

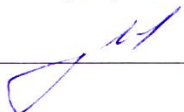
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт *высокоточных систем им. В.П. Грязева*  
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры  
«Приборы управления»  
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

  
В.В. Матвеев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по проведению практических (семинарских) занятий**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Основы конструирования оптических приборов»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**12.03.03 Фотоника и оптоинформатика**

с направленностью (профилем)  
**Интеллектуальные фотонные системы**  
Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Тула 2024 год

**Разработчик методических указаний:**

Алалуев В.В., доц. каф., к.т.н., \_\_\_\_\_



(подпись)

## Содержание

Практическая работа №1 Синтез двухкомпонентной оптической системы в параксиальной области.....	4
Практическая работа №2. Проекционная установка.....	18
Практическая работа №3. Микроскоп (визуальная часть).....	27
Практическая работа №4. Простая телескопическая система .....	38
Практическая работа №5. Конструирование линзы.....	58
Практическая работа №6. Конструирование зеркал .....	67
Практическая работа №7. Конструирование призм и плоскопараллельных пластин .....	72
Практическая работа №8. Оптический клин, конструирование узла клина.....	78
Практическая работа №9. Выполнение чертежей оптических схем .....	83

## Практическая работа №1 Синтез двухкомпонентной оптической системы в параксиальной области

**Цель работы:** углубление теоретического материала и приобретение практических навыков определения обобщённых характеристик, и оптических характеристик по ГОСТ 7226-76 для четырёх типов оптических систем.

### 1. Задание для работы

1. 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).
2. 1.2. Определить для системы в целом и для каждого ее компонента оптические характеристики по ГОСТ 7226-76, а также обобщенные оптические характеристики.

### 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.

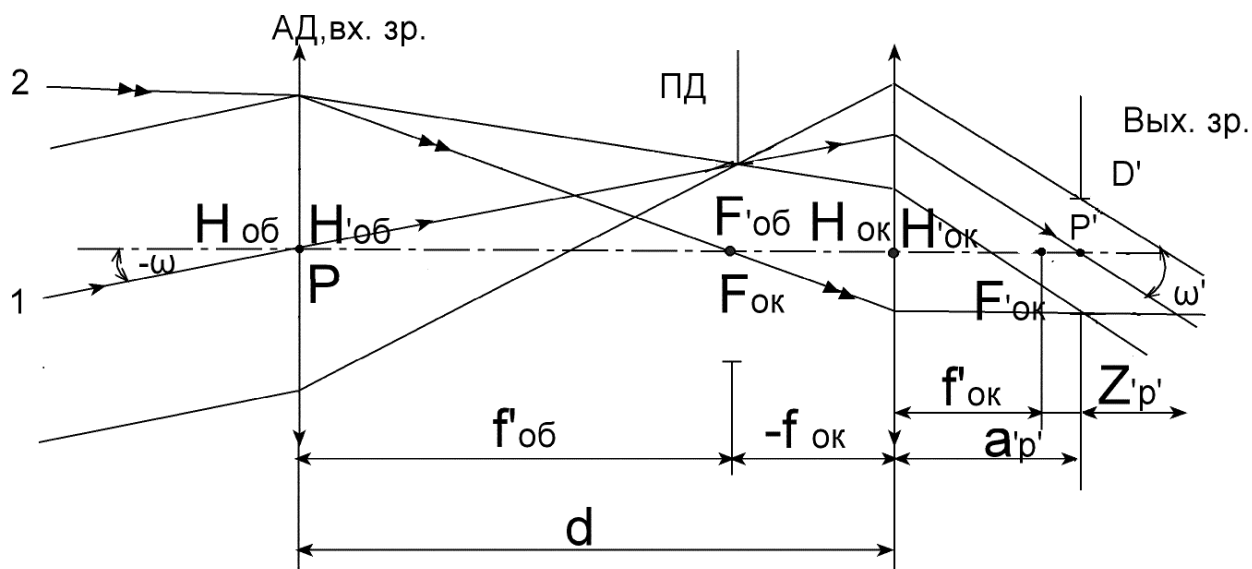


Рисунок 1.1. Телескопическая система по схеме Кеплера.

Основные оптические параметры:

- видимое увеличение  $\Gamma_T$ ;
- угловое поле в пространстве предметов  $2\omega^0$ ;
- диаметр выходного зрачка  $D'$ , мм.

Видимое увеличение  $\Gamma_T$  можно определить из следующего выражения:

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

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

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

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  $0,05 D$ .

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

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).

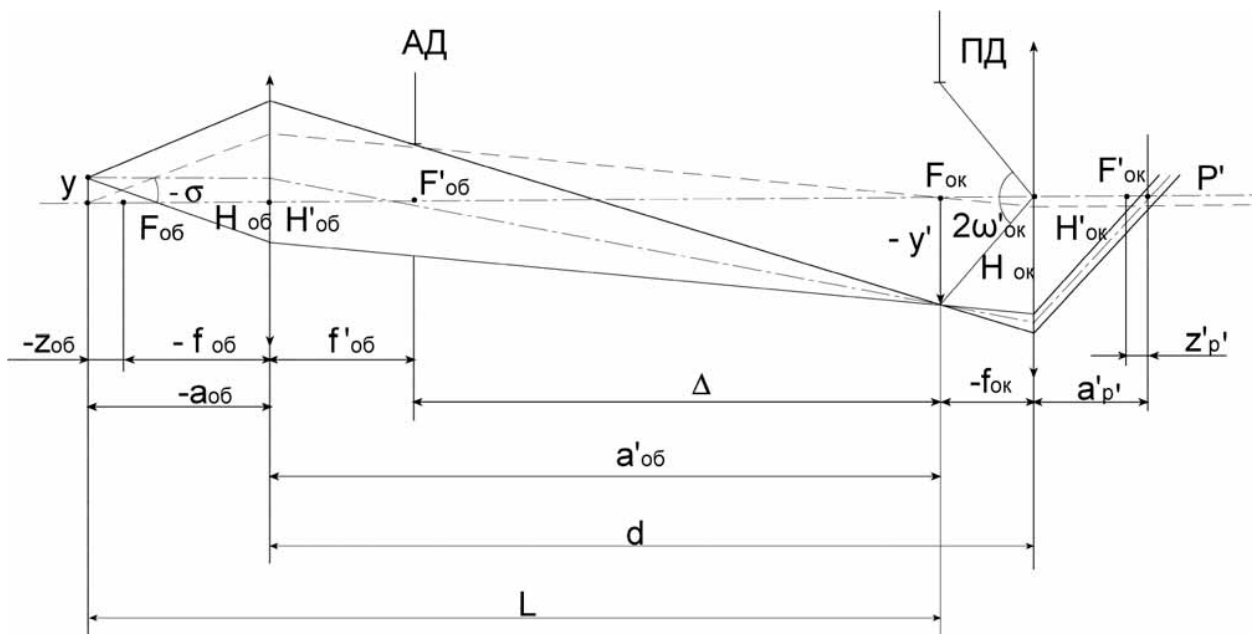


Рисунок 1.2. Оптическая схема микроскопа.

Основные оптические параметры:

- видимое увеличение  $\bar{\Gamma}$ ;
- числовая апертура объектива в пространстве предметов  $A$ ;
- линейное поле в пространстве предметов  $2y$ , мм.

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

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

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

$f'_м, f'_{об}, f'_{ок}$  - 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:

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

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  $\Delta$  -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).**

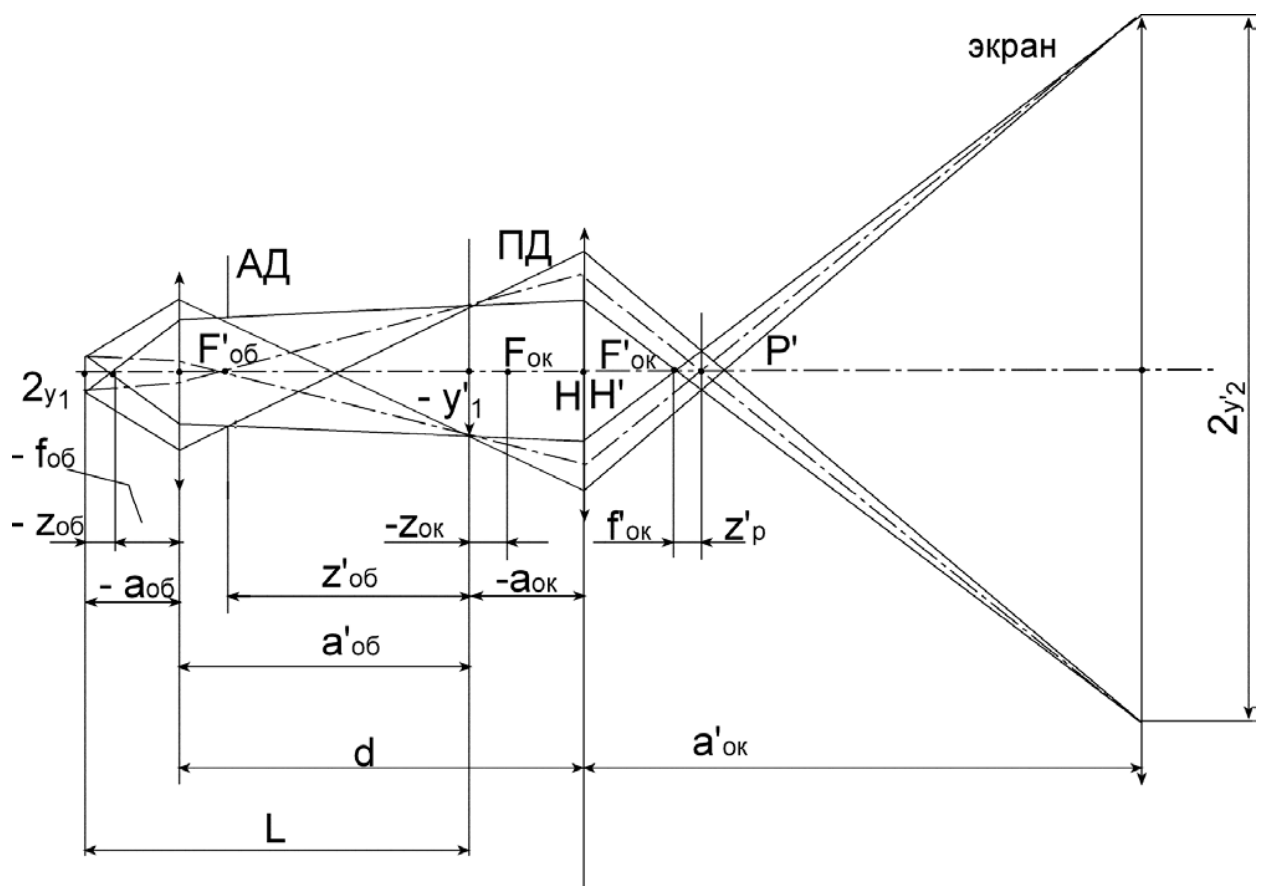


Рисунок 1.3. Оптическая схема микропроекционной системы.

Основные оптические параметры:

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



Линейное увеличение  $\beta_M$  определяется формулой:

$$\beta_M = \beta_{об} \beta_{ок} \cong \bar{\Gamma}_M \cdot K \cong \beta \cdot \bar{\Gamma}_{ок} \cdot K, \quad (1.11)$$

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:

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

Линейное поле в пространстве предметов:

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

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

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

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:

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

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

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

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

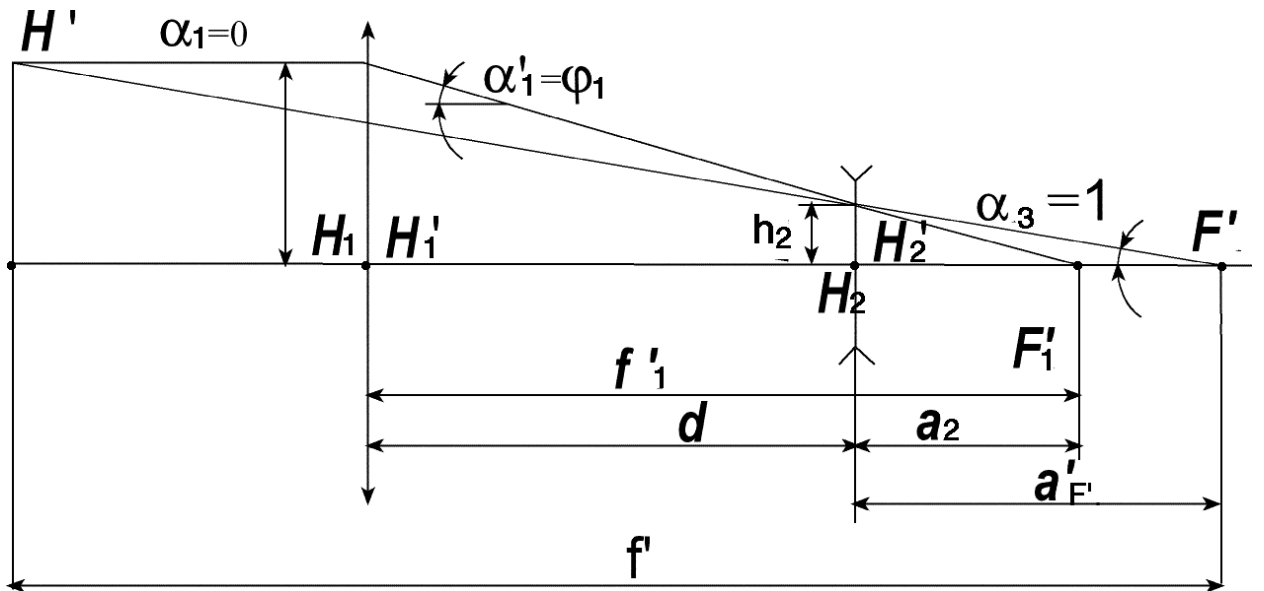


Рисунок 1.4. Оптическая схема фотообъектива.

Основные оптические параметры:

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

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:

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

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:

$r_1 = f'_1 (n - 1)$		
	$d_1$	<i>K8</i>
$r_2 = \infty$		
	$d_2 = d + S'_{H_1} - S_{H_2}$	
$r_3 = \infty$		
	$d_3$	<i>K8</i>
$r_4 = -f'_2 (n - 1)$		

$d_1$  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.

### Литература:

1. Прикладная оптика часть 2. Учебно-методическое пособие под ред проф. Шехонина А.А.

Таблица 1.1.

№№ вариантов	Положение плоскости предмета	Положение плоскости изображения	Обобщенные характеристики					расстояние между компонентами	увеличение 1-го компонента	расстояние между ПЛ-ми предмета и изображения 1-го	увеличение 2-го компонента	от посл. компонента до изображения
			увеличение	апертура	апертура	на предмете	на изображении					
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	Положение плоскости	Обобщенные характеристики					Основные характеристики оптических систем по ГОСТ 7226-76				
			Увелич-е	Передняя	Задняя	Величин	Величин	Видимое увеличение $\Gamma_T$	Диаметр вх. зрачка $D$	Диаметр вых. Зрачка $D'$	Угловое поле в пр-ве предметов $2\omega$	Угловое поле в пр-ве изображений $2\omega'$
00	дальнее	дальнее	$\overline{V}_0$	$\overline{A}_0$	$\overline{A}'_0$	$\overline{Y}_0$	$\overline{Y}'_0$					

01	дальнее	ближнее						Заднее фокусное расстояние $f'$	Диаметр вх. зрачка $D$	Числовая апертура в пр-ве изоб-ний $A' = n' \sin \sigma'$	Угловое поле в пр-ве предметов $2\omega$	Линейное поле в пр-ве изоб-ний $2y'$
10	ближнее	дальнее						Видимое увеличение $\bar{G}$	Числовая апертура в пр-ве предметов $A = n \sin \sigma$	Диаметр вых. Зрачка $D'$	Линейное поле в пр-ве предметов $2y$	Угловое поле в пр-ве изоб-ний $2\omega'$



11	ближнее	ближнее						Линейное увеличение $\beta$	Числовая апертура в пр-ве предметов $A = n \sin \sigma$	Числовая апертура в пр-ве изоб-ний $A' = n' \sin \sigma'$	Линейное поле в пр-ве предметов $2y$	Линейное поле в пр-ве изоб-ний $2y'$
----	---------	---------	--	--	--	--	--	-----------------------------	---	---	--------------------------------------	--------------------------------------

Таблица 1.3.

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

## Практическая 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 aberrаций.

1.4. 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  $\rho$  - коэффициент отражения экрана (можно считать 0,8);

$E$  - освещенность экрана.

Следовательно, освещенность экрана должна при диапроекции быть 80÷200лк.

Зная освещенность экрана и его площадь, можно определить световой поток  $\Phi'$  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).

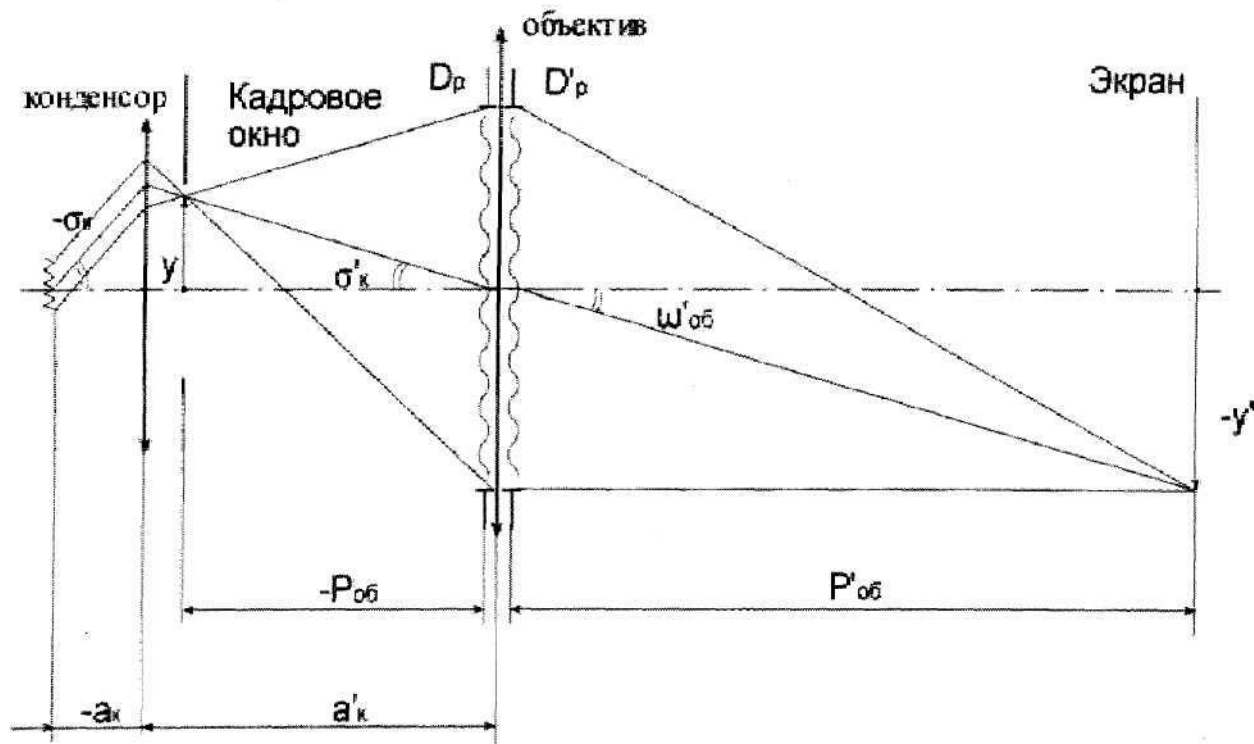


Рисунок 2.1. Принципиальная схема проекционной установки

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 K12(110в×300вт) с полным световым потоком 6450лм, имеющую тело накала 8×8,5 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  $i^2$ .

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

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;

$\tau$  - 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:

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

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:

$$D/f = 24/82,68 = 1/3,5$$

Угловое поле этот объектив должен иметь:

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{l'}{n} \quad (2.13)$$

где  $l'$  - половина диагонали экрана.

