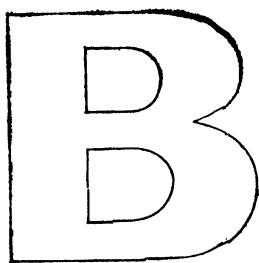




ДЛЯ ВУЗОВ

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



---

для вузов

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для оптических  
специальных вузов*



---

МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
1987

ББК 22.34  
С23  
УДК 681.4 (076)

Рецензенты: кафедра прикладной оптики МИИГАиК и  
канд. техн. наук **Т. И. Якушенкова**

**Сборник задач по теории оптических систем:**  
С23 Учеб. пособие для оптических специальностей вузов /  
Л. Н. Андреев, А. П. Грамматин, С. И. Кирюшин,  
В. И. Кузичев. — М., Машиностроение, 1987. —  
192 с.: ил.

(В обл.): 30 к.

Приведены задачи по основным разделам теории оптических систем, охватывающим как общие вопросы теории, касающиеся устройства основных оптических систем и принципа их действия, так и вопросы габаритного, светоэнергетического и аберрационного расчетов основных видов оптических систем. Даны задачи по оптическим фотоэлектрическим и лазерным системам, а также системам, применяемым в голографии. Для решения задач, носящих исследовательский характер, приведены программы решений на микрокалькуляторе «Электроника БЗ-34». Задачник написан в соответствии с программой курса «Теория оптических систем».

Для студентов, изучающих теоретические основы и проектирование оптических систем, и может быть полезен инженерно-техническим работникам оптической промышленности.

С 2706000000-071  
038(01)-87 71-87

**ББК 22.34**

Оптические системы давно и прочно вошли в нашу жизнь как одна из основных частей оптических, оптико-механических и оптико-электронных приборов, применяемых практически во всех сферах человеческой деятельности и существенно расширяющих возможности человека в познании окружающего мира.

Совершенствование существующих и создание новых оптических систем базируется на фундаментальных знаниях теоретических основ и принципов устройства оптических систем. Эти знания сообщаются при изучении курса «Теория оптических систем». В процессе формирования прочных знаний и приобретении умения в области проектирования оптических и оптико-электронных приборов очень важное место занимает решение практических задач.

Задачник составлен в дополнение к учебнику «Теория оптических систем» (Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. М.: Машиностроение, 1981) и содержит в основном те же разделы, которые, как считают авторы, и по объему и по содержанию соответствуют требованиям современности. В этом состоит коренное отличие данного задачника от уже существующих.

Авторы, работая над сборником задач, руководствовались желанием одновременно создать краткий практический курс теории оптических систем.

Сборник задач состоит из 13 глав, ответов, решений и приложений. Первые пять глав задачника содержат задачи, охватывающие общие вопросы теории оптических систем, без изучения которых невозможно решать задачи последующих глав, посвященных вопросам проектирования оптических схем как классических, так и имеющих определенные особенности.

Каждая глава начинается с краткого изложения теоретических положений и формул, необходимых и полезных при решении задач и при самостоятельном проектировании

оптических систем различных приборов. В последней главе приведены ответы и решения типовых задач, для некоторых задач приведены рекомендации по последовательности решения. В приложениях помещен справочный материал, необходимый для решения ряда задач, а также приведены программы расчетов, выполняемых на микрокалькуляторе «Электроника БЗ-34».

Гл. 1, 2, 7 написаны С. И. Кирюшиным; гл. 3, 8, 9, 12 и задачи 13.91—13.98 — А. П. Грамматиным; гл. 4, 5, 10, 11 — В. И. Кузичевым; гл. 6 и задачи 13.1—13.90 — Л. Н. Андреевым; ответы и решения задач — авторами в соответствии с написанием глав, над предисловием и приложением работал весь авторский коллектив.

Авторы просят читателей присылать замечания и пожелания по адресу: 107076, Москва, Стромынский пер., 4, издательство «Машиностроение».

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\beta$  — линейное увеличение;  
 $\nu$  — угловое увеличение;  
 $\alpha$  — продольное увеличение;  
 $\bar{\Gamma}$  — видимое увеличение микроскопа (лупы, окуляра);  
 $\Gamma_T$  — видимое увеличение телескопической системы;  
 $H (H')$  — передняя (задняя) главная точка;  
 $N (N')$  — передняя (задняя) узловая точка;  
 $\Delta_{HH'}$  — расстояние между главными точками;  
 $\Phi$  — оптическая сила системы;  
 $f (f')$  — переднее (заднее) фокусное расстояние;  
 $s_F (s_{F'})$  — передний (задний) фокальный отрезок;  
 $s_H (s_{H'})$  — расстояние от вершины передней (задней) поверхности до передней (задней) главной точки;  
 $a (a')$  — расстояние от передней (задней) главной точки до осевой точки предмета (изображения);  
 $a_F (a_{F'})$  — расстояние от передней (задней) главной точки первого (последнего) компонента до переднего (заднего) фокуса системы;  
 $a_P (a_{P'})$  — расстояние от передней (задней) главной точки до осевой точки входного (выходного) зрачка;  
 $s (s')$  — передний (задний) отрезок;  
 $z (z')$  — расстояние от переднего (заднего) фокуса до осевой точки предмета (изображения);  
 $h$  — расстояние от оптической оси до точки преломления или отражения меридионального луча;  
 $m (m')$  — координата по оси ОУ точки пересечения луча с плоскостью входного (выходного) зрачка;  
 $\varepsilon (\varepsilon')$  — угол падения (преломления, отражения);  
 $\sigma (\sigma')$  — угол между оптической осью и меридиональным лучом в пространстве предметов (изображений);  
 $n$  — показатель преломления;  
 $D (D')$  — диаметр входного (выходного) зрачка;  
 $s_P (s_{P'})$  — расстояние от передней (последней) поверхности до осевой точки входного (выходного) зрачка;  
 $D/f'$  — относительное отверстие;  
 $K$  — диафрагменное число;  
 $2y (2y')$  — линейное поле в пространстве предметов (изображений);  
 $2\omega (2\omega')$  — угловое поле в пространстве предметов (изображений);

$D_{\text{пд}}$  — диаметр полевой диафрагмы;  
 $L$  — расстояние между плоскостями предметов и изображений; длина системы;  
 $\lambda$  — длина волны;  
 $A$  — числовая апертура;  
 $\Delta$  — оптический интервал;  
 $\Sigma d$  — сумма толщин;  
 $k_{\omega}$  — коэффициент виньетирования;  
 $\psi$  — угловой предел разрешения;  
 $\delta$  — линейный предел разрешения;  
 $R_c$  — радиус стереоскопического восприятия;  
 $b$  — база глаз;  
 $B$  — база стереоскопического прибора;  
 $\Delta \varepsilon'_{\text{min}}$  — угловой порог стереоскопического восприятия;  
 $\Phi_e (\Phi_v)$  — поток излучения (световой поток);  
 $I_e (I_v)$  — сила излучения (сила света);  
 $M_e (M_v)$  — энергетическая светимость (светимость);  
 $E_e (E_v)$  — энергетическая освещенность (освещенность);  
 $L_e (L_v)$  — энергетическая яркость (яркость);  
 $Q_e$  — энергия излучения;  
 $M_{e, \lambda}(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической светимости;  
 $S(\lambda)$  — абсолютная спектральная чувствительность приемника;  
 $s(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность приемника;  
 $S_{\text{max}}$  — максимальная абсолютная спектральная чувствительность приемника;  
 $S$  — интегральная чувствительность приемника;  
 $\varepsilon$  — коэффициент теплового излучения;  
 $K(\lambda)$  — спектральная световая эффективность излучения;  
 $v(\lambda)$  — относительная спектральная световая эффективность излучения;  
 $K_m$  — максимальная световая эффективность излучения;  
 $K$  — световая эффективность излучения;  
 $Q_{\text{пр}}, Q_{\text{ист}}$  — площадь приемника (источника, входного зрачка и т. д.);  
 $\Delta y'$  — поперечная абберрация;  
 $\Delta s'$  — продольная абберрация;  
 $\Delta s'_{\lambda, \lambda_s}$  — продольная хроматическая абберрация (хроматизм положения);  
 $\Delta y'_{\lambda, \lambda_s}$  — поперечная хроматическая абберрация (хроматизм увеличения).

*Идеальная* оптическая система — это система, которая не нарушает гомоцентричности сколь угодно широких пучков лучей, проходящих через нее, и образует изображение, подобное предмету независимо от его размеров.

В реальных оптических системах свойства идеальной системы могут проявляться только в параксиальной области.

Ниже приведены основные формулы идеальной оптической системы, позволяющие выполнить габаритные расчеты и без которых невозможно конструирование оптических приборов. По этим формулам определяют положение и размеры предмета и изображения; фокусное расстояние оптической системы, которая образует изображение предмета в определенном месте и с заданным увеличением; взаимное расположение предмета, оптической системы и изображения предмета при заданных масштабе изображения и длине системы; поперечные размеры компонентов оптической схемы. В табл. 1.1 приведены способы (приемы) графического решения различных задач геометрической оптики.

Приведем основные формулы.

Линейное увеличение

$$\beta = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{fa'}{f'a} = \frac{na'}{n'a} = \\ = -\frac{f \operatorname{tg} \sigma}{f' \operatorname{tg} \sigma'} = \frac{n \operatorname{tg} \sigma}{n' \operatorname{tg} \sigma'};$$

угловое увеличение

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \sigma'}{\operatorname{tg} \sigma} = \frac{a}{a'} = -\frac{f}{f' \beta} = \frac{n}{n' \beta} = \frac{z}{f'} = \frac{f}{z'};$$

продольное увеличение

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta_1 \beta_2;$$



при бесконечно малой длине отрезка, расположенного вдоль оси, можно считать, что  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ , тогда

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta^2 = \frac{n'}{n} \beta^2.$$

Линейное, угловое и продольное увеличения связаны следующими соотношениями

$$\beta \gamma = -\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'};$$

$$\alpha \gamma = \beta.$$

Положение предмета, определяемое отрезками  $z$ ,  $a$ , положение изображения, определяемое отрезками  $z'$  и  $a'$ , связаны формулой Ньютона

$$zz' = ff'$$

или формулами отрезков

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1;$$

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

где  $n'/f' = -n/f = \Phi$  — оптическая сила системы.

Формула Лагранжа — Гельмгольца связывает размеры предмета и изображения и является инвариантом для поверхности

$$-yf \operatorname{tg} \sigma = y' f' \operatorname{tg} \sigma'.$$

Когда задано линейное увеличение  $\beta$  (масштаб изображения) и расстояние  $L$ , значения фокусного расстояния  $f'$  отрезков  $a$  и  $a'$  удобно вычислять по следующим формулам:

$$f' = \frac{L - \Delta_{HH'}}{(1 - \beta) \left( \beta - \frac{n}{n'} \right)} \beta; \quad (1.1)$$

$$a = -\frac{1 - \beta}{\beta} f = \frac{1 - \beta}{\beta} f' \frac{n}{n'}; \quad (1.2)$$

$$a' = f' (1 - \beta) \quad (1.3)$$

или

$$a = -\frac{L - \Delta_{HH'}}{1 - \beta n' / n}; \quad (1.4)$$

$$a' = -\frac{L - \Delta_{HH'}}{[n/n' - \beta]}. \quad (1.5)$$

Ход лучей рассчитывается по формулам углов и высот:

$$\operatorname{tg} \sigma_{k+1} = -\frac{f_k}{f'_k} \operatorname{tg} \sigma_k + \frac{h_k \Phi_k}{n_{k+1}}$$

или

$$\operatorname{tg} \sigma_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}} \operatorname{tg} \sigma_k + \frac{h_k \Phi_k}{n_{k+1}}, \quad (1.6)$$

$$h_{k+1} = h_k - \operatorname{tg} \sigma_{k+1} d_k. \quad (1.7)$$

Если формулы (1.6) и (1.7) применить к оптической системе, состоящей из  $p$  поверхностей, то можно вычислить заднее фокусное расстояние  $f'$  и определить значение  $a_{F'}$  (при  $\sigma_1 = 0$ ):

$$\left. \begin{aligned} f' &= h_1 / \operatorname{tg} \sigma_{p+1}; \\ a_{F'} &= h_p / \operatorname{tg} \sigma_{p+1}, \end{aligned} \right\}$$

вычислить переднее фокусное расстояние  $f$  и определить значение  $a_F$  (при  $\sigma_{p+1} = 0$ ):

$$\begin{aligned} f &= h_p / \operatorname{tg} \sigma_1; \\ a_F &= h_1 / \operatorname{tg} \sigma_1, \end{aligned}$$

определить положение  $a'_p$  изображения:

$$a'_p = h_p / \operatorname{tg} \sigma_{p+1}.$$

Оптическую силу и положение фокусов относительно главных плоскостей в сложных системах определяют по следующим формулам:

в системе из двух компонентов

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{(2)} &= \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d / n_2; \\ a_{F'} &= f' \left( 1 - \Phi_1 \frac{d}{n_2} \right); \\ a_F &= f \left( 1 - \Phi_2 \frac{d}{n_2} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

в системе из трех компонентов

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{(3)} &= \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 \frac{d_1}{n_2} (\Phi_2 + \Phi_3) - \\ &- \Phi_3 \frac{d_2}{n_3} \left( \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 \frac{d_1}{n_2} \right), \\ a_{F'} &= \frac{n_4}{\Phi} \left[ 1 - \Phi_1 \left( \frac{d_1}{n_2} + \frac{d_2}{n_3} \right) - \right. \\ &\left. - \Phi_2 \frac{d_2}{n_3} \left( 1 - \Phi_1 \frac{d_1}{n_2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

В случае расположения оптической системы в однородных средах ( $n = n'$ ), например в воздухе ( $n = n' = 1$ ), вид рассмотренных формул упростится:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{a'}{a} = \frac{f'}{z} = \frac{\operatorname{tg} \sigma'}{\operatorname{tg} \sigma}; \\ \gamma &= 1/\beta; \\ \alpha &= \beta^2; \\ \beta\gamma &= 1; \\ zz' &= -f'^2; \\ \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} &= \frac{1}{f'}; \\ y \operatorname{tg} \sigma &= y' \operatorname{tg} \sigma'; \\ f' &= -\frac{L - \Delta_{HH'}}{(1 - \beta)^2} \beta; \quad a = \frac{1 - \beta}{\beta} f'; \\ \operatorname{tg} \sigma_{k+1} &= \operatorname{tg} \sigma_k + h_k \Phi_k; \\ \Phi^{(2)} &= \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d; \\ a_{F'} &= f' (1 - \Phi_1 d); \\ a_F &= -f' (1 - \Phi_2 d); \\ \Phi^{(3)} &= \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 d_1 (\Phi_2 + \Phi_3) - \\ &- \Phi_3 d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d); \\ a_{F'} &= \frac{1}{\Phi} [1 - \Phi_1 (d_1 + d_2) - \Phi_2 d_2 (1 - \Phi_1 d_1)]. \end{aligned}$$

При  $\Delta_{HH'} = 0$ , т. е. для тонкой системы

$$f' = -\frac{L\beta}{(1-\beta)^2}; \quad a = -\frac{L}{1-\beta}; \quad a' = -\frac{L\beta}{1-\beta}.$$

Для сферических зеркал ( $n = -n' = 1$ ) справедливы следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} f' &= \frac{r}{2} = \frac{L\beta}{1-\beta^2}; \\ \beta &= -\frac{s'}{s}; \quad L = s' - s; \\ s &= -\frac{L}{1+\beta}; \\ s' &= \frac{L\beta}{1+\beta}; \\ \frac{1}{s'} + \frac{1}{s} &= \frac{1}{f'}; \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} s' &= \frac{r+L}{2} \pm \frac{\sqrt{r^2+L^2}}{2} = \frac{(r+L) \pm \sqrt{r^2+L^2}}{2} = \\ &= \left(f' + \frac{L}{2}\right) \pm \sqrt{f'^2 + \frac{L^2}{4}}; \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$s = \frac{(r-L) \pm \sqrt{r^2+L^2}}{2} = \left(f' - \frac{L}{2}\right) \pm \sqrt{f'^2 + \frac{L^2}{4}}. \quad (1.12)$$

В формулах (1.11) и (1.12) знак корня противоположен знаку величины  $L$ .

Формулы линзы приведены в гл. 2 и 3.

При графическом решении задач идеальной оптической системы применяют один из шести способов построения хода лучей (табл. 1.1). Способы основаны на использовании связи хода заданного луча с известным ходом вспомогательного луча.

Большинство графических задач решают, полагая, что пространство предметов однородно пространству изображений. В этом случае из приведенных в таблице остаются только четыре способа (второй способ совпадает с третьим, а пятый с шестым).

### 1.1. Способы построения хода лучей

Номер способа	Ход вспомогательного луча		Ход заданного луча в пространстве изображений
	в пространстве предметов	в пространстве изображений	
1	Параллельно заданному лучу через передний фокус $F$	Параллельно оптической оси	Через точку пересечения вспомогательного луча с задней фокальной плоскостью
2	Параллельно заданному лучу через переднюю узловую точку $N$	Параллельно заданному лучу через заднюю узловую точку $N'$	Через точку пересечения вспомогательного луча с задней фокальной плоскостью
3	Параллельно заданному лучу через переднюю главную точку $H$ . При этом переднюю фокальную плоскость вспомогательный луч пересекает на расстоянии $y_F$ от оси	Через заднюю главную точку $H'$ и точку задней фокальной плоскости, отстоящей от оси на расстоянии $y_{F'} = -y_F$	Через точку пересечения вспомогательного луча с задней фокальной плоскостью

Продолжение табл. 1.1

Номер способа	Ход вспомогательного луча		Ход заданного луча в пространстве изображений
	в пространстве предметов	в пространстве изображений	
4	Параллельно оптической оси через точку пересечения заданного луча с передней фокальной плоскостью	Через задний фокус	Параллельно вспомогательному лучу в пространстве изображений
5	Через точку пересечения заданного луча с передней фокальной плоскостью и через переднюю узловую точку $N$	Параллельно заданному лучу через заднюю узловую точку $N'$	Параллельно вспомогательному лучу в пространстве изображений
6	Через точку пересечения заданного луча с передней фокальной плоскостью на расстоянии $y_F$ от оси и через переднюю главную точку $H$	Через заднюю главную точку $H'$ и точку задней фокальной плоскости, отстоящей от оси на расстоянии $y_{F'} = -y_F$	Параллельно вспомогательному лучу в пространстве изображений

## Задачи

1.1. Определить высоту изображения, образованного объективом на экране, если предмет имеет высоту  $y = 30$  мм и расположен перед объективом на расстоянии  $a = -110$  мм. Фокусное расстояние объектива, расположенного в воздухе ( $n = n' = 1$ ), равно 100 мм. Каким должно быть расстояние от объектива до экрана?

1.2. Тонкий проекционный объектив образует на экране, расположенном справа от объектива на расстоянии 1,8 м, действительное изображение высотой 100 мм. Вычислить фокусное расстояние объектива, если высота предмета 20 мм.

1.3. Проекционный объектив образует на экране, находящемся справа от последней поверхности объектива на расстоянии 2,4 м, действительное изображение предмета высотой 100 мм. Определить фокусное расстояние объектива, если сам предмет имеет высоту 20 мм в случаях: а) объектив можно считать тонким; б) объектив нельзя считать тонким:  $\Delta_{HH'} = 48$  мм,  $s_{H'}' = -60$  мм. Среды однородные ( $n = n' = 1$ ). Определить расстояния  $a$  и  $L$ .

1.4. Определить взаимное расположение тонкой линзы с фокусным расстоянием 100 мм, предмета и экрана, на который проецируется действительное изображение предмета с пятикратным увеличением.

1.5. Определить взаимное расположение тонкой линзы с фокусным расстоянием 130 мм, расположенной в воздухе, предмета и экрана, на который проецируется с помощью этой линзы действительное изображение предмета с пятикратным увеличением. Как изменятся эти расстояния если: а) вторая среда—вода (см. прил. 1.1); б) первая среда—вода?

1.6. Предмет высотой 12 мм проецируется объективом увеличителя в виде действительного изображения высотой 48 мм. Плоскость изображения находится на расстоянии 260 мм справа от плоскости предмета. Определить фокусное расстояние объектива, если  $\Delta_{HH'} = 10$  мм.

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

## 1.2. Кардинальные элементы объективов

Номер по пор.	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Передний фокальный отрезок $s_{F'}$ , мм	Задний фокальный отрезок $s_{F'}$ , мм	Сумма расстояний $\Sigma d$ , мм
1	55,6	—41,7	43,6	18,6
2	55,6	—36,2	37,4	26,3
3	55,6	—49,9	27,3	32,5
4	55,6	—34,3	38,1	38,5

1.8. Производится фотографирование осциллограмм с экрана осциллографа размером  $120 \times 180$  мм на фотопленку с кадром  $24 \times 36$  мм. Вычислить фокусное расстояние тонкого объектива и расстояния от объектива до экрана и до фотопленки, если экран удален от фотопленки на 400 мм. Какой объектив из приведенных в табл. 1.2 позволяет наилучшим образом обеспечить расстояние в 400 мм?

