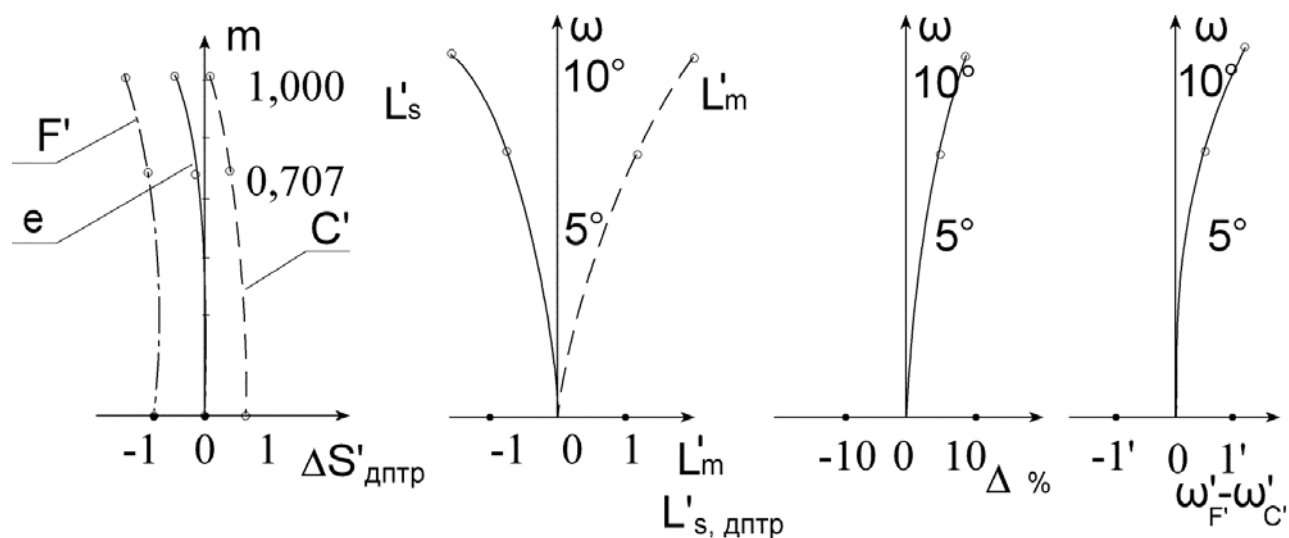


Рисунок 5.6. Графики аберраций бинокля галилеевского БГШ-3.

Аберрации широкого наклонного пучка лучей в меридиональном сечении

m	$\omega = -11^\circ$	$\omega = -8^\circ$
	$\Delta\omega'$	$\Delta\omega'$
1.000	3'46''	-1'36''
0.707	2'14''	0'24''
0	0	0
-0.707	-1'30''	-4'06''
-1.000	-2'26''	-6'34''

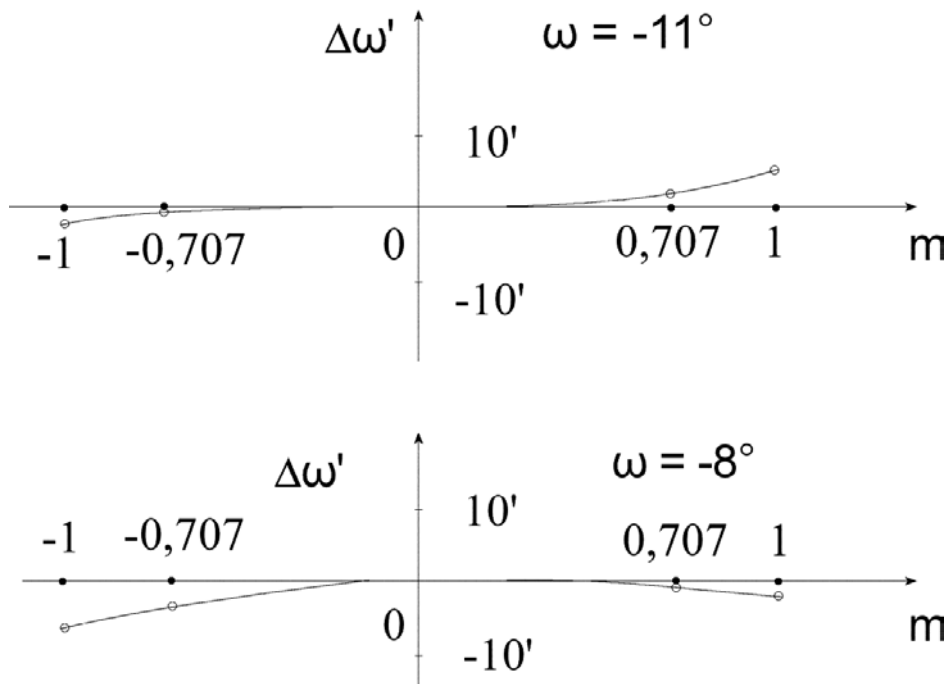


Рисунок 5.7. Графики аберраций бинокля галилеевского БГШ-3.

Аберрации широкого пучка лучей в сагиттальном сечении

M	$\omega = -11^\circ$		$\omega = -8^\circ$	
	$\Delta\psi'$	$\Delta\omega'$	$\Delta\psi'$	$\Delta\omega'$
1.000	-13'01''	-6'10''	-7'42''	-4'16''
0.707	-8'09''	-3'04''	-4'29''	-2'07''