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

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

Итак, необходим проекционный объектив со следующими характеристиками:

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

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

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

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

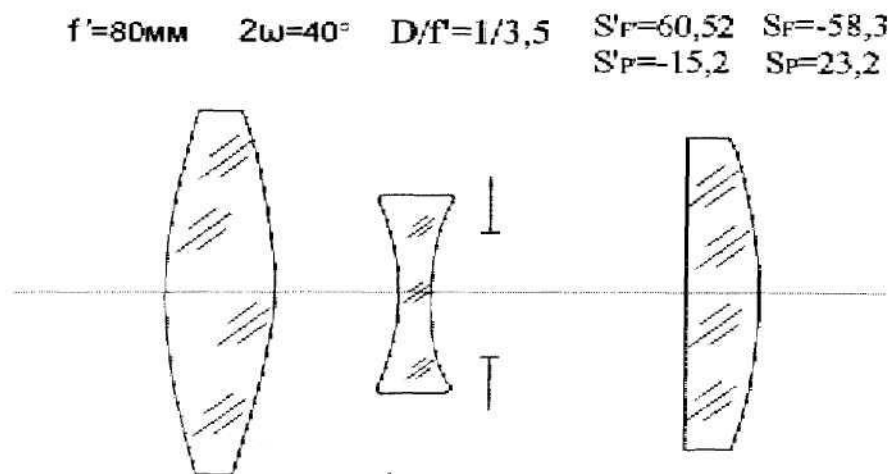


Рисунок 2.2, Объектив.

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.

$$\beta_k = \frac{24}{v} = -3^\circ \quad (2.23)$$

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  $37\text{мм}$ , а  $S'_k \geq 90\text{мм}$ , т.к.  $-p_{об} = 76,9$

При расчете конденсора на минимум сферической aberrации принимаем силы линз одинаковыми и каждую линзу рассчитываем на минимум сферической aberrации. Тогда для нечетных углов нулевого луча с осью имеем формулу (при условии нормировки  $\alpha_1 = \beta_k$ ,  $\alpha'_1 = 1$ ):

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

где  $t$  - порядковый номер линзы конденсора;

$m$  - число линз конденсора;

$\beta$  – 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 « $\alpha$ », можно рассчитать радиусы кривизны поверхностей конденсора по известной формуле:

$$r = h \frac{n_{k+1} - n_k}{\alpha} \quad (2.28)$$

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:

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

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
-3	-	1,6	-	-	0,3	1
	2,667	67	1,143	0,333	81	

Принимаем:

$$d_1 = d_3 = d_5 = 6,$$

$$d_2 = d_4 = 0,1$$

Тогда:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$S'_k = \frac{h}{\alpha} = \frac{110,774}{1} = 110,774$$

Если бы  $S'_k$  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.

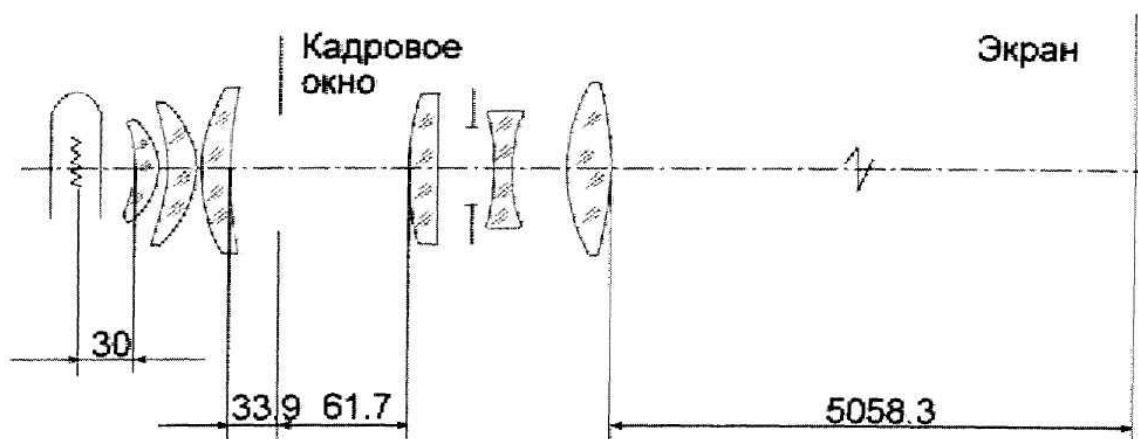


Рисунок 2.3. Схема проекционной установки

#### 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. Прикладная оптика часть 2. Учебно-методическое пособие под ред проф. Шехонина А.А.

#### 6. Задание для работы

Таблица 2.1



№ вар.	Размер кадра	Увеличение	Расстояние между кадром и экраном (м)	$f'_{об}$ (мм)	№ вар.	Размер кадра	Увеличение	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.	17x14	-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.	9,45x7,05	-	4,5	50	60.	100x100	-17	-	200

## **Практическая 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 предназначений 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.

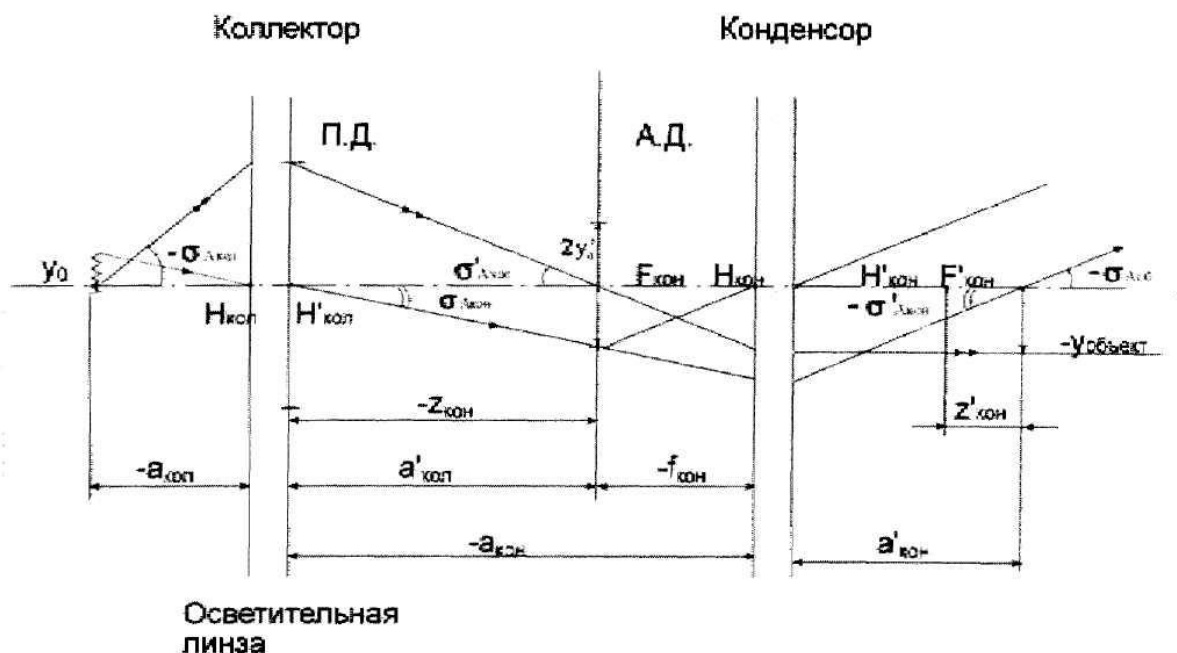


Рисунок 3.1. *Ход лучей в осветительной части микроскопа в проходящем свете.*

В передней фокальной плоскости конденсора находится вторая ирисовая диафрагма служащая апертурной. Осветительная система микроскопа рассчитывается обычно по методу Кеплера. Коллектор изображает источник света в апертурную диафрагму. Конденсор проецирует полевую диафрагму в плоскость предмета. Выходящие из конденсора параллельные пучки лучей равномерно освещают предмет. 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 Кеплера 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;

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

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

$A'_{кон} = n' \cdot \sin\sigma'_{кон}$  - 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:

$$\beta_{кон} = -\frac{2y_{об}}{r} = -\frac{f_{кон}}{r'} = -\frac{z_{кон}}{r'} = -\frac{A_{кон}}{A'} = -\frac{A_{кон}}{A} \quad (3.2)$$

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

Определение диаметра апертурной диафрагмы:

$$D_{АД} = -2 z_{кон} A_{кон} = -2 f_{кон} A_{об} = 2y_0' \quad (3.3)$$

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:

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

Вычисление диаметра полевой диафрагмы коллектора:

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

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  $\Delta_0$  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  $\Gamma$ , линейное поле  $2y_{об}$ , числовая апертура  $A_{об}$ . К остальным характеристикам относятся: линейный предел разрешения  $\delta$ , 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:

$$\bar{\Gamma} = \frac{tg\omega}{tg\omega} \quad (3.10)$$

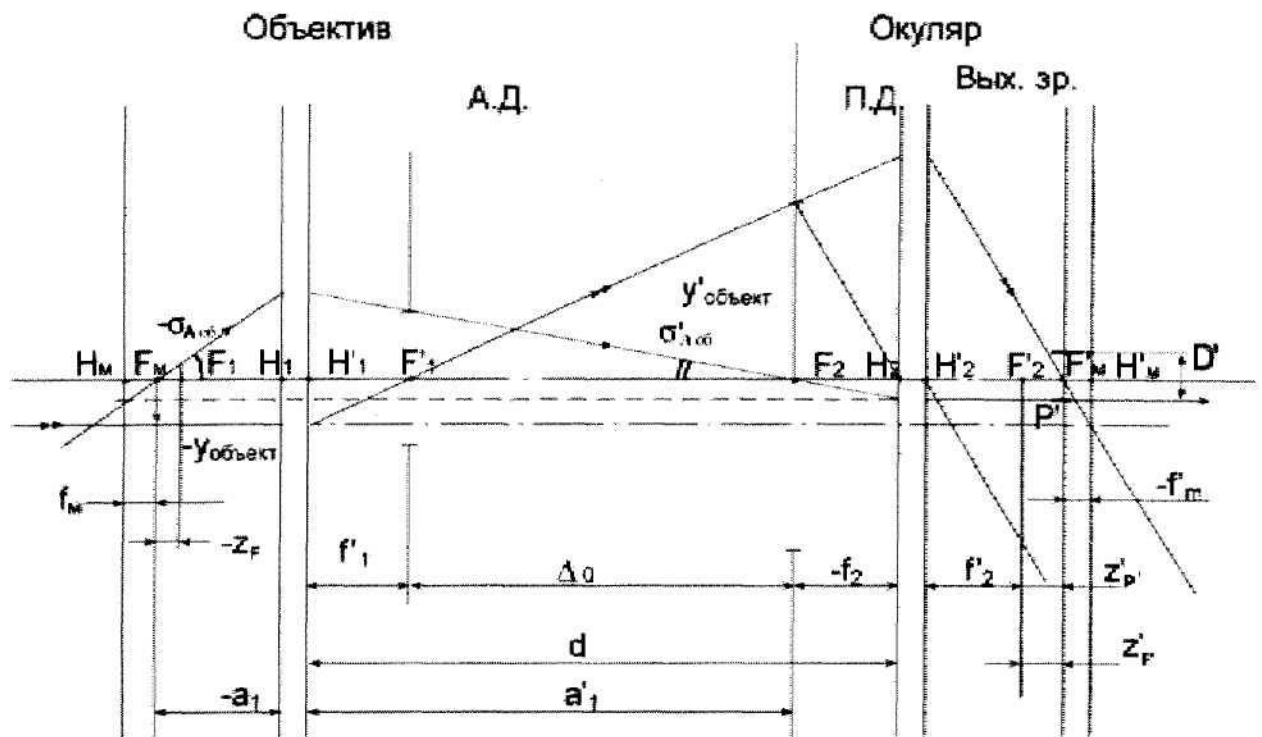


Рисунок 3.2. Ход лучей в наблюдательной системе микроскопа, состоящей из объектива и окуляра

### Основные формулы для расчета

1. Видимое увеличение микроскопа:

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

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

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

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

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

2. Линейное увеличение объектива:

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

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

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

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

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

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

4. Определение размера апертурной диафрагмы микроскопа:

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

где  $\sigma'_{Аоб}$  - апертурный угол объектива в пространстве изображения, причем:

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

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:

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

или:

$$A'_{об} = n' \sin(\operatorname{arctg} \frac{D'_{АД}}{\gamma_{\Lambda}}) \quad (3.21)$$

8. Определение диаметра полевой диафрагмы микроскопа:

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

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

9. Определение разрешающей способности микроскопа в линейной мере:

$$\delta = \frac{\lambda}{\gamma_{\Lambda}} \quad (3.23)$$

где  $\lambda$  - длина волны света в мм.

10. Определение глубины резко изображаемого пространства:

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



где  $T_a$  - аккомодационная глубина;

$T_e$  - волновая глубина.

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

$$T = T_e = \frac{\lambda}{\gamma^2} \quad (3.25)$$

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

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

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  $\Delta_0$  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.

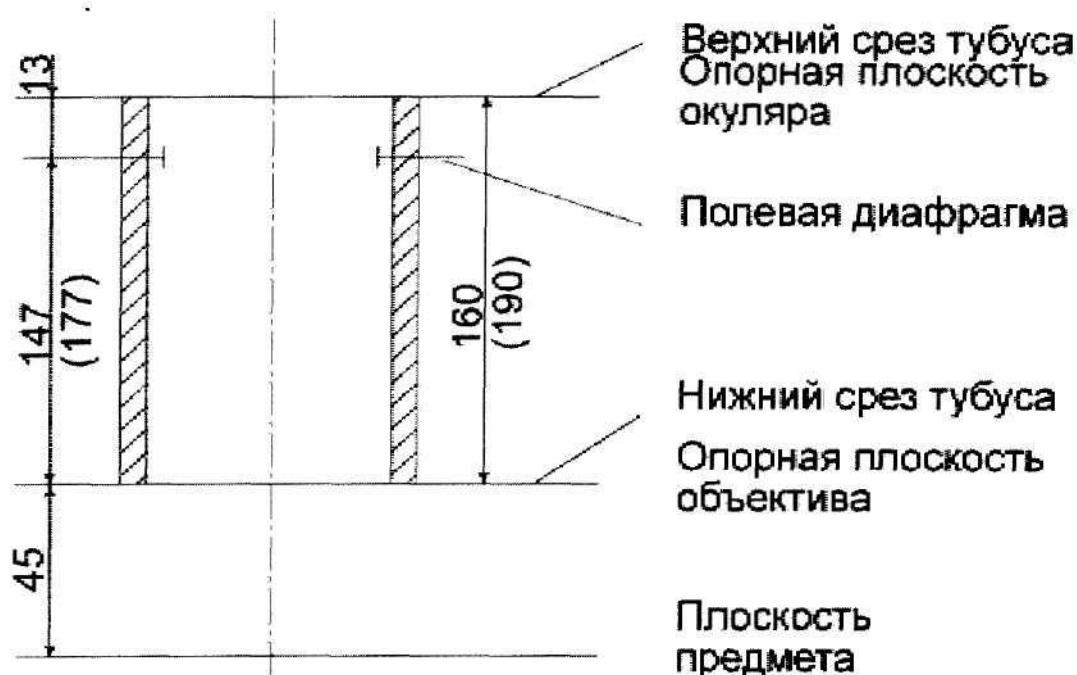


Рисунок 3.3. Схема тубуса упрощенного микроскопа.

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  $f'_{т.л.} = 250; 190; 125\text{мм}$ .

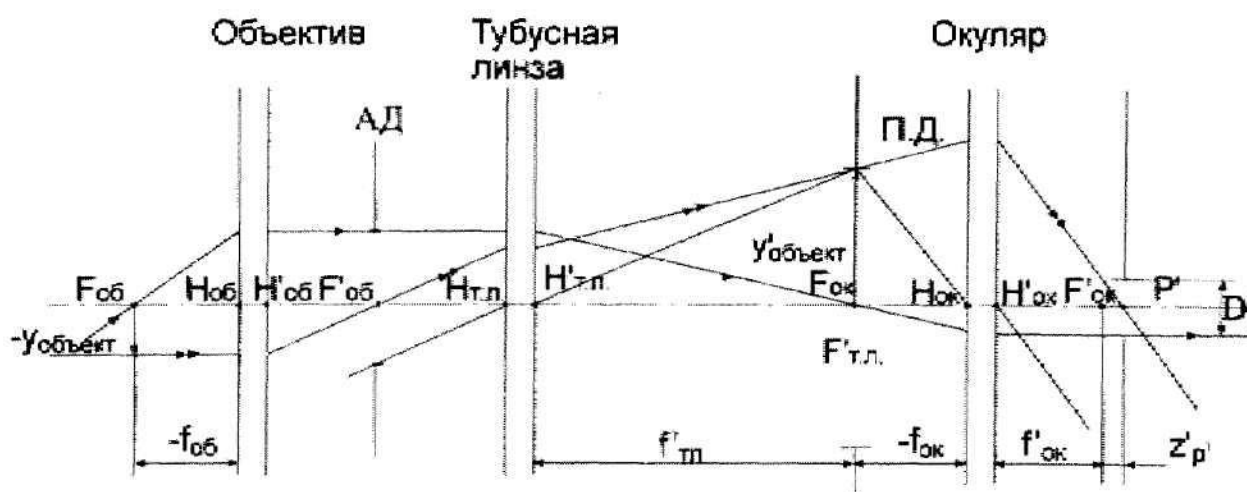


Рисунок 3.4. Ход лучей в наблюдательной части микроскопа, содержащей объектив с тубусом бесконечность.

### Основные формулы для расчета

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

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

2. Видимое увеличение микроскопа:

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

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

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

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

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

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  $\bar{G}$ , числовую апертуру объектива  $A_{об}$ , разрешающую способность  $\delta$ , диаметр выходного зрачка.

3.2. По апертуре 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  $D_{ПД}$  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  $2\omega' = 40^\circ \div 50^\circ$ ,  $S'_{p'} \cong \frac{f'_{ок}}{2}$  и  $S'_{p'} = \frac{f'_{ок}}{2}$ .

Симметричные окуляры применяются в основном для микрофотографирования и реже для визуального наблюдения, для них  $2\omega' = 40^\circ$ ,  $S'_{p'} \cong 0,75 f'_{ок}$ . Окуляры Аббе (ортоскопические) применяются совместно с объективами ахроматами средних апертур при больших увеличениях. Угловые поля этих окуляров  $2\omega' = 40^\circ$  и  $S'_{p'} \cong 0,75 f'_{ок}$ . 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:

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

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

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  $f'_{ок}$  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.

## Практическая работа №4. 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. 1.1. 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.
  2. 1.2. По полученным данным подобрать объектив и окуляр из каталогов оптических систем программы «ОПАЛ».
  3. 1.3. Составить телескопическую систему и определить расстояния между компонентами.
  4. 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  $\Delta$  - 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  $\Gamma_T$ , линейное  $\beta$ , угловое  $\gamma$  и продольное  $\alpha$  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.

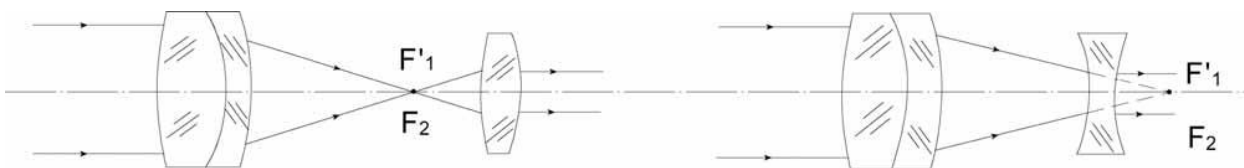


Рис. 5.1. Схема простых телескопических систем. а) Зрительная труба Кеплера. б) Зрительная труба Галилея.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение  $\Gamma_T$ , угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$ , 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  $\varphi$ .