1.9. Определить размер и положение изображения после тонкой линзы ( $d = 0$ ), имеющей  $r_1 = 100$  мм,  $r_2 = -66,7$  мм и изготовленной из стекла К8 ( $\lambda_D$ )\*, если предмет высотой 10 мм, расположен перед линзой на расстоянии 90 мм. Как изменятся размер и положение изображения, если толщина линзы  $d = 10$  мм?

1.10. Вычислить фокусное расстояние и радиусы кривизны симметричной тонкой двояковыпуклой линзы, если известно, что она образует действительное перевернутое изображение предмета:

а) размер предмета  $y = 24$  мм, размер изображения  $y' = 120$  мм, расстояние между предметом и изображением  $L = 600$  мм; линза изготовлена из стекла К8 ( $\lambda_e$ ) и расположена в воздухе;

б) как изменятся значения фокусного расстояния и радиусов кривизны, если линза имеет толщину  $d = 10$  мм и  $\Delta_{nn'} = 3,33$  мм?

в) чему будет равно фокусное расстояние линзы, если при  $d = 10$  мм радиусы кривизны линзы соответствуют значениям, вычисленным для тонкой линзы?

\* Здесь и далее указана длина волны, по которой из прил. 1.1. выбирается показатель преломления материала.



1.11. Тонким объективом с фокусным расстоянием  $f' = 30$  мм и диаметром входного зрачка  $D = 15$  мм проецируется кинокадр высотой  $h_k = 8$  мм на экран высотой  $H_{эк} = 2$  м. Определить, на каком расстоянии от экрана должен находиться зритель с угловым пределом разрешения глаза в одну угловую минуту, чтобы не заметить на экране ухудшения качества изображения при продольных смещениях пленки в кадровом окне (перпендикулярно к плоскости пленки) в пределах: а) 5 мкм; б) 50 мкм.

1.12. Вычислить допустимый прогиб кинопленки в кадровом окне высотой 18 мм при кинопроекции фильма на экран высотой 3 м. Изображение создает тонкий объектив с диаметром входного зрачка  $D = 60$  мм. Длина зала 30 м. Наблюдатель с угловым пределом разрешения глаза в одну угловую минуту находится на расстоянии 20 м от экрана. Как изменится значение допустимого прогиба пленки, если зритель будет находиться от экрана на расстоянии 4 м?

1.13. Построить ход заданного луча через положительную (рис. 1.1) и отрицательную (рис. 1.2) линзы всеми способами.

1.14. На рис. 1.3 показаны оптическая система, состоящая из четырех линз, расположенных в воздухе, и падающий луч. Построить ход этого луча через линзы, используя разные способы.

1.15. На рис. 1.4 показан ход луча через оптическую систему, состоящую из четырех тонких линз, расположенных в воздухе. Найти графически положение фокусов каждой линзы и заднее эквивалентное фокусное расстояние системы.

1.16. На рис. 1.5 приведены схемы оптических систем, представленных кардинальными элементами. Найти графически узловые точки этих систем.

1.17. На рис. 1.6, а, б приведены варианты оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов. На схемах приведены необходимые кардинальные точки. Используя только данные задачи, определить графически положение главных плоскостей и фокусов эквивалентной оптической системы без построения обратного хода лучей. Система находится в однородной среде.

1.18. На рис. 1.7, а, б, в показаны первая и последняя поверхности сложной оптической системы и ход трех лучей, причем ход двух лучей 1, 2 известен как до системы, так и после нее. Используя данные задачи и полагая, что система

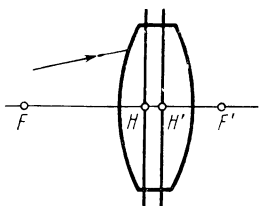


Рис. 1.1. Заданный луч, падающий на положительную линзу

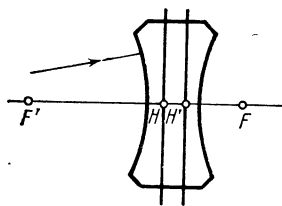


Рис. 1.2. Заданный луч, падающий на отрицательную линзу

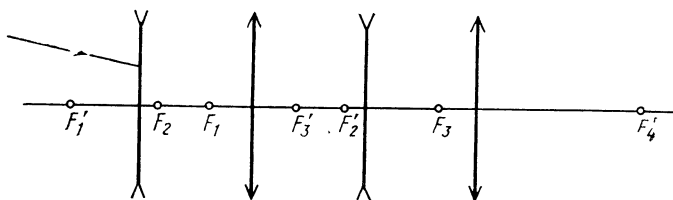


Рис. 1.3. Система из четырех тонких компонентов

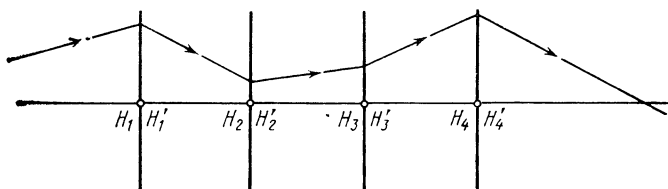


Рис. 1.4. Ход луча в четырехкомпонентной системе

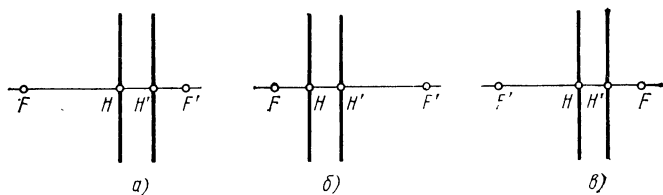


Рис. 1.5. Схема идеальной оптической системы, расположенной в неоднородных средах:

а —  $n > n'$ ; б —  $n < n'$ ; в —  $n' > n$

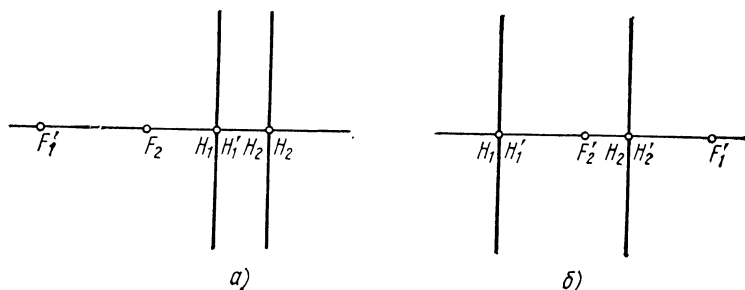


Рис. 1.6. Двухкомпонентные системы из двух тонких элементов:  
а)  $f'_1 < 0$ ; б)  $f'_1 > 0$

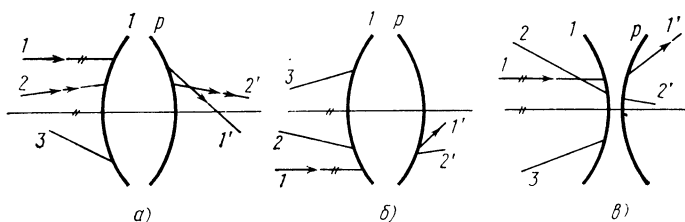


Рис. 1.7. Схемы сложных систем, состоящих из  $p$  поверхностей:  
а, б —  $f' > 0$ ; в —  $f' < 0$

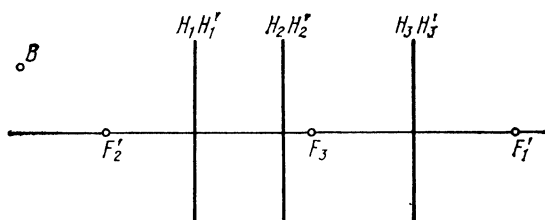


Рис. 1.8. Схема системы, состоящей из трех тонких компонентов

расположена в однородной среде, построить ход третьего луча  $3$  за последней поверхностью системы.

1.19. Оптическая система (рис. 1.8), состоящая из трех тонких компонентов, расположена в воздухе. Используя лишь приведенные на рисунке данные, определить графически эквивалентное фокусное расстояние системы, положение изображения точки  $B$  и передней главной плоскости без построения обратного хода лучей. Ходом какого луча можно проверить правильность построений? Решить задачу для случая, когда первый и третий компоненты — рассеивающие, а второй — собирающий.

1.20. Определить положение и размер фотографируемого в воде предмета относительно тонкого фотографического объектива с фокусным расстоянием  $f' = 50$  мм, если изображение размером 20 мм находится за объективом на расстоянии  $a' = 51,2$  мм. Какое расстояние необходимо установить по шкале дистанций?

1.21. Вычислить эквивалентное фокусное расстояние и положение фокусов двухкомпонентной системы, находящейся в воздухе, если главные плоскости компонентов разнесены на 60 мм, а фокусные расстояния  $f'_1 = 100$  мм,  $f'_2 = -50$  мм. Начиная с какого расстояния между компонентами система будет давать действительное изображение бесконечно удаленного предмета? На каком удалении от первого компонента должен быть размещен предмет ( $a_1 = ?$ ) и на каком расстоянии от второго компонента получится изображение ( $a'_2 = ?$ ), если система действует с  $\beta = -1$ ?

1.22. Перед двухкомпонентной системой на расстоянии 170 мм от передней главной плоскости первого компонента, имеющего фокусное расстояние  $f'_1 = 50$  мм, находится предмет высотой 10 мм. Второй компонент, имеющий фокусное расстояние  $f'_2 = -50$  мм, находится от первого компонента на расстоянии  $d = 25$  мм. Определить размер изображения предмета и положение изображения относительно задней главной плоскости второго компонента, используя: а) формулу отрезков; б) формулу углов и высот; в) формулы двухкомпонентной системы.

1.23. Идеальная оптическая система состоит из двух тонких компонентов, расположенных в воздухе на расстоянии 20 мм и имеющих фокусные расстояния, равные  $f'_1 = 100$  мм и  $f'_2 = -100$  мм. Определить эквивалентное фокусное расстояние и расстояния, определяющие положение переднего и заднего фокусов. При каком промежутке между компонентами фокусное расстояние второго компонента не влияет на значение эквивалентного фокусного расстояния? Как расположены в этом случае передний и задний эквивалентные фокусы? Ответьте на поставленные вопросы для случая, когда среда между компонентами имеет показатель преломления  $n_2 = 1,333$ .

1.24. В воде на расстоянии 200 мм от поверхности воды расположен предмет, имеющий размер 200 мм. Тонкая линза расположена так, что ее первая поверхность касается воды, а вторая — воздуха. Осевой луч, падающий на линзу из воды, образует угол, тангенс которого  $\operatorname{tg} \sigma = -0,01$ ; выходя из линзы, этот луч образует с осью угол, тангенс

которого  $\operatorname{tg} \sigma' = 0,187$ . Определить размер образованного линзой изображения предмета.

1.25. На рис. 1.9 главными плоскостями представлена идеальная оптическая система и предмет  $AB$ . Построить изображение.

1.26. Тонкая оптическая система, расположенная в воздухе, изображает предмет, имеющий размер  $2y$  в виде отрезка  $2y'$  (рис. 1.10). Определить графически фокусное расстояние этой системы в случае, когда: а)  $2y'$  — действительное изображение предмета; б)  $2y'$  — мнимое изображение предмета. Решить задачу для сферического зеркала.

1.27. Построить графически изображение точки  $B$  и предмета  $AM$  в вогнутом и выпуклом сферических зеркалах (рис. 1.11, а, б).

1.28. Предметные точки  $B$  оптически сопряжены соответственно с точками изображения  $B'$ , образованными сферическими зеркалами с осью  $OO'$ . Найти графически фокусное расстояние и радиус кривизны каждого из зеркал (рис. 1.12).

1.29. Известно, что объектив микроскопа создает изображение предмета в передней фокальной плоскости окуляра (рис. 1.13). Найти графически положение изображения диафрагмы  $D$  после окуляра, если  $y$  — предмет.

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

1.31. Объектив, образованный двумя расположенными в воздухе тонкими компонентами с фокусными расстояниями соответственно 100 и — 125 мм и разнесенными друг от друга на 100 мм, изображает предмет, имеющий форму квадрата со стороной 2 мм и расположенный в меридиональной плоскости.

Сторона квадрата, обращенная к объективу, находится на расстоянии 200 мм от первого компонента. Определить размеры и положение изображения предмета при: а)  $\beta_1 = \beta_2$ , б)  $\beta_1 \neq \beta_2$ . Высоту луча на первом компоненте принять равной 40 мм.

1.32. Плосковыпуклая линза толщиной 6 мм, изготовленная из стекла БК10 ( $\lambda_e$ ), изображает предмет высотой 30 мм. Предмет расположен перед первой плоской поверхностью линзы на расстоянии 56 мм. Изображение предмета получилось справа за второй поверхностью на расстоянии

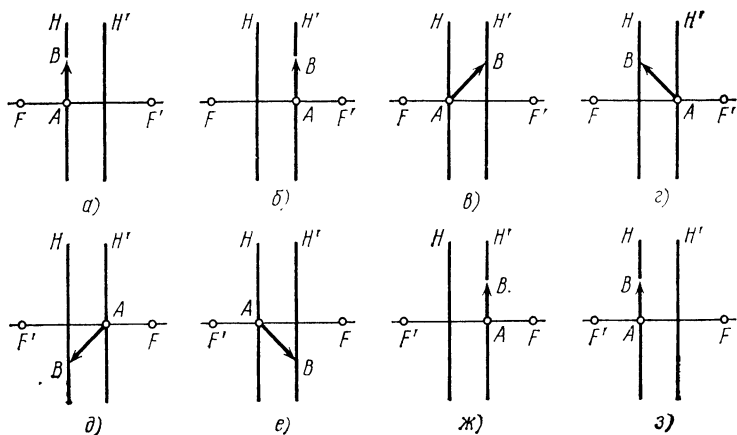


Рис. 1.9. Схемы идеальной оптической системы с различным положением предмета  $AB$

Рис. 1.10. Взаимное положение и размеры  $2y$  предмета и  $2y'$  изображения в тонкой идеальной оптической системе

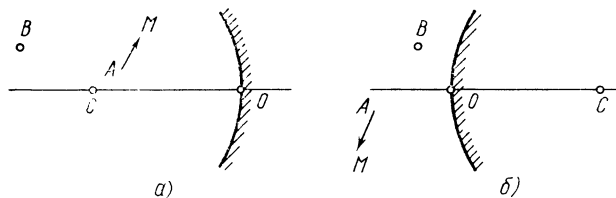
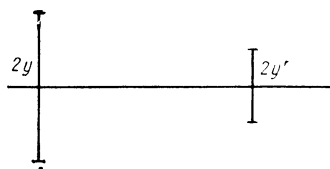


Рис. 1.11. Сферические зеркала:

$O$  — вершина,  $C$  — центр кривизны,  $B$  — предметная точка,  $AM$  — предмет

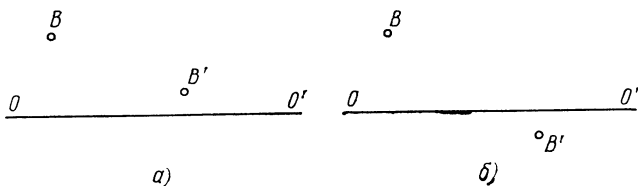


Рис. 1.12. Предметная точка и точка изображения в сферическом зеркале ( $OO'$  — оптическая ось зеркала)

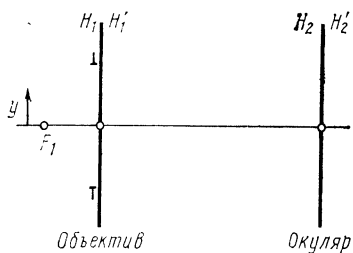


Рис. 1.13. Схема микроскопа

300 мм. Определить высоту изображения предмета. Линза расположена в воздухе.

1.33. Вычислить фокусное расстояние и положение фокуса системы, состоящей из трех тонких компонентов, расположенных в воздухе, используя данные табл. 1.3.

1.34. Используя данные задачи 1.33, исследовать:

1) влияние перемещения второго компонента в пределах  $\pm 0,1 d_1$  на фокусное расстояние системы и на значение  $a_{F'}$ ; сравнить результаты во всех вариантах, сделать выводы,  $\Sigma d = \text{const}$ ;

2) влияние изменений расстояний между главными плоскостями в пределах 0,1 соответствующих расстояний при всевозможных восьми комбинациях на фокусное расстояние и на значение  $a_{F'}$ ; сравнить результаты во всех вариантах, сделать выводы.

1.35. Оптическая система состоит из двух расположенных в воздухе тонких компонентов с фокусными расстояниями  $f'_1 = 100$  мм и  $f'_2 = -50$  мм. Изображение бесконечно удаленного предмета должно получиться на расстоянии 200 мм от задней главной плоскости второго компонента. Определить эквивалентное фокусное расстояние системы и

1.3. Значения параметров компонентов системы

Параметр	Вариант			
	а	б	в	г
Фокусное расстояние, мм:				
1-го компонента	1000	200	-400	1000
2-го компонента	-1000	-300	300	-500
3-го компонента	500	400	-550	300
Расстояние между главными плоскостями первого и второго компонентов, мм	500	60	200	400
Расстояние между главными плоскостями второго и третьего компонентов, мм	200	120	400	100

расстояние, на котором должны находиться друг от друга главные плоскости компонентов.

1.36. Точечный источник света находится над оптической осью сферического зеркала на расстоянии 100 мм, а его изображение — под осью на расстоянии 20 мм. Расстояние между плоскостями предметов и изображений вдоль оси равно 300 мм. Вычислить фокусное расстояние, радиус кривизны зеркала, положение плоскостей предмета и изображения от вершины зеркала.

1.37. Объектив телескопа имеет фокусное расстояние  $1,6 \cdot 10^5$  мм. Определить различие в положении изображений следующих объектов: а) звезды; б) Луны (см. прил. 1.1); в) искусственных спутников Земли, находящихся на орбите высотой  $H_1 = 320$  км,  $H_2 = 200$  км.

1.38. Телеобъектив состоит из положительного тонкого компонента с фокусным расстоянием  $f'_1 = 300$  мм и отрицательного компонента с  $f'_2 = -100$  мм, расстояние между компонентами  $d = 275$  мм. Определить положение плоскости пленки относительно второго компонента, если предмет расположен перед первым компонентом на расстоянии 10 м?

1.39. При проецировании фильма с кадром  $24 \times 36$  мм на весь экран, имеющий размер  $1200 \times 1800$  мм, с помощью объектива с фокусным расстоянием  $f' = 100$  мм длина зала  $a'$  должна быть не менее 5,1 м. Длина имеющегося зала не может быть более 3,5 м. В этом случае изображение займет лишь часть экрана. Определить: а) размер изображения на экране; б) какую оптическую силу в диоптриях должна иметь насадка, устанавливаемая вплотную к объективу, чтобы в имеющихся условиях изображение кадра занимало бы всю площадь экрана?

1.40. Микроскоп имеет объектив с фокусным расстоянием  $f'_{об} = 20$  мм и окуляр с  $f'_{ок} = 15$  мм при оптическом интервале  $\Delta = 160$  мм. Требуется осуществить проекцию изображения объекта на экран с 40-кратным увеличением, для чего определить:

а) на сколько и в какую сторону следует переместить окуляр?

б) на каком расстоянии от объектива должны находиться экран и окуляр в этом случае?

в) смещение плоскости предметов при исходном положении объектива, окуляра и экрана. С каким увеличением в этом случае изображается объект на экране?

г) перемещение микроскопа при исходных положениях предмета и экрана.



1.41. В качестве объектива, изображающего бесконечно удаленный предмет с угловым размером  $2\omega = 3^\circ$ , применена тонкая плосковыпуклая линза ( $r_1 = \infty$ ) с фокусным расстоянием  $f' = 100$  мм, изготовленная из стекла К8 ( $\lambda_e$ ). Определить размер изображения предмета. Решить задачу для случаев, когда вторая поверхность линзы зеркальная: а) плоская, б) выпуклая.

1.42. Двухзеркальная телескопическая система образована собирающим и рассеивающим зеркалами с фокусными расстояниями, соответственно равными 100 и 20 мм. Определить, на сколько и в какую сторону необходимо сместить второе зеркало, чтобы изображение бесконечно удаленной точки совпадало бы с вершиной первого зеркала.

1.43. Двухзеркальная телескопическая система образована собирающими зеркалами с радиусами кривизны  $r_1 = -200$  мм и  $r_2 = 40$  мм. Определить, на сколько и в какую сторону необходимо сместить второе зеркало, чтобы изображение бесконечно удаленной осевой точки совпадало бы с вершиной первого зеркала.

1.44. Конфокальный резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами (левым и правым) с радиусами кривизны, равными 100 мм. Определить положение изображения осевой точки А, расположенной правее вершины левого зеркала на расстоянии: а) 20 мм, б) 25 мм, в) 75 мм, г) 80 мм. Сделайте вывод о положении точки изображения.