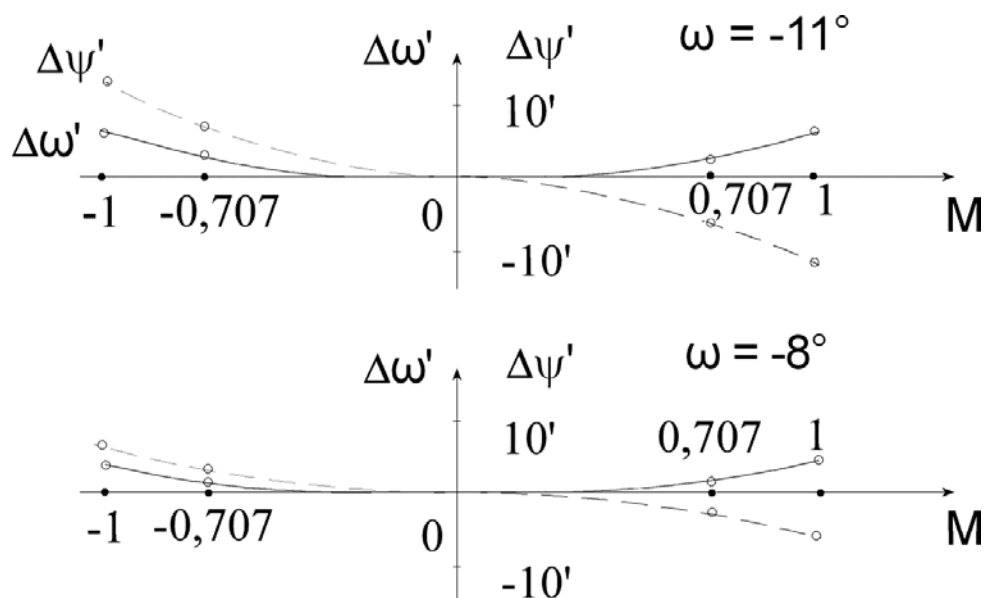


Рисунок 5.8. Графики aberrаций бинокля галилеевского БГШ-3.

4. Оформление работы

В отчете должны быть приведены:

- 4.1. Исходные данные
- 4.2. Габаритный расчет простой телескопической системы
- 4.3. Конструктивные данные и чертежи объектива и окуляра
- 4.4. Схема хода лучей
- 4.5. Расчет призм и чертежи для определения размеров граней призм
- 4.6. Оптическая схема всей системы с указанием нужных расстояний
- 4.7. Таблицы и графики aberrаций телескопической системы

5. Литература

1. Теория оптических систем. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. М: Машиностроение, 1992
2. Прикладная оптика. Дубовик А.С., Апенко М.И. и др. М.: Недра, 1992
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Панов В.А. и др., Л. Машиностроение, 1980
4. Методические указания по выполнению домашних заданий по курсу: «Теория оптических приборов и техническая оптик» Л., 1981, ИТМО
5. Методические указания по габаритному расчету и выбору компонентов телескопических систем. Л., 1989 ИТМО

6. Задание для работы

Таблица 5.1

Труба Кеплера с призмами

№ вар.	Γ_T	D'	2ω	a_p	Относ. отв. объектива и окуляра	$2\omega'$	D	Примечание
1.	$3,5^x$	5	10°	0	1:7	-	-	Система Малафеева-Порро I рода после объектива
2.	4^x	5	10°	-10	1:7	-	-	
3.	$4,2^x$	5	10°	-15	1:7	-	-	
4.	$4,4^x$	4	10°	-20	1:7	-	-	
5.	$4,5^x$	4	10°	0	1:6	-	-	
6.	$4,6^x$	4	10°	-10	1:6	-	-	
7.	5^x	4	8°	-15	1:6	-	-	
8.	$5,4^x$	5	8°	-20	1:5	-	-	
9.	$5,6^x$	5	$7^\circ 30'$	-30	1:5	-	-	
10.	6^x	5	$7^\circ 30'$	-10	1:5	-	-	
11.	$5,8^x$	5	7°	-20	1:5	-	-	
12.	$5,6^x$	4	8°	-25	1:6	-	-	
13.	$5,7^x$	4	$7^\circ 30'$	-20	1:5	-	-	
14.	$5,5^x$	5	8°	-25	1:5	-	-	
15.	$5,9^x$	5	7°	-15	1:4	-	-	
16.	$5,8^x$	4	8°	-25	1:6	-	-	
17.	6°	6	$7^\circ 30'$	-15	1:5	-	-	
18.	4^x	5	-	0	1:6	38°	-	Призма Шмидта с крышей (В _{кР} -45) после объектива
19.	$4,2^x$	5	-	-10	1:6	40°	-	
20.	$4,4^x$	5	-	-30	1:6	40°	-	
21.	$4,5^x$	4,5	-	0	1:5	40°	-	
22.	$4,6^x$	4,5	-	0	1:5	40°	-	
23.	$4,7^x$	4,5	-	0	1:6	45°	-	
24.	$4,8^x$	4	-	-10	1:5	45°	-	
25.	$4,9^x$	4	-	-20	1:4	40°	-	
26.	5^x	4	10°	-15	1:4	-	-	
27.	$5,1^x$	4	10°	0	1:5	-	-	
28.	$5,2^x$	4	10°	0	1:6	-	-	
29.	$5,3^x$	4	8°	0	1:4	-	-	