### 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.



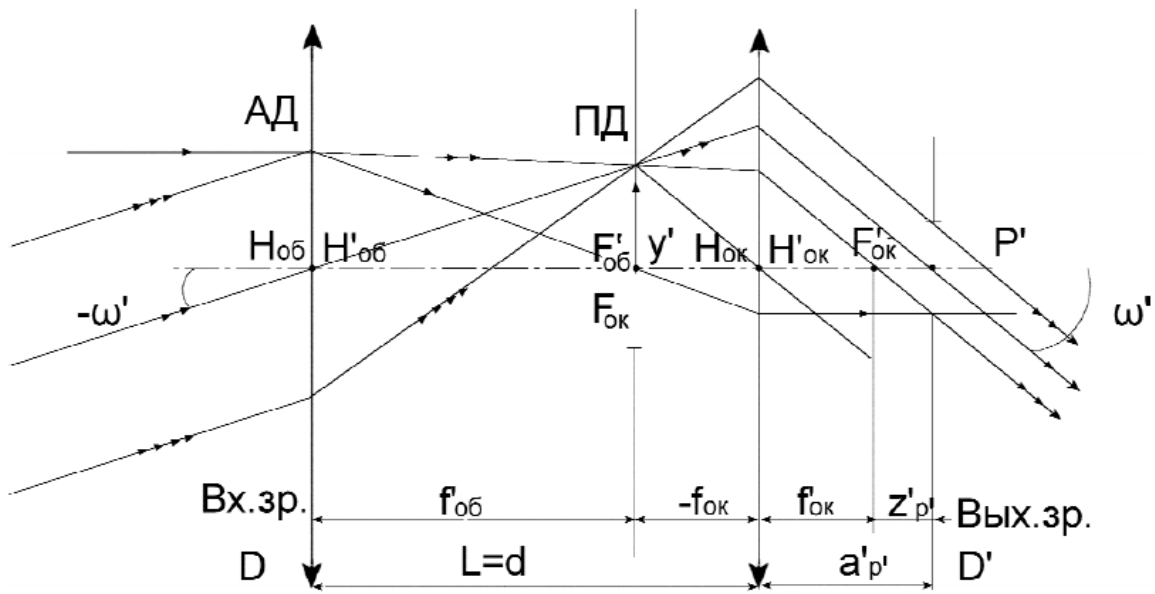


Рис. 5.2. а) Ход лучей в трубе Кеплера при  $a_p = 0$ .

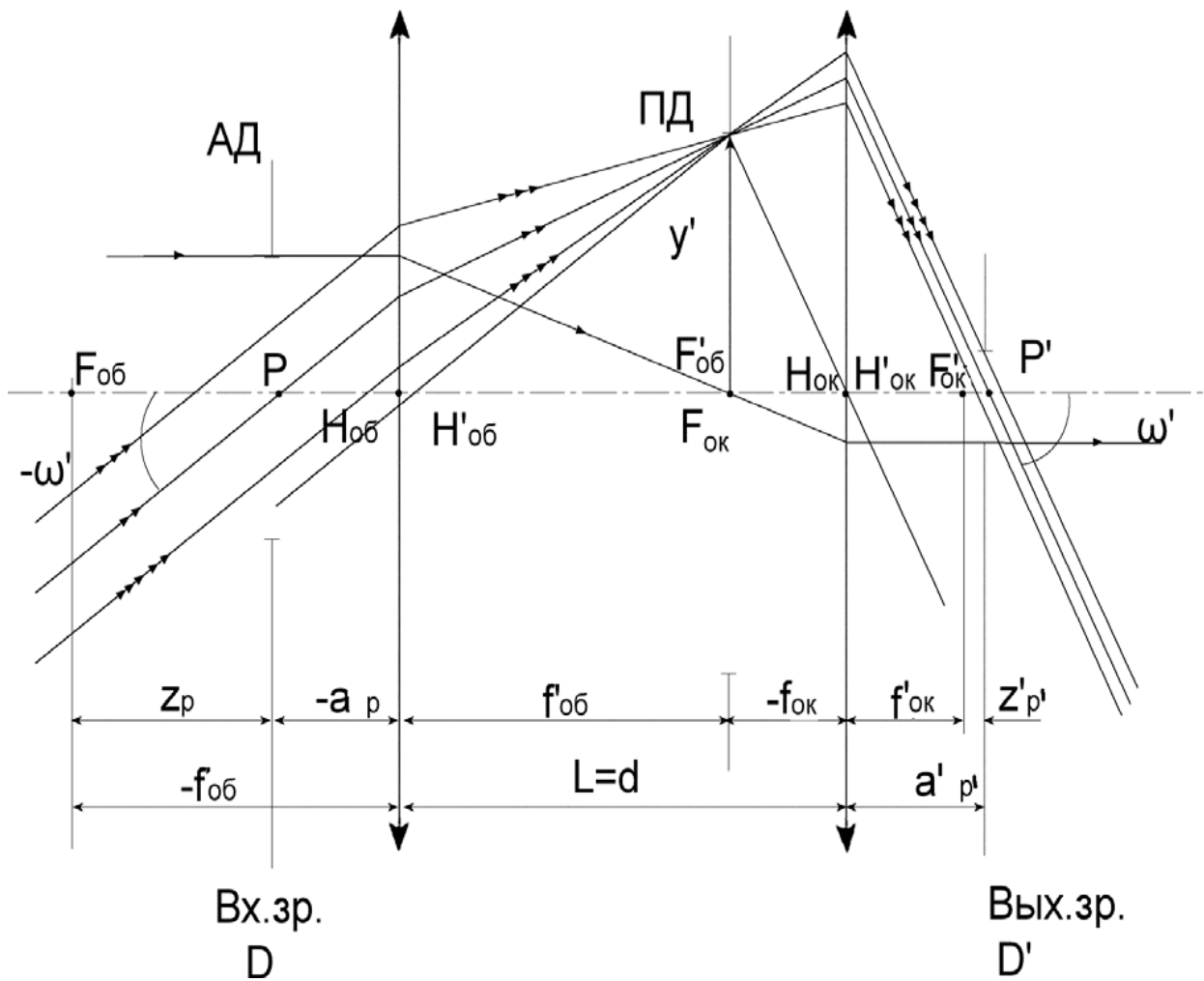


Рис. 5.2. б) Ход лучей в трубе Кеплера при  $a_p \neq 0$  и виньетировании 50%.

## 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:

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

4. Удаление выходного зрачка от заднего фокуса окуляра:

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

где  $z$  - расстояние входного зрачка от переднего фокуса объектива.

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

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

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  $a$  - 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.

$$D = 2m, \quad (5.15)$$

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

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

$$\varphi = \frac{1.22\lambda}{D}. \quad (5.17)$$

Если принять  $\lambda = 0,000556 \text{ мм}$  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

$$\Gamma_T = -\frac{f_1'}{f_2'} > 0 \quad \text{и система дает прямое изображение.}$$

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.

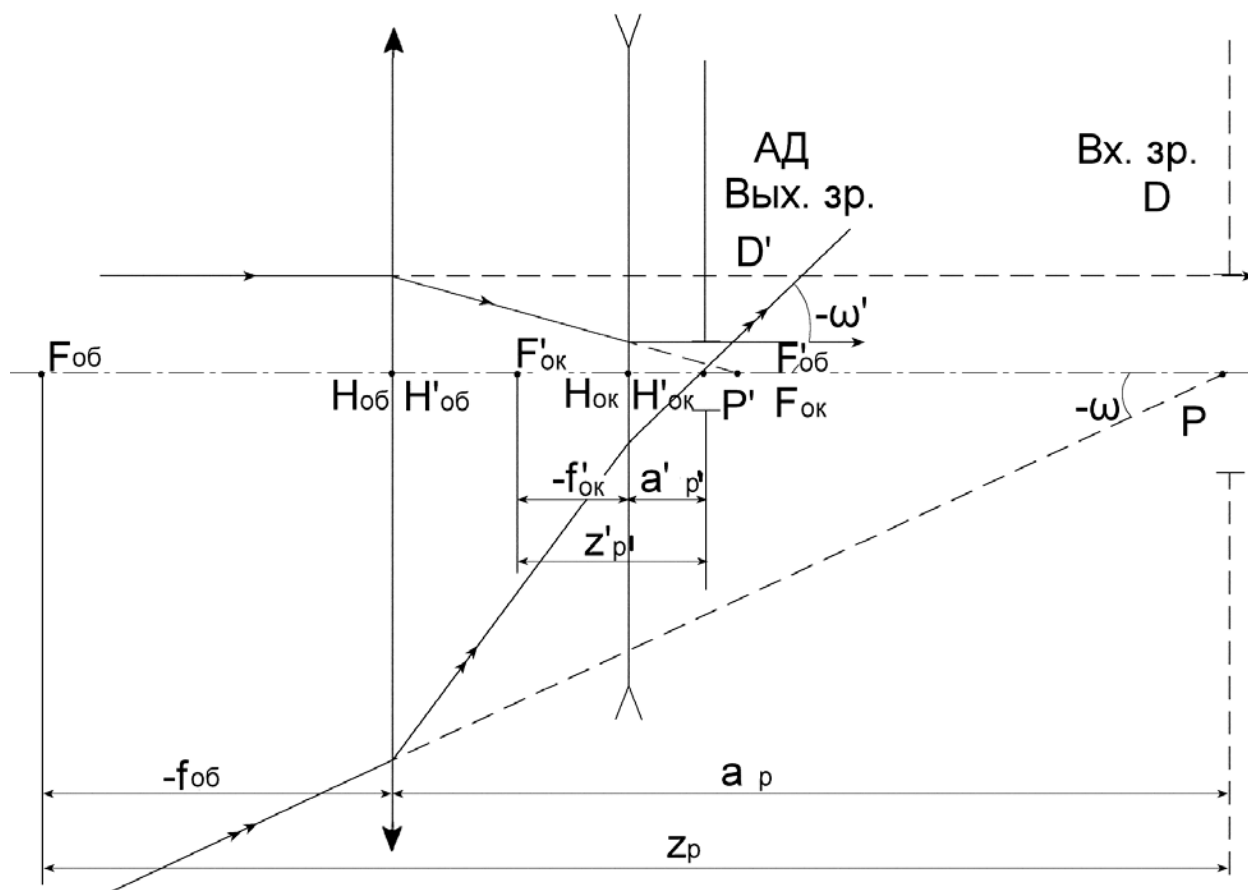


Рис. 5.3. Оптическая схема трубы Галилея с ходом лучей.

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  $a$  находим по формуле:

$$a_p = a'_p \cdot \Gamma_T^2 + f'_1 (\Gamma_T - 1). \quad (5.22)$$

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

Угловое поле в трубе Галилея ограничивается виньетирующей диафрагмой, роль которой выполняет оправа объектива. В зависимости от степени виньетирования угловое поле в пространстве предметов можно рассчитать по следующим формулам:

а) при отсутствии виньетирования:

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

б) при виньетировании 50%:

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

в) при виньетировании 100%:

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

При виньетировании 50% диаметры объектива и окуляра определяются выражениями:

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

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

### 3. Указания для выполнения лабораторной работы

3.1. По заданным исходным данным и приведенным выше формулам рассчитать фокусные расстояния объектива  $f'_2$  и окуляра  $f'_2$ , угловые поля в пространстве предметов  $2\omega$  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)  $D_{но}$  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  $2\omega$  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	$\leq 300$	$\leq 500$	$\leq 1000$
$D/f'_1$ , 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  $a_{P_{каталог}} \geq a_{P_{расчет}}$  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 призмённые 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 призм 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:

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

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

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

где  $n$  – показатель преломления стекла призмы;

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

Добавляя  $1 \div 2$  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:

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

Ширина редуцированной воздушной пластины равны:

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

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

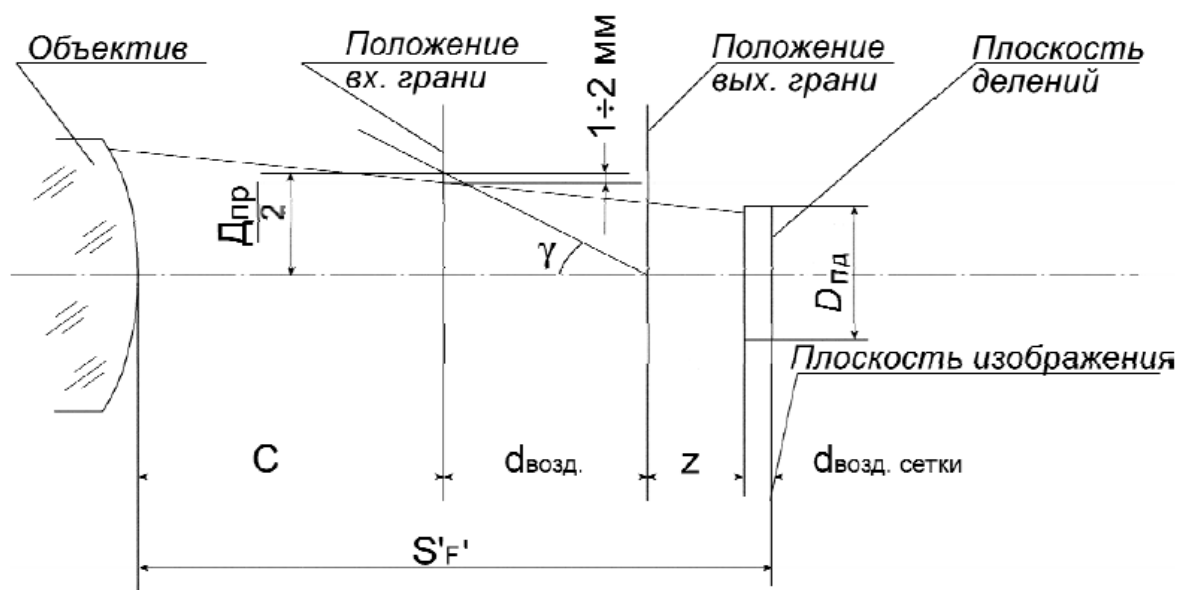


Рисунок 5.4. Определение размеров граней призмы.



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

$$c = S'_{F'_1} - d_{\text{возд.сетка}} - z - d_{\text{возд}}. \quad (5.39)$$

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.

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

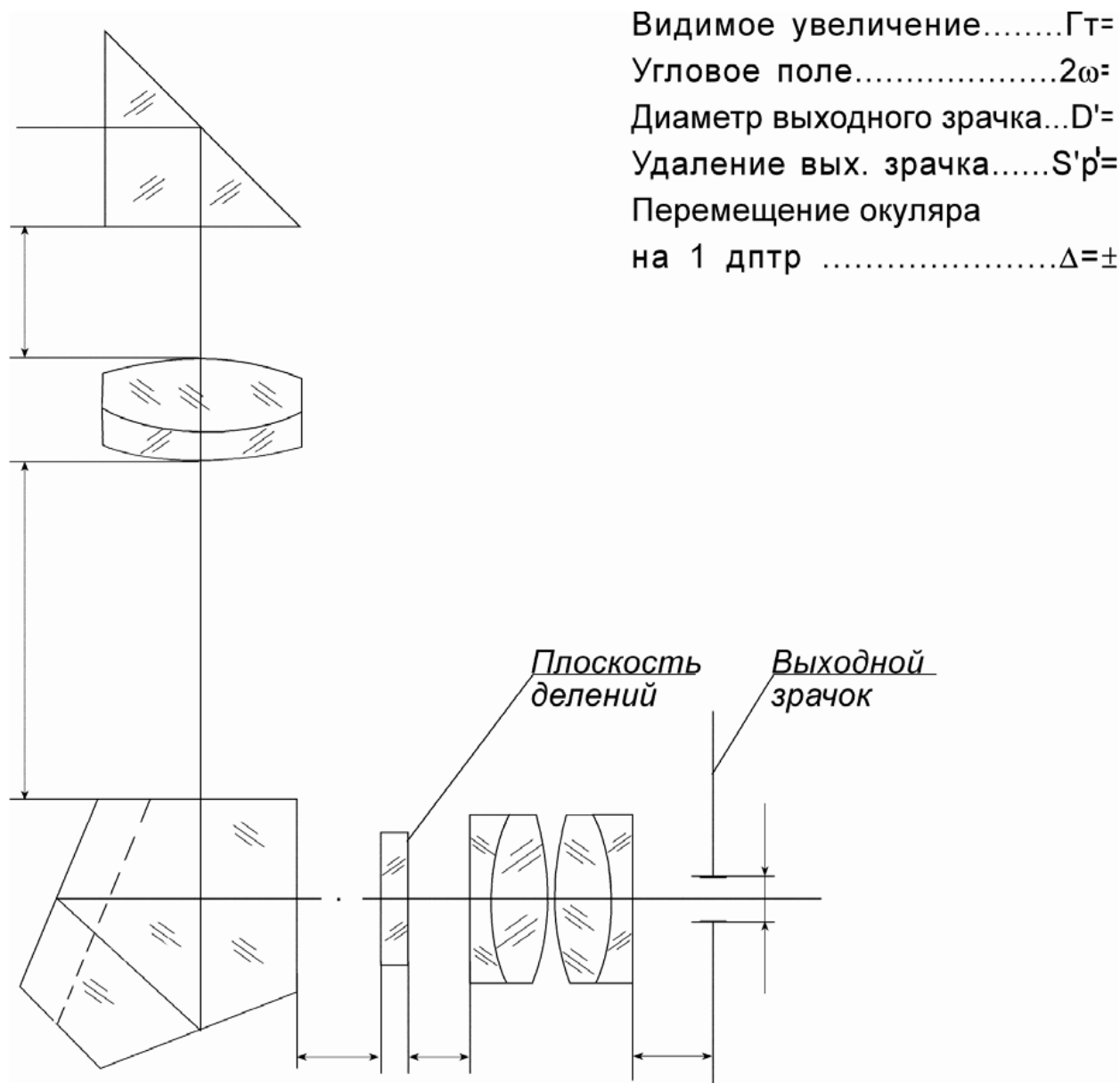


Рисунок 5.5. Оптическая схема зрительной трубы Кеплера.

#### 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. Прикладная оптика часть 2. Учебно-методическое пособие под ред проф. Шехонина А.А.
2. Теория оптических систем. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. М: Машиностроение, 1992
3. Прикладная оптика. Дубовик А.С., Апенко М.И. и др. М.: Недра,1992
4. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Панов В.А. и др., Л. Машиностроение ,1980
5. Методические указания по выполнению домашних заданий по курсу: «Теория оптических приборов и техническая оптик» Л., 1981, ИТМО
6. 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.	$G_T$	$D'$	$2\omega$	$ap$	Относ. отв. объектива и окуляра	$2\omega'$	$D$	Примечание
1.	$3,5^x$	5	$10^\circ$	0	1:7	-	-	Система Малафеева- Порро I рода после объектива
2.	$4^x$	5	$10^\circ$	-10	1:7	-	-	
3.	$4,2^x$	5	$10^\circ$	-15	1:7	-	-	
4.	$4,4^x$	4	$10^\circ$	-20	1:7	-	-	
5.	$4,5^x$	4	$10^\circ$	0	1:6	-	-	
6.	$4,6^x$	4	$10^\circ$	-10	1:6	-	-	
7.	$5^x$	4	$8^\circ$	-15	1:6	-	-	
8.	$5,4^x$	5	$8^\circ$	-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	$7^\circ$	-20	1:5	-	-	
12.	$5,6^x$	4	$8^\circ$	-25	1:6	-	-	
13.	$5,7^x$	4	$7^\circ 30'$	-20	1:5	-	-	
14.	$5,5^x$	5	$8^\circ$	-25	1:5	-	-	
15.	$5,9^x$	5	$7^\circ$	-15	1:4	-	-	
16.	$5,8^x$	4	$8^\circ$	-25	1:6	-	-	
17.	$6^x$	6	$7^\circ 30'$	-15	1:5	-	-	
18.	$4^x$	5	-	0	1:6	$38^\circ$	-	Призма Шмидта с крышей (ВКР-45) после объектива
19.	$4,2^x$	5	-	-10	1:6	$40^\circ$	-	
20.	$4,4^x$	5	-	-30	1:6	$40^\circ$	-	
21.	$4,5^x$	4,5	-	0	1:5	$40^\circ$	-	
22.	$4,6^x$	4,5	-	0	1:5	$40^\circ$	-	
23.	$4,7^x$	4,5	-	0	1:6	$45^\circ$	-	
24.	$4,8^x$	4	-	-10	1:5	$45^\circ$	-	
25.	$4,9^x$	4	-	-20	1:4	$40^\circ$	-	
26.	$5^x$	4	$10^\circ$	-15	1:4	-	-	
27.	$5,1^x$	4	$10^\circ$	0	1:5	-	-	
28.	$5,2^x$	4	$10^\circ$	0	1:6	-	-	
29.	$5,3^x$	4	$8^\circ$	0	1:4	-	-	

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

Таблица 5.2.