1.45. На каком расстоянии друг от друга следует разместить компоненты двухкомпонентного фотообъектива, чтобы получить полное изображение Луны на кадре форматом  $8 \times 8$  мм, если фокусные расстояния компонентов соответственно  $f'_1 = 100$  мм,  $f'_2 = 500$  мм?

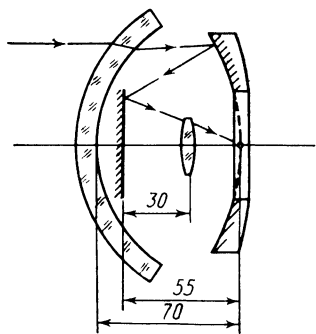


Рис. 1.14. Схема зеркально-линзового объектива

1.46. На рис. 1.14 приведена оптическая схема зеркально-линзового объектива с необходимыми размерами, все компоненты которого размещены в воздухе. Фокусные расстояния объектива  $f' = 100$  мм, центрального линзового мениска  $f'_1 = -3150$  мм. Определить радиус кривизны большого сферического зеркала и фокусное расстояние линзы, если изображение бесконечно удаленной

осевой точки должно совпасть с вершиной сферического зеркала.

1.47. Элемент волоконного световода представляет собой цилиндр, изготовленный из стекла с показателем преломления  $n_{\text{ст}}$ , окруженный тонкой цилиндрической оболочкой из стекла с  $n_{\text{об}}$ . Вывести формулу, позволяющую вычислить максимальный угол падения на входной торец в зависимости от значений  $n_{\text{ст}}$  и  $n_{\text{об}}$ . Какое явление при этом используется?

1.48. При изготовлении волоконных световодов рекомендуют применять следующие пары стекол: В722/Вт476, В752/В510, В735/В521, В735/В518 (см. прил. 1.1). Используя формулу, полученную в предыдущей задаче, определить значение  $A = \sin \sigma_{\text{max}}$ .

1.49. При падении на плоскую границу, разделяющую воздух и стекло, отраженный свет будет полностью поляризован, если отраженный и преломленный лучи перпендикулярны друг к другу. Соответствующий этому угол падения  $\epsilon_B$  называют углом Брюстера. Определить  $\epsilon_B$  для стекла Ф6 ( $\lambda_e$ ).

1.50. В центре дна цилиндрического сосуда, наполняемого жидкостью до высоты  $H$ , расположен точечный источник света. При каком минимальном радиусе диска, плавающего над источником, ни один луч не выйдет через поверхность жидкости, если  $H$  равно: а) 100 мм, б) 150 мм, в) 200 мм, г) 300 мм? В качестве жидкости применить воду, кедровое масло, монобромнафталин.

1.51. Тонкий проекционный объектив создает увеличенное перевернутое изображение объекта на экране размером  $2y'_1$ . Перемещая объектив к экрану (при неподвижном объекте), можно получить еще одно положение объектива, при котором на экране будет также четкое изображение объекта, однако размер изображения уже будет  $2y'_2$ . Как связаны между собой эти два положения объектива и значения линейного увеличения? Вычислить размер объекта.

1.52. Известно расстояние между осевой предметной точкой  $A$  и ее изображением  $A'$ , находящимися друг от друга на расстоянии  $L$ , а также положение  $z'$  точки изображения от заднего фокуса. Вычислить фокусное расстояние тонкого объектива.

1.53. Перед выпуклым сферическим зеркалом с фокусным расстоянием  $f'$  установлена перпендикулярно к оси тонкая плоскопараллельная стеклянная пластинка на расстоянии  $d_1$  от зеркала. В каком месте по отношению к пер-

вой поверхности пластинки следует поместить осевую предметную точку, чтобы ее изображение, образованное отражением от пластинки, и изображение от пластинки и зеркала совпадали бы? Решить задачу для пластинки, изготовленной из стекла с показателем преломления  $n_{пл}$  и толщиной  $d_{пл}$ .

Варианты:

а)  $d_1 = 50$  мм;  $f' = 200$  мм; проверить справедливость решения для вогнутого зеркала;

б)  $d_1 = 45$  мм;  $f' = 200$  мм;

в) пусть пластинка  $d_{пл} = 15$  мм;  $n_{пл} = 1,5$ ;  $d_1 = 50$  мм;  $f' = 200$  мм; проверить решение графически.

1.54. Оптическая система состоит из собирающей линзы с фокусным расстоянием  $f'_1 = 200$  мм и вогнутого сферического зеркала с  $f'_2 = -100$  мм, удаленного от линзы на 300 мм. Предмет, имеющий размер  $y = 10$  мм, расположен перед линзой на расстоянии  $a_1 = -400$  мм. Определить размер и положение изображения после системы.

1.55. Оптическая система действует с угловым увеличением  $\gamma = -5$ . Высота осевого луча на последнем компоненте системы составляет  $h_p = 7,5$  мм. Определить положение изображения, если осевая предметная точка находится перед первым компонентом на расстоянии  $a_1 = -200$  мм, а высота сопряженного осевого луча на первой поверхности  $h_1 = 10$  мм. Последняя среда — воздух. Вычислить размер изображения предмета, если сам предмет имеет высоту  $y = 20$  мм, а первая среда: а) воздух; б) вода.

1.56. Передний и задний апертурные углы в оптической системе соответственно равны  $-0,036$  и  $0,18$ . Предмет имеет высоту 10 мм, действительное перевернутое изображение предмета равно 1,5 мм. Определить показатель преломления первой среды, если последняя среда — воздух.

## ГЛАВА 2

### ОПТИКА ПАРАКСИАЛЬНЫХ И НУЛЕВЫХ ЛУЧЕЙ

*Параксиальными* называют лучи, идущие в узком, бесконечно близком к оптической оси (нормалям) пространстве под такими малыми углами  $\alpha$ , что  $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \alpha$ .

*Нулевыми* называют фиктивные лучи, ход которых рассчитывается по формулам параксиальных лучей при конечных значениях углов и высот.

Формулы параксиальной оптики позволяют определить значения кардинальных элементов оптических систем, положение и размер изображения предмета в параксиальной области. По формулам параксиальной оптики рассчитывают ход вспомогательных лучей при абберационной коррекции и исследованиях оптических систем в области аббераций третьего порядка, а также радиусы кривизны поверхностей оптических компонентов.

Приведем основные формулы параксиальной оптики.  
Линейное увеличение

$$\beta = \frac{dy'}{dy} = \frac{n\alpha}{n' \alpha'};$$

линейное увеличение сферической поверхности

$$\beta = \frac{r-s'}{r-s} = \frac{ns'}{n' s}; \quad (2.1)$$

инвариант Гюйгенса — Гельмгольца

$$n_1 \alpha_1 dy_1 = n_{p+1} \alpha_{p+1} dy_{p+1};$$

нулевой инвариант Аббе

$$n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right); \quad (2.2)$$

формула параксиального луча

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}; \quad (2.3)$$

ход параксиального луча через ряд оптических поверхностей можно рассчитать, используя формулы (2.2), (2.3). Однако при расчетах хода луча через большое число поверхностей оказывается удобнее пользоваться формулами углов и высот:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k+1} &= \frac{n_k}{n_{k+1}} \alpha_k + \frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1} r_k} h_k; \\ h_{k+1} &= h_k - \alpha_{k+1} d_k; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

фокусные расстояния и фокальные отрезки можно определить после расчета хода лучей по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \alpha_1 = 0, f' &= h_1 / \alpha_{p+1}, s_F' = h_p / \alpha_{p+1}; \\ \text{при } \alpha_{p+1} = 0, f &= h_p / \alpha_1, s_F = h_1 / \alpha_1, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

значения радиусов кривизны сферических поверхностей связаны с углами и высотами следующими зависимостями:

для преломленного луча

$$r_k = \frac{n_{k+1} - n_k}{\alpha_{k+1} n_{k+1} - \alpha_k n_k} h_k;$$

для отраженного луча ( $-n_{k+1} = n_k$ )

$$r_k = \frac{2h_k}{\alpha_{k+1} + \alpha_k}.$$

Формулы линзы, расположенной в воздухе ( $n_1 = n_3 = 1$ ,  $n_2 = n$ ):

оптическая сила

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{f'} &= (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}; \\ \text{фокальные отрезки} \\ s_{F'} &= f' \left( 1 - \frac{n-1}{nr_1} d \right); \\ s_F &= -f' \left( 1 + \frac{n-1}{nr_2} d \right); \\ \text{отрезки, определяющие положение} \\ &\text{главных плоскостей,} \\ s_{H'} &= -f' \frac{n-1}{nr_1} d; \\ s_H &= -f' \frac{n-1}{nr_2} d; \\ \text{расстояние между главными точками} \\ \Delta_{HH'} &= \left[ 1 - \frac{f'}{n} (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] d. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Если линза тонкая, т. е.  $d = 0$ , то главные плоскости совпадают между собой и с поверхностями линзы. В этом случае

$$\frac{1}{f'_0} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$$

$$s_{F'} = -s_F = f'_0; \quad s_{H'} = s_H = 0.$$

## Задачи

2.1. Определить линейное увеличение оптической преломляющей сферической поверхности, разделяющей среды с показателями преломления  $n$  и  $n'$ , если радиус кривизны равен  $r$ , а предмет находится перед поверхностью на расстоянии  $s$ , для вариантов, представленных в табл. 2.1.

2.1. Конструктивные параметры преломляющей поверхности

Вариант	$n$	$n'$	$r$	$s$
а	1	1,5	50	—200
б	1,5	1	50	—200
в	1,5	1	—50	—200
г	1	1,5	—50	—200

2.2. Какой радиус кривизны должна иметь преломляющая поверхность, разделяющая среды с показателями преломления  $n = 1$  и  $n' = 1,5$ , чтобы осевая предметная точка, расположенная перед поверхностью на расстоянии  $s = -200$  мм, изображалась бы за поверхностью на расстоянии  $s' = 100$  мм? Какое значение будет иметь показатель преломления первой (последней) среды, если линейное увеличение  $\beta = -0,5$ ?

2.3. Используя данные задачи 2.2, определить радиус кривизны поверхности для случая, когда среды поменяли местами ( $n = 1,5$ ;  $n' = 1$ ).

2.4. Используя данные задачи 2.2, определить положение изображения для случая, когда поверхность повернута так, что знак у радиуса кривизны стал обратным. С каким увеличением теперь действует поверхность?

2.5. Определить линейное увеличение оптической отражающей поверхности, находящейся в среде с показателем преломления  $n = -n'$ , если радиус кривизны равен  $r$ , а предмет находится на расстоянии  $s$  от поверхности, для следующих вариантов: а)  $r = 50$  мм,  $s = -200$  мм; б)  $r = -50$  мм,  $s = -100$  мм; в)  $r = -50$  мм,  $s = -37$  мм.

Определить в каждом из вариантов положение точки изображения.

2.6. Выполнен расчет хода параксиального луча через оптическую систему, состоящую из четырех поверхностей. Показатели преломления сред имеют значения: первой и пятой  $n_1 = n_5 = 1$ ; второй и четвертой  $n_2 = n_4 = 1,5$ ; третьей  $n_3 = 1,6$ . Предмет имел высоту  $dy_1 = 1$  мм, а первый угол луча с осью  $\alpha_1 = -0,01$ . Получены следующие значения размеров изображений и углов:  $dy_2 = -0,431$ ,  $\alpha_2 = 0,0155$ ;  $dy_3 = -0,583$ ,  $\alpha_3 = 0,0107$ ;  $dy_4 = -0,782$ ,  $\alpha_4 = 0,0085$ ;  $dy_5 = -0,781$ ,  $\alpha_5 = 0,0128$ .

Проверить правильность расчета.

2.7. Используя данные задачи 2.6, вычислить длину отрезка, определяющего положение изображения относительно последней поверхности, если известно, что  $s_1 = -100$  мм,  $d_1 = 6$  мм,  $d_2 = 4$  мм,  $d_3 = 5$  мм.

2.8. Используя данные задач 2.6 и 2.7, вычислить радиусы кривизны поверхностей. Начертить схему объектива.

2.9. Используя данные задачи 2.8, вычислить фокусное расстояние объектива и определить положение кардинальных точек.

2.10. Конденсорная симметричная двояковыпуклая линза толщиной  $d = 6$  мм с радиусами  $r_1 = -r_2 = 50$  мм, изготовленная из стекла К8 ( $\lambda_e$ ), проецирует изображение источника света на щель монохроматора. Определить расстояние  $s'_2$ , на котором должна располагаться щель от последней поверхности линзы, если  $s_1 = -150$  мм. Определить положение главных плоскостей линзы относительно источника и щели.

2.11. Линза толщиной  $d = 6$  мм, изготовленная из стекла ТК21 ( $\lambda_e$ ), создает перевернутое изображение предмета размером 0,6 мм на расстоянии  $s'_2 = 115$  мм. Предмет расположен перед линзой на расстоянии  $s_1 = -60$  мм и имеет размер 0,3 мм. Определить радиусы кривизны поверхностей линзы, расположенной в воздухе.

2.12. Используя данные задачи 2.11, определить положение и размер изображения для линзы, обращенной к предмету вогнутыми поверхностями при  $s_1 = -60$  мм и  $y_1 = 0,3$  мм, применяя соотношения параксиальной оптики и формулы идеальной оптической системы (см. гл. 1).

2.13. Вычислить углы параксиального луча с осью для оптической системы, имеющей следующие конструктивные параметры:

$r_1 = 44,96$		$n_1 = 1$
$r_2 = 14,25$	$d_1 = 1$	$n_2 = 1,6422$
$r_3 = -21,88$	$d_2 = 2$	$n_3 = 1,5183$
		$n_4 = 1$

Проходящее излучение имеет длину волны  $\lambda_e$ . Предмет расположен перед линзой на расстоянии  $s_1 = -47$  мм. При расчете принять  $h_1 = r_1$ .

2.14. Определить линейное увеличение микрообъектива и положение изображения предмета, находящегося перед

объективом на расстоянии  $s_1 = -2$  мм, если известны следующие конструктивные параметры:

$r_1 = \infty$		$n_1 = 1$
$r_2 = -4$	$d_1 = 2$	$n_2 = 1,51$
$r_3 = \infty$	$d_2 = 1,2$	$n_3 = 1$
$r_4 = 6,5$	$d_3 = 1,5$	$n_4 = 1,65$
$r_5 = -7,5$	$d_4 = 1,6$	$n_5 = 1,51$
$r_6 = 53,0$	$d_5 = 7,4$	$n_6 = 1$
$r_7 = 8,5$	$d_6 = 1,0$	$n_7 = 1,65$
$r_8 = -10,5$	$d_7 = 1,8$	$n_8 = 1,51$
		$n_9 = 1$

2.15. Определить радиусы кривизны поверхностей линз конденсора любительского увеличителя, состоящего из двух одинаковых плосковыпуклых линз, касающихся вершинами выпуклых поверхностей, если при расстоянии между источником и его изображением  $L = 146,2$  мм конденсор действует с линейным увеличением  $\beta_k = -1$ . Линзы конденсора изготовлены из стекла БК6 ( $\lambda_e$ ).

2.16. Вычислить длину отрезков, определяющих положение фокусов и главных плоскостей в линзе, расположенной в воздухе и имеющей конструктивные параметры, представленные в табл. 2.2.

Сделать чертежи линз и показать кардинальные элементы.

2.2. Значения конструктивных параметров линз

Параметр	Вариант			
	а	б	в	г
$r_1$	100	-100	60	-100
$r_2$	-60	-60	100	100
$d$	6	6	6	6
Марка стекла ( $\lambda_e$ )	К8	БК6	К8	К8



2.17. В результате расчета фотографического объектива «Юпитер-11» получены следующие значения углов и высот:

$\alpha_1 = 0$	$h_1 = 1$	$n_1 = 1$
$\alpha_2 = 0,7622$	$h_2 = 0,9742$	$n_2 = 1,5687$
$\alpha_3 = 0,9805$	$h_3 = 0,9719$	$n_3 = 1$
$\alpha_4 = 1,7886$	$h_4 = 0,8349$	$n_4 = 1,4874$
$\alpha_5 = 1,6194$	$h_5 = 0,5879$	$n_5 = 1,6033$
$\alpha_6 = 0,6378$	$h_6 = 0,4875$	$n_6 = 1$
$\alpha_7 = 0,7986$	$h_7 = 0,4689$	$n_7 = 1,6887$
$\alpha_8 = 1$		$n_8 = 1$

Вычислить значения радиусов кривизны линз объектива для фокусного расстояния  $f' = 133,14$  мм, толщину линз и вычертить схему объектива.

2.18. Используя данные задачи 2.17, вычислить фокусные расстояния первой линзы и компонента, состоящего из первых трех линз объектива «Юпитер-11».

2.19. Вычислить фокусное расстояние объектива «Юпитер-11» (см. задачу 2.17), если последняя линза изготовлена из стекла с показателем преломления  $n_7 = 1,728$ . Радиусы кривизны  $r_6$  и  $r_7$  не изменены.

2.20. В объективе «Юпитер-11» показатель преломления стекла последней линзы заменен на  $n_7 = 1,6725$ . Требуется, не изменяя радиусов кривизны поверхностей этой линзы, сохранить заданное фокусное расстояние  $f' = 133,14$  мм. Найти, за счет изменения какого параметра можно это сделать и каким должно быть его значение? На сколько и в какую сторону должна сместиться плоскость изображения?

2.21. Найти радиусы кривизны и фокусное расстояние тонкой линзы, расположенной в воздухе и изготовленной из стекла К1 ( $\lambda_e$ ), если  $r_1 = -0,5 r_2$ , расстояние между действительным предметом и изображением  $L = 500$  мм; при этом линза действует с угловым увеличением  $\gamma = -0,25$ .

2.22. Объектив состоит из двух одинаковых плоско-выпуклых линз, обращенных к предмету выпуклыми поверхностями; толщина каждой линзы 6 мм. Линзы изготовлены из стекла СТК9 ( $\lambda_e$ ), фокусное расстояние объектива  $f' = 79,27$  мм,  $a_{f'} = 71,13$  мм. Вычислить фокусное расстоя-

ние линзы и расстояние между линзами. Чему будет равно фокусное расстояние объектива, если: а) весь объектив помещен в воду? б) водой заполнено лишь пространство между линзами? в) объектив помещен в воду, но пространство между линзами заполняет воздух?

## ГЛАВА 3

### ДЕТАЛИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

Заднее и переднее фокусные расстояния одиночной линзы определяются по формулам

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{n_3} \left( \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \right) - \frac{(n_2 - n_1)(n_3 - n_2)}{n_2 n_3 r_1 r_2} d;$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{n_1} \left( \frac{n_1 - n_2}{r_3} + \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) + \frac{(n_1 - n_2)(n_2 - n_3)}{n_1 n_2 r_1 r_2} d.$$

Фокусное расстояние и положение фокуса любой оптической системы можно определить с помощью расчета параксиального луча по рекуррентным формулам (2.4), (2.5).

Переднее и заднее фокусные расстояния связаны зависимостью

$$f = -\frac{n_1}{n_3} f'.$$

Асферические поверхности оптических деталей задаются уравнениями двух типов:

$$by^2 + cx^2 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n = 0;$$

$$z = a_1 (y^2 + x^2) + a_2 (y^2 + x^2)^2 + \dots + a_n (y^2 + x^2)^n.$$

Радиусы при вершинах асферических поверхностей, входящие в формулы для нахождения фокусных расстояний и положений кардинальных точек, определяются выражениями:

для поверхности, заданной уравнением первого типа,

$$r = -0,5a_1;$$

для поверхности, заданной уравнением второго типа,

$$r = \frac{1}{2a_1}.$$

Для решения задач по расчету одиночных линз можно пользоваться как формулами, выражающими связь между конструктивными и кардинальными элементами, так и формулами для расчета параксиального луча. В более сложных случаях, например при расчете кардинальных элементов системы Манжена, целесообразно использовать формулы для расчета параксиального луча.

Для обеспечения надежного крепления линз в оправках, а также для получения достаточной жесткости при их обработке необходимо, чтобы толщина  $t$  положительных линз по краю (рис. 3.1) и отрицательных линз по оптической оси была бы не менее заданных нормативно-технической документацией значений [5]. Толщина  $t$  по краю линз вычисляется по формуле

$$t = d - a_1 + a_2,$$

$$\text{где } a_i = r_i \left( 1 - \cos \left( \arcsin \frac{D}{2r_i} \right) \right),$$

или

$$a_i = r_i \sqrt{r_i^2 - \frac{D^2}{4}}.$$

Для расчета световых размеров плоских зеркал, расположенных в коническом пучке лучей, опирающемся на диафрагмы с диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 3.2), используются следующие формулы:

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

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

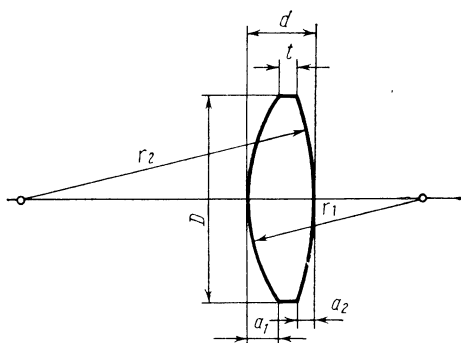
$$l_3 = \frac{D_1 + 2z \operatorname{tg} \sigma}{\sqrt{1 - \left( \frac{\operatorname{tg} \sigma}{\operatorname{tg} \gamma} \right)^2}},$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \sigma = \frac{D_2 - D_1}{2a}.$$

Расстояния между краями световых зон зеркал и плоскостями диафрагм  $z_1$  и  $z_2$  вычисляются по формулам  $z_1 = z - l_2 \cos \gamma$ ;  $z_2 = a - z - l_1 \cos \gamma$ .