30.	5,4 ^x	4	8,5 ^o	-10	1:5	-	-	
31.	5,3 ^x	4	9 ^o	-5	1:5	-	-	
32.	5,2 ^x	4	10 ^o	-10	1:5	-	-	
33.	5,5 ^x	4	9 ^o	-25	1:4	-	-	Головная прямоуголь- ная призма, после объектива - пентапризма с крышей
34.	5,6 ^x	-	8 ^o	-30	1:4	-	25	
35.	5,7 ^x	-	8 ^o	-20	1:5	-	25	
36.	5,8 ^x	-	8 ^o	-25	1:6	-	25	
37.	5,9 ^x	-	7,5 ^o	-30	1:5	-	30	
38.	6 ^x	-	6 ^o	-15	1:5	-	30	
39.	6,1 ^x	-	6 ^o	-20	1:5	-	30	
40.	6 ^x	-	6 ^o	-40	1:5	-	30	
41.	5,9 ^x	4	7,5 ^o	-30	1:4	-	-	
42.	5,8 ^x	4	7,5 ^o	-20	1:4	-	-	
43.	6,5 ^x	4	6 ^o	-15	1:5	-	-	
44.	6,5 ^x	4	6 ^o	-15	1:5	-	-	
45.	7 ^x	5	6 ^o	-30	1:6	-	-	
46.	5 ^x	5	9 ^o	-25	1:6	-	-	
47.	4,5 ^x	5	10 ^o	-20	1:6	-	-	
48.	3,5 ^x	4	8 ^o	-25	1:5	-	-	
49.	4,5 ^x	5	10 ^o	-20	1:6	-	-	
50.	3,5 ^x	4	8 ^o	-10	1:5	-	-	
51.	4 ^x	4	10 ^o	-20	1:7	-	-	Головная прямоуголь- ная призма, после объектива – пентапризма с крышей
52.	4,5 ^x	5	10 ^o	-25	1:6	-	-	
53.	5 ^x	5	8 ^o	-20	1:4	-	-	
54.	5,5 ^x	4	9 ^o	-25	1:5	-	-	
55.	5,2 ^x	5	8,5 ^o	-25	1:6	-	-	
56.	4,8 ^x	5	8 ^o	-30	1:5	-	-	
57.	5 ^x	4	7,5 ^o	-25	1:4	-	-	
58.	4,5 ^x	5	7 ^o	-20	1:5	-	-	
59.	4,8 ^x	4	8 ^o	-25	1:6	-	-	
60.	5 ^x	4	8,5 ^o	-30	1:5	-	-	

Таблица 5.2.

Труба Галилея

№ вар.	Γ_T	D'	2ω	a_p	Относ. отв. объектива и окуляра	$2\omega'$	D	Примечание
1.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
2.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
3.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
4.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
5.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
6.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
7.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
8.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
9.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
10.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
11.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
12.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
13.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
14.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
15.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
16.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
17.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
18.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
19.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
20.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
21.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
22.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
23.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
24.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
25.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
26.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
27.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
28.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
29.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
30.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
31.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	

32.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
33.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
34.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
35.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
36.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
37.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
38.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
39.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
40.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
41.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
42.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
43.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
44.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
45.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
46.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
47.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
48.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	
49.	2,5	2	8	8	1:7	-	-	
50.	2,6	2	8	8	1:7	-	-	
51.	2,7	2	8	10	1:7	-	-	
52.	2,8	2	8	10	1:6	-	-	
53.	2,9	4	7	10	1:6	-	-	
54.	3,0	4	7	10	1:6	-	-	
55.	3,1	6	7	12	1:6	-	-	
56.	3,2	8	7	12	1:6	-	-	
57.	3,3	-	6	12	1:5	-	16	
58.	3,4	-	6	12	1:7	-	16	
59.	3,5	-	6	15	1:6	-	20	
60.	3,6	-	5	12	1:6	-	20	

Работа №6

«Система для коллимации лазерного излучения»

Цель работы: углубление знаний по разделу «Системы преобразования лазерных пучков», приобретение практических навыков расчета простейших телескопических систем для коллимации лазерных пучков при использовании геометрооптической модели излучения.

1. Задание для работы

1.1. В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 6.1) выполнить габаритный расчет телескопической системы.

1.2. Определить конструктивные параметры компонентов телескопической системы.

1.3. Исследовать абберационные свойства компонентов.

1.4. Выполнить абберационную коррекцию всей системы.

2. Краткая теория

Системы для коллимации лазерного излучения предназначены для уменьшения угла расходимости 2ω пучка лучей лазера. Угол расходимости $2\omega_d$ идеального лазера, генерирующего пучок лучей, параллельных оси, то есть имеющего плоский волновой фронт, определяется дифракцией, однако в реальных лазерах полевой угол всегда несколько больше $2\omega_d$.

Для различных типов лазеров угол 2ω меняется от нескольких угловых минут до нескольких десятков градусов. Для уменьшения угла расходимости используют телескопические системы. В зависимости от спектрального диапазона излучения и требований к структуре преобразованного излучения, они могут быть линзовыми, зеркально-линзовыми и зеркальными.

Линзовые коллимационные системы представляют собой перевернутые системы Галилея или Кеплера. При работе с мощными лазерами используют системы Галилея, т.к. в них нет промежуточного изображения и не возникает нежелательных тепловых явлений. Системы Кеплера используют с лазерами малой мощности и в системах оптической обработки информации.

Принципиальная оптическая схема перевернутой системы Галилея приведена на рис. 6.1.

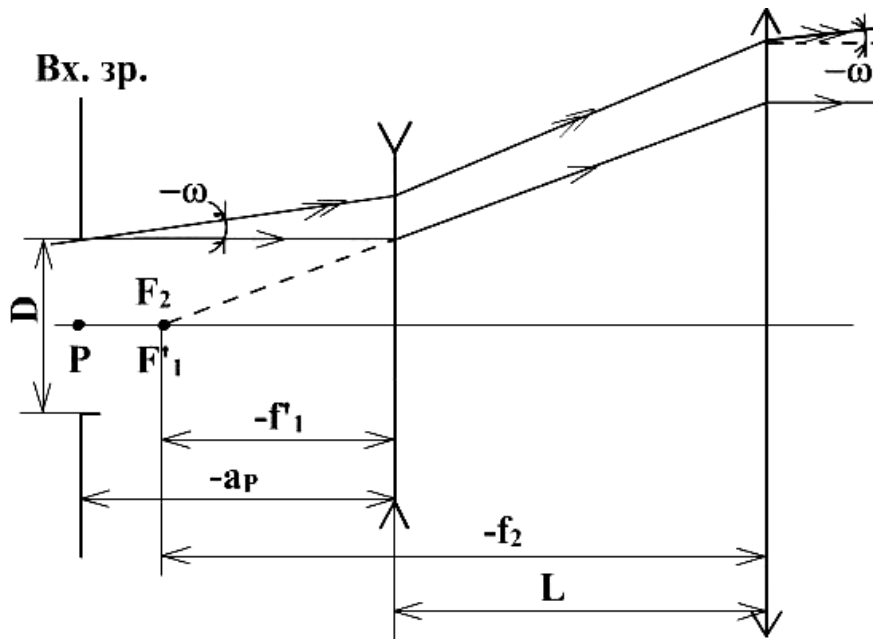


Рисунок 6.1. Принципиальная оптическая схема перевернутой системы Галилея.