## Труба Галилея

№ вар.	$\Gamma T$	$D'$	$2\omega$	$ap$	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	

#### 4. Задания для работы

№ варианта	Числовая апертура, $A_{об}$	Разрешающая способность, $\delta$ (мм)	Видимое увеличение, $\bar{G}$	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 <sup>x</sup>	—
14.	0,2	—	-100 <sup>x</sup>	—
15.	0,3	—	-150 <sup>x</sup>	—
16.	0,4	—	-200 <sup>x</sup>	—
17.	0,5	—	-250 <sup>x</sup>	—
18.	0,6	—	-300 <sup>x</sup>	—
19.	0,7	—	-350 <sup>x</sup>	—
20.	—	—	-400 <sup>x</sup>	—



21.	–	–	-450 <sup>x</sup>	–
22.	–	–	-500 <sup>x</sup>	–
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 <sup>x</sup>	250
35.	–	–	-220 <sup>x</sup>	250
36.	–	–	-250 <sup>x</sup>	190
37.	–	–	-270 <sup>x</sup>	190
38.	–	–	-300 <sup>x</sup>	190
39.	–	–	-350 <sup>x</sup>	190

## Практическая работа №5. Конструирование линзы

**Цель работы:** определить оптические и конструктивные параметры

### Основные формулы для решения задач

Формула линзы, расположенной в воздухе ( $n_1 = n_3 = 1$ ),  $n_2 = n$ :  
оптическая сила

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

Для линзы, расположенной в воздухе:

- фокальные отрезки

$$s'_{F'} = f' \left( 1 - \frac{n - 1}{nr_1} d \right); s_f = -f' \left( 1 - \frac{n - 1}{nr_2} d \right)$$

- отрезки, определяющие положение главных плоскостей

$$s'_{H'} = -f' \frac{n - 1}{nr_1} d; s_H = -f' \frac{n - 1}{nr_2} d$$

- расстояние между главными точками

$$\Delta_{HH'} = \left[ 1 - \frac{f'}{n} (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] d$$

Для бесконечно тонкой линзы ( $d = 0$ ) главные плоскости совпадают между собой и с поверхностями линзы. В этом случае:

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right); s'_{F'} = -s_f = f'; s'_{H'} = s_H = 0$$

Переднее и заднее фокусные расстояния линзы связаны зависимостью  $f = -(n_1/n_2)f'$ .

### Линза (зеркало) Манжена (рис.1)

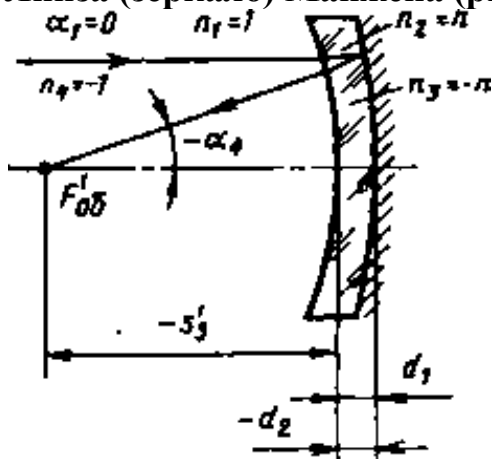


Рис. 1. Линза Манжена

$r_1 = r_3, n_1 = 1, n_3 = -n_2 = -n, n_4 = -n_1 = -1, d_2 = -d_1$

Бесконечно тонкая линза Манжена  $d_2 = -d_1 = 0$ .

Оптическая сила  $\Phi$  и фокусное расстояние  $f'$

$$\Phi = n_d/f' = \sum_{v=1}^3 (n'v - nv)/rv = 2(n-1)(p_1 - p_2) - 2p > 0$$

$$f' = a'_F = a'_3 < 0.$$

Линза Манжеса конечной толщины — кардинальные элементы определяют из расчета хода первого параксиального луча при  $\alpha_1 = 0$ .

### Размеры линзы

Световой диаметр линзы

а) при  $s_1 = -\infty$  (рис. 2, а):  $D_{CB} = D + 2ap \operatorname{tg} \omega$ .

б) при  $s_1 \neq \infty$  (рис. 2, б):  $D_{CB} = D + [a_p (D + 2y)/(a_1 - a_p)]$ .

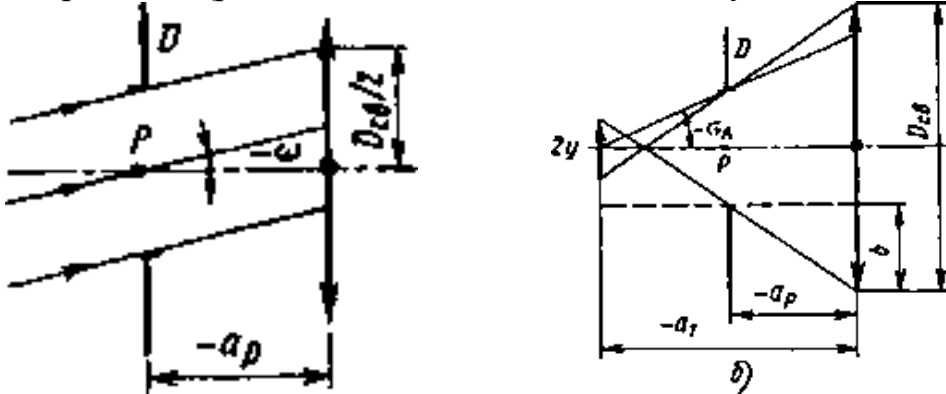


Рис. 2. Ход полевых лучей для определения светового диаметра линзы (компонента)

Полный диаметр  $D_{пол}$  линзы:  $D_{пол} = D_{CB} + \Delta D$ , где  $\Delta D$  — припуск на закрепление линзы в оправе.

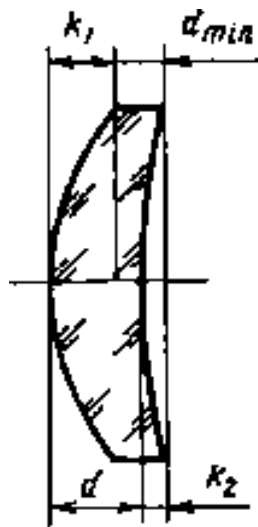


Рис. 3. К определению толщины положительной линзы

### Толщина положительной линзы рис. 3

$d = k_1 + d_{min} - k_2 \geq D_{пол}$ . где  $d_{min}$  определяется из нормативно-технической документации,  $k_v = r_v - [r_v / \sqrt{rv^2 - D_{пол}^2/4}]$  — стрелка прогиба для сферической поверхности; для асферической поверхности  $z_v = k_v$  определяется из уравнения профиля поверхности при  $y = D_{пол}/2$ .

Толщина отрицательной линзы  $d = (0,08 \dots 0,15) D_{пол}$  в зависимости от

диаметра и точности обработки, чаще всего принимают  $d = 0,1D_{\text{пол.}}$ .

### Расчет очковых линз

Аметропия глаза  $A = \pm 1000/s_d$ , где  $s_d$  — удаление дальней точки глаза, выраженное в метрах.

Фокусное расстояние очковой линзы для исправления аметропии  $A : f' = s_d + d$ , где  $d = -f_{2л} = 17,1$  мм (для редуцированного глаза).

Оптическая сила очковой линзы для исправления аметропии  $A$   
 $\Phi_{л} = A / (1 + Ad/1000)$ .

### Конструирование линзы.

Конструктивные элементы линз разделяются на две группы:

Первая группа — элементы, которые характеризуют оптическое действие линзы и определяются при расчете оптической системы: константы оптического стекла и технические требования к нему, радиусы кривизны (форма) поверхностей, толщина (по оси), световые диаметры, вид просветления или защиты поверхностей и допуски на качество поверхности, чистоту и центрировку. Расчетные радиусы кривизны должны быть округлены до ближайших значений по ГОСТу 1807—57.

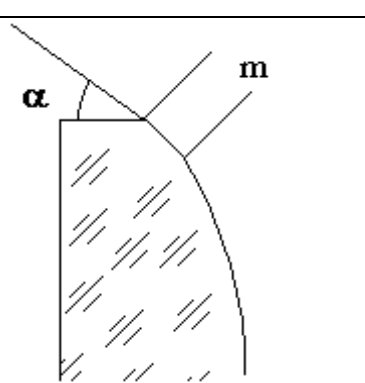
При расчете не должны допускаться слишком тонкие линзы, так как при полировании они прогибаются, что делает невозможным получение точных поверхностей и центрировку (мал припуск на центрировку и трудно разместить фаски).

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  $0,05D$ .

Вторая группа — элементы, зависящие от способа крепления линз. К этой группе относятся диаметры линз  $D$ , а также размеры и расположение фасок (табл. 3—5).

Табл 3. Фаски для крепления кольцом и предохранения от выколов

Диаметр детали в мм	Ширина фаски $t$ в мм		Расположение фаски
	несклеиваемая сторона	склеиваемая сторона	
До 6	$0,1^{+0,1}$	$0,1^{+0,1}$	
Св. 6 до 10	$0,1^{+0,2}$	$0,1^{+0,2}$	
10 - 18	$0,2^{+0,3}$		
18 - 30	$0,3^{+0,3}$		
Св. 30 до 50	$0,3^{+0,4}$	$0,2^{+0,3}$	
50 - 80	$0,4^{+0,5}$		
Св. 80 до 120	$0,5^{+0,6}$		
120 - >>>	$0,7^{+0,8}$		

#### 4. Угол наклона фаски в зависимости от D/R

D/R	Угол наклона фаски		в град
	на выпуклой поверхности	на вогнутой поверхности	на плоской поверхности
До 0.4	45	45	
Св. 0,4 до 0,7	40	50	
» 0,7 » 1,0	35	55	
» 1.0 » 1.3	30	60	45
» 1,3 » 1,5	25	65	
» 1,5 » 1,75	—	70	
» 1.75 » 2	—	90	
Примечание. Угол наклона фаски проверке не подлежит.			

#### 5. Фаски для крепления линз завальцовкой

D в мм	t в мм	D в мм	t в мм
До 6	0 <sup>+0,2</sup>	Св. 18 до 30	0,5 <sup>+0,3</sup>
Св. 6 до 10	0,3 <sup>+0,2</sup>	» 30 » 50	0,7 <sup>+0,5</sup>
» 10 » 18	0,4 <sup>+0,2</sup>	» 50 » 80	1,0 <sup>+0,5</sup>

Фаски снимаются:

- 1) для предохранения линз от выколов при сборке, а также вследствие появления мелких выколов на острых краях в процессе центрировки (защитные фаски);
- 2) для крепления линз завальцовкой и обеспечения центрировки;
- 3) для удаления излишков стекла.

Фаски для предохранения от выколов снимаются на острых краях **всех** линз. Ширина фаски берется в зависимости от диаметра линзы. Фаски снимаются с помощью сферических чашек, чтобы угол, образованный хордой фаски и цилиндрическим ободком линзы, примерно равнялся углу между фаской и касательной к сферической поверхности линзы в этом месте.

На выпуклых поверхностях при отношении диаметра детали к радиусу поверхности более 1,5 фаску не снимают. В чертежах указывают ширину фаски  $t$  и угол ее наклона

Фаски третьего типа снимаются главным образом со стороны вогнутой поверхности линз в том случае, когда световые диаметры с одной и другой стороны линзы значительно различаются между собой. Такие фаски снимают либо под углом  $45^\circ$  к ободку линзы, либо применяют двойные фаски — плоскую и под углом  $45^\circ$ .

#### Задачи для разбора

**Задача 1.** Линза имеет следующие конструктивные параметры:  $r_1=120$  мм,  $r_2=100$  мм,  $d=20$  мм,  $n_e=1,5183$  (стекло К8). Определить тип линзы, ее

фокусное расстояние  $f'$  и фокальные отрезки  $s_F, s'_{F'}$ . Определить положение  $s_H, s'_{H'}$  главных точек, не пользуясь формулами.

*Решение.* Для данной линзы  $r_1 - r_2 = d$ , т. е. линза является концентрической, поэтому главные точки совпадают друг с другом и с центром кривизны поверхностей линзы,  $s_H = r_1, s'_{H'} = r_2$ .

Для определения фокусного расстояния преобразуем формулу оптической силы линзы в воздухе, подставив условие концентричности  $r_1 - r_2 = d$ :

$$\begin{aligned} \Phi = \frac{1}{f'} &= (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n - 1)^2}{n} \cdot \frac{d}{r_1 r_2} = (n - 1) \frac{(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} + \\ &+ \frac{(n - 1)^2 (r_1 - r_2)}{n r_1 r_2} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \left( 1 - \frac{n - 1}{n} \right) = \frac{n - 1}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \\ &= - \frac{n - 1}{n} \cdot \frac{d}{r_1 r_2}. \end{aligned}$$

В результате получаем  $f' = 1/\Phi = n r_1 r_2 / [(r_2 - r_1)(n - 1)] = 1,5183 \cdot 100 \times 120 / [(100 - 120)(1,5183 - 1)] = -1757,63$ ,  $f = -f' = 1757,63$ .

Так как  $s_H = r_1 = 120$ , то  $s_F = s_H + f = r_1 + f = 120 + 1757,63 = 1877,63$ . Учитывая, что  $s'_{H'} = r_2 = 100$ , можно записать  $s'_{F'} = s'_{H'} + f' = r_2 + f' = 100 - 1757,63 = -1657,63$

**Задача 2.** В линзе-шаре задний фокус совпадает с вершиной второй поверхности. Определить показатель преломления стекла и найти стекло со значением  $n_e$ , близким к вычисленному.

*Решение.* В соответствии с условиями задачи  $s'_{F'} = 0$ . Используя формулу оптической силы линзы, выведем соотношения для  $f'$ , а затем для  $s'_{F'}$  линзы шара, учитывая, что  $r_1 = -r_2 = r, d = r_1 - r_2 = 2r_1 = -2r_2$ .

Для  $f'$  имеем  $f' = n r_1 / [2(n - 1)]$ . Линза-шар является концентрической, у которой  $s_H = r_1, s'_{H'} = r_2$ . Действительно, учтя, что  $d = 2r_1$  и полученную формулу для фокусного расстояния  $f'$  из уравнений для  $s_H$  и  $s'_{H'}$  имеем записанные выше равенства:

$$\begin{aligned} s_H &= -f'(n - 1) d / (n r_2) = 2f'(n - 1) / n = r_1, \\ s'_{H'} &= -f'(n - 1) d / (n r_1) = 2f'(n - 1) / (n r_2) = r_2. \end{aligned}$$

Поэтому

$$s'_{F'} = f' + s'_{H'} = n r_1 / [2(n - 1)] + r_2 = n r_1 / [2(n - 1)] - r_1 = r_1 (2 - n) / [2(n - 1)],$$

тогда получаем, что  $n = 2$ , если  $s'_{F'} = 0$ . Близкое значение  $n_e$  имеет стекло СТФ2 ( $n_e = 1,9554$ ). Для линзы-шара из этого стекла получим  $s'_{F'} = 0,223$ . Если  $n = 2$ , то  $f' = r_1$ , и так как линза находится в воздухе, то  $f = -f'$ , следовательно  $f = r_2$ .

**Задача 3.** Симметричная двояковыпуклая линза, сделанная из стекла К8 ( $n_e = 1,5183$ ), имеет фокусное расстояние 100 мм, толщину 5 мм. Определить радиусы кривизны линзы, расположенной в воздухе.

*Решение.* В симметричной линзе  $r_2 = -r_1$ . Это условие подставим в формулу фокусного расстояния линзы и преобразуем ее.

$$f' = nr_1r_2/\{(n-1)[n(r_2-r_1)+d(n-1)]\} = \\ = -nr_1^2/[-(n-1)n2r_1+d(n-1)^2],$$

откуда

$$nr_1^2 - 2f'(n-1)nr_1 + f'd(n-1)^2 = 0$$

или

$$r_1^2 - 2f'(n-1)r_1 + f'd(n-1)^2/n = 0.$$

Подставив численные значения, имеем:

$$r_1^2 - 103,66r_1 + 88,4657 = 0,$$

откуда  $r_1 = 51,83 \mp 50,9694$ ,  $r_1 = 102,799 \approx 102,8$ .

В результате получаем  $r_1 = 102,8$ ,  $r_2 = -102,8$ .

**Задача 4.** Найти фокусное расстояние и задний фокальный отрезок тонкой линзы Манжена, образованной, линзой, для которой  $r_1 = -100$  мм,  $r_2 = -200$  мм,  $d = 0$ , а вторая поверхность покрыта отражающим слоем. Линза выполнена из стекла К8 ( $n_e = 1,5183$ ).

*Решение.* Запишем конструктивные параметры линзы Манжена, учитывая, что по ходу луча для расчета линза имеет 3 радиуса кривизны и 2 толщины, причем после отражения от второй поверхности меняются знаки на противоположные у показателей преломления сред, т. е.  $n_3 = -n_2 = -n$ ,  $n_4 = -1$  но  $r_3 = r_1$ :

$r_1 = -100$	$d_1 = 0$	1
$r_2 = -200$	$d_2 = 0$	1,5183
$r_3 = -100$		-1,5183
		-1

Фокусное расстояние и задний фокальный отрезок  $f' = a'_{F'}$ , можно определить для бесконечно тонкой линзы Манжена двумя способами: используя формулу для оптической силы тонкой линзы Манжена, предварительно выведя ее, а затем переходя к фокусному расстоянию, или расчетом хода параксиального луча.

Первый способ. Оптическую силу тонкой линзы Манжена можно получить суммированием оптических сил отдельных поверхностей по ходу луча, т. е.

$$\Phi = n_4/f' = \sum_{v=1}^{v=3} (n'_v - n_v)/r_v = \sum_{v=1}^{v=3} (n'_v - n_v)/p_v.$$

Из этой формулы получаем

$$\Phi = (n_2 - n_1)p_1 + (n_3 - n_2)p_2 + (n_4 - n_3)p_3 = (n - 1)p_1 - 2np_2 + \\ + (n - 1)p_1 = 2(n - 1)p_1 - 2np_2 = 2(n - 1)(p_1 - p_2) - 2p_2.$$

Подставим числовые значения в полученную формулу:

$\Phi = 2(n - 1)(p_1 - p_2) - 2p_2 = 2(1,5183 - 1)[1/(-100) - 1/(-200)] - 2/(-200) = 0,04817$ , в результате имеем  $f' = 1/\Phi = -207,598$ , т.е.  $f' = 207,6$  мм.

Второй способ. Рассчитаем ход первого параксиального луча, для которого  $\alpha_1 = 0$ ; примем  $h = 10$ , причем  $h_1 = h_2 = h_3 = h$ , т. к. линза тонкая.

$$\alpha_2 = h_1(n - 1)nr_1 = 10(1,5183 - 1)/[(1,5183)(-100)] = -0,0341369;$$

$$\alpha_3 = n_2\alpha_2/n_3 + h_2(n_3 - n_2)/n_3r_2 = n\alpha_2/(-n) + h(-n - n)/(-nr_2) = -\alpha_2 +$$

$$+ 2h/r_2 = 0,0341369 + 2 \cdot 10/(-200) = 0,0658631;$$

$$\alpha_4 = n_3\alpha_3/n_4 + h(n_4 - n_3)/n_4r_3 = n\alpha_3 - h(n - 1)/r_3 = 1,5183 \times$$

$$\times 0,0658631 - 10 \cdot 1,5183 - 1/(-200) = -0,04817;$$

$$f' = h_1/\alpha_4 = -10/0,04817 = -20,598;$$

$$s'_{F'} = h_3/\alpha_4 = h_1/\alpha_4 = -207,598, \text{ т.е. } f' = \alpha'_{F'} = -207,6.$$

**Задача 5.** Найти фокусное расстояние и задний фокальный отрезок линзы Манжена конечной толщины (рис. 9.1), для которой  $d = 10$  мм, взяв остальные данные из задачи 9.4. Сравнить значения фокусных расстояний линзы конечной толщины и тонкой линзы из задачи 9.4.