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

Рис. 3.1. Конструктивные размеры в линзе



Световые размеры зеркал могут быть найдены также графическим методом. Однако при малых значениях угла  $\gamma$  этот метод дает невысокую точность. При определении размера  $l_3$  графическим методом необходимо учитывать, что световая зона зеркала представляет собой эллипс, поэтому после нахождения отрезков  $l_1$  и  $l_2$  следует найти середину сечения зеркала  $C$  [ $AC = CB = (l_1 + l_2)/2$ ], провести через нее прямую, перпендикулярную к оптической оси, до пересечения с крайними лучами пучка. Тогда  $l_3 = KL$ .

Для расчета размеров отражательных призм, расположенных в коническом пучке лучей, опирающемся на диафрагмы диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 3.3), используются следующие формулы:

$$\text{при } D_1 > D_2 \quad D = D_1 - \frac{z}{a} (D_1 - D_2);$$

$$\text{при } D_1 < D_2 \quad D = 2 \left( z + a \frac{D_1}{D_2 - D_1} \right) \frac{\operatorname{tg} \sigma \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \sigma},$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \gamma = \frac{n}{2c};$$

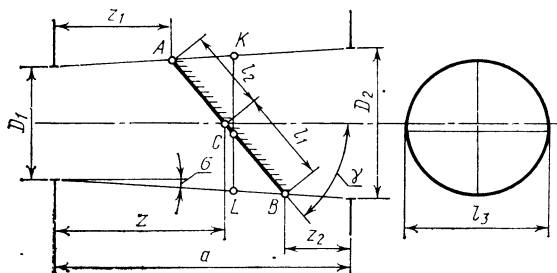


Рис. 3.2. Наклонное плоское зеркало в расходящемся пучке лучей

$c$  — коэффициент призмы, равный отношению длины хода луча в призме  $d$  к световому диаметру  $D$  грани. Значения коэффициента  $c$ , а также соотношения, связывающие размеры призм со световым диаметром  $D$  грани, можно взять из справочной литературы [1].

Если призма расположена в параллельном пучке лучей с расходямостью  $2\omega$  на расстоянии  $z$  перед диафрагмой диаметром  $D_1$ , то

$$D = \left( 2z + \frac{D_1}{\operatorname{tg} \omega} \right) \frac{\operatorname{tg} \omega \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \omega}.$$

Для нормальной работы призм с полным внутренним отражением необходимо, чтобы это внутреннее отражение было полным для всех лучей данного пучка, в котором расположена призма. Для проверки выполнения этого условия требуется определить максимальный угол падения лучей на входную грань призмы, который равен максимальному углу  $\sigma_{\max}$  лучей с оптической осью. Полное внутреннее отражение обеспечивается, когда  $\sin \sigma_{\max} \leq n \sin \left( \varepsilon - \arcsin \frac{1}{n} \right)$ , где  $n$  — показатель преломления стекла призмы;  $\varepsilon$  — угол падения луча, идущего вдоль оптической оси, на отражающую грань.

Числовая апертура волоконного световода определяется по формуле  $\sin \sigma_A = \sqrt{n_{\text{ст}}^2 - n_{\text{об}}^2}$ , где  $n_{\text{ст}}$  — показатель преломления световодной жилы (сердцевины);  $n_{\text{об}}$  — показатель преломления оболочки.

При расчете оптических систем, работающих совместно со световодами, необходимо принимать во внимание, что пучок на выходе световода

всегда симметричен относительно оси волокна за счет многократных отражений лучей от его стенок. Если на входной торце падает асимметричный пучок лучей (рис. 3.4), то на выходе из волокна пучок приобретает форму конуса (в частности, полого, как показано на рис. 3.4) симметричного относительно оси волокна.

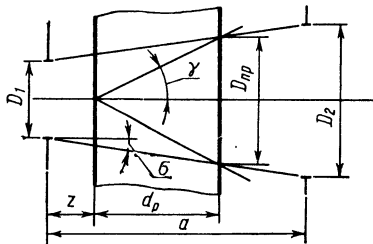


Рис. 3.3. Определение размеров призмы

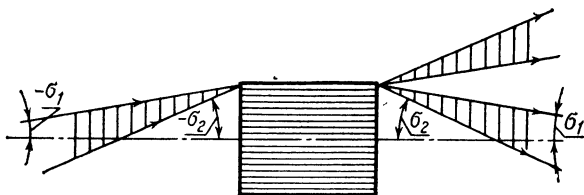


Рис. 3.4. Ход пучков лучей до и после световода

Расчет линзы Френеля (рис. 3.5) с плоской первой поверхностью выполняется по формуле

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

где

$$\sin \sigma_1 = \sin \left( \operatorname{arctg} \frac{h_1 - k \Delta h}{s_1} \right);$$

$$\sin \sigma_3 = \sin \left( \operatorname{arctg} \frac{h_2 - k \Delta h}{s'} \right);$$

$$h_2 = s_1 \operatorname{tg} \sigma_1 - d \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{\sin \sigma}{n} \right).$$

В этих формулах  $\Delta h$  — расстояние между соседними ступеньками,  $k$  — порядковый номер ступеньки, начиная с края линзы, причем для края  $k = 0$ . Формула для угла наклона профиля справедлива, если на ступенчатой поверхности отсутствует полное внутреннее отражение, чему соответствует условие

$$\sin \sigma_{\text{зпред}} = \frac{\sin \sigma_1 \pm \sqrt{(n^2 - 1)(n^2 - \sin^2 \sigma_1)}}{n^2} > \sin \sigma_3.$$

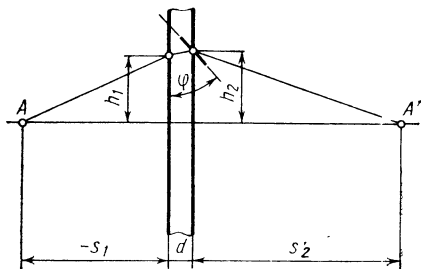


Рис. 3.5. Действие преломляющего элемента линзы Френеля

Перед расчетом таблицы, содержащей значения углов для различных значений  $h_2$ , необходимо определить оптимальную ориентацию плоской стороны линзы Френеля. Для этого рассчитывают угол  $\varphi$  для края светового диаметра линзы дважды: для прямого хода лучей и обратного, принимая во внимание, что первая по ходу поверхность — плоская. Оптимальной ориентации соответствует меньшее значение угла  $\varphi$ .

## Задачи

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

3.2. Линза имеет следующие конструктивные элементы:  $r_1 = 100$ ,  $r_2 = 80$ ,  $d = 20$ , стекло К8 ( $\lambda_e$ ) и расположена в воздухе. Определить фокусное расстояние линзы. Кроме того, не пользуясь формулами, найти положение главных плоскостей относительно последней поверхности.

3.3. Линза имеет форму шара. Найти показатель преломления стекла линзы при условии, что ее задний фокус располагается на второй поверхности. Какое стекло по ОСТЗ-77—77 имеет наиболее близкий к найденному показатель преломления для спектральной линии  $e$ ? Определить расположение заднего фокуса шаровой линзы с радиусом кривизны  $r = 10$  мм, выполненной из этого стекла.

3.4. Концентрическая линза расположена в воздухе и имеет следующие конструктивные элементы:  $r_1 = 20$ ,  $r_2 = 15$ ,  $d = 5$ , стекло К8 ( $\lambda_e$ ). Плоскость предмета (мнимая) проходит через общий центр преломляющих поверхностей линзы. Определить перемещение плоскости изображения относительно плоскости предмета и линейные увеличения при перемещении линзы вдоль оптической оси на  $\pm 5$  мм, т. е. при  $s_1 = 15$  мм и  $s_1 = 25$  мм.

3.5. В глазной линзе окуляра одна поверхность является плоской, а другая — параболидаальной с уравнением вида  $y^2 + x^2 + 74,34 z = 0$ . Определить фокусное расстояние линзы, выполненной из стекла ТК16, для спектральной линии  $e$ .

3.6. При работе линз с мощными источниками света, например лазерами, возникают яркие вторичные изображения, вызванные френелевским отражением света от преломляющих поверхностей, так называемые блики. При этом преломляющие поверхности работают как зеркала. В зависимости от числа отражений, которые претерпевают лучи, различают блики первого (одно отражение) и второго (два отражения) порядка. Блики создают помехи, а в некоторых случаях при фокусировке мощного излучения на поверхности или внутри оптической детали приводят к ее разрушению.

Определить положение фокуса лучей, претерпевших двукратное френелевское отражение от поверхностей линзы со следующими значениями конструктивных параметров:  $r_1 = 50$ ,  $r_2 = 80$ ,  $d = 5$ ,  $n = 1,613$ .

3.7. Уравнение поверхности асферического зеркала имеет вид  $z = -0,00274 (y^2 + x^2) + 0,00035 (y^2 + x^2)^2$ . Найти его фокусное расстояние.

3.8. Склеенный компонент имеет следующие конструктивные параметры:  $r_1 = \infty$ ,  $r_2 = -100$ ,  $r_3 = \infty$ ,  $d_1 = 5$ ,  $d_2 = 3$ . Первая линза выполнена из стекла ТК14 ( $\lambda_e$ ), а вторая — из стекла Ф1 ( $\lambda_e$ ). Вывести формулу для фокусного расстояния такого компонента. Определить номинальное значение фокусного расстояния, а также пределы его изменения, если в чертеже указано, что  $\Delta n_e$  соответствует для обоих стекол 4-й категории.

3.9. Найти фокусное расстояние и положение заднего фокуса системы Манжена, образованной линзой с  $r_1 = -100$ ,  $r_2 = -200$ ,  $d = 10$  из стекла К8 ( $\lambda_e$ ), у которой вторая поверхность покрыта отражающим слоем.

3.10. При работе линзовых оптических систем совместно с мощными лазерами возникает опасность разрушения оптических деталей вследствие фокусировки светового излучения, отраженного от преломляющих поверхностей вследствие френелевского отражения (рефлексов). На примере плосковыпуклой линзы определить, изменяется ли расположение фокуса отраженных от второй поверхности лучей при переворачивании линзы. Толщину линзы принять равной нулю. Вывести формулы для положения фокуса относительно линзы.

3.11. Для центровки линз в оправе используются автоколлимационные блики от преломляющих поверхностей. Очевидно, что для получения автоколлимации от наружной поверхности линзы светящуюся точку (или ее изображение) необходимо поместить в центр первой поверхности, тогда



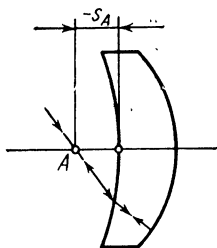


Рис. 3.6. Автоколлимационная точка линзы

изображение этой точки совпадает с ней самой. Такая точка называется автоколлимационной точкой первой поверхности. Вывести формулу для нахождения положения автоколлимационной точки второй поверхности линзы  $S_A$  (рис. 3.6).

Найти положения автоколлимационных точек для линзы с  $r_1 = 100$ ,  $r_2 = -50$ ,  $d = 10$ , выполненной из стекла К8 ( $\lambda_e$ ), в прямом и перевернутом положениях.

3.12. При расчете оптических систем широко используется практический прием «прогиба» одиночных линз, основанный на том, что при изменении кривизны  $\rho = 1/r$  поверхностей на одно и то же значение  $\Delta\rho$  фокусное расстояние линзы почти не изменяется. Таким приемом достигается изменение формы линзы при сохранении ее оптической силы. Требуется вывести зависимость погрешности оптической силы линзы от ее конструктивных параметров и значения  $\Delta\rho$  при использовании этого приема. Определить погрешность оптической силы (ее изменение), когда  $\Delta\rho = 0,001$  для линз с конструктивными элементами: 1)  $r_1 = 100$ ,  $r_2 = -100$ ,  $d = 10$ , стекло К8 ( $\lambda_e$ ); 2)  $r_1 = 20$ ,  $r_2 = 31,84$ ,  $d = 2$ , стекло К8 ( $\lambda_e$ ). Определить фокусные расстояния этих линз при исходных значениях конструктивных элементов.

3.13. Радиусы оптических поверхностей линзы составляют  $r_1 = 55,7$ ;  $r_2 = -103,2$ . Определить толщину линзы, если ее полный диаметр  $D = 25$ , а наименьшая толщина по краю составляет 2 мм.

3.14. Определить, выполнима ли линза со следующими конструктивными элементами:  $r_1 = 20,7$ ;  $r_2 = 134$ ;  $d = 2$ ;  $D = 20$ .

3.15. Объектив зрительной трубы имеет следующие характеристики:  $f' = 150$  мм,  $K = 5$ ,  $2\omega = 6^\circ$ . На расстоянии  $z = 75$  мм от задней главной плоскости объектива установлено плоское зеркало, которое отклоняет оптическую ось на угол  $60^\circ$  от первоначального направления. Определить световые размеры зеркала.

3.16. Перед объективом зрительной трубы со световым диаметром 50 мм под углом  $45^\circ$  к оптической оси установлено плоское зеркало. Угол поля зрительной трубы составляет  $2\omega = 10^\circ$ . Входной зрачок расположен на первой поверхности объектива. Расстояние от зеркала до объектива  $z = 45$  мм. Определить световые размеры зеркала при усло-

вии, что оно поворачивается на угол  $\pm 15^\circ$  вокруг оси, проходящей через точку пересечения отражающей плоскости зеркала с оптической осью.

3.17. В коническом пучке лучей, опирающемся на диафрагмы диаметрами  $D_1 = 24$  мм и  $D_2 = 30$  мм, которые расположены на расстоянии  $a = 25$  мм, необходимо установить зеркало, отклоняющее оптическую ось на  $90^\circ$ . Определить световые размеры зеркала, если оно расположено на расстоянии  $z = 11$  мм от первой диафрагмы.

3.18. За фотографическим объективом с фокусным расстоянием  $f' = 50$  мм,  $K = 3,5$  и форматом кадра  $24 \times 36$  мм установлено плоское зеркало, отклоняющее оптическую ось на  $90^\circ$  в плоскости, образованной оптической осью и шириной кадра. Определить световые размеры зеркала при условиях, что выходной зрачок объектива совмещен с задней главной плоскостью, виньетирование отсутствует, а расстояние от задней главной плоскости объектива до зеркала составляет 25 мм.

3.19. Определить размеры плоского зеркала, установленного между плоскостью предмета и объективом микроскопа с характеристиками  $8 \times 0,20$ . Линейное поле в плоскости предмета составляет  $2y = 2,25$  мм. Расстояние зеркала от плоскости предмета  $z = 3$  мм. Ход лучей телецентрический. Зеркало отклоняет оптическую ось на  $120^\circ$ .

3.20. Объектив зрительной трубы имеет следующие характеристики:  $f' = 120$  мм;  $K = 4$ ;  $2\omega = 12^\circ$ . Определить длину хода луча в призме БКУ-45° (полупентапризма с крышей), первая грань которой установлена на расстоянии 30 мм от задней главной плоскости объектива. Входной зрачок совпадает с объективом.

3.21. В бинокле с видимым увеличением  $\Gamma_T = 6$ , диаметром входного зрачка  $D = 24$  мм и угловым полем  $2\omega = 9^\circ$  установлена призмная система, состоящая из двух одинаковых призм БР-180°. Расстояние между последней гранью призмы и фокальной плоскостью объектива равно 20 мм, а между соседними гранями призм — 2 мм. Фокусное расстояние объектива равно 120 мм. Материал призм — стекло БК10 ( $\lambda_e$ ). Определить размеры призм.

3.22. В бинокле, данные которого приведены в задаче 3.21, установить призму Пк-0° (призма Пехана с крышей) и определить ее световой диаметр при условии, что расстояние между последней гранью призмы и фокальной плоскостью объектива равно 20 мм. Материал призмы — стекло БК10.

3.23. Проверить, будет ли обеспечено полное внутреннее отражение на гранях призмы в задаче 3.21, если виньетирование в оптической системе отсутствует.

3.24. Вывести формулу для определения показателя преломления  $n$  стекла призмы по заданному углу  $\varepsilon$  падения осевого луча на грань и максимальному углу  $\sigma_{\max}$  между лучом и осью. Представить формулу для частного случая при  $\varepsilon = 45^\circ$ .

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

3.26. Призма Ак-0° (призма Аббе с крышей), выполненная из стекла К8, установлена между диафрагмами диаметрами  $D_1 = 30$  мм и  $D_2 = 50$  мм, расстояние между которыми составляет  $a = 150$  мм. Расстояние между первой диафрагмой и первой гранью призмы  $z = 40$  мм. Определить размеры призмы.

3.27. Определить числовую апертуру световодов, изготовленных из стекол следующих марок (по ГОСТ 3-776—80):

- 1) ВС58 ( $n_e = 1,7271$ ) и ВТО42 ( $n_e = 1,478$ );
- 2) ВС83 ( $n_e = 1,6143$ ) и ВО73-1 ( $n_e = 1,515$ );
- 3) ВС92 ( $n_e = 1,5893$ ) и ВО54 ( $n_e = 1,4898$ ).

3.28. Световодный жгут образован волокнами, сердцевина которых выполнена из стекла ТК16 ( $\lambda_e$ ), а оболочка — из стекла ВО77 ( $\lambda_e$ ). Определить максимальное относительное отверстие объектива, который может работать с этим жгутом без потери световой энергии за счет несоответствия числовых апертур объектива и жгута. Угловое поле в пространстве изображений у объектива составляет  $2\omega = 12^\circ$ . Виньетирование отсутствует.

3.29. Изображение проецируется объективом на вогнутую поверхность волоконного жгута, имеющую радиус кривизны  $r = -50$  мм. Где должен располагаться выходной зрачок объектива для того, чтобы обеспечить симметризацию пучка, входящего в волокно?

3.30. Выходной зрачок объектива расположен на расстоянии  $-70$  мм от плоскости изображения, в которой находится входной плоский торец волоконного световода со световым диаметром 10 мм. Диаметр выходного зрачка объектива равен 20 мм. Изображение, расположенное на плоском

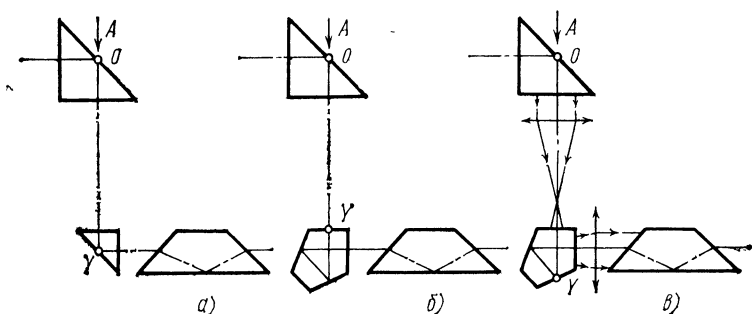


Рис. 3.7. Компенсация поворота изображения вращением призмы Дове, перед которой в схеме установлены:

*a* — призма  $AP-90^\circ$ ; *b* — пентапризма; *v* — объектив и пентапризма

выходном торце световода, рассматривается через лупу. Определить диаметры выходных зрачков лупы для центральной и крайних точек поля изображения.

3.31. Головная прямоугольная призма панорамического прибора (рис. 3.7) вращается вокруг оси  $OY$  по часовой стрелке, если смотреть на призму в направлении, указанном стрелкой  $A$ . Определить, в каком направлении и с какой скоростью должна вращаться призма Дове для компенсации поворота изображения.

3.32. На рис. 3.8 представлена система из трех зеркал. Определить тип простейшей призмы и ее ориентацию, обеспечивающую получение прямого изображения при сохранении направления визирной оси.

3.33. Определить тип простейшей призмы, способной работать в сходящемся пучке лучей, и ее ориентацию, обеспечивающую получение прямого изображения по условиям предыдущей задачи.

3.34. Определить, в каком направлении и с какой скоростью должна вращаться компенсационная призма, описанная в задаче 3.32, для компенсации поворота изображения, возникающего при вращении головного зеркала вокруг оси  $OY$ .