Основными характеристиками коллимирующей системы являются:

- видимое увеличение Γ ,
- угловое поле в пространстве предметов 2ω ,
- угловое поле в пространстве изображений $2\omega'$,
- диаметр входного зрачка D , равный диаметру выходного торца лазера,
- положение a_p входного зрачка относительно первого компонента.

Основные формулы для габаритного расчета:

$$\Gamma = -\frac{f'_1}{f'_2}, \quad (6.1)$$

$$\Gamma = \frac{\text{tg } \omega'}{\text{tg } \omega}, \quad (6.2)$$

$$D' = D/\Gamma, \quad (6.3)$$

$$L = f'_1 + f'_2, \quad (6.4)$$

где f'_1 - фокусное расстояние первого отрицательного компонента, f'_2 - фокусное расстояние второго положительного компонента, D' - диаметр выходного зрачка, L - длина системы.

Из всех aberrаций осевого пучка исправляется только сферическая aberrация, т.к. система обладает высокой степенью монохроматичности.

Аберрации внеосевых пучков из-за малого полевого угла ω не имеют существенного значения.

3. Указание по выполнению работы

3.1. При выполнении п.1.1. определяются фокусные расстояния компонентов и расстояние между компонентами L по формулам (6.1) - (10.4). Относительное отверстие компонентов телескопической системы $1:k$ берется, как правило, не больше, чем $1:3$. В вариантах заданий для работы относительное отверстие задано, следовательно, фокусное расстояние первого компонента равно:

$$f'_1 = -D \cdot k. \quad (6.5)$$

3.2. При выполнении п.1.2. и определении конструктивных параметров компонентов телескопической системы необходимо принимать во внимание, что положительные линзы имеют отрицательную сферическую аберрацию, а отрицательные – положительную. Для устранения сферической аберрации всей системы нужно, чтобы сферические аберрации компонентов были бы равны по модулю и противоположны по знаку. Поскольку аберрации при одинаковом относительном отверстии пропорциональны фокусному расстоянию, а фокусное расстояние второго компонента во много раз больше фокусного расстояния первого, необходимо уменьшать сферическую аберрацию второго компонента и увеличивать сферическую аберрацию первого компонента. Для этого нужно выполнить вторую линзу из стекла с более высоким показателем преломления, а первую с более низким.

Кроме этого, форма линз должна быть такой, чтобы вторая линза имела минимальную сферическую аберрацию, а первая – максимальную. Для начала принимаем одну из поверхностей линз плоской, в первой линзе плоской будет первая поверхность, а во второй – последняя.

$$r_2 = (1 - n_2) \cdot f'_1, \quad (6.6)$$

$$r_4 = (1 - n_4) \cdot f'_2. \quad (6.7)$$

3.3. При выполнении п.1.3. необходимо определять сферическую аберрацию первого компонента в прямом ходе, а второго компонента в обратном ходе. Задняя апертура у компонентов будет одинаковой и равной:

$$\sin \sigma' = \frac{1}{2k}. \quad (6.8)$$

Аберрационные свойства компонентов необходимо исследовать для разных марок стекла, сохраняя при этом фокусные расстояния за счет

изменения радиусов. Первая линза должна иметь максимальную сферическую aberrацию, следовательно, она должна быть обращена плоской стороной к параллельному ходу лучей. Вторая линза должна иметь минимальную сферическую aberrацию, значит должна быть обращена выпуклой стороной к параллельному ходу лучей. После того, как будут использованы возможности коррекции сферической aberrации за счет выбора стекол, можно составить телескопическую систему и выполнить оптимизацию, используя в качестве параметров все радиусы кривизны (п.1.4. задания для работы). Если сферическая aberrация второй линзы значительно превышает сферическую aberrацию первой, то ее можно заменить двумя линзами, имеющими минимальную сферическую aberrацию.

4. Оформление работы

В отчете должны быть представлены:

4.1. Габаритный расчет и расчет конструктивных параметров оптической системы.

4.2. Таблицы и графики сферической aberrации компонентов и всей телескопической системы.

4.3. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров.

Пример оформления оптической схемы приведен на рис. 6.2.

5. Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем., М.: Машиностроение, 1992.

2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов. М.: Логос, 2000.

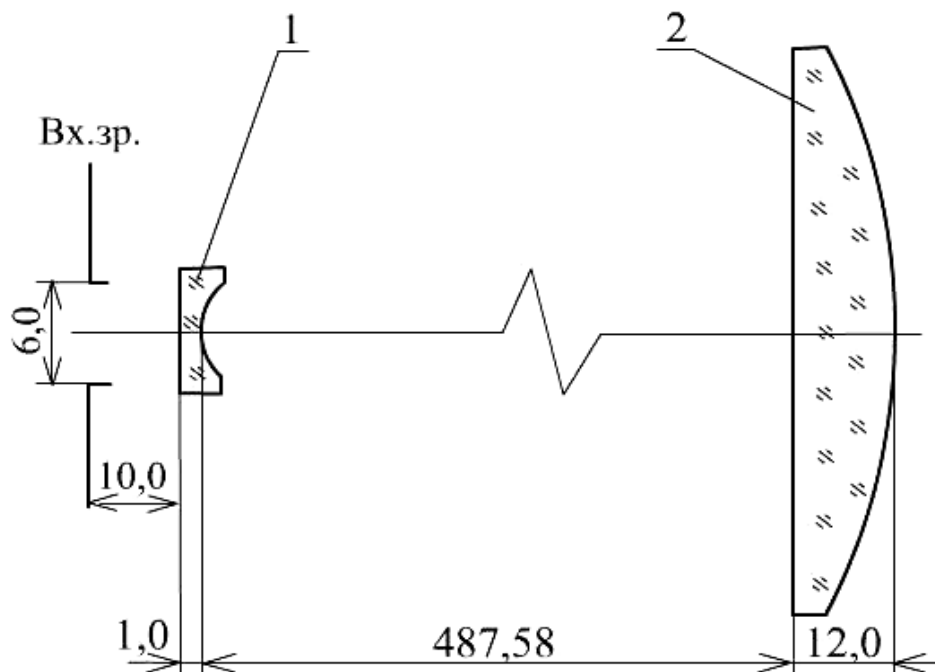
3. Вычислительная оптика. М.М.Русинов, А.П. Грамматин и др. Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.