*Решение.* Запишем конструктивные параметры линзы, учитывая, что

$n_4 = -n_1,$	$n_3 = -n_2 = -n,$	$r_1 = r_3,$	$d_2 = -d_1.$
			1
$r_1 = -100$		$d_1 = 0$	1,5183
$r_2 = -200$		$d_2 = 0$	-1,5183
$r_3 = -100$			-1

Задачу можно решить расчетом хода первого параксиального луча из бесконечности, когда  $\alpha_1 = 0$ . Примем  $h_1 = 10$ , тогда  $\alpha_2 = h_1(n - 1)/(nr_1) = -0,0341369$ , такое же значение, как и для тонкой линзы;

$$h_2 = h_1 - d_1\alpha_2 = 10 - 10(-0,0341369) = 10,3414;$$

$$\alpha_3 = -\alpha_2 + 2h_2/r_2 = 0,0341369 + 2 \cdot 10,3414/(-200) = -0,0692771;$$

$$h_3 = h_2 - d_2\alpha_3 = h_2 - d_1\alpha_3 = 10,3414 + 10(-0,0692771) = 9,6486;$$

$$\alpha_4 = n\alpha_3 - h_3(n - 1)/r_3 = 1,5183(-0,0692771) - 9,6486(1,5183 - 1)/(-100) = -0,0551746;$$

$$f' = h_1/\alpha_4 = 10/(-0,0551746) = -181,243;$$

$$s'_{F'} = h_3/\alpha_4 = 9,6486/(-0,0551746) = -174,87.$$

По сравнению с тонкой линзой Манжена, для которой  $f' = -207,6$  мм, в линзе Манжена конечной толщины фокусное расстояние уменьшилось. Чтобы сохранить  $f'$  таким же, как в тонкой линзе, можно выполнить масштабирование. Коэффициент масштабирования представляет собой отношение заданного (требуемого) фокусного расстояния к полученному, т.е.  $K_M = f'_{\text{треб}}/f'_{\text{пол}} = -207,6/(-181,243) = 1,145424$ . Умножив радиусы кривизны линзы на этот коэффициент, имеем:  $r_1 = r_3 = 114,542$ ,  $r_2 = -229,085$ ,  $d_1 = -d_2 = 11,5$ .

Рассчитав вход первого параксиального луча через пересчитанную линзу так же, как было сделано выше, получим при  $\alpha_1 = 0$ ,  $h_1 = 10$ :



$$\alpha_2 = -0,0298029; h_2 = 10,3427; \alpha_3 = -0,0604928; h_3 = 9,64700;$$

$$\alpha_4 = -0,048193, f' = h_1/\alpha_4 = -207,495, s'_{f'} = h_1/\alpha_4 = -200,17.$$

Если требуется более высокая точность для  $f'$ , то можно выполнить повторное масштабирование, при котором  $k_M = 1,0000496$  относительно конструктивных параметров, полученных после первого масштабирования. После повторного масштабирования имеем  $r_1 = r_3 = -114,6$ ,  $r_2 = -229,2$ ,  $d_1 = -d_2 = 11,5$ . Из расчета первого параксиального луча получаем  $f' = -207,608$ ,  $s'_{f'} = -200,286$ .

Для линзы без асферической поверхности стрелка прогиба второй поверхности  $k = r_2 + \sqrt{r_2^2 + D_{пол}^2/4} = -51,83 + \sqrt{51,83^2 - 80^2/4} = 13,64$ . Толщина линзы  $d = 2,5 + 13,64 = 16,1$ . Разница в толщинах линз составляет  $0,4$  мм.

Фокусное расстояние линз одинаковое, оно определяется из формулы оптической силы линзы, которая для плосковыпуклой линзы упрощается и имеет вид  $\Phi = 1/f' = (n - 1) (-1/r_2)$ . Отсюда  $f' = (-r_2)/(n - 1) = -51,83/(1 - 1,5183) = 100$  мм.

Определим положение задней главной точки  $s'_{H'} = -f' [(n - 1)/n] x(d/r_2) = 0$ , т. к.  $r_1 = \infty$ , поэтому  $f' = s'_{f'} = 100$  мм.

**Задача 6.** Переднее фокусное расстояние глаза равно  $-17,1$  мм. Найти заднее фокусное расстояние глаза, если показатель преломления влаги внутренней камеры  $n = 1,336$ .

**Решение.** Фокусные расстояния системы связаны уравнением  $f/f' = -n/n'$ . В данном случае  $n = 1$ , поэтому  $f' = -f/n = +17,1 \times 1,336 = 22,85$  мм.

**Задача 7.** Дальняя точка миопического близорукого глаза находится на расстоянии  $0,5$  м. Определить аметропию глаза по величине и знаку. Какие очки нужны для исправления этой аметропии?

**Решение.** Дальняя точка расположена перед глазом,  $s_d = -0,5$  м. Аметропия  $A = 1000/s_d = -2$  дптр. Для исправления такой аметропии нужны отрицательные линзы с фокусным расстоянием  $f'_л = s_d + d$ . Для редуцированного глаза  $d = -f_{г.л} = 17,1$  мм, т. е. линзу надо установить так, чтобы ее задняя главная точка совпадала с передним фокусом глаза.

**Задача 8.** Определить параметра очковых линз (бифокальные очки) для пациента, у которого аметропия составляет для дальних предметов  $A_d = -4$  дптр и возрастная дальность зрения  $3$  дптр.

**Решение.** Очки расположены на расстоянии  $d = -f_{г.л} = 17,1$  мм от глаза, тогда оптическая сила очковой линзы  $\Phi_л = A/[1 + A_d/1000]$ , где  $A = 1/s_d$ ,  $s_d$  — расстояние до дальней точки.

Очки для «дали», т. е. для рассматривания далеких предметов должны иметь оптическую силу  $\Phi_{лд} = -4/[1 + (-4) \cdot 17,1/1000] = -4,29 = -4,3$  дптр; очки для работы на близком расстоянии  $\Phi_{лб} = 3/[1 + 3 \cdot 17,1/1000] = 2,85 = 2,9$  дптр.

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 9.** Найти кардинальные отрезки симметричной двояковыпуклой линзы из стекла БК10 ( $n_s = 1,5713$ ), у которой  $r_1 = 27,3$  мм, толщина линзы  $d = 6$  мм.

*Ответ:*  $f' = -f = 24,89$ ;  $s'_H = -s_H = -1,99$ ;  $s'_F = -s_F = 22,9$ .

**Задача 10.** При какой толщине линза в задаче 9.18 станет телескопической? Найти видимое увеличение этой линзы.

*Ответ:*  $d = 150,17$  мм,  $\Gamma_T = -1$ .

**Задача 11** Сконструировать линзу согласно варианта.

№	Световой диаметр расчетный, мм	Место размещения в приборе	Фокусное расстояние, м
1	25,542	Линза в окуляре телескопической системы	120
2	15,434	Линза в окуляре микроскопа	110
3	35,423	1 линза объектива телескопической системы	188
4	25,324	Линза фотообъектива	98
5	42,34	Линза проекционного объектива	212
6	81,23	1 Линза объектива телескопа	452
7	100,234	1 линза коллиматора	500
8	50,23	Осветительная линза микроскопа	245
9	40	Линза фотообъектива	110
10	8,123	Линза объектива микроскопа	50

Определите диаметр линзы, радиусы сферических поверхностей, размеры и расположение фасок, основные требования к материалу и изготовлению, составить эскиз чертежа.

#### Содержание отчета

1. Название работы
2. Цель работы
3. Эскиз конструкции
4. Выполненные расчеты

#### Контрольные вопросы

1. Приведите формулы линзы
2. Какому условию должна соответствовать толщина особо точных зеркал
- 3.

## Практическая работа №6. Конструирование зеркал

Цель работы: определить оптические и конструктивные параметры зеркал различного вида

### Плоские зеркала

Световые размеры плоских зеркал

Световые размеры плоских зеркал, расположенных в коническом пучке лучей, опирающемся на диафрагмы с диаметрами  $D$ , и  $D_1$  (рис. 1), рассчитываются по следующим формулам

$$l_1 = \frac{D_1 + 2z \operatorname{tg} \sigma}{2 \cos \gamma (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \sigma)} \quad l_2 = \frac{D_1 + 2z \operatorname{tg} \sigma}{2 \cos \gamma (\operatorname{tg} \gamma + \operatorname{tg} \sigma)}$$

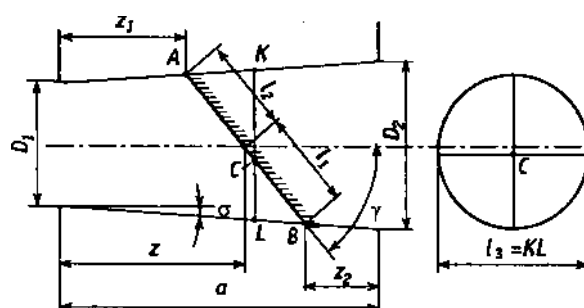


Рис.1. Наклонное плоское зеркало в расходящемся пучке лучей

$$l_3 = \frac{D_1 + 2z \operatorname{tg} \sigma}{\sqrt{1 - (\operatorname{tg} \sigma / \operatorname{tg} \gamma)^2}},$$

где  $\operatorname{tg} \sigma = (D_2 - D_1) / 2a$ . Расстояния  $z_1$ , и  $z_2$  — между краями световых зон зеркал и плоскостями диафрагм:  $z_1 = z - l_2 \cos \gamma$ ,  $z_2 = a - z - l_1 \cos \gamma$ .

Если зеркало расположено в параллельном пучке лучей, то  $\sigma = \omega$ , где  $\omega$  — полевой угол.

Определение размеров плоского зеркала для различных пучков лучей представлено в табл. 1.

*Толщины плоских зеркал*

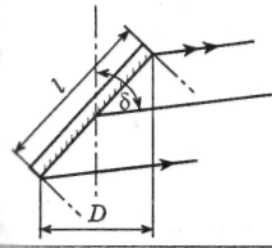
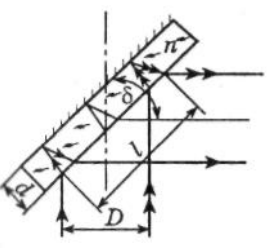
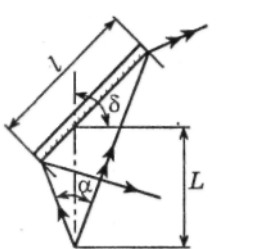
Особо точные зеркала  $d \geq (1/5 \dots 1/7) l_{\max}$ .

Точные зеркала  $d \geq (1/8 \dots 1/10) l_{\max}$ .

Грубые зеркала  $d \geq (1/15 \dots 1/25) l_{\max}$ , где  $l_{\max}$  — наибольший размер зеркала или его диаметр.

Таблица 1. Определение размеров плоского зеркала

Схема работы	Вид	Длина зеркала ( $l$ )	Ширина зеркала ( $b$ )
--------------	-----	-----------------------	------------------------

зеркала	пучка		
	Параллельный пучок	$l = \frac{D}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}$ D — диаметр цилиндрического пучка лучей	$b = D$ $\delta$ — угол отклонения лучей зеркалом
	Параллельный пучок	$l = \frac{1}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} \times \left( D + \frac{2d \cos\frac{\delta}{2}}{n} \right)$	$b = D$ n — показатель преломления
	Расходящийся пучок	$l = L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \left( \frac{1}{\sin\frac{\delta + \alpha}{2}} + \frac{1}{\sin\frac{\delta - \alpha}{2}} \right)$	$b = \frac{l \sin\frac{\delta - \alpha}{2}}{\cos\frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{l \sin\frac{\delta - \alpha}{2}}{L \sin\frac{\alpha}{2}}}}$

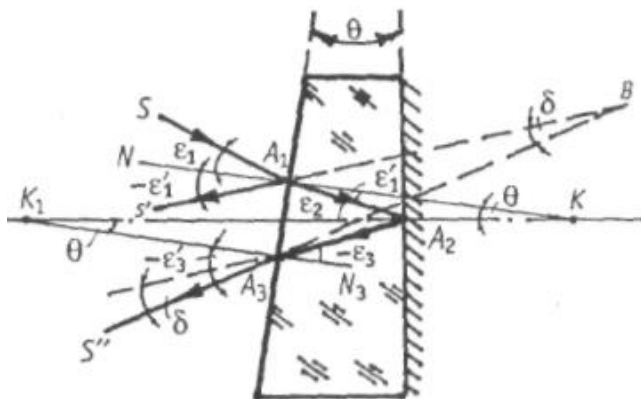


Рис. 2. Зеркало с внутренним покрытием:  
 $\theta$  — угол клиновидности,  $\delta$  — угол двоения

Угол  $\delta$  двоения зеркала с внутренним покрытием (рис. 2)

$$\delta = 2\theta\sqrt{n^2 + (n^2 - 1)\text{tg}^2\varepsilon_1}.$$

## Плоские зеркала

Зеркала применяются в тех случаях, когда они дают выигрыш в весе и простоте конструкции по сравнению с призмами.

Плоские зеркала, участвующие в построении изображения в визуальных системах приборов или используемые в точных измерительных приборах (например, интерферометрах), требуют высокой точности изготовления. Как правило, отражающий слой на этих зеркалах наносится на наружной стороне. Это делается для того, чтобы избежать влияния ошибок изготовления зеркала, например клиновидности, на качество оптической системы. Зеркала с задней отражающей поверхностью нельзя устанавливать в сходящихся пучках (Вызывают двоение изображения, а при наклонном положении также астигматизм и асимметрию в строении пучка). Плоские зеркала невысокой точности имеют широкое применение в неответственных узлах (осветительные устройства, видеоискатели фотокамер, рисовальные устройства микроскопов и т. п.).

Формы зеркал весьма разнообразны. Толщина зеркал зависит от размера, способа крепления и главным образом от требуемой точности поверхностей (табл. 6). Чем точнее зеркало, тем больше должна быть его толщина. Толстые зеркала меньше деформируются при креплении. Зеркала концевых отражателей дальномеров при допуске на подгонку под пробное стекло 0,1—0,3 полосы и при размерах сторон 60—80 мм имеют толщину 10—12 мм.

Для изготовления точных зеркал, входящих в оптическую систему прибора, применяется стекло марки К8, для концевых отражателей дальномеров — плавленый кварц (нечувствительный к изменениям температуры). Для таких же целей в менее ответственных случаях применяется стекло марок ЛК5 или МКР-1 (пирекс), в неответственных случаях — зеркальное стекло.

## Сферические и асферические зеркала

Сферические и асферические (параболические, гиперболические, эллиптические), внеосевые с внешней и с задней отражающими поверхностями применяются для объективов астрономических приборов, объективов микроскопов, телеобъективов фотоаппаратов, для прожекторов и различных осветительных устройств.

## Задачи для разбора

**Задача 1.** Доказать, что угол двоения  $\delta$  зеркала с внутренним покрытием (рис. 9.5) зависит от угла клиновидности  $\theta$  зеркала, показателя преломления  $n$  и угла падения  $\varepsilon$  луча и определяется по формуле

$$\delta = 2\theta\sqrt{n^2 + (n^2 - 1)\text{tg}^2\varepsilon_1}$$

*Решение (доказательство).* При установке плоского зеркала с

внутренним покрытием перед телескопической системой (на пути параллельного пучка) клиновидность зеркала, происходящая от непараллельности его плоскостей, вносит двоение изображения вследствие частичного отражения лучей от передней плоскости без покрытия. Обозначим углы падения и преломления на передней (первой) поверхности через  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_1'$ , углы падения и отражения на задней (шорой) поверхности через  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_2'$ ; углы падения и преломления при вторичном преломлении на передней поверхности через  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_3'$  (рис. 9.5). В доказательстве не учитывалось правило знаков, так как углы  $\theta$  и  $\delta$  не имеют знака.

Применяя формулу закона преломления к первой поверхности, найдем  $n \sin \varepsilon_1' = \sin \varepsilon_1$ . Из треугольника  $A_1 A_2 K$  устанавливаем  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1' + \theta$  или  $\varepsilon_1' = \varepsilon_2 - \theta$ . Аналогично этому из треугольника  $A_2 A_3 K$  имеем  $\varepsilon_2' = \varepsilon_3 - \theta$ .

Так как  $|\varepsilon_2| = |\varepsilon_2'|$ , то  $\varepsilon_1' + \theta = \varepsilon_3 - \theta$ . Поэтому  $\varepsilon_3 = \varepsilon_1' + 2\theta$  и  $\sin \varepsilon_3 = \sin(\varepsilon_1' + 2\theta)$ . Но по закону преломления для точки  $A_3$

$$\sin \varepsilon_3' = n \sin \varepsilon_3 = n \sin(\varepsilon_1' + 2\theta).$$

Если клиновидность зеркала незначительна, то угол  $\varepsilon_3'$  должен величаться на малую величину от угла отражения  $\varepsilon_1'$ .

Положим, что  $\varepsilon_3' = \varepsilon_1' + \delta$ , где угол двоения  $\delta = \angle S'BS''$ . Подставив это значение в предыдущую формулу, найдем

$$\sin(\varepsilon_1' + \delta) = n \sin(\varepsilon_1' + 2\theta).$$

Разлагая синусы в ряд Маклорена и ограничиваясь первыми членами разложения, получим  $\sin \varepsilon_1' + \delta \cos \varepsilon_1' = n \sin \varepsilon_1' + 2n \theta \cos \varepsilon_1'$ .

Преобразуем полученное выражение с учетом закона преломления:

$$\delta = \frac{2n \theta \cos \varepsilon_1'}{\cos \varepsilon_1'}. \text{ Так как } \cos \varepsilon_1' = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon_1} / n \text{ и } \cos \varepsilon_1 = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon_1},$$

$$\delta = 2\theta \sqrt{(n^2 - \sin^2 \varepsilon_1) / (1 - \sin^2 \varepsilon_1)} = 2\theta \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \sin^2 \varepsilon_1 / (1 - \sin^2 \varepsilon_1)}$$

Учитывая, что  $\sin^2 \varepsilon_1 / (1 - \sin^2 \varepsilon_1) = \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1$  получаем окончательную формулу для угловой величины двоения  $\delta = 2\theta \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1}$ .

**Задача 2.** Вывести формулу для хроматизма в угловой мере  $\delta_{F'-C'}$  для плоского зеркала с внутренним покрытием, если угол клиновидности зеркала  $\theta$ .

*Решение.* Найдем, например, разность углов  $\delta$  для лучей линий  $F'$  и  $C'$ . Дифференцируя формулу угла  $\delta$  двоения зеркала, полученную в задаче 9.14,  $\Delta \delta_{F'-C'} = 2\theta (2n + 2n \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1) \Delta n / [2 + \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1}]$ , где  $\Delta n = n_{F'} - n_{C'}$ , находим

$$\Delta \delta_{F'-C'} = 2\theta n (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1) (n_{F'} - n_{C'}) / \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1}$$

Последнее выражение может быть преобразовано так

$$\begin{aligned} \Delta \delta_{F'-C'} &= 2n\theta (n_{F'} - n_{C'}) / [\cos^2 \varepsilon_1 \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon_1}] = \\ &= 2n \square (n_{F'} - n_{C'}) \cos \varepsilon_1 / [\cos^2 \varepsilon_1 \sqrt{n^2 \cos^2 \varepsilon_1 + n^2 \sin^2 \varepsilon_1 - \sin^2 \varepsilon_1}] = \end{aligned}$$

$$= 2n \sin \theta (n_{F'} - n_{C'}) / [\cos \varepsilon_1 \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon_1}]$$

Если  $\varepsilon_1 = 0^\circ$ , то  $\cos \varepsilon_1 = 1$ ,  $\sin \varepsilon_1 = 0$ , и формула принимает вид

$$\Delta \delta_{F'-C'} = 2n\theta (n_{F'} - n_{C'}) / n = \Delta \delta_{F'-C'} = 2\theta (n_{F'} - n_{C'})$$

Если  $\varepsilon_1 = 45^\circ$ , то  $\cos \varepsilon_1 = 1/\sqrt{2}$ ,  $\sin \varepsilon_1 = 1/\sqrt{2}$  и формула имеет

вид

$$\Delta \delta_{F'-C'} = 2n\theta (n_{F'} - n_{C'}) / \sqrt{2n^2 - 1}.$$

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.** Перед объективом зрительной трубы со световым диаметром 50 мм под углом  $45^\circ$  к оптической оси установлено плоское зеркало. Угловое поле зрительной трубы равно  $2\omega = 10^\circ$ . Входной зрачок совпадает с оправой объектива. Расстояние от зеркала до объектива  $d = 45$  мм. Определить световые размеры зеркала при условии, что оно поворачивается на угол  $\pm 15^\circ$  вокруг оси, проходящей через точку пересечения отражающей плоскости зеркала с оптической осью.