3.35. Рассчитать линзу Френеля с фокусным расстоянием 200 мм, толщиной  $d = 10$  мм и диафрагменным числом  $K=1$ , проецирующую изображение точечного источника на бесконечность. Материал лин-

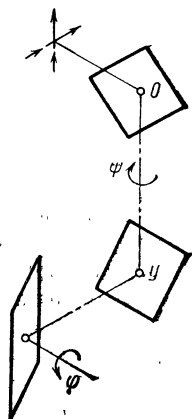


Рис. 3.8. Система из трех зеркал

зы — полиметилметакрилат ( $\lambda_e$ ). Расстояние между соседними ступеньками  $\Delta h = 0,2$  мм. Определить оптимальную ориентацию плоской поверхности. Угол наклона профиля  $\varphi$  вычислить для трех крайних зон.

3.36. Рассчитать линзу Френеля, создающую изображение точки при следующих условиях:  $s_1 = -100$  мм,  $s' = 300$  мм,  $d = 5$  мм; числовая апертура в пространстве предметов 0,5;  $\Delta h = 0,2$  мм; материал линзы — полиметилметакрилат ( $\lambda_e$ ). Определить оптимальную ориентацию плоской поверхности. Угол наклона профиля  $\varphi$  вычислить для трех крайних зон.

3.37. Рассчитать линзу Френеля из полиметилметакрилата ( $\lambda_e$ ), установленную в видоискателе зеркального фотоаппарата и выполняющую функцию коллективной линзы. Формат кадра видоискателя  $20 \times 28$  мм. Линза изображает выходной зрачок объектива «Гелиос-44» в передней главной плоскости лупы с фокусным расстоянием 58 мм. Ступенчатая поверхность линзы Френеля должна располагаться в плоскости изображения объектива. Расстояние выходного зрачка объектива от его задней фокальной плоскости составляет — 57,5 мм. Расстояние между соседними ступеньками линзы Френеля 0,05 мм. Вычислить угол наклона профиля для двух крайних зон, толщиной линзы пренебречь.

3.38. Вывести формулу для предельного значения числовой апертуры линзы Френеля, изображающей точечный источник света с линейным увеличением—1. Найти предельные апертуры при использовании в качестве материала линзы полиметилметакрилата ( $\lambda_e$ ) и стекла СТК9 ( $\lambda_e$ ).

## ГЛАВА 4

### ОГРАНИЧЕНИЕ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

---

Ограничение пучков лучей в оптических системах осуществляется либо оправами оптических деталей, либо специальными деталями — диафрагмами.

Диафрагма, которая ограничивает пучок лучей, выходящих из осевой точки предмета, называется *апертурной*. Изображение апертурной диафрагмы через предшествующую ей часть оптической системы в обратном ходе лучей называется *выходным зрачком*. Изображение апертурной диафрагмы че-

рез последующую часть оптической системы в прямом ходе лучей называется *выходным зрачком*. Апертурная диафрагма, входной и выходной зрачки являются элементами сопряженными:

$$\beta_P = \frac{D'}{D} ,$$

где  $\beta_P$  — линейное увеличение в зрачках;  $D'$  — диаметр выходного зрачка;  $D$  — диаметр входного зрачка.

Диафрагма, расположенная в плоскости предмета или в одной из плоскостей, с ней сопряженных, и ограничивающая размер линейного поля оптической системы в пространстве изображений, называется *полевой*.

Для плоскости предмета и изображения, находящейся на конечном расстоянии, поле оптической системы определяется в линейной мере:  $2y$  — линейное поле в пространстве предметов;  $2y'$  — линейное поле в пространстве изображений.

Для плоскости предмета и изображения, находящейся в бесконечности, поле оптической системы определяется в угловой мере:  $2\omega$  — угловое поле в пространстве предметов;  $2\omega'$  — угловое поле в пространстве изображений.

Угловое увеличение в зрачках

$$\gamma_P = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'} .$$

Если плоскость предмета находится в бесконечности, то сопряженной с ней будет задняя фокальная плоскость. В этом случае линейное поле в пространстве изображений (или диаметр полевой диафрагмы  $D_{п.д}$ ) определяется по формуле

$$D_{п.д} = 2y' = 2f' \operatorname{tg} \omega .$$

Любая диафрагма, кроме апертурной и полевой, которая ограничивает пучки лучей, выходящих из точки предмета, лежащей вне оси, называется *виньетирующей*. Действие виньетирующих диафрагм характеризуют коэффициентом виньетирования наклонного пучка  $k_\omega$ :

$$k_\omega = \frac{2m}{D} ,$$

где  $2m$  — линейный размер сечения наклонного пучка в меридиональной плоскости.

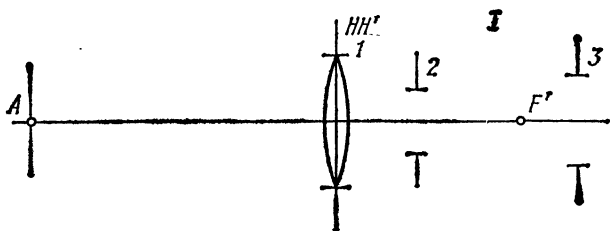
## Задачи

4.1. В оптической системе в виде одиночной тонкой линзы в оправе установлены две материальные диафрагмы (рис. 4.1). Найти графически входной и выходной зрачки оптической системы, апертурную, полевую и виньетирующие диафрагмы для двух случаев: а) предметная плоскость  $A$  расположена на конечном расстоянии; б) предметная плоскость расположена в бесконечности. На рис. 4.1, I—IV обозначены: 1 — оправка тонкой линзы, 2 и 3 — материальные диафрагмы. На рис. 4.1, V обозначено: 2 — оправка тонкой линзы, 1 и 3 — материальные диафрагмы.

4.2. Тонкий компонент с фокусным расстоянием  $f' = 100$  мм используется в качестве объектива зрительной трубы. Предметная плоскость расположена в бесконечности. Перед объективом на расстоянии 20 мм расположена апертурная диафрагма диаметром 15 мм. Определить диаметр выходного зрачка и его расстояние от объектива. Найти световой диаметр объектива для углового поля  $2\omega = 12^\circ$  при отсутствии виньетирования.

4.3. Телеобъектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 120$  мм. Фокусное расстояние первого компонента  $f'_1 = 200$  мм, второго —  $f'_2 = -100$  мм. Посередине между компонентами установлена апертурная диафрагма диаметром 70 мм. Определить положение входного зрачка телеобъектива относительно первого компонента и выходного — относительно второго. Найти относительное отверстие телеобъектива и линейное увеличение в зрачках.

4.4. Тонкая линза диаметром 20 мм имеет фокусное расстояние  $f' = 50$  мм. Позади линзы на расстоянии 20 мм установлена диафрагма диаметром 10 мм. Найти диаметры входного и выходного зрачков, если предметная плоскость расположена в бесконечности. Определить угловое поле



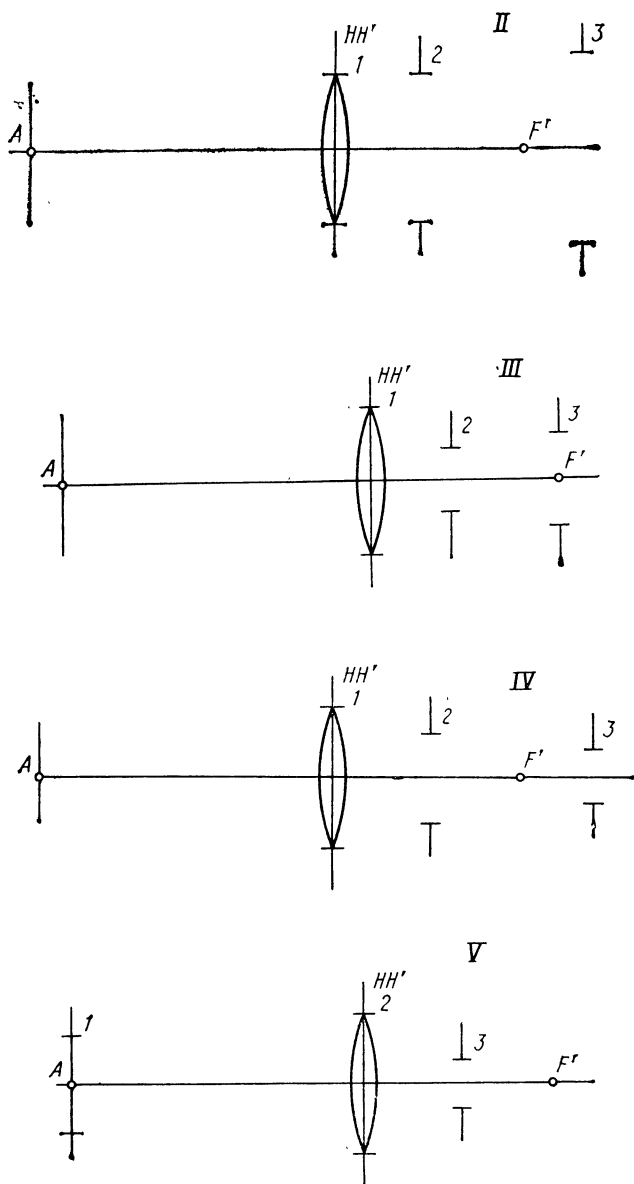


Рис. 4.1. Тонкая линза с диафрагмами:  
I—V — различные положения диафрагм



линзы в пространстве предметов при отсутствии виньетирования и при полном виньетировании.

4.5. Объектив «Юпитер-11» имеет следующие конструктивные параметры:

		$n_1=1$
$r_1=63,326$	$d_1=4,5$	$n_2=1,5687$
$r_2=342,82$	$d_2=0,3$	$n_3=1$
$r_3=37,544$	$d_3=10,2$	$n_4=1,4874$
$r_4=-201,148$	$d_4=20,3$	$n_5=1,6033$
$r_5=24,11$	$d_5=20,95$	$n_6=1$
$r_6=62,888$	$d_6=3,1$	$n_7=1,6887$
$r_7=123,34$		$n_8=1$

Входной зрачок объектива расположен на расстоянии  $s_p = 82,99$  от первой поверхности. Найти расстояние от последней поверхности до выходного зрачка, а также расстояние от пятой поверхности до апертурной диафрагмы.

4.6. Найти положение входного и выходного зрачков объектива «Юпитер-8», имеющего следующие конструктивные параметры :

		$n_1=1$
$r_1=26,82$	$d_1=4,1$	$n_2=1,6130$
$r_2=96,76$	$d_2=0,35$	$n_3=1$
$r_3=17,62$	$d_3=4,05$	$n_4=1,6701$
$r_4=35,12$	$d_4=3,55$	$n_5=1,4724$
$r_5=\infty$	$d_5=1,0$	$n_6=1,6887$
$r_6=11,89$	$d_6=5,04$	$n_7=1$
$r_7=-93,05$	$d_7=2,2$	$n_8=1,5000$
$r_8=18,68$	$d_8=11,85$	$n_9=1,6701$
$r_9=-47,62$		$n_{10}=1$

Апертурная диафрагма расположена между шестой и седьмой поверхностями на расстоянии 2,5 мм от шестой поверхности.

4.7. На каком расстоянии нужно расположить тонкие компоненты объектива типа дублета Пецваля, чтобы получить фокусное расстояние объектива  $f' = 80$  мм? Фокусное расстояние первого компонента  $f'_1 = 120$  мм, второго —  $f'_2 = 100$  мм. Найти диаметр апертурной диафрагмы, установленной между компонентами на расстоянии 40 мм от первого

компонента, если относительное отверстие объектива  $D/f' = 1:2$ .

4.8. В двухзеркальном объективе типа объектива Кассегрена апертурной диафрагмой является оправа первого вогнутого зеркала, имеющего радиус кривизны  $r_1 = -200$  мм. Диаметр этого зеркала  $D = 100$  мм. На каком расстоянии от вогнутого зеркала нужно установить второе выпуклое зеркало, имеющее радиус кривизны  $r_2 = -100$  мм, чтобы объектив имел относительное отверстие  $D/f' = 1:5$ ? Найти диаметр выходного зрачка объектива и его расстояние от вершины выпуклого зеркала.

4.9. В двухзеркальном объективе апертурной диафрагмой является оправа второго выпуклого зеркала, имеющего радиус кривизны  $r_2 = -200$  мм. Первое вогнутое зеркало имеет радиус кривизны  $r_1 = -400$  мм. Расстояние между вершинами зеркал  $d = -120$  мм. Найти относительное отверстие объектива и расстояние от вершины вогнутого зеркала до входного зрачка. Диаметр апертурной диафрагмы 40 мм.

4.10. Реверсивный телеобъектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 100$  мм. Первый компонент отрицательный и имеет фокусное расстояние  $f'_1 = -50$  мм; второй компонент положительный и имеет фокусное расстояние  $f'_2 = 50$  мм. Апертурной диафрагмой является оправа второго компонента. Найти диаметр этой оправы, если относительное отверстие объектива  $D/f' = 1:2$ .

4.11. Двухзеркальный объектив типа объектива Кассегрена имеет следующие конструктивные параметры:  $r_1 = -300$ ;  $r_2 = -150$ ;  $d = -90$ .

Апертурной диафрагмой объектива является оправа второго выпуклого зеркала. Найти диаметр этой оправы, если относительное отверстие объектива  $D/f' = 1:2$ .

4.12. В фотоаппарате «Зоркий» полевая диафрагма расположена в задней фокальной плоскости и имеет размеры  $24 \times 36$  мм. Найти угловое поле в пространстве предметов, соответствующее диагонали полевой диафрагмы, для объективов «Индустар-50» ( $f' = 50$  мм), «Юпитер-9» ( $f' = 85$  мм) и «Юпитер-11» ( $f' = 135$  мм). Предметная плоскость расположена в бесконечности.

4.13. Объектив зрительной трубы, предназначенной для наблюдения искусственных спутников Земли, имеет фокусное расстояние  $f' = 1000$  мм. Определить минимальный диаметр полевой диафрагмы, при котором в поле трубы будут

одновременно видны два спутника, если расстояние между ними 5 км. Удаление спутников от поверхности Земли 200 км, наблюдение ведется в зените.

4.14. Телеобъектив с фокусным расстоянием  $f' = 500$  мм состоит из двух компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 60$  мм. Первый компонент положительный, а его оптическая сила по абсолютному значению вдвое меньше оптической силы отрицательного компонента. Диаметр оправ обоих компонентов 50 мм. Определить относительное отверстие телеобъектива. Найти угловое поле телеобъектива в пространстве предметов при отсутствии виньетирования и при полном виньетировании. Предметная плоскость расположена в бесконечности.

4.15. В панкратическом объективе «Метеор-4», применяемом в любительской киносъёмочной камере «Кварц», фокусное расстояние изменяется от  $f'_{\min} = 9$  мм до  $f'_{\max} = 36$  мм. Определить минимальное и максимальное угловое поле объектива в пространстве предметов, соответствующее диагонали кадра для пленки «Супер», имеющей формат  $5,69 \times 4,12$  мм. Предметная плоскость расположена в бесконечности.

4.16. Объектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 80$  мм. Фокусное расстояние первого компонента  $f'_1 = 120$  мм, второго —  $f'_2 = 110$  мм. На каком расстоянии от второго компонента нужно установить полевую диафрагму, если предметная плоскость расположена в бесконечности? Найти угловое поле объектива в пространстве предметов, если диаметр полевой диафрагмы  $D_{п.д} = 17,6$  мм.

4.17. Перед тонкой линзой на расстоянии 60 мм установлена диафрагма диаметром 20 мм. Диаметр оправы линзы 22 мм, фокусное расстояние линзы  $f' = 100$  мм. В задней фокальной плоскости линзы установлена полевая диафрагма диаметром  $D_{п.д} = 10$  мм. Найти угловое поле линзы в пространстве предметов, если предметная плоскость расположена в бесконечности. Определить коэффициент виньетирования наклонного пучка для края поля. Виньетирование несимметрично относительно главного луча.

4.18. Объектив типа дублета Пецваля состоит из тонких компонентов, расстояние между которыми  $d = 100$  мм. Фокусное расстояние первого компонента  $f'_1 = 150$  мм, второго —  $f'_2 = 120$  мм. Между компонентами объектива на расстоянии 60 мм от первого компонента установлена апертурная диафрагма. Найти угловое поле объектива в пространстве

предметов и в пространстве изображений, если полевая диафрагма диаметром  $D_{п.д} = 20$  мм установлена в задней фокальной плоскости.

4.19. Телеобъектив состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 90$  мм. Первый компонент имеет фокусное расстояние  $f'_1 = 150$  мм, второй —  $f'_2 = -75$  мм. Апертурная диафрагма расположена между компонентами на расстоянии 60 мм от первого компонента. Найти угловое поле телеобъектива в пространстве предметов и изображений, если полевая диафрагма диаметром  $D_{п.д} = 40$  мм установлена в задней фокальной плоскости объектива.

4.20. В двухзеркальном объективе типа объектива Кассегрена первое (вогнутое) зеркало имеет радиус кривизны  $r_1 = -240$  мм, второе (выпуклое) зеркало имеет  $r_2 = -120$  мм. Расстояние между вершинами зеркал  $d = -72$  мм. Найти угловое поле объектива в пространстве предметов, если полевая диафрагма диаметром  $D_{п.д} = 40$  мм расположена в задней фокальной плоскости объектива. Определить относительное отверстие объектива, если апертурной диафрагмой является оправа первого зеркала диаметром 75 мм.

4.21. Объектив типа дублета Пецваля состоит из двух одинаковых тонких компонентов с фокусными расстояниями  $f'_1 = f'_2 = 100$  мм. Диаметры обоих компонентов 20 мм, расстояние между компонентами  $d = 75$  мм. Внутри объектива на расстоянии 50 мм от первого компонента расположена диафрагма диаметром 8 мм. Определить относительное отверстие объектива. Найти угловое поле объектива в пространстве предметов при отсутствии виньетирования и при коэффициенте виньетирования  $k_\omega = 0,5$ . Предметная плоскость находится в бесконечности. Определить диаметр полевой диафрагмы, соответствующий угловому полю при 50%-ном виньетировании. Виньетирование несимметрично относительно главного луча.

4.22. Тонкий компонент с фокусным расстоянием  $f' = 80$  мм используется в качестве объектива, создающего изображение бесконечно удаленного предмета. Найти диаметр апертурной диафрагмы, установленной за объективом на расстоянии 20 мм, при котором объектив будет иметь относительное отверстие  $D/f' = 1:2$ . Определить диаметр оправы объектива, при котором оптическая система будет свободна от виньетирования, если угловое поле объектива в пространстве предметов  $2\omega = 10^\circ$ .

4.23. В задней фокальной плоскости объектива следящей системы (диаметр входного зрачка объектива  $D = 80$  мм) установлена полевая диафрагма диаметром  $D_{п.д} = 2$  мм. Найти угловое поле объектива в пространстве предельных значений, если относительное отверстие объектива имеет предельное значение, соответствующее выполнению условия синусов ( $D/f' \leq 1:0,5$ ). Предметная плоскость расположена в бесконечности.

4.24. В реверсивном телеобъективе с фокусным расстоянием  $f' = 20$  мм полевая диафрагма, установленная в задней фокальной плоскости, должна быть расположена на расстоянии  $af' = 60$  мм от задней главной точки второго компонента. Расстояние между тонкими компонентами объектива  $d = 80$  мм. Определить фокусные расстояния первого и второго компонентов объектива и его угловое поле в пространстве предметов и изображений, если диаметр полевой диафрагмы  $D_{п.д} = 30$  мм. Найти относительное отверстие реверсивного телеобъектива, если апертурной диафрагмой объектива является оправа второго компонента диаметром 40 мм.

4.25. Объектив типа дублета Пецваля состоит из двух тонких компонентов, расположенных на расстоянии  $d = 80$  мм. Фокусное расстояние первого компонента  $f'_1 = 120$  мм, второго —  $f'_2 = 100$  мм. Апертурной диафрагмой объектива является оправа первого компонента. Найти диаметр этой оправы, если относительное отверстие объектива  $D/f' = 1:2$ . Определить диаметр второго компонента, если коэффициент виньетирования наклонного пучка для края поля должен быть  $k_\omega = 0,8$ . Виньетирование несимметрично относительно главного луча. Угловое поле объектива в пространстве предметов  $2\omega = 15^\circ$ .

## ГЛАВА 5

### ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ПЕРЕДАТЧИК ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

---

Для оценки оптической системы как передатчика энергии излучения или световой энергии применяются энергетические или световые величины и соответствующие единицы их измерения. Эти величины и единицы приведены в табл. 5.1.