Длина волны: $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$

Видимое увеличение: $\Gamma = 0,0667$

Диаметр входного зрачка: $D = 6 \text{ мм}$

Угловое поле в пространстве предметов: $2\omega = 12'$



Фокусные расстояния и фокальные отрезки для $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$

№ позиции	f'	S_F	$S'_{F'}$
1	-34,233	35,131	-34,034
2	528,798	-521,610	529,383
Система	0	0	0

№ позиции	Св. \varnothing_1	Стрелка по св. \varnothing_1	Св. \varnothing_2	Стрелка по св. \varnothing_2	Толщина по оси
1	6,036	0,087	5,862	-0,239	1
2	96,618	0,374	96,868	-2,970	12

Рисунок 6.2. Пример оформления оптической схемы.

6. Варианты заданий для работы

Таблица 6.1

Вариант	λ МКМ	2ω МИН	$2\omega'$ МИН	D ММ	$-a_p$ ММ	Относительное отверстие компонентов $1:k$
1	0,6328	10	1	5	10	1:3
2	0,526	15	1	5	12	1:3
3	0,5397	12	0,8	6	15	1:4
4	0,488	10	0,8	6	12	1:5
5	0,6943	10	1	4	10	1:3
6	0,4416	12	0,9	4	15	1:4
7	0,5955	15	1	5	12	1:3
8	0,6328	10	1	5	10	1:3
9	0,526	15	1	6	10	1:5
10	0,5397	12	0,8	6	10	1:5
11	0,488	12	0,8	4	12	1:4
12	0,6943	10	0,9	4	15	1:5
13	0,4416	12	1	5	12	1:4
14	0,5955	15	0,8	5	10	1:3
15	0,6328	10	1	6	12	1:4
16	0,4416	12	0,8	4	12	1:3
17	0,5955	15	0,9	4	10	1:5
18	0,488	10	1	6	14	1:3
19	0,5955	14	1	5	15	1:5
20	0,6328	12	0,9	4	10	1:4
21	0,5397	10	1	5	10	1:3
22	0,526	15	1	5	12	1:3
23	0,6328	12	0,8	6	15	1:4
24	0,5955	10	0,8	6	12	1:5
25	0,4416	10	1	4	10	1:3
26	0,6943	12	0,9	4	15	1:4
27	0,488	15	1	5	12	1:3
28	0,5397	10	1	5	10	1:3
29	0,526	15	1	6	10	1:5
30	0,6328	12	0,8	6	10	1:5

Работа №7

«Система для концентрации лазерного излучения»

Цель работы: углубление знаний по разделу «Системы преобразования лазерных пучков», приобретение практических навыков расчета простейших систем для концентрации лазерного излучения с использованием геометрооптической модели излучения.

1. Задание для работы

- 1.1. В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 7.1) выполнить габаритный расчет системы.
- 1.2. Определить конструктивные параметры компонентов системы.
- 1.3. Исследовать абберационные свойства компонентов.
- 1.4. Выполнить абберационную коррекцию всей системы.

2. Краткая теория

Системы для концентрации лазерного излучения предназначены для получения наибольшей поверхностной плотности потока излучения на площадке малых размеров. Если оптическая система безабберационная и лазерный пучок имеет идеальное распределение интенсивности, можно получить предельный дифракционный кружок рассеяния, диаметр которого равен

$$\delta = 2,44\lambda \cdot k, \quad (7.1)$$

где k - диафрагменное число фокусирующего объектива.

В общем случае диаметр пятна δ значительно больше дифракционного, определяется назначением системы и равен:

$$\delta = 2tg \omega \cdot f', \quad (7.2)$$

где 2ω - угол расходимости лазерного пучка.

Для получения пятна малых размеров нужна оптическая система с малым фокусным расстоянием. Если взять обычный объектив, то у него расстояние от последней поверхности до места фокусировки будет приблизительно равно или меньше фокусного расстояния объектива, что очень неудобно в эксплуатации. Место фокусировки лазерного излучения должно находиться на значительном расстоянии от объектива. Для решения этой задачи используются или двухкомпонентные системы в виде перевернутого телеобъектива, или трехкомпонентные, состоящие из перевернутой телескопической системы и линзы.

Принципиальная оптическая схема трехкомпонентной системы для концентрации лазерного излучения приведена на рис. 7.1.