*Ответ:*  $l_1 = 68,6$  мм,  $l_2 = 50,5$  мм,  $l_3 = 58,6$  мм.

### Задача 4. Сконструируйте плоское зеркало

№	Пучек лучей	Точность зеркала	Световой диаметр, мм	Тип отражающей поверхности
1	Расходящийся	Грубое	50	Внутренняя
2	Расходящийся	Грубое	60	Наружная
3	Расходящийся	Точное	40	Внутренняя
4	Расходящийся	Точное	70	Наружная
5	Расходящийся	Особо точное	80	Внутренняя
6	Сходящийся	Особо точное	50	Наружная
7	Сходящийся	Грубое	50	Внутренняя
8	Сходящийся	Грубое	60	Наружная
9	Сходящийся	Точное	40	Внутренняя
10	Сходящийся	Точное	70	Наружная

Содержание отчета

1. Название работы
2. Цель работы
3. Эскиз конструкции
4. Выполненные расчеты

Контрольные вопросы

1. Какому условию должна соответствовать толщина особо

точных зеркал

## 2. Порядок расчета зеркал.

### Практическая работа №7. Конструирование призм и плоскопараллельных пластин

Цель работы рассчитать и определить конструктивные параметры призм и плоскопараллельных пластин.

#### Плоскопараллельные пластины

Световой диаметр плоскопараллельной пластины (рис. 1)

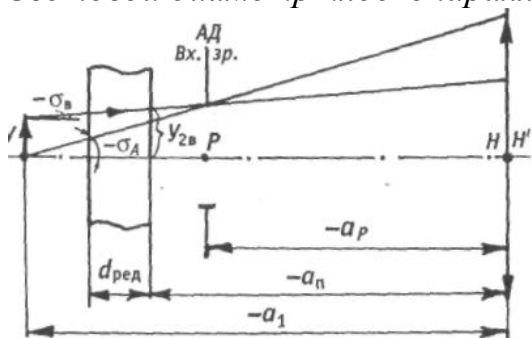


Рис.1. К определению светового диаметра ППП

$$D_{свППП} = 2y_{2в}; y_{2в} = y - (a_n - a_p) \operatorname{tg} \sigma_B,$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \sigma_B = (D/2 - y)/(a_1 - a_p), D = 2(a_1 - a_p) \operatorname{tg} \sigma_A.$$

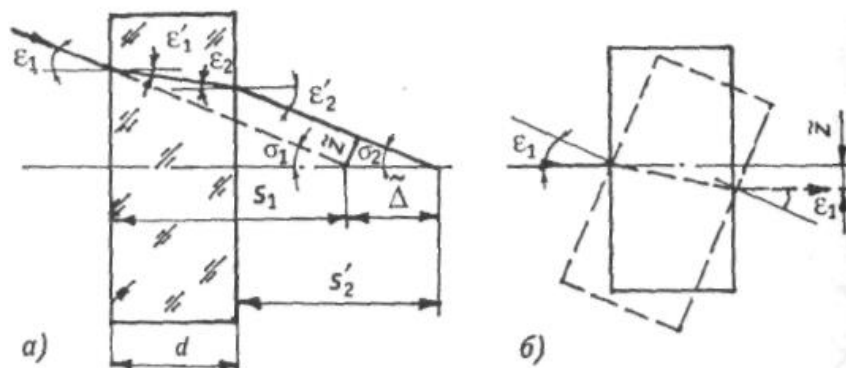


Рис. 2. Преломление луча плоскопараллельной пластиной

*a* — ППП установлена перпендикулярно оптической оси;

*b* — ППП наклонена к оптической оси под углом  $\epsilon_1$

*Продольное смещение  $\Delta$  луча:*  $\Delta = d(n - 1)/n$  — в параксиальной области, при малых углах падения;  $\tilde{\Delta} = d(1 - \cos \epsilon_1 / \sqrt{n^2 - \sin^2 \epsilon_1})$  — в области действительных лучей (точная формула).

*Поперечное смещение  $z$  луча:*  $z = \Delta \cdot \epsilon = [d \cdot \epsilon(n - 1)]/n$  — в параксиальной области,  $\tilde{z} = d \sin \epsilon (1 - \cos \epsilon_1 / \sqrt{n^2 - \sin^2 \epsilon_1}) = \tilde{\Delta} \sin \epsilon$  — в области действительных лучей (точная формула).

*Толщина редуцированной ППП  $d_{ред} = d/n$ .*



### Отражательные призмы

Коэффициент отражательной призмы  $k = l/D_{св пр}$ , где  $l$  — геометрическая длина хода луча в призме,  $D_{св пр}$  — световой диаметр призмы.

Толщина эквивалентной ППП, заменяющей призму

$$d_{ППП} = l = kD_{св пр}.$$

Толщина редуцированной ППП, заменяющей призму

$$d_{ред} = d_{ППП}/n = kD_{св пр}/n.$$

Размеры отражательных призм, расположенных в коническом пучке лучей, опирающемся на диафрагмы диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 9.8)

при  $D_1 > D_2$ :  $D_{св пр} = D_1 - (z/a)(D_1 - D_2)$ ;

при  $D_1 < D_2$ :  $D_{св пр} = 2[z + aD_1/(D_2 - D_1)]\text{tg}\sigma \cdot \text{tgy}/(\text{tgy} - \text{tg}\sigma)$ ,

где  $\text{tgy} = D_{св пр}/2d_{ред} = n/2k$ ,  $k$  — коэффициент призмы.

Световой диаметр призмы, расположенной в параллельном пучке лучей с расходимостью  $\omega$  на расстоянии  $z$  перед диафрагмой диаметром  $D_1$

$$D_{св пр} = [2z + D_1/\text{tg}\omega] \text{tg}\omega \text{tgy}/(\text{tgy} - \text{tg}\omega).$$

Световой диаметр призмы, расположенной в сходящемся пучке лучей при  $\omega < 0$  (рис. 4)

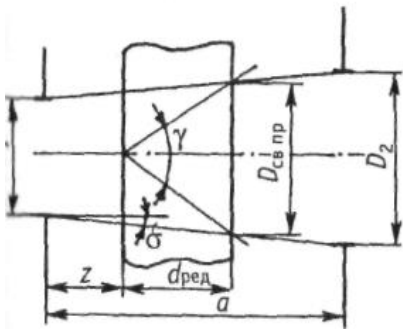


Рис. 3. Определение размеров призмы

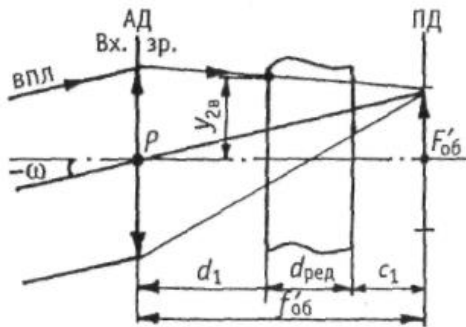


Рис. 4. Определение светового диаметра призмы, расположенной за объективом

$$D_{нд} < D, \quad D_{св пр} = 2y_{2 впл}.$$

Если известно  $d_1$  то

$$D_{св пр} = Dk_{\omega}(1 - d_1/f'_{об}) - 2d_1 \text{tg}\omega;$$

если известно  $c_1$  то

$$D_{св пр} = \frac{Dk_{\omega} - 2(f'_{об} - c_1)\beta_{2 впл}}{1 - 2k\beta_{2 впл}/n},$$

где  $\beta_{2вил} = \text{tg}\omega + Dk_{\omega}/(2f'_{об})$ ;  $k_{\omega}$  — коэффициент виньетирования;  $k$  — коэффициент призмы;  $c_1$  — расстояние от выходной грани призмы до полевой диафрагмы (фокальной плоскости объектива);  $n$  — показатель преломления стекла призмы.

Максимальный угол падения  $\varepsilon_{max} = \sigma_{max}$  лучей на входную грань призмы, при котором происходит полное внутреннее отражение от отражающей грани

$$\sin \sigma_{max} \leq n \sin[\varepsilon - \arcsin(1/n)],$$

где  $\varepsilon$  — угол падения луча, идущего вдоль оптической оси, на отражающую грань.

## Задачи для разбора

**Задача 1.** Перед бесконечно тонким объективом на расстоянии 60 мм установлена плоскопараллельная пластинка (ППП) толщиной 10 мм из стекла К8 ( $n_c = 1,5183$ ) (рис. 9.6). Предмет величиной  $2y = 10$  мм расположен на расстоянии 80 мм перед объективом апертурная диафрагма находится на расстоянии 50 мм также перед объективом. Апертура  $A = 0,4$ . Определить световой диаметр плоской непараллельной пластинки и положение предмета относительно объектива с учетом действия ППП.

*Решение.* Для определения светового диаметра ППП надо рассчитать ход апертурного, верхнего и нижнего полевого лучей. Вначале найдем диаметр апертурной диафрагмы, одновременно являющейся и входным зрачком. При выполнении габаритного расчета редуцируем ППП, чтобы она не изменяла хода лучей, причем  $d_p = d/n = 10/1,5183 = 6,5863$  мм. Как видно из рис. 9.6,  $D = D_{ад} = 2(a_1 - a_p) \text{tg} \sigma_A$ . По условию задачи  $A = \sin \sigma_A = 0,4$ , тогда  $\text{tg} \sigma_A = 0,4364$ . Найдем  $D$ :  $D = D_{ад} = 2(-80 + 50)(-0,4364) = 26,18 > 2y$ , поэтому световой диаметр надо определять по второй поверхности ППП, диаметр которой больше, чем первой поверхности, что видно из рис. 9.6.

Рассчитаем ход верхнего полевого луча. Для этого вначале найдем  $\text{tg} \sigma_B$ :  $\text{tg} \sigma_B = (D/2 - y)/(a_p - a_1) = (13,09 - 5)/(-50 + 80) = 0,2697$ . Высота на второй поверхности ППП  $y_{2B} = y - (-a_1 + a_n) \text{tg} \sigma_B = 5 + (80 - 60)0,2697 = 10,394$ . Для контроля правильности расчета  $y_{2B}$  найдем высоту на апертурной диафрагме по верхнему полемому лучу  $D/2 = y_{2B} + (-a_n + a_p) \text{tg} \sigma_B = 10,394 + (60 - 50)0,2697 = 13,09$ , что совпадает с полученным выше результатом.

Для расчета нижнего полевого луча найдем  $\text{tg} \sigma_H = (D/2 + y) \times (-a_1 + a_p) = (13,09 + 5)/(80 - 50) = 0,603$ . Из рис. 9.6 видно, что  $y - y_H = (-a_1 + a_n) \text{tg} \sigma_H = 20 \times 0,603 = 12,06$ , поэтому  $-y_H = 12,06 - y = 7,06$ .

Контроль расчета нижнего луча:  $-D/2 = -y_{2H} + (-a_n - a_p) \text{tg} \sigma_H = -7,06 + (60 - 50)0,603 = 13,09$ .

Из расчета апертурного луча определим высоту  $h_2$  на второй поверхности пластинки  $h_{2АП} = (a_n - a_1) \text{tg} \sigma_A = (-60 + 80)(-0,4364) = 8,728 = 8,73$ . Максимальную высоту на поверхности пластинки дает верхний полевой луч,  $= 10,39$ , поэтому световой диаметр пластинки  $D_{свн} = 2y_{2B} = 20,8$ . Плоскопараллельная пластинка дает продольное смещение  $\Delta$  луча:  $\Delta = d(n -$

$l/n = 10(1,5183 - 1)/1,5183 = 3,414$  мм. Поэтому предметом для объектива является изображение, даваемое ППП, которое находится на расстоянии  $-\hat{a}_1$  от объектива:  $\hat{a}_1 = -a_1 - \Delta = +80 - 3,41 = 76,59 = 76,6$  мм.

**Задача 2.** Плоскопараллельная пластина толщиной 10мм установлена перпендикулярно оптической оси. На какой угол  $\varepsilon_1$  надо наклонить ППП, чтобы луч, идущий вдоль оптической оси, сместился параллельно самому себе (рис. 9.7, б) на 2 мм? Пластина изготовлена из стекла К8 ( $n_e = 1,5183$ ).

*Решение.* Определим поперечное смещение луча  $z$ , используя приближенную формулу  $z = [d(n - 1)/n] \operatorname{tg} \varepsilon_1$  откуда  $\operatorname{tg} \varepsilon_1 = zn/[d(n - 1)] = 2 \cdot 1,5183 / (10 \cdot 0,5183) = 0,585877$ ,  $\varepsilon_1 = 30,365^\circ$ . Для уточнения результата используем точную формулу  $z = \Delta \sin \varepsilon_1 = d \sin \varepsilon_1 (1 - \cos \varepsilon_1 / \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon_1})$ . Непосредственное решение уравнения затруднительно, поэтому сделаем вычисления для нескольких значений углов, близких к полученному из приближенной формулы. Результаты расчета представлены в таблице 9.2.

**Таблица 1.** Значения поперечного смещения  $z$  для разных углов наклона  $\varepsilon_1$  ППП

№№ п/п	$\varepsilon_1$ угл. град.	$\Delta$	$z$
1	30	3,95912	1,97956
2	30,3	4,231759	2,13504
3	30,270	3,969617	2,00098
4	30,258	3,969152	2,000036

В табл. 9.2 вначале для вычислений выбраны значения  $\varepsilon_1 = 30^\circ$  и  $\varepsilon_1 = 30,3^\circ$ , с малым отличием от приближенного значения  $\varepsilon_1 = 30,365^\circ$ . Затем интерполяцией получено третье значение  $\varepsilon_1 = 30,27^\circ$ . При необходимости получения более точного значения  $z$  выполнен расчет для  $\varepsilon_1 = 30,258^\circ$ .

**Задача 3.** За объективом с фокусным расстоянием  $f' = 120$  мм, относительным отверстием 1:4, угловым полем  $2\omega = 12^\circ$  установлена призма БкУ-45° на расстоянии  $d_1 = 30$  мм. Входной зрачок совпадает с оправой объектива, принимаемого бесконечно тонким. Найти длину хода луча в призме.

*Решение.* Диаметр входного зрачка  $D = f'/K = 120/4 = 30$  мм. Диаметр полевой диафрагмы, установленной в плоскости действительного изображения,  $D_{\text{пд}} = 2f'_{\text{об}} \operatorname{tg} \omega = 2 \cdot 120 \operatorname{tg} 6^\circ = 240 \cdot 0,105 = 25,2$  мм

Длина хода луча в призме  $l = \kappa D_{\text{св пр}}$ , так как  $\kappa = l/D_{\text{св пр}}$ , поэтому надо определить световой диаметр призмы. Поскольку  $D_{\text{пд}} < D$ , то  $D_{\text{св}}$  призмы надо определить на передней грани по ходу верхнего полевого луча при  $\omega < 0$  (рис. 9.9).

Рассчитаем ход верхнего полевого луча по формулам произвольных тангенсов.

$$y_{1B} = D/2 = 15, \beta_1 = \operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} (-6^\circ) = -0,105;$$

$$\beta_{2B} = \beta_{1B} + y_{1B}/f'_{\text{об}} = -0,105 + 30/(2 \cdot 120) = 0,02;$$

$$y_{2B} = y_{1B} - d_1 \beta_{2B} = 15 - 30 \cdot 0,02 = 14,4;$$

$$D_{\text{св пр}} = 2 y_{2B} = 214,4 = 28,8.$$

Длина хода луча в призме БкУ-45°  $l = k D_{\text{св пр}} = 2,111 D_{\text{св пр}} = 2,111 \cdot 28,8 = 60,8 \text{ мм}$ .

**Задача 4.** Рассчитать линзу Френеля с фокусным расстоянием 200 мм, толщиной  $d = 10 \text{ мм}$  и диафрагменным числом  $K = 1$ , проецирующую изображение точечного источника в бесконечность. Материал линзы — полиметилметакрилат ( $n_e = 1,49$ ). Расстояние между соседними ступеньками  $\Delta h = 0,2 \text{ мм}$ . Найти оптимальную ориентацию плоской поверхности. Для трех крайних зон вычислить угол профиля  $\varphi$ .

*Решение.* Вначале проверим, не происходит ли полного внутреннего отражения на ступеньках поверхности для двух ориентаций.

Первая поверхность — плоская.

Так как  $K = 1$ , то  $\text{tg} \sigma_A = \text{tg} \sigma_1 = -0,5$ ;  $\sin \sigma_1 = -0,4472$ ,  $\sin \sigma_3 = 0$ . Найдем предельное значение  $\sin \sigma_3$ , т.е.  $\sin \sigma_{3\text{пред}}$

$$\sin \sigma_{3\text{пред}} = \left[ \sin \sigma_1 \pm \sqrt{(n^2 - 1)(n^2 - \sin^2 \sigma_1)} \right] / n^2;$$

$$\sin \sigma_{3\text{пред}} = [-0,4472 \pm \sqrt{(1,49^2 - 1)(1,49^2 - 0,4472^2)}] / 1,49^2 =$$

$= 0,5057$ ,  $\sin \sigma_3 < 0,506$  — полного внутреннего отражения не происходит.

Вторая поверхность — плоская, тогда  $\sin \sigma_1 = 0$ ,  $\sin \sigma_3 = 0,4472$ ,

$\sin \sigma_{3\text{пред}} = \left[ \sqrt{(n^2 - 1)} \right] / n^2 = \sqrt{1,49^2 - 1} / 1,49^2 = 0,4975$ ,  $\sin \sigma_3 < \sin \sigma_{3\text{пред}}$ , также отсутствует полное внутреннее отражение.

Формула для угла  $\varphi$  наклона профиля справедлива, если на ступенчатой поверхности не происходит полного внутреннего отражения.

Теперь найдем оптимальную ориентацию плоской поверхности, т.е. для которой угол  $\varphi$  меньше по величине,

$$\text{tg} \varphi = (\sin \sigma_3 - \sin \sigma_1) / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma_1} \cdot \cos \sigma_3$$

Если первая поверхность плоская, то  $\sigma_3 = 0$ ,  $\sin \sigma_1 = -0,4472$ ,  $\text{tg} \varphi = (0 + 0,4472) / \sqrt{1,49^2 - 0,4472^2} \cdot 1 = 1,0615$ ,  $\varphi = 46,708^\circ$ .

Если плоская поверхность — вторая, то  $\sin \sigma_1 = 0$ ,  $\sin \sigma_3 = 0,4472$ . В этом случае  $\text{tg} \varphi = 0,4472 / \sqrt{1,49^2 - 0,89443} = 0,7509$ ,  $\varphi = 36,903^\circ$ .

Следовательно, плоская поверхность должна быть второй по ходу луча света. При такой ориентации толщина линзы не влияет на результаты расчета.

Определим углы  $\varphi$  для первых трех зон от края. Для первой от края зоны  $\text{tg} \sigma_3 = (100 - 0,2) / 200 = 0,499$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,4465$ ;  $\cos \sigma_3 = 0,8948$ ;  $\text{tg} \varphi = 0,4465 / \sqrt{1,49^2 - 0,8948} = 0,7501$ .

Для второй от края зоны  $\text{tg} \sigma_3 = (99,8 - 0,2) / 200 = 0,498$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,4458$ ;  $\cos \sigma_3 = 0,8951$ ;  $\text{tg} \varphi = 0,4458 / \sqrt{1,49^2 - 0,8951} = 0,7494$ ;  $\varphi = 36,848^\circ$ .

Для третьей от края зоны  $\text{tg} \sigma_3 = (99,6 - 0,2) / 200 = 0,497$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,44506$ ;  $\cos \sigma_3 = 0,8955$ ;  $\text{tg} \varphi = 0,4451 / \sqrt{1,49^2 - 0,8955} = 0,7487$ ;  $\varphi = 36,822^\circ$ .

## Задачи для самостоятельного изучения

**Задача 5.** Перед плоскопараллельной пластинкой на расстоянии  $S_1 = -100$  мм помещен предмет. Определить положение его изображения и величину продольного смещения луча, если толщина пластинки  $d = 60$  мм, показатель преломления стекла  $n = 1,5$ .

*Ответ:*  $S'_2 = -140$  мм,  $\Delta = 20$  мм.

**Задача 6.** Призма БС- $0^\circ$  (ромб) установлена в параллельном пучке лучей перед объективом зрительной трубы с угловым полем  $2\omega = 30^\circ$ . Определить марку стекла, из которого следует выполнить призму, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение. Определить размеры призмы при условии, что входной зрачок зрительной трубы совпадает со второй по ходу луча преломляющей гранью призмы, а его диаметр равен 20 мм.