## 5.1. Энергетические и световые величины и единицы

Энергетические величины			Световые величины		
Наименование	Аналитическая зависимость	Единица измерения	Наименование	Аналитическая зависимость	Единица измерения
Поток излучения	Основная величина $\Phi_e$	ватт [Вт]	Световой поток	$\Phi_v = I_v \Omega$	люмен [лм]
Энергетическая светимость	$M_e = \frac{\Phi_e}{Q_1}$	ватт на квадратный метр [Вт·м <sup>-2</sup> ]	Светимость	$M_v = \frac{\Phi_v}{Q_1}$	люмен на квадратный метр [лм·м <sup>-2</sup> ]
Энергетическая освещенность	$E_e = \frac{\Phi_e}{Q_2}$	ватт на квадратный метр [Вт·м <sup>-2</sup> ]	Освещенность	$E_v = \frac{\Phi_v}{Q_2}$	люкс [лк]
Сила излучения	$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$	ватт на стерадиан [Вт·ср <sup>-1</sup> ]	Сила света	Основная величина $I_v$	кандела [кд]
Энергетическая яркость	$L_e = \frac{I_e}{Q_1 \cos \varepsilon}$	ватт на стерадиан и на квадратный метр [Вт·ср <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> ]	Яркость	$L_v = \frac{I_v}{Q_1 \cos \varepsilon}$	кандела на квадратный метр [кд·м <sup>-2</sup> ]

Примечание.  $Q_1$  — площадь первичного источника;  $Q_2$  — площадь вторичного источника и приемной поверхности;  $\Omega$  — телесный угол, в котором распространяется излучение;  $\varepsilon$  — угол между нормалью к поверхности и направлением распространения излучения.

При различных фотометрических расчетах применяют следующие основные формулы:

энергетическая освещенность от точечного источника

$$E_e = \frac{I_e}{r^2} \cos \varepsilon,$$

где  $r$  — расстояние от источника до облучаемой поверхности;  $\varepsilon$  — угол падения лучей на поверхность;

энергетическая освещенность от источника, имеющего форму круглого диска или сферы,

$$E_e = \pi L_e \sin^2 \omega, \quad (5.1)$$

где  $2\omega$  — угловой размер источника из точки, в которой определяется энергетическая освещенность;

связь между энергетической яркостью и энергетической светимостью

$$L_e = M_e / \pi; \quad (5.2)$$

энергетическая яркость вторичного источника

$$L_e = \rho \frac{E_e}{\pi}, \quad (5.3)$$

где  $\rho$  — коэффициент диффузного отражения вторичного источника.

Энергетическая светимость тепловых источников определяется по закону Стефана — Больцмана:

$$M_e = \varepsilon \sigma T^4,$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент теплового излучения реального тела;  $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ ;  $T$  — температура по абсолютной шкале, К.

Для расчета спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, определяемой формулой Планка, применяют уравнение единой изотермической кривой:

$$y = 142,32x^{-5} \left( e^{\frac{4,9651}{x}} - 1 \right)^{-1},$$

где  $y = M_{e,\lambda}^0(\lambda) / [M_{e,\lambda}^0]_{\max}$ ;  $M_{e,\lambda}^0(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела для произвольной длины волны  $\lambda$ ;  $[M_{e,\lambda}^0]_{\max} = 1,301 \left( \frac{T}{1000} \right)^5 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$  — максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости абсо\_

лютно черного тела;  $\chi = \lambda/\lambda_m$ ;  $\lambda_m = 2896/T$  — длина волны, на которую приходится максимум излучения абсолютного черного тела, мкм.

Спектральная плотность энергетической светимости реального тела определяется выражением

$$M_{e,\lambda}(\lambda) = \varepsilon(\lambda) M_{e,\lambda}^0(\lambda),$$

где  $\varepsilon(\lambda)$  — спектральный коэффициент теплового излучения реального тела.

Для световых величин сохраняются те же формулы, что и для энергетических, с соответствующими единицами. Переход от энергетических единиц к световым и наоборот выполняется через световую эффективность излучения:

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = \frac{680 \int v(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda},$$

где  $v(\lambda) = K(\lambda)/K_m$  — относительная спектральная световая эффективность;  $K(\lambda) = \Phi_{v,\lambda}(\lambda)/\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  — спектральная световая эффективность;  $K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$  — максимальное значение спектральной световой эффективности.

Если источник света яркостью  $L_v$  расположен на оптической оси, то освещенность его изображения при равенстве показателей преломления сред пространства предметов и изображений определяется выражением

$$E'_v = \tau \pi L_v \sin^2 \sigma'_A,$$

где  $\tau$  — коэффициент пропускания оптических сред, расположенных между предметом и его изображением;  $\sigma'_A$  — апертурный угол в пространстве изображений.

Последнюю формулу иногда применяют в виде

$$E'_v = \frac{\tau \pi L_v}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \frac{\beta_P^2}{(\beta_P - \beta)^2}, \quad (5.4)$$

где  $D/f'$  — относительное отверстие;  $\beta_P$  — линейное увеличение в зрачках;  $\beta$  — линейное увеличение в сопряженных плоскостях.

Если предметная плоскость находится в бесконечности, то  $\beta = 0$  и формула (5.4) принимает вид

$$E'_v = \frac{\tau \pi L_v}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2. \quad (5.5)$$



Для предмета, расположенного вне оптической оси, освещенность его изображения

$$E'_{v,\omega'} = E'_v k_\omega \cos^4 \omega',$$

где  $k_\omega$  — коэффициент виньетирования наклонного пучка;  $\omega'$  — половина углового поля в пространстве изображений.

Коэффициент пропускания оптической системы приближенно можно вычислить по формуле

$$\tau_{o.c} = 0,96^{N_{кр}} \cdot 0,94^{N_{фл}} \cdot 0,98^{N_1} \cdot 0,99^{N_2} \cdot 0,995^{N_3} \cdot 0,99^d \cdot 0,9^{N_0},$$

где  $N_{кр}$  — число границ крон — воздух;  $N_{фл}$  — число границ флинт — воздух;  $N_1$  — число однослойно просветленных поверхностей;  $N_2$  — число двуслойно просветленных поверхностей;  $N_3$  — число трехслойно просветленных поверхностей;  $d$  — суммарная толщина оптических деталей по оси;  $N_0$  — число отражающих (зеркальных) поверхностей.

### Задачи.

5.1. На каком расстоянии от бумаги нужно расположить источник силой света  $I_v = 200$  кд, чтобы при освещении бумаги получить ее яркость  $L_v = 40$  кд·м<sup>-2</sup>? Угол падения лучей на поверхность бумаги  $\varepsilon = 0$ , коэффициент диффузного отражения бумаги  $\rho = 0,63$ .

5.2. Определить яркость листа белой бумаги с коэффициентом диффузного отражения  $\rho = 0,6$ , освещаемой лампой силой света  $I_v = 100$  кд, с расстояния  $r = 0,3$  м. Угол падения лучей на освещаемую поверхность  $\varepsilon = 30^\circ$ .

5.3. Фотоэлемент с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{пр} = 20$  мм расположен от источника на расстоянии  $r = 0,6$  м. Определить силу света источника, при которой на фотоэлемент упадет световой поток  $\Phi_v = 0,087$  лм. Угол падения лучей на поверхность фотоэлемента  $\varepsilon = 0$ .

5.4. Над фотоэлементом с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{пр} = 20$  мм расположен источник силой света  $I_v = 100$  кд. На каком расстоянии от фотоэлемента должен находиться источник, чтобы на его светочувствительную поверхность падал световой поток  $\Phi_v = 0,0314$  лм? Каково будет значение светового потока, падающего на светочувствительную поверхность фотоэлемента, если его сместить в сторону на 1 м?

5.5. Лист белой бумаги с коэффициентом диффузного отражения  $\rho = 0,6$  и размером  $4 \times 4$  см освещается источником силой света  $I_v = 100$  кд с расстояния  $r_1 = 1$  м. На рас-

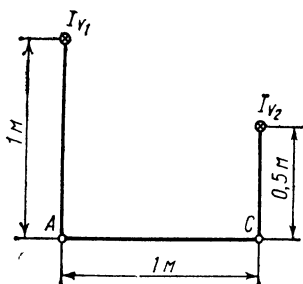


Рис. 5.1. Освещение листа бумаги двумя источниками

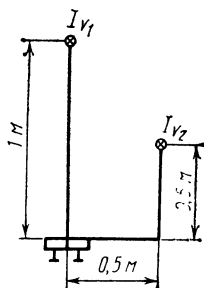


Рис. 5.2. Освещение фотоэлемента двумя источниками

стоянии  $r_2 = 0,4$  м от бумаги расположен фотоэлемент с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 50$  мм. Определить световой поток, падающий на светочувствительную поверхность фотоэлемента, при засветке его излучением, отраженным от бумаги. Считать, что угол падения световых лучей на поверхность бумаги и фотоэлемента  $\epsilon = 0$ .

5.6. Киноэкран площадью  $Q_{\text{эк}} = 12$  м<sup>2</sup> равномерно освещается световым потоком  $\Phi_v = 2400$  лм. Найти яркость экрана, если его коэффициент диффузного отражения  $\rho = 0,8$ .

5.7. Точечный источник света излучает равномерно по всем направлениям световой поток  $\Phi_0 = 3000$  лм. На каком расстоянии от источника нужно расположить экран, чтобы освещенность экрана была  $E_v = 10$  лк? Угол падения световых лучей на экран  $\epsilon = 0$ .

5.8. Лист белой бумаги с коэффициентом диффузного отражения  $\rho = 0,7$  освещается двумя источниками, имеющими силу света  $I_{v1} = 100$  кд,  $I_{v2} = 50$  кд. Найти яркость бумаги в точках A и C. Условия освещения приведены на рис. 5.1.

5.9. Фотоэлемент площадью светочувствительной поверхности  $Q_{\text{фз}} = 10$  мм<sup>2</sup> освещается двумя источниками. Определить силу света первого источника, если сила света второго источника  $I_{v2} = 14$  кд, а на светочувствительную поверхность фотоэлемента должен упасть световой поток  $\Phi_v = 4 \cdot 10^{-4}$  лм. Условия освещения приведены на рис. 5.2.

5.10. На каком расстоянии от освещаемого объекта можно считать точечным источник, имеющий форму круглого плоского диска, если его площадь  $Q = 12,6$  мм<sup>2</sup>? Допустимая

относительная погрешность в определении освещенности, обусловленная пренебрежением конечными размерами источника, не должна превышать 2 %.

5.11. Точечный источник силой света  $I_v = 100$  кд расположен на расстоянии  $r_1 = 1$  м от экрана. Найти освещенность в центре экрана, если по другую сторону от источника на расстоянии  $r_2 = 0,5$  м параллельно экрану установлено плоское зеркало. Коэффициент отражения зеркала  $\tau_0 = 0,9$ .

5.12. На расстоянии  $r_1 = 10$  м над плоской поверхностью висит лампа. Считая лампу точечным источником с постоянной силой света по всем направлениям, определить ее силу света, при которой освещенность под лампой  $E_v = 10$  лк. Определить диаметр круга под лампой, в пределах которого освещенность уменьшается в 8 раз.

5.13. На расстоянии  $r = 2$  м над центром круглого стола диаметром  $d = 2$  м расположен точечный источник, сила света которого описывается функцией, обеспечивающей равномерную освещенность во всех точках стола. Найти вид функции  $I_v(\epsilon)$  и световой поток, падающий на поверхность стола, если сила света источника по направлению, перпендикулярному к поверхности стола, составляет  $I_v = 100$  кд.

5.14. Над столом на расстоянии  $r = 750$  мм установлен светильник в виде круглого плоского диска диаметром  $d = 500$  мм. Плоскости светильника и стола параллельны. Считая светильник равномерным источником, определить его светимость, если освещенность в центре стола  $E_v = 50$  лк.

5.15. Максимальная сила света папиросы  $I_v = 2,5 \times 10^{-3}$  кд. Определить наибольшее расстояние, с которого можно заметить ночью огонек папиросы, если минимальный световой поток, регистрируемый глазом  $\Phi_v = 10^{-13}$  лм, а диаметр зрачка глаза ночью  $D_{\text{гл}} = 8$  мм. Поглощением света в атмосфере пренебречь.

5.16. Источник силой света  $I_v = 100$  кд освещает приемник площадью светочувствительной поверхности  $Q_{\text{пр}} = 10$  мм<sup>2</sup> с расстояния  $r = 1$  м. Угол падения лучей на поверхность приемника  $\epsilon = 0$ . Спектральная плотность  $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  потока излучения, создаваемого источником, и соответствующая спектральная плотность  $v(\lambda)$   $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$  светового потока, приведены на рис. 5.3. Площади, ограниченные кривыми, построенными в одинаковом масштабе, составляют  $Q_1 = 10$  мм<sup>2</sup> и  $Q_2 = 500$  мм<sup>2</sup>. Найти поток излучения, поступающий от источника на светочувствительную поверхность приемника.

5.17. Тепловой источник в форме шарика диаметром  $d = 20$  мм, имеющий температуру  $t = 1727^\circ\text{C}$ , облучает термоэлемент с площадью светочувствительной поверхности  $Q_{\text{тэ}} = 100$  мм<sup>2</sup> с расстояния  $r = 560$  мм. Определить коэффициент теплового излучения источника, если на светочувствительную поверхность термоэлемента поступает поток излучения  $\Phi_e = 0,01$  Вт.

5.18. Вольфрамовый шарик диаметром  $d = 20$  мм освещает лист белой бумаги с расстояния  $r = 1$  м. Коэффициент теплового излучения вольфрама  $\varepsilon = 0,31$ . Яркость бумаги, имеющей коэффициент диффузного отражения  $\rho = 0,5$ , составляет  $L_v = 15$  кд·м<sup>-2</sup>. Найти температуру вольфрамового шарика, если световая эффективность излучения вольфрама  $K = 3$  лм·Вт<sup>-1</sup>.

5.19. Тепловой источник диаметром  $d_{\text{и}} = 1$  м имеет температуру  $t = 1000^\circ\text{C}$  и тепловой коэффициент излучения  $\varepsilon = 0,4$ . На расстоянии  $r = 1$  км от источника расположена оптическая система, регистрирующая его излучение. Определить диаметр входного зрачка оптической системы, при котором в систему будет поступать поток излучения  $\Phi_e = 6,3 \cdot 10^{-4}$  Вт. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,6$ .

5.20. Солнце имеет температуру  $T = 6000$  К и излучает, как абсолютно черное тело. Определить энергетическую освещенность, создаваемую Солнцем на поверхности Земли, если угловой размер Солнца для земного наблюдателя  $2\omega = 0,009$ , а коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,75$ . Найти освещенность от Солнца на поверхности Зем-

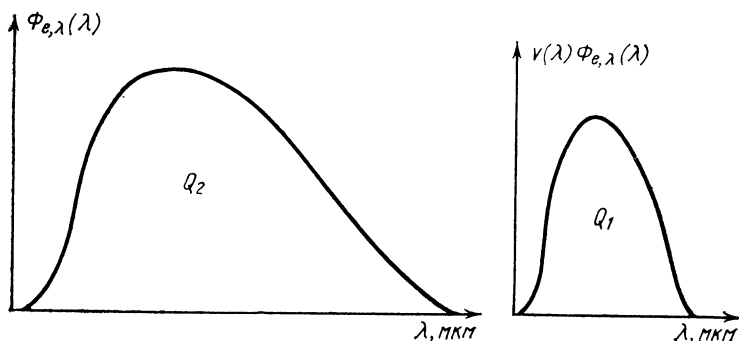


Рис. 5.3. Спектральная плотность потока излучения и светового потока

ли, если световая эффективность излучения Солнца  $K = 84 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.21. Тепловой источник в форме круглого плоского диска диаметром  $d_{\text{и}} = 20 \text{ мм}$  имеет коэффициент теплового излучения  $\varepsilon = 0,55$  и световую эффективность излучения  $K = 0,02 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Температура источника  $t = 727^\circ\text{C}$ . На расстоянии  $r = 1000 \text{ мм}$  от источника расположен приемник с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 10 \text{ мм}$ . Поверхности источника и приемника параллельны друг другу. Найти световой поток, поступающий от источника на приемник.

5.22. Звезда Сириус создает на поверхности Земли освещенность  $E_v = 9 \cdot 10^{-6} \text{ лк}$ . Световая эффективность излучения Сириуса  $K = 45 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Определить световой поток и поток излучения, поступающий от Сириуса во входной зрачок объектива телескопа с относительным отверстием  $D/f' = 1:4$  и фокусным расстоянием  $f' = 8000 \text{ мм}$ .

5.23. Вольфрамовый шарик диаметром  $d = 10 \text{ мм}$  имеет температуру  $t = 727^\circ\text{C}$  и коэффициент теплового излучения  $\varepsilon = 0,3$ . На расстоянии  $r = 300 \text{ мм}$  от шарика расположен термоэлемент, имеющий площадь светочувствительной поверхности  $Q_{\text{тз}} = 100 \text{ мм}^2$ . Определить коэффициент пропускания нейтрального светофильтра, установленного между шариком и термоэлементом, если на светочувствительную поверхность термоэлемента должен упасть поток излучения  $\Phi_e = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$ .

5.24. Абсолютно черное тело нагрето до температуры  $T = 3000 \text{ К}$ . Определить световой поток, излучаемый поверхностью этого тела площадью  $Q = 10 \text{ см}^2$ , если световая эффективность излучения  $K = 19 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.25. Определить температуру вольфрама, если его энергетическая светимость  $M_e = 40,8 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ , а коэффициент теплового излучения  $\varepsilon = 0,45$ .

5.26. Во сколько раз изменится спектральная плотность энергетической светимости желто-зеленого излучения ( $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ ) абсолютно черного тела, если его температура  $T$  возрастет от  $1500$  до  $2000 \text{ К}$ ? При решении задачи воспользоваться единой изотермической кривой (см. прил. 1.2).

5.27. Определить спектральную плотность светимости вольфрама, имеющего температуру  $T = 2500 \text{ К}$ , для длины волны  $\lambda = 0,480 \text{ мкм}$  (синий цвет). При решении задачи воспользоваться единой изотермической кривой (см. прил. 1.2), спектральным коэффициентом излучения вольфрама (см. прил. 1.3), относительной спектральной световой

эффективностью (ее значения для длин волн от 380 до 780 нм через каждые 10 нм приведены в прил. 1.4, например для  $\lambda = 530$  нм относительная спектральная световая эффективность равна 0,862). Максимальную спектральную световую эффективность принять равной  $K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.28. Длина волны, на которую приходится максимум излучения абсолютно черного тела, составляет  $\lambda_m = 3 \text{ мкм}$ . Определить поток излучения, испускаемый этим телом, если его площадь  $Q = 100 \text{ мм}^2$ . Во сколько раз изменится поток излучения, если длина волны, на которую приходится максимум излучения, уменьшится в 1,5 раза?

5.29. Абсолютно черное тело площадью  $Q = 100 \text{ мм}^2$  излучает поток излучения  $\Phi_e = 28,7 \text{ Вт}$ . Определить температуру тела.

5.30. Найти площадь абсолютно черного тела, имеющего температуру  $t_1 = 2727^\circ\text{C}$ , которая будет излучать такой же поток излучения, как и абсолютно черное тело при температуре  $t_2 = 27^\circ\text{C}$  с площади  $Q_2 = 1 \text{ м}^2$ .

5.31. Тепловой источник с температурой  $T = 2800 \text{ К}$  излучает поток излучения  $\Phi_e = 122 \text{ Вт}$  с площади  $Q = 100 \text{ мм}^2$ . Определить коэффициент теплового излучения источника.

5.32. Поток излучения с длиной волны  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$  (желто-зеленый цвет) соответствует световой поток  $\Phi_v = 1 \text{ лм}$ . Найти поток излучения с длиной волны  $\lambda = 0,480 \text{ мкм}$  (синий цвет), соответствующий такому же световому потоку. При решении задачи воспользоваться относительной спектральной световой эффективностью (см. прил. 1.4), максимальную спектральную световую эффективность принять равной  $K_m = 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ .

5.33. Определить освещенность изображения Луны, получаемого после объектива с относительным отверстием  $D/f' = 1:2$ . Яркость Луны  $L_v = 2500 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ , оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$ .

5.34. В задней фокальной плоскости объектива с относительным отверстием  $D/f' = 1:1$  установлен приемник с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 20 \text{ мм}$ . Определить световой поток, поступающий на приемник от ночного неба яркостью  $L_v = 10^{-4} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , если коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ , оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$ .

5.35. Определить относительное отверстие объектива, применяемого для фотосъемки в масштабе 2:1, позволяющее

получить такую же освещенность в плоскости изображения, какая была при съемке в масштабе 1:2 при относительном отверстии  $D/f' = 1:22$ . Линейное увеличение в зрачках объектива  $\beta_p = 1$ .

5.36. Тонкий компонент диаметром  $D = 40$  мм с фокусным расстоянием  $f' = 200$  мм проецирует отверстие абсолютно черного тела площадью  $Q = 20$  мм<sup>2</sup> на светочувствительную поверхность приемника. Температура источника  $T = 1500$  К, коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$ . Определить поток излучения, поступающий на приемник, если изображение отверстия абсолютно черного тела меньше светочувствительной поверхности приемника.

5.37. Во сколько раз повышается освещенность в задней фокальной плоскости объектива с относительным отверстием  $D/f' = 1:1$  по сравнению с освещенностью на поверхности Земли от Солнца, если угловой размер Солнца для земного наблюдателя  $2\omega = 0,01$ ? Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ .