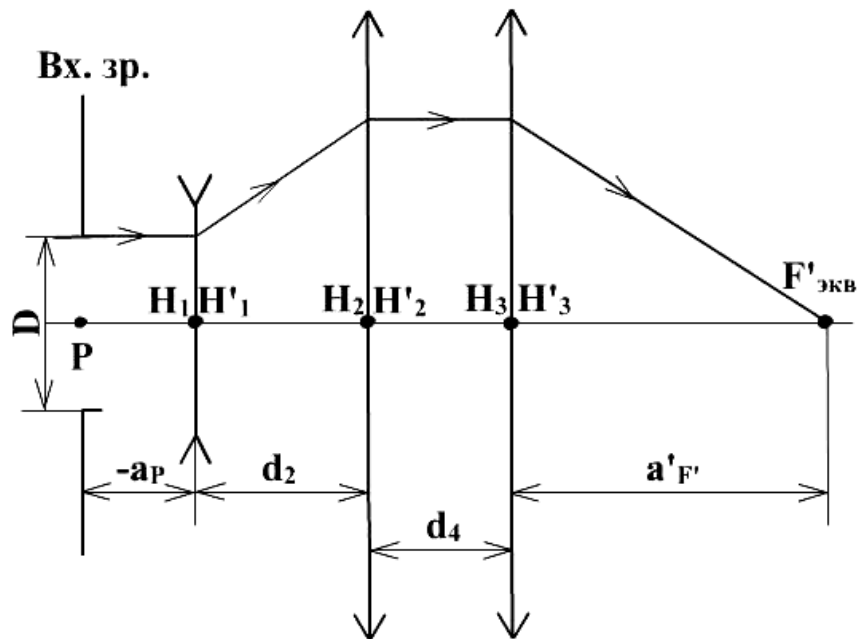


Рисунок 7.1. Принципиальная оптическая схема трехкомпонентной системы для концентрации лазерного излучения.

Основными оптическими характеристиками системы для концентрации лазерного излучения являются:

- фокусное расстояние f' ,
- диаметр входного зрачка D , равный диаметру выходного торца лазера,
- угловое поле в пространстве предметов 2ω ,
- расстояние от третьего компонента до места фокусировки $a'_{F'}$.

Основные формулы для габаритного расчета:

$$f' = \frac{\delta}{2 \operatorname{tg} \omega}, \quad (7.3)$$

$$f' = \Gamma \cdot f'_3, \quad (7.4)$$

где f'_3 - фокусное расстояние третьего компонента, можно принять $a'_{F'} \approx f'_3$, Γ - видимое увеличение перевернутой телескопической системы, которое равно

$$\Gamma = -\frac{f'_1}{f'_2}. \quad (7.5)$$

Расстояние между первым и вторым компонентами d_2 равно

$$d_2 = f'_1 + f'_2, \quad (7.6)$$

Из всех aberrаций исправляется только сферическая aberrация для осевого пучка.

3. Указание по выполнению работы

3.1. При выполнении п.1.1. определяются фокусные расстояния компонентов по формулам (7.3) - (7.6). Относительные отверстия первого и второго компонентов равны и определяются как

$$1/k = D/f'_1 = D'/f'_2, \quad (7.7)$$

где D' - выходной зрачок телескопической системы, равный

$$D' = D/\Gamma. \quad (7.8)$$

Относительное отверстие третьего компонента равно D'/f'_3 .

3.2. При выполнении п.1.2. и определении конструктивных параметров компонентов телескопической системы необходимо принимать во внимание, что положительные линзы имеют отрицательную сферическую aberrацию, а отрицательные – положительную. Для устранения сферической aberrации всей системы нужно, чтобы сферическая aberrация, вносимая положительными компонентами была бы равна по модулю и противоположна по знаку сферической aberrации, вносимой отрицательным компонентом. Поскольку aberrации при одинаковом относительном отверстии пропорциональны фокусному расстоянию, а фокусное расстояние второго компонента во много раз больше фокусного расстояния первого, необходимо уменьшать сферическую aberrацию второго компонента и увеличивать сферическую aberrацию первого компонента. Третий компонент – положительный, необходимо также уменьшать сферическую aberrацию третьего компонента. Для этого нужно выполнить вторую и третью линзы из стекла с более высоким показателем преломления, а первую из стекла с более низким показателем преломления.

Кроме этого, форма линз должна быть такой, чтобы вторая и третья линзы имели минимальную сферическую aberrацию, а первая – максимальную. Для начала принимаем одну из поверхностей линз плоской, в первой и второй линзах плоской будет первая поверхность, а в третьей – последняя.

$$r_2 = (1 - n_2) \cdot f'_1, \quad (7.9)$$

$$r_4 = (1 - n_4) \cdot f'_2, \quad (7.10)$$

$$r_5 = (1 - n_6) \cdot (-f'_3).$$

3.3. При выполнении п.1.3. необходимо принимать во внимание следующее: сферическая aberrация первого и третьего компонентов рассчитывается в прямом ходе, задняя апертура для них определяется по формулам:

$$\sin \sigma'_1 = D / 2f'_1, \quad (7.11)$$

$$\sin \sigma'_3 = D' / 2f'_3. \quad (7.12)$$

Сферическая aberrация второго компонента определяется в обратном ходе, задняя апертура второго компонента равна:

$$\sin \sigma'_2 = D' / 2f'_2. \quad (7.13)$$

Для того, чтобы в области aberrаций третьего порядка была исправлена сферическая aberrация во всей системе, необходимо, в соответствии с формулой

$$\Delta S' = \Delta S'_1 \beta_2^2 \dots \beta_k^2 + \Delta S'_2 \beta_3^2 \dots \beta_k^2 + \dots + \Delta S'_{k-1} \beta_k^2 + \Delta S'_k, \quad (7.14)$$

выполнение следующего условия:

$$(\Delta S'_1 + \Delta S'_2) \left(\frac{f'_3}{f'_2} \right)^2 + \Delta S'_3 = 0, \quad (7.15)$$

где $\Delta S'_1$, $\Delta S'_2$, $\Delta S'_3$ - сферическая aberrация первого, второго и третьего компонентов.

Сначала нужно выполнить все линзы плосковогнутыми или плосковыпуклыми из стекла К8 и проверить выполнение условия (7.15). Первая линза должна иметь максимальную сферическую aberrацию и для этого ее нужно поставить плоской стороной к параллельному ходу лучей, а вторая и третья линзы должны иметь минимальную сферическую aberrацию, следовательно, они должны быть обращены выпуклой стороной к параллельному ходу лучей. Если условие (7.15) не выполняется, тогда нужно менять стекла, сохраняя при этом фокусные расстояния компонентов за счет изменения радиусов кривизны. После того, как условие (7.15) будет приблизительно выполнено, необходимо составить всю систему и определить суммарную сферическую aberrацию. Если качество изображения будет неудовлетворительное (волновые aberrации более $0,25\lambda$) необходимо при выполнении п.1.4. произвести оптимизацию, используя в качестве параметров все радиусы кривизны.