*Ответ:*  $n \geq 1,693$  (стекло СТК12  $n_e = 1,695$ ),  $D_{св} = 54,5$  мм.

**Задача 7.** Призма Ак- $0^\circ$  (призма Аббе с крышей), выполненная из стекла К8, установлена между диафрагмами  $D_1 = 30$  мм и  $D_2 = 50$  мм, расстояние между которыми  $a = 150$  мм. Расстояние между первой диафрагмой и первой гранью призмы  $z = 40$  мм (рис. 9.8). Определить размеры призмы.

Указание: сравнить длину хода луча в призме и расстояние между диафрагмами.

**Задача 8.** Рассчитать линзу Френеля, создающую изображение точки, если  $s_1 = -100$  мм,  $s_1' = 300$  мм,  $d = 5$  мм,  $A = 0,5$ ; расстояние между соседними ступеньками  $\Delta h = 0,2$  мм, материал линзы — полиметилметакрилат ( $n_e = 1,49$ ). Определить оптимальную ориентацию плоской поверхности. Угол наклона профиля вычислить для трех крайних зон.

*Ответ:* Плоская поверхность должна быть второй по ходу луча.

$h_1 = 57,7$  мм,  $\varphi = 48,29^\circ$ ;  $h_1 = 57,5$  мм,  $\varphi = 46,24^\circ$ ;  $h_1 = 57,3$  мм,  $\varphi = 48,19^\circ$ .

**Задача 9.** Сконструируйте отражательную призму для телескопической системы которую необходимо поместить между двумя компонентами телескопической системы.

№	Расстояние между компонентами $L$ , мм	Диаметр 1 компонента $D1$ , мм	Диаметр 2 компонента $D2$ , мм	Тип призмы
1	300	50	40	AP90
2	400	60	50	АкP90
3	300	40	30	БП90
4	400	70	50	БкП90
5	350	80	60	AP80
6	450	50	40	АкP80
7	350	50	40	BP45
8	450	60	50	ВкP45
9	350	40	30	БР180
10	450	70	50	МП1 рода
11	450	50	40	МП2 рода

Содержание отчета

1. Название работы
2. Цель работы
3. Эскиз конструкции
4. Выполненные расчеты

Контрольные вопросы

1. Порядок расчета призм
2. Охарактеризуйте явление полного внутреннего отражения
3. Способы крепления призм

### **Практическая работа №8. Оптический клин, конструирование узла клина**

Цель работы: рассчитать и определить конструктивные параметры оптического клина.

Угол  $\delta$  отклонения луча в клине (рис. 9.10)  $\delta = \theta(n - 1)$  — в параксиальной области и при малых углах падения луча;

$\tilde{\delta} = \theta(n \cos \varepsilon'_1 / \cos \varepsilon'_1 - 1)$  — в области действительных лучей.

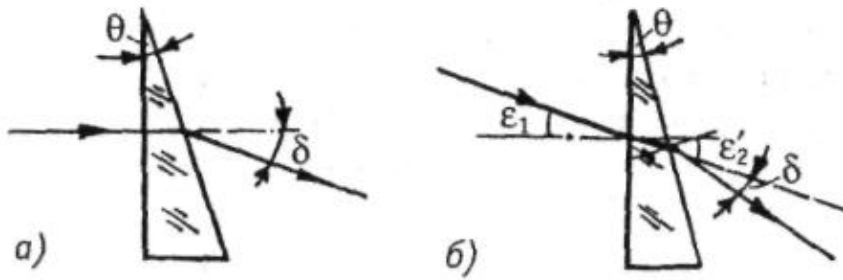


Рис. 1. Преломление луча в клине а — при  $\varepsilon_1 = 0$ ; б — при  $\varepsilon_1 \neq 0$

Поперечное смещение изображения при поступательном перемещении клина (рис. 2)

$$\Delta y' = y'_1 - y'_2 = d \cdot \theta (n - 1).$$

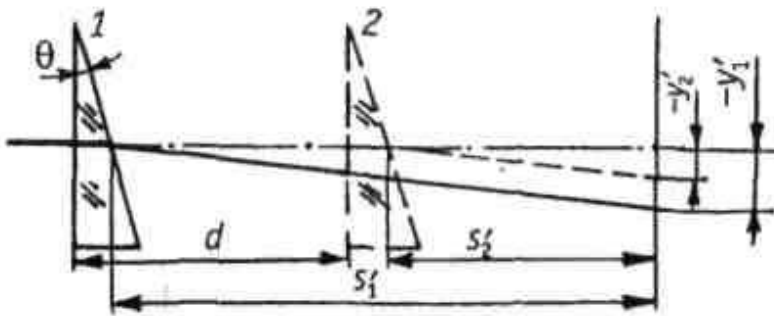


Рис. 2. Поступательное перемещение клина

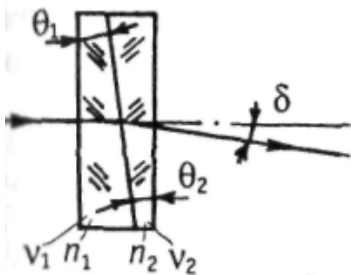


Рис. 3. Ахроматический клин

Преломляющие углы ахроматического клина (рис. 3)

$$\theta_1 = \frac{\delta \cdot v_1}{(n_1 - 1)(v_1 - v_2)};$$

$$\theta_2 = \frac{\delta \cdot v_2}{(n_2 - 1)(v_2 - v_1)}.$$

Формулы для расчета линзы Френеля с первой плоской поверхностью (рис. 9.13)

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \sigma_3 - \sin \sigma_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma_1 - \cos \sigma_3}},$$

где  $\sin \sigma_1 = \sin[\operatorname{arctg}(h_1 - k\Delta h)/s_1]$ ;  
 $\sin \sigma_3 = \sin[\operatorname{arctg}(h_2 - k\Delta h)/s_2]$ ;  $h_2 = s_1 \operatorname{tg} \sigma_1 - d \operatorname{tg}[\operatorname{arc} \sin(\sin \sigma_1/n)]$ ;  $\Delta h$  — расстояние между соседними ступеньками профиля,  $k$  — порядковый номер ступеньки, начиная с края линзы, причем для края  $k = 0$ .

Формула для угла наклона справедлива, если на ступенчатой поверхности отсутствует полное внутреннее отражение, чему соответствует условие

$$\sin \sigma_{3 \text{ нед}} = \left[ \sin \sigma_1 \mp \sqrt{(n^2 - 1)(n^2 - \sin^2 \sigma_1)} \right] / n^2 > \sin \sigma_3 .$$

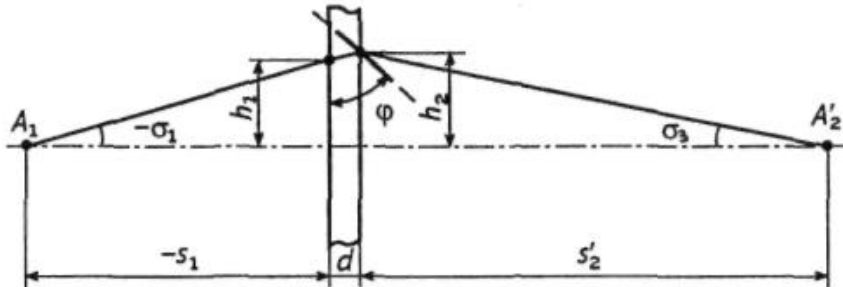


Рис. 4. Преломление луча элементом профиля линзы Френеля

Перед расчетом значений  $\varphi$  определяют оптимальную ориентацию плоской стороны линзы Френеля, которой соответствует меньшее значение угла  $\varphi$  для края светового диаметра.

Особенности конструкции клиньев

Клинья - оптические детали, работающие в широком пучке лучей, в связи с этим требования, проставляемые в таблице на чертеже, :

Защитные фаски на клиньях выбираются в зависимости от формы нерабочей поверхности (круглая или некруглая): Фаски на деталях круглой формы - п.3.2.2 лекций; фаски на деталях некруглой формы - п.3.3.3 лекций.

На преломляющие поверхности клиньев наносят просветляющие покрытия

#### Задачи для разбора

**Задача 1.** Найти преломляющие углы двух клиньев, составляющих ахроматический клин (рис. 3), если полный угол отклонения  $\delta$  должен быть  $\delta = 24'$ . Клинья выполнены из стекла марок К8 ( $n_1 = n_e = 1,5183$ ,  $v_1 = v_e = 63,83$ ), Ф1 ( $n_2 = n_e = 1,6169$ ,  $v_2 = v_e = 36,70$ ). Определить линейное смещение, даваемое ахроматическим клином в плоскости, расположенной на расстоянии 100 мм от клина.

**Решение.** Для того, чтобы клин был ахроматическим, необходимо получить одинаковые угловые отклонения  $\delta_{\lambda 1}$  и  $\delta_{\lambda 2}$ . В данной задаче это  $\delta_F$  и  $\delta_C$ . Для этого решим два уравнения: уравнение ахроматизации  $\delta_1/v_1 + \delta_2/v_2 = 0$  и уравнение получения заданного значения угла отклонения  $\delta = \delta_1 + \delta_2$ .

Из этих уравнений имеем  $\delta_1 = \delta v_1 / (v_1 - v_2)$ ,  $\delta_2 = \delta v_2 / (v_2 - v_1)$ :  $\delta_1 = 24' * 63,83 / (63,83 - 36,70) = 56,466'$ ;  $\delta_2 = 24' * 36,70 / (36,7 - 63,83) = -32,466'$  или  $\delta_2 = \delta - \delta_1 = 24' - 56,466' = -32,466'$ .

Определим преломляющие углы клиньев  $\theta_1$  и  $\theta_2$ :

$$\theta_1 = \delta_1 / (n_1 - 1) = 56,46670,5183 = 1^\circ 48,944';$$

$$\theta_2 = \delta_2 / (n_2 - 1) = -32,46670,6169 = -52,628'.$$

Углы клиньев имеют разные знаки, так как клинья обращены вершинами в противоположные стороны. Эти клинья склеиваются и



образуют одну оптическую деталь. Следует помнить, что приведенные формулы расчета справедливы при  $\delta < 2 \dots 3^\circ$ .

Линейное смещение, образуемое клином на расстоянии 100 мм,  $y' = a' \delta = 24' - 100/3438' = 0,698 = 0,7$  мм.

**Задача 2.** В оптическом компенсаторе используется перемещающийся вдоль оптической оси клин (рис. 2) с преломляющим углом  $\theta = 2^\circ$ . Плоскость изображения находится на расстоянии 50 мм за клином. Определить, на сколько изменится линейное смещение пуча клином в плоскости изображения при перемещении клина на 20 мм.

*Решение.* Угловое смещение луча клином  $\delta = \theta (n - 1) = 2^\circ (1,5183 - 1) = 1,0366^\circ$ . Линейное смещение  $y_1'$  (луча клином в его первоначальном положении на расстоянии  $s_1' = 50$  мм:  $y_1' = \delta \cdot s_1' = 50 \cdot 1,0366^\circ \pi / 180^\circ = 0,904$  мм.

При смещении клина на 20 мм линейное смещение в плоскости изображения  $y_2' = \delta s_2' = 1,0366^\circ (50 - 20) \pi / 180^\circ = 0,542$  мм.

В результате линейное смещение луча уменьшится на величину  $y_1' - y_2' = 0,904 - 0,542 = 0,362$  мм.

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.** Как изменяется взаимное положение двух параллельных между собой лучей, преломленных клином? В каких оптических системах и с какой целью используется это изменение?

**Задача 4.** Определить угол  $\delta$  отклонения луча двумя клиньями с преломляющими углами  $\theta_1 = 5^\circ$  и  $\theta_2 = 6^\circ$ , если оба клина расположены так, что их преломляющие грани параллельны, а преломляющие углы направлены в одну сторону. Показатели преломления стекол  $n_1 = 1,64$  и  $n_2 = 1,58$ .

*Ответ:*  $\delta = 6,68^\circ$ .

### Задача \_\_ Рассчитайте оптический апохроматический клин круглой формы

№	Угол отклонение $\delta, ^\circ$	Диаметр компонента D, мм		
1	1	30		
2	2	20		
3	3	10		
4	1	20		
5	2	30		
6	3	20		
7	1	10		
8	2	10		
9	3	30		
10	1	40		

<b>11</b>	<b>2</b>	<b>40</b>		
-----------	----------	-----------	--	--

Содержание отчета

1. Название работы
2. Цель работы
3. Эскиз конструкции
4. Выполненные расчеты

Контрольные вопросы

1. Порядок расчета одиночного клина
2. Порядок расчета апохроматического клина
3. Способы крепления клиньев

## Практическая работа №9. Выполнение чертежей оптических схем

Цель работы: Изучить правила выполнения оптических схем и начертить пример.

1. На оптической схеме должны быть изображены: оптические элементы\* изделия;

источники излучения (упрощенно или условными графическими обозначениями);

приемники лучистой энергии, например, фотоэлементы, фотоумножители (условными графическими обозначениями).

Элементы, поворачивающиеся или перемещающиеся вдоль или перпендикулярно оси, следует показывать в основном рабочем положении. Кроме основного рабочего положения могут быть показаны и другие положения элементов, например, крайние. При необходимости, например, при изображении поворачивающихся элементов, допускается обозначать оси прописными буквами русского алфавита.

Кроме того, на оптической схеме следует указывать:

положение диафрагм;

положение зрачков (при необходимости);

положение фокальных плоскостей, плоскостей изображения, плоскостей предмета (при необходимости например, для фотографических объективов и объективов микроскопов);

положение экранов, светорассеивающих полостей и поверхностей (при необходимости).

2. Номера позиций

2.1. Номера позиций элементам схемы следует присваивать по ходу луча. При разветвлении схемы в несколько направлений номера позиций следует указывать по одному из направлений до конца, затем последующие номера позиций по другому направлению и т. д.

2.2. Если в схему изделия входит элемент, имеющий самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), то его следует изобразить упрощенно (приложение 3, черт. 2, поз. 12), обвести тонкой штрихпунктирной линией и указать размеры, определяющие его положение.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

2.3. Повторяющимся элементам необходимо присваивать один и тот же номер позиции, после которого в скобках допускается ставить порядковый номер.

2.4. Допускается присваивать номера позиций источникам излучения и приемникам лучистой энергии.

2.5. Данные об элементах должны быть указаны в таблице

15		Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Зона	Поз.				
8 мм					
6	8	70	63	10	
185					

В графе «Обозначение» указывают обозначение основного конструкторского документа. Для элементов, имеющих самостоятельную принципиальную схему (расчет оптических величин), при необходимости, указывают ее (его) обозначение в графе «Примечание». (Измененная редакция, Изм. № 1).

2.6. Если изделие имеет оптические сменные части, то на оптической схеме следует изобразить одну из них, вынести ее позицию, а в графе «Примечание» таблицы элементов записать, что они сменные, и указать размеры, определяющие их положение в схеме (приложение 3, черт. 2).

3. На принципиальной оптической схеме следует помещать:

основные оптические характеристики изделия в виде записей на поле схемы или таблицы произвольной формы, например:

для телескопических систем:

видимое увеличение;

угловое поле оптической системы в пространстве предметов; диаметр выходного зрачка;

удаление выходного зрачка от последней поверхности; предел разрешения;

коэффициент пропускания (при необходимости);

для фотографических объектов:

фокусное расстояние; относительное отверстие;

угловое поле оптической системы в пространстве предметов или размер кадра; разрешающую способность (при необходимости); коэффициент пропускания (при необходимости);

для фотоэлектрических систем:

размеры фотокатодов или типы фотоприемников;

размеры светового пятна на фотокатодах (при необходимости).

Допускается основные оптические характеристики изделия указывать с предельными отклонениями или их наибольшие и наименьшие значения;

фокусные расстояния  $f'$  и расстояния  $SF$  и  $S'F'$  отдельных сборочных единиц оптической

системы, например, объективов, оборачивающих систем и окуляров.

Эти данные следует помещать на поле схемы в таблице. Размеры граф не устанавливаются:

Поз.	Наименование	Обозначение расчета (схемы)	$\lambda$	$f'$	$S_F$	$S'_F$

дополнительные сведения, например:

расстояние от последней поверхности фотографического объектива до плоскости изображения в зависимости от расстояния до предмета, линейное перемещение окуляра на одну диоптрию и т. д.; наименования или типы источников излучения и приёмников лучистой энергии. Допускается указывать световые диаметры и соответствующие им стрелки.

4. На оптической схеме в зависимости от типа следует указывать:

диаметры диафрагм, размеры зрачков, размеры тела накала или других светящихся элементов источников излучения (при необходимости);

воздушные промежутки и другие размеры по оси, определяющие взаимное расположение оптических элементов, диафрагм, зрачков, фокальных плоскостей, плоскостей изображения и плоскостей предмета (для систем, работающих на конечном расстоянии), источников излучения и приёмников, энергии;

размеры, определяющие пределы рабочего перемещения или предельные углы поворота оптических деталей;

размеры, определяющие положение оптической системы относительно механических частей прибора, например, размер, определяющий положение объектива микроскопа относительно нижнего среза тубуса (при необходимости);

габаритные или установочные размеры, например, длину базы, высоту выноса (при необходимости).