5.38. Круглый плоский диск яркостью  $L_v = 1000$  кд·м<sup>-2</sup> проецируется тонким компонентом на экран, расположенный от диска на расстоянии  $L = 216$  мм. Фокусное расстояние компонента  $f' = 30$  мм. Найти освещенность в центре изображения диска, если диаметр компонента  $D = 10$  мм, коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,9$ . Задача имеет два решения.

5.39. На поверхности непрозрачного предмета с коэффициентом диффузного отражения  $\rho = 0,7$  создана освещенность  $E_v = 10^4$  лк. Предмет проецируется на экран с линейным увеличением  $\beta = -4$ . Проекционный объектив типа «Индустар» с относительным отверстием  $D/f' = 1:4$  и линейным увеличением в зрачках  $\beta_p = 1$  имеет суммарную толщину оптических деталей  $d = 17$  мм и шесть непросветленных поверхностей, граничащих с воздухом: число границ раздела крон — воздух  $N_{кр} = 3$ , флинт — воздух  $N_{фл} = 3$ . Определить освещенность изображения предмета в центре экрана. Какова будет освещенность изображения, если для проецирования использовать тот же объектив с двухслойным просветлением всех поверхностей?

5.40. Изображение бесконечно удаленного источника, имеющего угловой размер  $2\omega = 0,02$  и яркость  $L_v = 10^3$  кд·м<sup>-2</sup>, получено на светочувствительной поверхности приемника, установленной в задней фокальной плоскости объектива. Фокусное расстояние объектива  $f' = 200$  мм, коэффициент пропускания —  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Найти диаметр

входного зрачка объектива, при котором на светочувствительную поверхность приемника диаметром  $d_{\text{пр}} = 5$  мм будет поступать световой поток  $\Phi'_v = 4 \cdot 10^{-5}$  лм. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

5.41. Объектив следящей системы, имеющий фокусное расстояние  $f' = 160$  мм, диаметр входного зрачка  $D = 40$  мм и коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ , регистрирует объекты на фоне дневного неба яркостью  $L_v = 10^4$  кд·м $^{-2}$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ . Определить диаметр светочувствительной поверхности приемника, установленной в задней фокальной плоскости объектива, и угловое поле системы в пространстве предметов, если световой поток, поступающий от неба на приемник, составляет  $\Phi'_v = 0,1$  лм.

5.42. Источник излучения, имеющий форму круглого плоского диска диаметром  $d_{\text{и}} = 1$  м, расположен на расстоянии  $z = 100$  м от переднего фокуса оптической системы. Характеристики оптической системы: фокусное расстояние  $f' = 100$  мм, относительное отверстие  $D/f' = 1:2$ , линейное увеличение в зрачках  $\beta_P = 1$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Изображение источника образуется на светочувствительной поверхности приемника диаметром  $d_{\text{пр}} = 5$  мм. Найти яркость источника, если на светочувствительную поверхность приемника поступает световой поток  $\Phi'_v = 10^{-5}$  лм. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,5$ .

5.43. В задней фокальной плоскости объектива с относительным отверстием  $D/f' = 1:2$  и диаметром входного зрачка  $D = 200$  мм установлен приемник, имеющий диаметр светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 4$  мм. Определить световой поток, поступающий на приемник от Луны яркостью  $L_p = 2500$  кд·м $^{-2}$ , если угловой размер Луны  $2\omega = 0,009$ . Коэффициенты пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,7$ , атмосферы  $\tau_a = 0,5$ .

5.44. Излучение бесконечно удаленного источника, имеющего угловой размер  $2\omega = 0,01$ , регистрируется приемником, установленным в задней фокальной плоскости объектива. Фокусное расстояние объектива  $f' = 200$  мм, диаметр входного зрачка  $D = 100$  мм, коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Определить яркость источника, если на светочувствительную поверхность приемника диаметром  $d_{\text{пр}} = 3$  мм поступает световой поток  $\Phi'_v = 5 \cdot 10^{-4}$  лм. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,5$ .



5.45. Непрозрачный предмет с коэффициентом диффузного отражения  $\rho = 0,6$  проецируется на экран с пятикратным увеличением. Относительное отверстие проекционного объектива  $D/f' = 1:4$ , линейное увеличение в зрачках  $\beta_P = 1$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Проецируемый предмет освещается двумя одинаковыми лампами накаливания. Определить силу света каждой лампы, если освещенность изображения предмета в центре экрана  $E'_v = 5$  лк. Лампы расположены от предмета на расстоянии  $r = 300$  мм, угол падения лучей на поверхность предмета  $\varepsilon = 30^\circ$ .

5.46. Солнце имеет угловой размер  $2\omega = 0,01$  и создает на поверхности Земли освещенность  $E_v = 10^5$  лк. Определить освещенность изображения Солнца, создаваемого оптической системой с фокусным расстоянием  $f' = 100$  мм, диаметром входного зрачка  $D = 50$  мм и коэффициентом пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Найти световой поток, поступающий на площадку приемника диаметром  $d_{пр} = 0,5$  мм, расположенную в плоскости изображения Солнца.

5.47. Объектив следящей системы с относительным отверстием  $D/f' = 1:2$ , угловым полем в пространстве предметов  $2\omega = 40^\circ$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$  регистрирует объекты на фоне дневных облаков яркостью  $L_v = 1,5 \cdot 10^4$  кд·м<sup>-2</sup>. Определить освещенность изображения облаков в центре поля и на краю поля, если линейное увеличение в зрачках объектива  $\beta_P = 0,8$ , а коэффициент виньетирования наклонных пучков для края поля  $k_\omega = 0,7$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

5.48. Широкоугольный фотографический объектив с угловым полем в пространстве предметов  $2\omega = 80^\circ$  регистрирует объекты на фоне дневных облаков яркостью  $L_v = 10^4$  кд·м<sup>-2</sup>. Коэффициент пропускания объектива  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Найти относительное отверстие объектива, если при коэффициенте пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,6$  освещенность изображения облаков в центре поля  $E'_v = 420$  лк. Определить коэффициент виньетирования наклонных пучков, если при линейном увеличении в зрачках  $\beta_P = 1,2$  освещенность изображения облаков на краю поля составляет  $E'_{v, \omega'} = 113$  лк.

Для расширения возможностей глаза при наблюдении более мелких структур используют лупы и микроскоп.

Лупы обычно состоят из одной или нескольких линз и предназначены для наблюдения близко расположенных предметов при небольшом увеличении  $\bar{\Gamma} = 2 \div 30\times$ .

Для получения большего увеличения применяют микроскоп. Микроскоп состоит из трех основных оптических узлов: объектива, окуляра и осветительной системы.

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

Под видимым увеличением микроскопа (лупы) понимают отношение тангенса угла, под которым видно изображение предмета через микроскоп, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом с расстояния наилучшего видения:

$$\bar{\Gamma} = \operatorname{tg} \omega' / \operatorname{tg} \omega.$$

Видимое увеличение лупы может быть вычислено по формуле

$$\bar{\Gamma} = 250/f'_л,$$

где  $f'_л$  — фокусное расстояние лупы.

Когда глаз расположен вблизи лупы

$$\bar{\Gamma}_0 = \bar{\Gamma} + 1.$$

Линейное поле лупы в случае, если предмет расположен в передней фокальной плоскости, определяется выражением

$$2y = D_л - D_{г.л.}$$

Видимое увеличение микроскопа с конечной длиной тубуса определяется по формуле

$$\bar{\Gamma}_м = -\frac{250}{f'_м} = \beta_{об} \bar{\Gamma}_{ок} = -\frac{\Delta_0 250}{f'_{об} f'_{ок}},$$

где  $f'_м$  — фокусное расстояние микроскопа;  $\beta_{об}$  — линейное увеличение объектива;  $\bar{\Gamma}_{ок}$  — видимое увеличение окуляра;  $\Delta_0$  — оптическая длина тубуса (оптический интервал—

расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра).

Для микроскопов, длина тубуса которых принята равной бесконечности, видимое увеличение вычисляется по формуле

$$\bar{\Gamma}_m = - \frac{f'_{т.л}}{f'_{об}} \bar{\Gamma}_{ок},$$

где  $f'_{т.л}$  — фокусное расстояние тубусной линзы;  $f'_{об}$  — фокусное расстояние объектива.

Полезное увеличение микроскопа  $\bar{\Gamma}_п$  лежит в пределах

$$500 A < \Gamma_п < 1000 A,$$

где  $A = n_1 \sin \sigma_A$  — числовая апертура объектива.

Диаметр выходного зрачка микроскопа

$$D' = 500 A / \bar{\Gamma}_m.$$

Линейное поле микроскопа

$$2y_{об} = D_{п.д} / \beta_{об};$$

здесь  $D_{п.д}$  — диаметр полевой диафрагмы окуляра, определяемый по формуле

$$D_{п.д} = 2f'_{ок} \operatorname{tg} \omega',$$

где  $\omega'$  — половина углового поля окуляра в пространстве изображений.

Линейный дифракционный предел разрешения микроскопа

$$\delta = \frac{\lambda}{A_{об} + A_k},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $A_{об}$ ,  $A_k$  — числовая апертура объектива и конденсора соответственно.

Если  $A_{об} = A_k$ , то  $\delta = \lambda / (2A)$ .

Глубина резко изображаемого пространства микроскопа (лупы)

$$T = T_a + T_b = \frac{250}{\bar{\Gamma}_m^2} + \frac{\lambda}{2A^2},$$

где  $T_a$  — аккомодационная глубина;  $T_b$  — волновая глубина;  $\lambda$  — длина волны, мм.

Если изображение предмета проецируется на экран или если в плоскости полевой диафрагмы располагается шкала или сетка, то  $T_a = 0$ . Тогда

$$T = T_b = \lambda / (2A^2).$$

## Задачи

6.1. В биологических микроскопах используются ахроматические объективы:  $4 \times 0,12$ ;  $6,3 \times 0,17$ ;  $10 \times 0,25$ ;  $16 \times 0,40$ ;  $40 \times 0,65$ ;  $60 \times 0,85$ ;  $100 \times 1,25$  МИ (масляная иммерсия). Найти полезные увеличения для каждого из объективов и подобрать окуляры из имеющегося набора:  $\bar{\Gamma}_{ок} = 4\times$ ;  $6,3\times$ ;  $10\times$ ;  $16\times$ ;  $20\times$ ;  $25\times$ .

6.2. В металлографических микроскопах, длина тубуса которых принята равной бесконечности, используются объективы:  $f' = 40$ ,  $A = 0,10$ ;  $f' = 25$ ,  $A = 0,20$ ;  $f' = 16$ ,  $A = 0,30$ ;  $f' = 10$ ,  $A = 0,5$ ;  $f' = 6,3$ ,  $A = 0,65$ ;  $f' = 4$ ,  $A = 0,85$ ;  $f' = 2,5$ ,  $A = 1,25$  и тубусная линза  $f'_{т.л} = 250$  мм. Найти полезное увеличение для каждого объектива и подобрать окуляры из имеющегося набора:  $\bar{\Gamma}_{ок} = 6,3\times$ ;  $10\times$ ;  $12,5\times$ ;  $16\times$ ;  $20\times$ ;  $25\times$ .

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

6.4. В металлографическом микроскопе используются планапохроматы:  $f' = 16$ ,  $A = 0,30$ ;  $f' = 6,3$ ,  $A = 0,65$ ;  $f' = 4$ ,  $A = 0,85$ , тубусная линза с  $f' = 250$  мм и окуляр  $\bar{\Gamma}_{ок} = 10\times$ ,  $2y' = 18$  мм. Найти диаметр выходного зрачка микроскопа и линейное поле.

6.5. Определить глубину резко изображаемого пространства биологического микроскопа, укомплектованного ахроматическими объективами:  $4 \times 0,12$ ;  $10 \times 0,30$ ;  $40 \times 0,65$  и окулярами:  $\bar{\Gamma}_{ок} = 6,3\times$  и  $\bar{\Gamma}_{ок} = 10\times$ ;  $\lambda = 0,0005$  мм: а) при наблюдении препарата; б) при использовании окуляров с сеткой или шкалой.

6.6. Определить глубину резко изображаемого пространства металлографического микроскопа, укомплектованного планахроматами:  $f' = 16$ ,  $A = 0,30$ ;  $f' = 6,3$  мм,  $A = 0,65$ ;  $f' = 2,5$ ,  $A = 1,25$ , тубусной линзой  $f' = 250$  мм и окуляром с  $\bar{\Gamma}_{ок} = 16\times$ ,  $\lambda = 0,0005$  мм: а) при наблюдении шлифа; б) при проекции на экран.

6.7. Подобрать из каталога объективы и окуляры для биологического микроскопа при исследовании объекта, наименьшая структура которого не превышает  $0,001$ ;  $0,0005$ ;  $0,0002$  мм, если  $\lambda = 0,0005$  мм.

6.8. Определить дифракционный предел разрешения металлографического микроскопа, укомплектованного пла-

нахроматом  $f' = 6,3$  мм,  $A = 0,65$ , тубусной линзой  $f' = 250$  мм и окуляром  $\bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 10\times$ , если  $\lambda = 0,0005$  мм.

6.9. Определить дифракционный предел разрешения биологического микроскопа при использовании ахроматического объектива  $100\times 1,25$  МИ (масляная иммерсия), если  $\lambda = 0,000546$  мм.

6.10. Определить дифракционный предел разрешения ультрафиолетового микроскопа при использовании суперапохромата  $6,3\times 0,75$  ВГИ (водно-глицериновая иммерсия) в ультрафиолетовом излучении с  $\lambda = 0,00028$  мм.

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

6.12. Найти наименьшее расстояние между двумя точками объекта, различаемыми раздельно, при использовании объективов:  $6,3\times 0,20$ ;  $10\times 0,30$ ;  $16\times 0,40$ ;  $25\times 0,50$ ;  $40\times 0,65$ ;  $60\times 0,85$ ;  $100\times 1,25$  МИ, если  $\lambda = 0,00055$  мм.

6.13. В микроскопе, имеющем видимое увеличение  $\bar{\Gamma}_m = -150\times$ , используется объектив с  $f' = 10$  мм и окуляр с  $f' = 25$  мм. Каково будет видимое увеличение микроскопа, если оптическую длину тубуса  $\Delta_0$  увеличить (уменьшить) на 30 мм?

6.14. В микроскопе используется окуляр с  $\bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 10\times$  и угловым полем  $2\omega' = 30^\circ$ . Определить увеличение микроскопа и линейное поле при работе с объективами:  $10\times 0,30$ ;  $40\times 0,65$ .

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

6.16. Микроскоп имеет видимое увеличение  $\bar{\Gamma}_m = -200\times$  и окуляр с фокусным расстоянием  $f'_{\text{ок}} = 25$  мм. В задней фокальной плоскости объектива микроскопа устанавливается апертурная диафрагма диаметром  $D_{\text{а-д}} = 7$  мм. Расстояние между предметом и изображением после микрообъектива  $L = 192$  мм. Определить диаметр и удаление выходного зрачка микроскопа от окуляра. Объектив и окуляр считать тонкими.

6.17. Определить фокусное расстояние объектива микроскопа, имеющего видимое увеличение  $\bar{\Gamma}_m = -400\times$ . Фокусное расстояние окуляра  $f'_{\text{ок}} = 25$  мм. Расстояние меж-

ду предметом и его изображением после микрообъектива 180 мм. Объектив считать тонким.

6.18. Видимое увеличение микроскопа  $\bar{\Gamma}_m = -200\times$ , окуляра  $\bar{\Gamma}_{ок} = 10\times$ . Расстояние между предметом и изображением после микрообъектива  $L = 192$  мм. Каким должен быть диаметр апертурной диафрагмы, установленной в задней фокальной плоскости микрообъектива, если диаметр выходного зрачка микроскопа  $D' = 1,0$  мм? Объектив и окуляр считать тонкими.

6.19. Видимое увеличение микроскопа  $\bar{\Gamma}_m = -400\times$ , окуляра  $\bar{\Gamma}_{ок} = 10\times$ . Расстояние между предметом и изображением после микрообъектива  $L = 180$  мм. Каким должен быть диаметр апертурной диафрагмы, установленной в задней фокальной плоскости микрообъектива, если его числовая апертура  $A_{об} = 0,65$ ? Объектив и окуляр считать тонкими.

6.20. В микроскопе, видимое увеличение которого  $\bar{\Gamma}_m = -200\times$ , используется объектив с фокусным расстоянием  $f'_{об} = 10$  мм и окуляр с фокусным расстоянием  $f'_{ок} = 25$  мм. Определить оптическую длину тубуса  $\Delta_0$ .

6.21. Найти видимое увеличение микроскопа, если оптическая длина тубуса  $\Delta_0 = 140$  мм, видимое увеличение окуляра  $\bar{\Gamma}_{ок} = 10\times$  и фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 16$  мм.

## ГЛАВА 7

### ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

Под *телескопической* понимают такую оптическую систему, которая позволяет наблюдать детали удаленных предметов с большей подробностью, чем при наблюдении невооруженным глазом. Так как телескопическая система превращает приходящие от предметных точек пучки параллельных лучей в пучки, состоящие из взаимно параллельных лучей, то ее фокусное расстояние равно бесконечности (оптическая сила равна нулю). Такие системы называют афокальными.

Основными характеристиками телескопической системы являются: видимое увеличение  $\Gamma_t$ ; угловое поле  $2\omega$ ; диаметр выходного зрачка  $D'$ .

К остальным характеристикам относятся: угловой предел разрешения  $\psi$ ; длина системы  $L$ ; положение входного  $s_p$  или  $a_p$  и выходного  $s'_p$  или  $a'_p$  зрачков; линейное увеличение линзовой  $\beta_{об.с}$  или призмной  $\beta_{пр}$  оборачивающих систем; коэффициент виньетирования  $k_\omega$ .

Рассмотренные характеристики, фокусные расстояния объектива, окуляра, линз оборачивающей системы, а также световые диаметры различных компонентов будем в дальнейшем называть *данными для конструирования*.

Ниже приведены основные формулы, позволяющие в процессе проектирования выполнять расчеты телескопических систем.

Видимое увеличение

$$\Gamma_T = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{D}{D'} = -\frac{f'_{об}}{f'_{ок}} \beta_{об.с},$$

где  $f'_{об}$  — фокусное расстояние объектива;  $f'_{ок}$  — фокусное расстояние окуляра;  $\beta_{об.с}$  — линейное увеличение оборачивающей системы.

Применяя отношение  $D/D'$ , необходимо учитывать знак видимого увеличения. Линейное  $\beta$  и продольное  $\alpha$  увеличения телескопической системы связаны с видимым известными соотношениями:

$$\beta = \frac{n}{n' \Gamma_T}; \quad \alpha = \frac{n}{n' \Gamma_T^2}.$$

Угловое поле в пространстве предметов ( $2\omega$ ) связано с угловым полем в пространстве изображения ( $2\omega'$ ) равенством

$$\operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} \omega' / \Gamma_T \quad (7.1)$$

и зависит от фокусного расстояния объектива и диаметра полевой диафрагмы  $D_{п.д}$ :

$$\operatorname{tg} \omega = -D_{п.д} / (2f'_{об}). \quad (7.2)$$

Диаметр входного зрачка

$$D = D' \Gamma_T. \quad (7.3)$$

Входной и выходной зрачки определяются также удалением

$$a_p = (s'_p - s'_{F', ок} - \Delta z'_p) \Gamma_T^2 - f'_1, \quad (7.4)$$

где  $s'_{p'}$  — удаление выходного зрачка;  $s'_{F', \text{ок}}$  — задний фокальный отрезок окуляра;  $\Delta z'_p$  — сферическая аберрация в зрачках.

Угловой предел разрешения, определяемый дифракцией, вычисляют по формулам

$$\psi = \frac{140''}{D} \text{ или } \psi = \frac{120''}{D},$$

а если учитывать свойства глаза при абсолютном контрасте, то по формуле

$$\psi = 60''/\Gamma_T.$$

Полезное увеличение  $\Gamma_{T, \text{п}} = 0,5 D$ . Угловые пределы разрешения в пространстве изображения  $\psi'$  и в пространстве предметов  $\psi$  связаны видимым увеличением:  $\psi' = \psi \Gamma_T$ .

Длина телескопической системы

$$L = f'_{\text{об}} + f'_{\text{ок}} + L_{\text{об.с}},$$

где  $L_{\text{об.с}} = -f_3 + d_3 + f'_4$  — длина двухлинзовой оборачивающей системы или  $L_{\text{об.с}} = -a_3 + a'_3$  — длина однолинзовой оборачивающей системы.