4. Оформление работы

В отчете должны быть представлены:

- 4.1. Габаритный расчет оптической системы и расчет конструктивных параметров компонентов.
- 4.2. Таблицы и графики сферической абберрации компонентов и всей системы.
- 4.3. Оптическая схема с указанием необходимых параметров и размеров.

Пример оформления оптической схемы приведен на рис. 7.2.

5. Литература

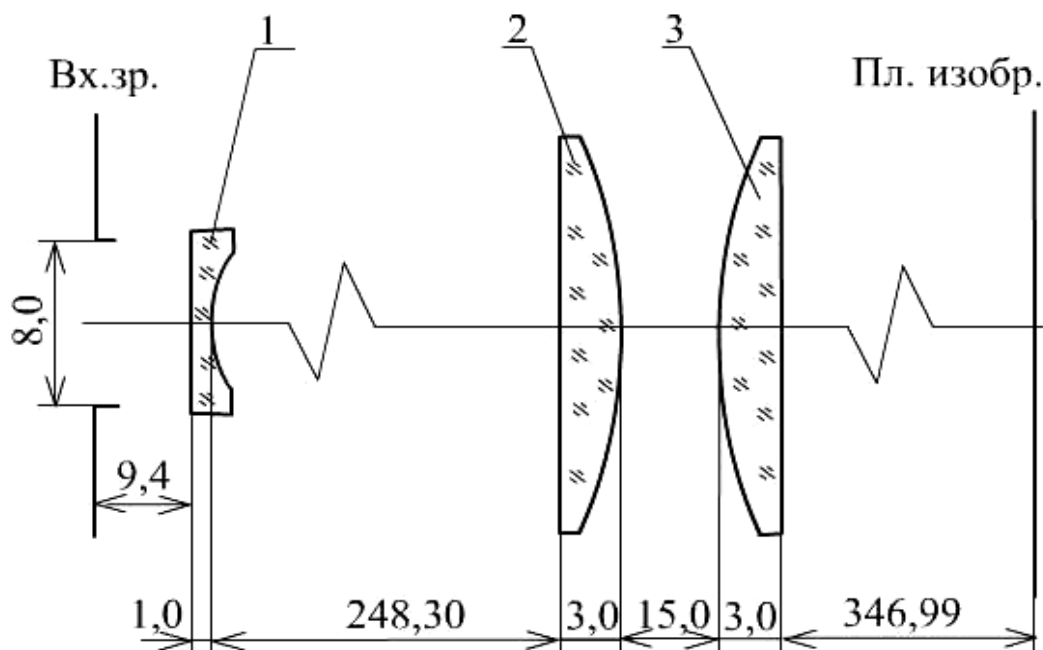
4. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.А. Теория оптических систем., М.: Машиностроение, 1992.
5. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. Учебник для ВУЗов. М.: Логос, 2000.
6. Вычислительная оптика. М.М.Русинов, А.П. Грамматин и др. Под ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984.

Длина волны: $\lambda = 0,448 \text{ мкм}$

Эквивалентное фокусное расстояние: $f' = 137,51 \text{ мм}$

Диаметр входного зрачка: $D = 8 \text{ мм}$

Угловое поле в пространстве предметов: $2\omega = 10'$



Фокусные расстояния и фокальные отрезки для $\lambda = 0,448 \text{ мкм}$

№ позиции	f'	S_F	$S'_{F'}$
1	-161,961	162,653	-161,961
2	411,9	-410,259	411,9
3	349,729	-349,729	348,088
Система	137,5146	47,2174	346,9941

№ позиции	Св. \varnothing_1	Стрелка по св. \varnothing_1	Св. \varnothing_2	Стрелка по св. \varnothing_2	Толщина по оси
1	8	0	8,002	0,111	1
2	21,048	0	21,102	-0,163	3
3	21,120	0,193	20,964	0	3

Рисунок 7.2. Пример оформления оптической схемы.

6. Варианты заданий для работы

Таблица 7.1

Вариант	λ МКМ	δ ММ	2ω МИН	D ММ	$-a_p$ ММ	$a'_{F'}$ ММ	d_2 ММ	d_4 ММ
1	0,6328	0,1	10	4	15	200	200	10
2	0,526	0,15	15	5	10	250	300	20
3	0,5397	0,2	6	6	12	280	400	15
4	0,488	0,15	10	8	10	400	350	20
5	0,6943	0,15	10	4	10	300	250	10
6	0,4416	0,1	18	6	15	350	300	14
7	0,6328	0,2	10	5	10	220	220	12
8	0,526	0,15	15	4	15	300	250	14
9	0,5397	0,2	10	6	12	250	350	20
10	0,488	0,15	10	8	15	350	250	15
11	0,5955	0,1	12	6	15	250	300	15
12	0,6943	0,1	30	8	10	300	350	20
13	0,4416	0,1	15	6	10	350	300	10
14	0,6328	0,2	10	4	12	250	300	15
15	0,5955	0,15	15	7	20	300	350	20
16	0,6328	0,15	10	4	12	280	200	10
17	0,488	0,1	15	6	15	250	250	15
18	0,5397	0,2	12	3	15	300	240	15
19	0,6943	0,1	12	4	18	280	280	18
20	0,526	0,2	10	4	10	320	300	20
21	0,6328	0,1	10	4	15	300	200	10
22	0,526	0,15	15	5	10	350	300	20
23	0,5397	0,2	6	6	12	290	400	15
24	0,488	0,1	10	8	10	410	350	20
25	0,6943	0,15	10	4	10	340	250	10
26	0,4416	0,15	18	6	15	360	300	14
27	0,6328	0,2	10	5	10	250	220	12
28	0,526	0,1	15	4	15	320	250	14
29	0,5397	0,2	10	6	12	270	350	20
30	0,488	0,1	10	8	15	350	250	15