Пример выполнения оптической принципиальной и расположения (объединенной) схемы визира

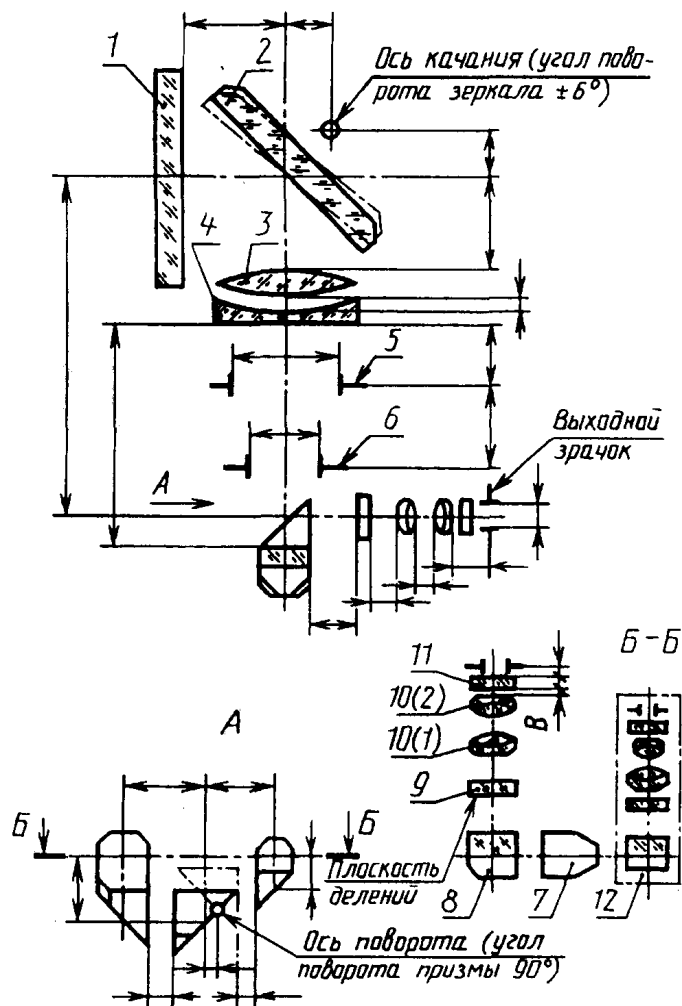


Таблица 1

Оптическая характеристика	Значение		
	номин.	наиб.	наим.
Увеличение			
Угловое поле оптической системы в пространстве предметов			
Диаметр выходного зрачка			
Удаление выходного зрачка от последней поверхности			
Предел разрешения			
Перемещение окуляра на одну диоптрию			

Таблица 2

Поз.	Наименование	Обозначение расчета (схемы)	$\lambda$	$f'$	$S'f'$	$S_f$

3,4	Объектив					
10	Окуляр					

Таблица 3

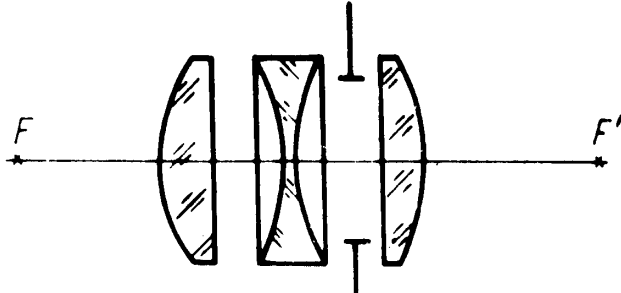
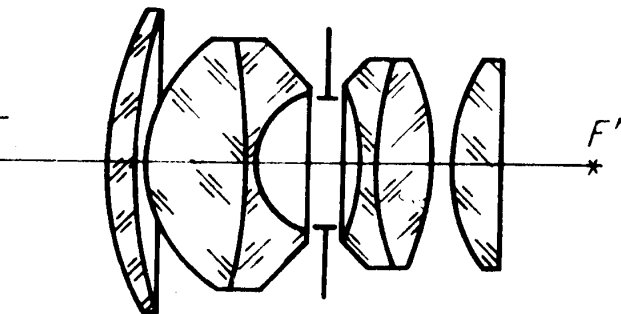
Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	1		Стекло защитное	1	
	2		Зеркало	1	
	3		Линза	1	
	4		Линза	1	
	5		Диафрагма	1	
	6		Диафрагма	1	
	7		Призма AP-90	1	
	8		Призма AP-90	1	
	9		Сетка	1	
	10		Линза		
	11		Светофильтр	1	Сменные В = ; Г = ; В = ; Г = .
			Светофильтр	1	
	12		Окуляр	1	

Задания:

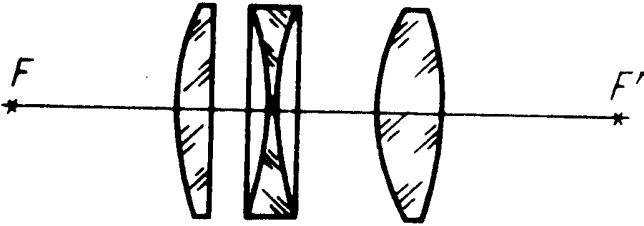
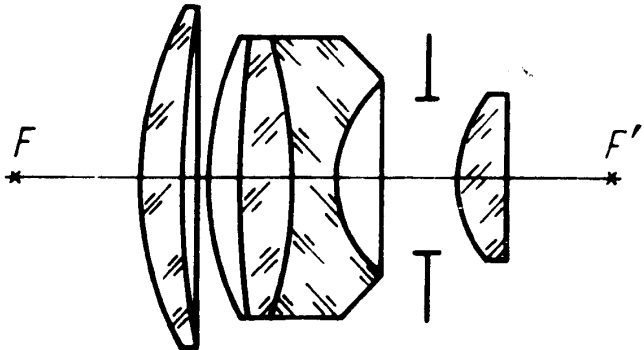
Составить оптическую схему объектива согласно варианта

### Фотографические и проекционные объективы.

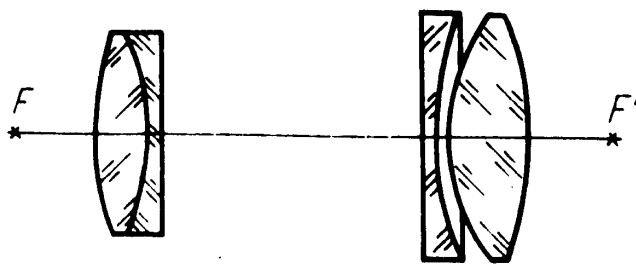
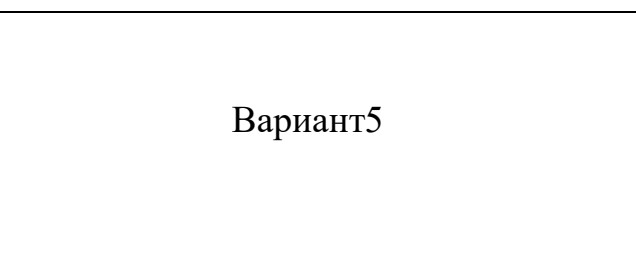
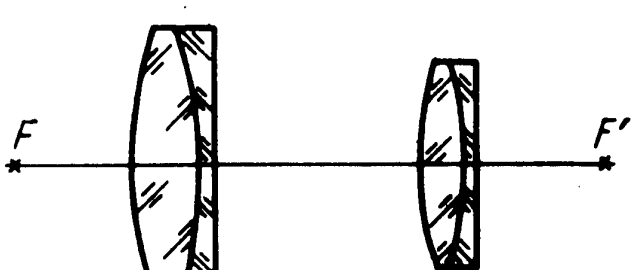
Тип объективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
	Номер поверхности	r	d	$n_D$	D

Вариант1 Фотографические объективы		1	19,14			
 <p><math>f' = 52; 1:3,5; 2\omega = 42^\circ;</math>  <math>S_F = -44,66; S'_{F'} = 35,59;</math></p>	2	-	3,1	1,613	14,5	
	3	81,31	6,3	0		
	4	-	1,6	1	12,0	
	5	19,54	6,6	1,616	4	
	6	22,35	2,6	1	14,5	
	7	237,7		1,613	0	
		-				
		22,35				
Вариант2		1	56,43			
 <p><math>f' = 75; 1:1,5; 2\omega = 18^\circ;</math>  <math>S_F = -23,96; S'_{F'} = 44,10;</math></p>	2	429,5	6,9	1,612	50,3	
	3	0	0,1	6	49,7	
	4	-	1,7	1	42,2	
	5	180,3	16,0	1,647	5	31,5
	6	7	3,3	1	31,0	
	7	20,10	15,0	1,647	5	34,2
	8	-	0,2	5	35,5	
	9	29,78	12,0	1,657	7	34,2
		27,0		7		
	-		1	32,3		
	39,63					
	76,91		1,657	7		
	-					
	129,7					
	0					



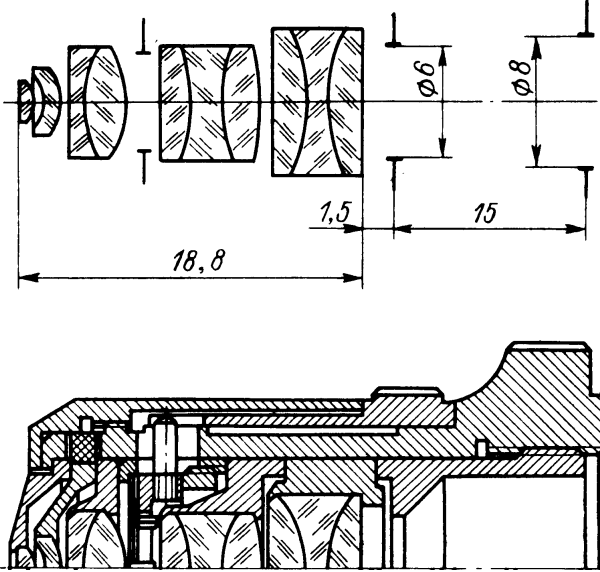
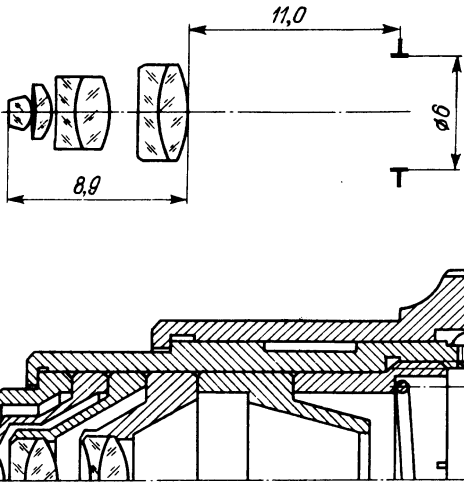
Вариант3		1	30,0			
 <p><math>f' = 100</math>; 1:3,5; <math>2\omega = 60^\circ</math>;  <math>S_F = -87,39</math>; <math>S'_{F'} = 82,1</math>;</p>	2	1100	5,7	1,612	28,6	
	3	-74,0	6,2	1		
	4	30,0	1,9	1,625	28,6	
	5	175,0	10,3	9		
	6	-48,0	3,8	1	28,6	
					1,612	6
Вариант4		1	88,81			
 <p><math>f' = 180</math>; 1:2,8; <math>2\omega = 14^\circ</math>;  <math>S_F = -197,7</math>; <math>S'_{F'} = 83,1</math>;</p>	2	441,8	8,6	1,622	68,0	
	3	55,91	2,3	1	60,6	
	4	77,66	10,0	1,622	55,4	
	5	-	10,8	7	41,2	
	6	959,7	14,5	1,498	38,8	
	7	0	39,8	2	30,8	
	8	37,02	3,8	1,672	31,0	
		186,8		1		
	0			1,728		
	-			0		
	2367,8					

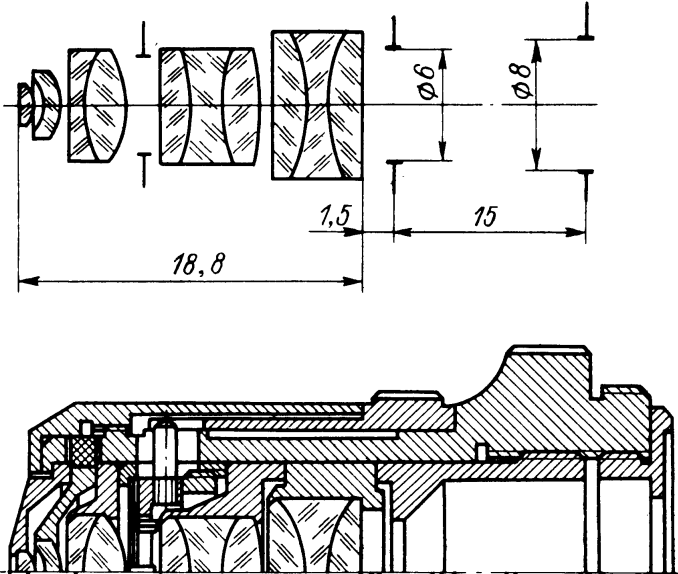
Тип объективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
	Номер поверхности	r	d	$n_D$	D

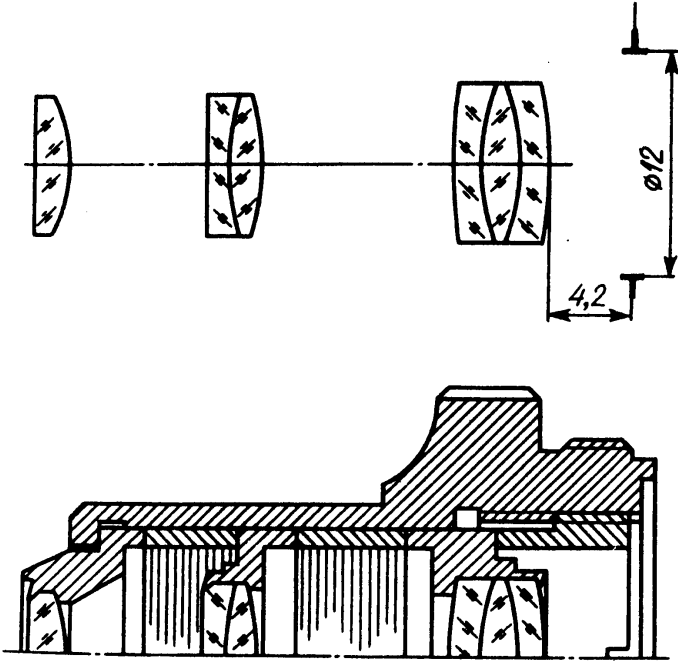
Фотографические объективы Вариант7		1	46,8			
 <p><math>f' = 75; 1:2,1; 2\omega = 23^\circ;</math> <math>S_F = 37,39; S'_{F'} = -45,5;</math></p>		2	-	11,0	1,510	36,5
		3	39,39	2,5	1,578	36,5
		4	$\infty$	32,5	1	
		5	66,5	2,5	1,578	39,5
		6	26,5	2,5	1	
		7	30,4	10,5	1,510	39,5
			-	134,8		
Вариант5		1	52,4			
 <p><math>f' = 100; 1:2,1; 2\omega = 23^\circ;</math> <math>S_F = -37,39; S'_{F'} = 45,5;</math></p>		2	-47,9	14,0	1,510	48,6
		3	$\infty$	2,4	1,578	45,2
		4	88,5	2,4	1	
		5	35,3	2,9	1,578	41,7
		6	40,4	3,3	1	
		7	-	14,2	1,510	68,4
			-	181,3		
Вариант6		1	79,4			
 <p><math>f' = 100; 1:2; 2\omega = 5^\circ;</math> <math>S_F = 38,9; S'_{F'} = -29,6;</math></p>		2	-76,4	11,0	1,516	51,3
		3	$\infty$	3,7	3	50
		4	90,2	9,8	1,619	9
		5	56,6	9,8	1	32,8
		6	-46,6	2,0	1,516	30
		7	-	3	1,619	9
			-	492,2		

## Объективы микроскопов

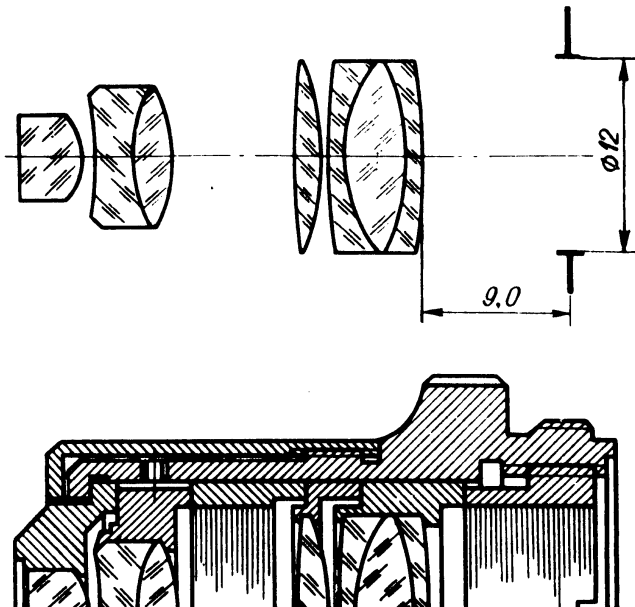
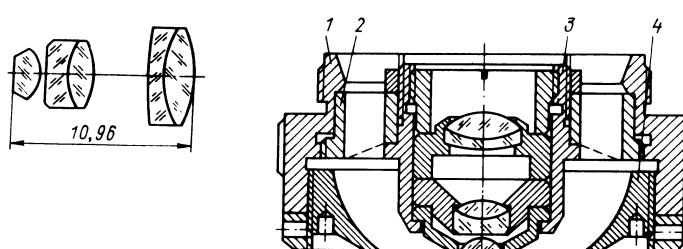
Тип микрообъективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
	Номер поверхности	r	d	Марка стекла $n_D$	D
<p style="text-align: center;">Двухлинзовые объективы малого увеличения</p> <p style="text-align: center;">Вариант8</p> $f' = 10,44; A=0,25;$ $S_F = -7,72; S'_{F'}=11,36; \beta \leq 10$	1	3,32			
	2	-6,03	2,5	1,4338	5,0
	3	23,99	0,45	1,5696	8,4
<p style="text-align: center;">Вариант9</p> $f' = 16,42; A=0,2;$ $S_F = -14,14; S'_{F'}=15,65; \beta \leq 10$	1	21,0			
	2	-6,9	1,0	1,6475	4,8
	3	-10,0	3,5	1,5163	4,8
<p style="text-align: center;">Вариант10</p> $f' = 35,89; A=0,1;$ $S_F = -34,69; S'_{F'}=35,36; \beta=3$	1	42,9			
	2	-	0,92	1,6488	7,6
	3	14,29	1,73	1,5100	7,8
		-			
		22,46			
<p style="text-align: center;">Вариант11</p> $f' = 24,18; A=0,2;$ $S_F = -21,77; S'_{F'}=23,68; \beta \leq 10$	1	13,09			
	2	-8,59	2,86	1,5163	9,0
	3	-	1,51	1,6138	10,6
		39,99			
<p style="text-align: center;">Вариант12</p> $f' = 29,48; A=0,1;$ $S_F = -28,01; S'_{F'}=28,65; \beta=3$	1	16,75			
	2	-6,49	2,5	1,5163	6,4
	3	-	1,0	1,7398	7,2
		19,63			

Тип микрообъективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
<p>Объективы ахроматы Вариант13</p>  <p>M-42 (8×0,20); f' = 18,4; S=8,57;</p>	1	$\infty$	1,0	ТФ1	5,8
<p>Вариант14</p>  <p>OM-41 (90×1,25) f' =1,96; S=0,1</p>	2	8,9	2,0	КФ4	6,3
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	3	-8,9	13,7	-	6,3
<p>Вариант14</p>	4	144,4	1,0	ТФ1	7,5
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	5	13,67	2,0	КФ4	7,6
<p>Вариант14</p>	6	-13,8			7,6
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	7	$\infty$	0,92	К2	1,0
<p>Вариант14</p>	8	-0,78	0,05	-	1,55
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	9	-7,88	1,00	К5	2,5
<p>Вариант14</p>	10	-2,01	0,2	ТФ1	3,0
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	11	-	34,01	К2	3,4
<p>Вариант14</p>	12	5,32	1,82	-	3,4
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	13	-4,02	1,51	ТФ4	4,4
<p>Вариант14</p>	14	101,8	1,0	К5	4,6
<p>Тип микрообъективов. Оптические характеристики</p>	15	0	1,51		4,8
<p>Вариант14</p>	16	5,66	-7,44		4,8

Тип микрообъективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов					
	Номер поверхности	$r$	$d$	Марка стекла $n_D$	$D$	
<p>Объективы апохроматы Вариант 15</p>  <p>OM-15 (60×0,1) <math>f' = 3,1</math>; <math>S = 0,22</math></p>	1	$\infty$	1,30	Кедровое масло	1,4	
	2	-1,08	0,04		К2	2,2
	3	-	11,08	1,40		-
	4	-2,8	0,25	К3	3,4	
	5	$\infty$	0,90		-	4,5
	6	6,8	2,60	БФ 27		4,7
	7	-4,8	1,1		Флюорит	5,0
	8	$\infty$	2,35	-		5,0
	9	-5,01	1,1		Флюорит	5,2
	10	5,7	2,6	ЛФ1		5,5
	11	-12,8	0,02		Флюорит	5,7
	12	$\infty$	2,03	К15		5,7
	13	-7,03	1,2		Квасцы	6,2
	14	7,03	2,4	КФ4		6,2
	15	-	112,9			6,5

Тип микрообъективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
	<p>Вариант16</p>  <p>OM-18 (10×0,3) f' =15,1; S=4,8</p>	1	∞	2,0	ЛФ1
	2	-8,0	7,5	-	7,2
	3	∞	1,5	К8	7,8
	4	13,57	1,5	Флюорит	8,2
	5	-	10,4	ит	8,4
	6	13,57	1,5	-	8,8
	7	31,00	2,0	ЛФ11	9,0
	8	12,40	1,5	Флюорит	9,4
	9	-	21,38	ит	9,4

Тип микрообъективов. Оптические характеристики	Конструктивные параметры объективов				
	Номер поверхности	r	d	Марка стекла $n_D$	D

Вариант17						
 <p>OM-21 (20×0,65) f' =8,43; S=0,67</p>		1	$\infty$	4,0	ТК1	3,0
		2	-3,8	0,6	-	5,0
		3	-32,0	2,5	БК9	7,0
		4	8,5	2,4	Флюорит	7,7
		5	-7,3	7,5	ит	7,7
		6	70,0	2,0	-	11,0
		7	-13,2	0,5	К8	11,0
		8	76,3	1,0	-	11,0
		9	9,2	3,6	КФ2	10,3
		10	-9,2	1,0	Флюорит	10,3
		11	-64,1		КФ1	10,3
Вариант18						
 <p>ОЭ-1 (40×0,65) f' =6,3; S=0,7</p>		1	$\infty$	1,7	К3	1,6
		2	-1,8	0,2	-	3,0
		3	$\infty$	1,3	ТФ2	3,4
		4	4,2	1,5	К3	3,8
		5	-4,6	3,4	-	3,8
		6	26,5	1,0	Ф2	5,3
		7	5,6	1,8	К3	5,8
		8	-7,9			5,8