Содержание:

1.	ВВЕДЕНИЕ	3
2.	РАБОТА №1 «СИНТЕЗ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПАРАКСИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ»	4
3.	РАБОТА №2 «ПРОЕКЦИОННАЯ УСТАНОВКА»	17
4.	РАБОТА №3 «МИКРОСКОП (ВИЗУАЛЬНАЯ ЧАСТЬ)»	26
5.	РАБОТА №4 «МИКРОПРОЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА»	39
6.	РАБОТА №5 «ПРОСТАЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА»	44
7.	РАБОТА №6 «СИСТЕМА ДЛЯ КОЛЛИМАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»	64
8.	РАБОТА №7 «СИСТЕМА ДЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»	70
9.	СОДЕРЖАНИЕ	77

Название кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики отражает новейшую тенденцию проникновения компьютерных технологий во все сферы науки и техники. В то же время эта кафедра является прямой наследницей старейших оптических кафедр России – кафедры теории оптических приборов, физиологической оптики, оптических приборов, лабораторных, а затем оптико-механических приборов. В разное время этими кафедрами заведовали и работали на них такие выдающиеся ученые как академик В.П. Линник, член-корреспондент Академии наук СССР профессор В.С. Игнатовский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук В.Н. Чуриловский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Ленинской и четырех Государственных премий, премии Французской Академии наук, профессор, доктор технических наук М.М. Русинов, заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор, доктор технических наук И.И. Крыжановский, член-корреспондент Академии артиллерийских наук, профессор, доктор технических наук А.Н. Захарьевский, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской премии и премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук В.А. Зверев, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров СССР профессор, доктор технических наук А.П. Грамматин, лауреат Государственной премии профессор, доктор технических наук П.Д. Иванов, лауреат премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук С.А. Родионов.

Таким образом кафедра прикладной и компьютерной оптики по праву может считаться ведущей оптической кафедрой России, продолжающей дело таких основоположников как В.С. Игнатовский, В.Н. Чуриловский, М.М. Русинов, В.П. Линник, А.Н. Захарьевский, и собравшей в своем составе ведущих представителей школы прикладной и вычислительной оптики: Л.Н. Андреева, А.П. Грамматина, В.А. Зверева, П.Д. Иванова, С.А. Родионова и их учеников.

В списке достижений кафедры: создание непревзойденных широкоугольных аэрофотосъемочных объективов с улучшенным светораспределением по полю и приборов обработки аэрофотоснимков (М.М. Русинов, Н.А. Агальцова), превосходящие зарубежные аналоги гидросъемочные объективы (М.М. Русинов, П.Д. Иванов, Л.Н. Курчинская), методы и средства контроля главного зеркала телескопа БТА (В.А. Зверев, С.А. Родионов, В.В. Усоскин), металлостеклянная оптика (И.И. Крыжановский, С.М. Никитин), оптика для космического проекта “Вега” (Г.И. Цуканова), высокоскоростные кинокамеры для научных исследований (И.И. Крыжановский, В.И. Решеткин), компьютерные пакеты автоматизированного проектирования оптики (С.А. Родионов с сотрудниками). Эти достижения в свое время были отмечены двумя ленинскими премиями, пятью государственными премиями, премией Совета Министров СССР, премией французской академии наук.

В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;
- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическая оптика;
- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

О последнем направлении следует сказать несколько подробнее. Следует подчеркнуть тот известный факт, что вычислительная оптика не только явилась первым практическим применением для компьютеров (одним из первых применений первой в мире ЭВМ Марк-1 в 1944 году был расчет оптических систем), но и способствовала развитию многих новых методов прикладной математики (методов оптимизации, численного интегрирования, решения некорректных задач и т.д.)

В России работы в этом направлении были начаты А.П. Грамматиным (1958 г.). В ЛИТМО в 1960 году были построены одни из первых отечественных ЭВМ ЛИТМО-1 и ЛИТМО-2, предназначенные главным образом для расчета оптических систем; а соответствующий математический аппарат был разработан доцентом кафедры оптико-механических приборов В.В. Хваловским.

С 1965 г. на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной оптики, проводимых на кафедре являются:

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа aberrаций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);
- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманограммы и т.п.);
- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.)
- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;
- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Основным и наиболее перспективным направлением развития кафедры представляется именно компьютерная оптика как основа для подготовки так называемых “компьютерных инженеров” – специалистов, профессия которых, по нашему мнению и по мнению авторитетных зарубежных экспертов, станет ведущей в наступающем веке.

Область деятельности таких специалистов – это решение сложных инженерных и научных задач (в нашем конкретном случае прикладной оптики) на основе интенсивного использования математических методов и компьютерных технологий, а также разработка такого рода технологий.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаний в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оплотехники, оптических приборов и систем);
- глубоких знаний прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;
- владения современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.;

Как показывает опыт, задачи прикладной оптики настолько разнообразны, сложны и комплексны, а применяемые для их решения методы, модели и средства настолько универсальны, что специалист по компьютерной оптике может с успехом практически безо всякой адаптации работать в любой области, требующей владения математическими методами и компьютерными технологиями.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сервере: aco.ifmo.ru

Цуканова Галина Ивановна, Карпова Галина Васильевна,
Багдасарова Ольга Васильевна, Карпов Вячеслав Григорьевич,
Кривоустова Екатерина Всеволодовна, Ежова Ксения Викторовна

Прикладная оптика. Часть 2.

Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А.

В авторской редакции

Компьютерное макетирование

Зав. редакционно-издательским отделом

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 06.12.03

Отпечатано на ризографе. Тираж 200 экз. Заказ № 754

К.В. Ежова

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики



197101, Санкт-Петербург, ул. Саблинская, 14