Оптическая сила коллективной линзы

$$\Phi_2 = \Phi_1 (1 + a_p \Phi_1) + \Phi_3 (1 - a'_{p'} \Phi_3),$$

где  $\Phi_1$  — оптическая сила объектива;  $a_p$  — удаление входного зрачка;  $\Phi_3$  — оптическая сила окуляра в простой схеме или оптическая сила первой линзы оборачивающей системы в сложной схеме;  $a'_{p'}$  — удаление выходного зрачка в простой схеме или определенная часть расстояния  $d_3$  в сложной схеме.

Удаление выходного зрачка

$$s'_{p'} = s'_{F', \text{ок}} + \frac{a_p + f'_{\text{об}}}{\Gamma_T^2} - \frac{f_{\text{ок}}'^2}{f_{\text{кол}}'}.$$

Необходимое перемещение  $\Delta$  окуляра для компенсации недостатков зрения ( $\bar{A}_d$ , дптр) определяется расстоянием  $c$  от заднего фокуса окуляра до глаза, значением  $\bar{A}_d$  и фокусным расстоянием окуляра:

$$\Delta = \frac{f_{\text{ок}}'^2}{\frac{1000}{\bar{A}_d} + c}. \quad (7.5)$$



При выполнении габаритного расчета простой зрительной трубы должны быть известны основные характеристики ( $\Gamma_T$ ,  $2\omega$ ,  $D'$ ) и такие параметры, как удаление входного или выходного зрачка, длина  $L$  системы, коэффициент виньетирования. Расчет выполняется в следующем порядке (рис. 7.1).

1. Вычисление фокусных расстояний объектива и окуляра

$$f'_{об} = \frac{\Gamma_T L}{\Gamma_T - 1}; \quad f'_{ок} = \frac{L}{1 - \Gamma_T}. \quad (7.6)$$

2. Определение диаметра входного зрачка по формуле (7.3).

Теперь основные оптические характеристики объектива известны ( $f'_{об}$ ;  $2\omega$ ;  $D/f'_{об}$ ), и он может быть выбран по каталогу или рассчитан.

3. Определение окулярного углового поля по формуле (7.1).

4. Определение удаления выходного зрачка по формуле (7.4).

5. Вычисление диаметра полевой диафрагмы на основании формулы (7.2).

6. Диаметр объектива

$$D_1 = 2m_1 + 2a_P \operatorname{tg} \omega,$$

где  $2m_1 = k_\omega D$ .

7. Диаметр коллективной линзы окуляра

$$D_2 = 2a_P \operatorname{tg} \omega - 2(f'_{об} - s_{F, ок}) \operatorname{tg} \omega_2 + 2m_2,$$

где  $\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{f'_{об} + a_P}{f'_{об}} \operatorname{tg} \omega$ ;  $m_2 = -\frac{m_1 s_{F, ок}}{f'_{об}}$ .

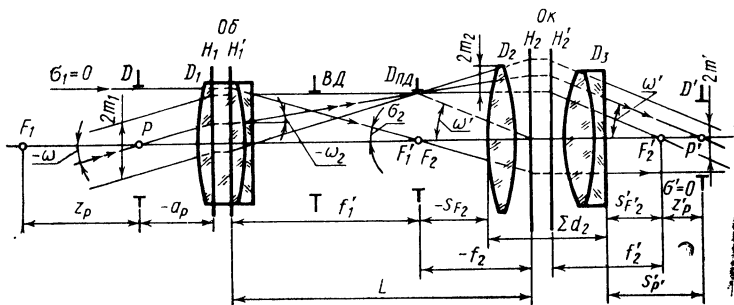


Рис. 7.1. Схема с ходом лучей простой зрительной трубы

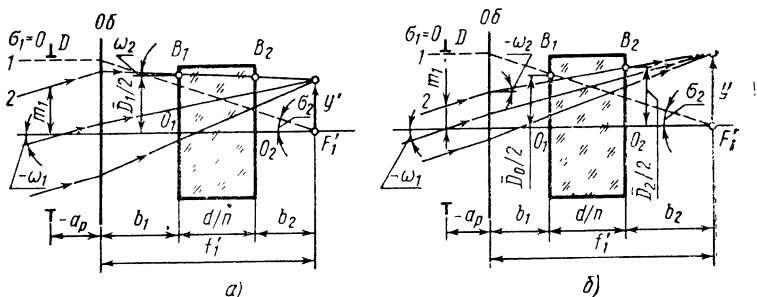


Рис. 7.2. Ход лучей в призме, определяющий ее размеры

### 8. Диаметр глазной линзы окуляра

$$D_3 = 2s'_p \cdot \operatorname{tg} \omega' + 2m',$$

где  $2m' = k_\omega D'$ .

При габаритном расчете призмённого монокуляра, который выполняют в рассмотренном порядке, следует учитывать особенность расчета призм, расположенных в сходящихся или расходящихся пучках лучей: расстояние от главной плоскости тонкого объектива до первой поверхности призмы  $b_1 = f'_{о\phi} - b_2 - d/n$ , а расстояние от задней грани призмы до фокальной плоскости

$$b_2 = \frac{f'^2_{ок}}{1000} A_d,$$

где значение  $A_d$  задают в пределах  $A_d = 10 \div 20$  дптр.

Диаметр отверстия на входной грани призмы определяется либо ходом верхнего внеосевого луча ( $\bar{D}_1$ ) (рис. 7.2, а), либо ходом осевого луча ( $\bar{D}_0$ ), а наибольший световой диаметр ( $\bar{D}_2$ ) выходной грани — ходом верхнего внеосевого луча (рис. 7.2, б):

$$\bar{D}_0 = \frac{nb_2 D}{nf'_{о\phi} - cD}; \quad (7.7)$$

$$\bar{D}_1 = 2n \frac{b_2 A - f'^2_{о\phi} \operatorname{tg} \omega_1}{nf'_{о\phi} - 2cA}; \quad (7.8)$$

$$\bar{D}_2 = 2 \left( y' + \frac{b_2}{f'_{о\phi}} A \right), \quad (7.9)$$

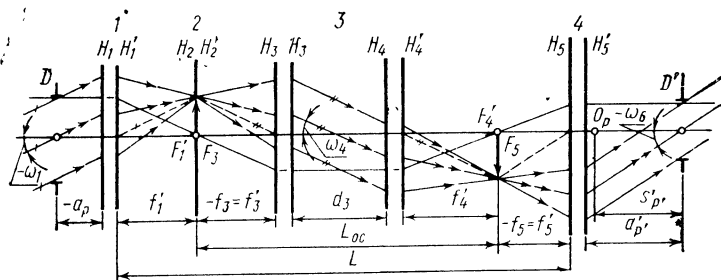


Рис. 7.3. Схема зрительной трубы с двухкомпонентной линзовой оборачивающей системой:

1 — объектив; 2 — коллектив; 3 — двухкомпонентная оборачивающая система; 4 — окуляр

где  $c = d/D$  — коэффициент призмы;  $A = 0,5 k_{\omega} D + (f'_{\text{об}} + a_P) \operatorname{tg} \omega_1$ ;  $A = h_1 - y'$ , причем отношение  $A/f' = \operatorname{tg} \omega_2$  и, если  $\operatorname{tg} \omega_2 > 0$ , наибольший диаметр имеет входная поверхность призмы [см. формулу (7.8)], а если  $2y' > D$ , то  $\operatorname{tg} \omega_2 < 0$  и наибольший размер имеет выходная поверхность призмы [см. формулу (7.9)].

Перед расчетом зрительной трубы с двухкомпонентной линзовой оборачивающей системой (рис. 7.3) должны быть известны следующие характеристики: 1)  $\Gamma_T$ ; 2)  $2\omega_1$ ; 3)  $D(D')$ ; 4)  $L$ ; 5)  $f'_{\text{ок}} = f'_5$ ; 6)  $k_{\omega}$ ; 7)  $a_P (S'P')$ ; 8)  $\beta_{\text{об.с.}}$ .

Приведем формулы расчета:

$$f'_{\text{об}} = f'_1 = -\frac{\Gamma_T f'_5}{\beta_{\text{об.с.}}}; 2m_1 = k_{\omega} D;$$

$$D_1 = 2m_1 + 2a_P \operatorname{tg} \omega_1;$$

$$f'_3 \frac{(1-k_{\omega}) D}{f'^2_1 \operatorname{tg} \omega_1} + f'_3 (\beta_{\text{об.с.}} - 1) + L - (f'_1 + f'_5) = 0;$$

$$f'_4 = -\beta_{\text{об.с.}} f'_3; d_3 = -\frac{(1-k_{\omega}) D}{\operatorname{tg} \omega_1} \left( \frac{f'_3}{f'_1} \right)^2;$$

$$D_2 = -2f'_1 \operatorname{tg} \omega_1;$$

$$D_3 = Df'_3/f'_1; D_4 = D_3;$$

$$\frac{1}{f'_2} = \frac{1}{f'_1} \left( 1 + \frac{a_p}{f'_1} \right) + \frac{1}{f'_3} \left( 1 - \frac{d_3}{2f'_3} \right),$$

$$D_{\text{пл}} = -2f'_5 \operatorname{tg} \omega_5,$$

где  $\operatorname{tg} \omega_5 = \operatorname{tg} \omega' = \Gamma_T \operatorname{tg} \omega_1$ .

Диаметр коллективной линзы окуляра

$$D_5 = D_{\text{пл}} - 2s_{F, \text{ок}} \operatorname{tg} \omega_5 + 2m_5,$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \omega_5 = \frac{D_{\text{пл}} - d_3 \operatorname{tg} \omega_4}{2f'_4}, \quad 2m_5 = -\frac{2m_3 s_{F, \text{ок}}}{f'_4},$$

$$2m_3 = k_\omega D_3; \operatorname{tg} \omega_4 = D_2 / (2f'_3).$$

Диаметр глазной линзы окуляра

$$D_6 = k_\omega D' - 2s'_p \operatorname{tg} \omega_6,$$

$$\text{где } s'_p = s'_{F', \text{ок}} + \left( f'_4 - \frac{d_3}{2} \right) \frac{f'^2_5}{f'_4} + \Delta z'_p.$$

Глубина изображаемого пространства определяется разностью расстояний  $p_1 - p_2$ , где  $p_1 = p'_1 \Gamma_T^2$ ,  $p_2 = p'_2 \Gamma_T^2$  или

$$p'_1 = \frac{p' D_{\text{гл}}}{D_{\text{гл}} - p' \psi_{\text{гл}}},$$

$$p'_2 = \frac{p' D_{\text{гл}}}{D_{\text{гл}} + p' \psi_{\text{гл}}},$$

$p'$  — расстояние, на которое аккомодирован глаз. Если глаз аккомодирован на бесконечность, то  $p_{1\infty} = p'_{1\infty} \Gamma_T^2$  является расстоянием, определяющим начало практической бесконечности.

Объемное восприятие предметов, наблюдаемых с помощью стереоскопических телескопических систем, возможно, в пределах радиуса стереоскопического зрения

$$R_c = B / \Delta \epsilon_{\min},$$

где  $\Delta \epsilon_{\min} = \Delta \epsilon'_{\min} / \Gamma_T$ ;  $\Delta \epsilon'_{\min}$  — угловой предел стереоскопического восприятия.

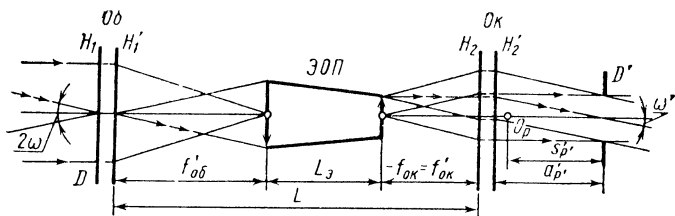


Рис. 7.4. Схема зрительной трубы с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП)

Для зрительных труб с электронно-оптическими преобразователями ЭОП применяют следующие соотношения (рис. 7.4):

$$f'_{об} = \frac{L - L_э}{\Gamma_T - \beta_э} \Gamma_T; f'_{ок} = \frac{L - L_э}{\beta_э - \Gamma_T} \beta_э; \quad (7.10)$$

$$D_{фк} = -2f'_{об} \operatorname{tg} \omega; D_{эк} = 2f'_{ок} \operatorname{tg} \omega'; \quad (7.11)$$

$$s'_{р'} = -(D_{ок, гл} - D') / (2 \operatorname{tg} \omega'); \quad (7.12)$$

$$D_{кол} = D_{эк} - \frac{D' + 2(s'_{р'} - s'_{р', ок}) \operatorname{tg} \omega'}{f'_{ок}} s_{F, ок};$$

$$D_{гл} = D' + 2s'_{р'} \operatorname{tg} \omega'.$$

## Задачи

7.1. Вычислить угловой предел разрешения зрительной трубы с видимым увеличением  $\Gamma_T = 8\times$  и диаметром выходного зрачка  $D' = 4$  мм, определяемый: а) теорией дифракции, б) возможностями глаза.

7.2. Определить основные оптические характеристики зрительной трубы, которая позволяла бы наблюдать пространство предметов в направлении, перпендикулярном к линии наблюдения в пределах  $\pm 200$  м, и удаленных от прибора на расстояние 4 км, если при этом необходимо различать детали предметов размером 0,4 м.

7.3. Бинокль имеет видимое увеличение  $\Gamma_T = 8\times$ , угловое поле  $2\omega = 6^\circ$  и диаметр выходного зрачка  $D' = 5$  мм. Определить размеры линейного поля и линейный предел разрешения, которые обеспечивает бинокль или система

бинокль с глазом, предметов, удаленных на расстояние  $p = 3$  км.

7.4. Угловое увеличение теодолита равно  $30\times$ , диаметр входного зрачка  $D = 60$  мм. Определить угловой предел разрешения прибора и вычислить минимальный размер деления рейки, которые можно будет различать при измерении расстояний 3 км.

7.5. В простой зрительной трубе с видимым увеличением  $\Gamma_T = -10\times$ , угловым полем  $2\omega = 6^\circ$  и диаметром выходного зрачка  $D' = 2$  мм применен окуляр с фокусным расстоянием  $f'_{ок} = 25$  мм. Каким должен быть диаметр тонкого объектива, если входной зрачок системы располагается перед объективом на расстоянии  $0,7 f'_{об}$  в случаях: а)  $k_\omega = 0,5$ ; б)  $k_\omega = 1$ ?

7.6. Телескопическая система предназначена для измерения отклонений стрелочного указателя от нулевого положения прибора, расположенного на расстоянии 50 м от системы. Размах стрелочного указателя поперек оси наблюдения равен  $\pm 2,6$  м. Сетка телескопической системы должна позволять измерять отклонения стрелки 0,5 м. Определить угловое поле, диаметр полевой диафрагмы, конструктивные данные и цену деления сетки, если известно, что  $\Gamma_T = -4\times$ ,  $L = 250$  мм.

7.7. Определить основные характеристики и данные для конструирования зрительной трубы, предназначенной для корректировки стрельбы в тире, если дистанция — 100 м,  $2y = 2$  м, диаметр отверстий в мишени от пули 5 мм. Диаметр выходного зрачка трубы принять равным 2 мм, а длину трубы без оборачивающей системы ( $\beta_{об.с} = -1\times$ )  $L = 175$  мм.

7.8. Определить данные для конструирования, угловое поле и положение входного зрачка зрительной трубы Кеплера, если известны следующие параметры: видимое увеличение  $\Gamma_T = -4\times$ ; диаметр выходного зрачка  $D' = 5$  мм, диаметр тонкого объектива  $D_{об} = 20$  мм, удаление выходного зрачка  $a_{р.} = 25$  мм; диаметр коллективной линзы тонкого окуляра  $D_{ок} = 18$  мм; относительное отверстие объектива  $D/f'_{об} = 1:4$ .

7.9. Определить данные для конструирования и угловое поле зрительной трубы Галилея, которая должна иметь видимое увеличение  $\Gamma_T = 4\times$ , диаметр выходного зрачка  $D' = 5$  мм, объектив диаметром  $D_{об} = 40$  мм и относительным отверстием  $D/f'_{об} = 1:4$ . Глаз удален от окуляра на расстояние 20 мм.

7.10. Рассчитать призменный монокуляр, предназначенный для наблюдения за отклонениями разрывов метеорологических ракет от облаков, находящихся в зените на высоте 20 км. Максимально возможные отклонения могут достигать 1 км. Прибор должен позволять различать минимальные отклонения 10 м. Впечатление от изображения этих отклонений должно быть не хуже, чем от миллиметровых делений линейки, наблюдаемой невооруженным глазом. Диаметр выходного зрачка равен  $D' = 5$  мм, длина системы без призмы  $L = 225$  мм.

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

7.12. Зрительная труба Галилея с увеличением  $\Gamma_T = 3,5\times$  при наблюдении бесконечно удаленных предметов имеет длину  $L = 100$  мм. Определить фокусные расстояния объектива и окуляра и расстояние, на которое следует переместить окуляр, чтобы наблюдать предметы, удаленные от объектива на 5 м.

7.13. Пусть в качестве объектива и окуляра простой телескопической системы применены две шаровые линзы радиусами  $r_{ш1} = 50$  мм и  $r_{ш2} = 10$  мм, изготовленные из стекол соответственно К8 и БК10 ( $\lambda_e$ ) и имеющие относительные отверстия  $D_{об}/f'_{об} = D_{ок}/f'_{ок} = 1:10$ . Определить расстояние между линзами  $d_2$ , видимое увеличение  $\Gamma_T$  и угловое поле.

7.14. Простая зрительная труба Кеплера имеет видимое увеличение  $\Gamma_T = -8\times$  и длину  $L = 225$  мм, задний фокальный отрезок окуляра  $s'_{р',ок} = 0,4f'_{ок}$ . На каком расстоянии  $a_p$  от тонкого объектива должен быть расположен входной зрачок трубы, чтобы выходной зрачок был удален от последней поверхности окуляра на расстояние  $s'_{р'} = 11$  мм? Принять  $\Delta z'_p = 0$ .

7.15. В зрительной трубе Кеплера с увеличением  $\Gamma_T = -8\times$  использованы симметричный окуляр с  $f'_{ок} = 25$  мм и  $s'_{р',ок} = 0,75 f'_{ок}$  и коллектив с фокусным расстоянием  $f'_{кол} = 100$  мм, установленный так, что главные плоскости коллектива совпадают с задней фокальной плоскостью тонкого объектива. Входной зрачок системы диаметром  $D = 32$  мм расположен перед объективом на расстоянии

120 мм. Определить диаметр и удаление выходного зрачка трубы. Чему будет равно удаление выходного зрачка, если коллектив убрать? Принять  $\Delta z_p' = 0$ .

7.16. Определить данные для конструирования и угловое поле прибора, предназначенного для наблюдения за перемещениями предмета, удаленного от пункта наблюдения на 20 км. Предмет может перемещаться вдоль горизонта вправо и влево от своего начального положения на 1050 м. Прибор должен позволять отчетливо различать перемещения на расстояние 6 м (подобно тому, как видны невооруженному глазу деления линейки ценой 0,75 мм с расстояния 250 мм). Диаметр выходного зрачка  $D' = 3$  мм, длина трубы без оборачивающей системы с линейным увеличением  $\beta_{об.с} = -1\times$  составляет  $L = 220$  мм.

7.17. Наблюдение с помощью бинокля Б  $8\times 40$  ведется за предметами, расположенными на расстоянии 3 км от наблюдателя. Определить глубину изображаемого пространства, если диаметр зрачка глаза составляет: а)  $D_{г.л} = 3$  мм; б)  $D_{г.л} = 5$  мм, а угловой предел разрешения глаза  $\psi_{г.л} = 3'$ . Начиная с какого расстояния все предметы будут наблюдаться как расположенные в бесконечности? Чему равен радиус стереоскопического восприятия, если база прибора  $B = 125$  мм, а угловой порог стереоскопического восприятия равен  $10''$ ?

7.18. Зрительная труба с электронно-оптическим преобразователем имеет видимое увеличение  $\Gamma_T = 4,4\times$ , длину  $L = 250$  мм и угловые поля  $2\omega = 6^\circ$ ,  $2\omega' = 25,97^\circ$ . Определить значения фокусных расстояний объектива и окуляра, а также диаметры фотокатода  $D_{фк}$  и экрана  $D_{эк}$ , если линейное увеличение электронно-оптического преобразователя  $\beta_э = -0,6\times$  и  $L_э = 40$  мм. На каком расстоянии от тонкого окуляра должен быть расположен глаз наблюдателя, если диаметр глазной линзы окуляра равен 13,2 мм, а  $D' = 4$  мм?

7.19. Зрительная труба с линзовой симметричной оборачивающей системой имеет:  $\Gamma_T = 12\times$ ;  $f_{ок} = 25$  мм;  $s_{f',ок} = 15,2$  мм;  $s_{f,ок} = -7,5$  мм;  $D' = 4$  мм;  $L = 300$  мм;  $k_\omega = 0,8$ ;  $2\omega_1 = 5^\circ$ ;  $a_p = -15$  мм. Вычислить конструктивные данные.

7.20. Рассчитать зрительную трубу Галилея, видимое увеличение которой  $\Gamma_T = 2,5\times$ , угловое поле  $2\omega = 5^\circ$ , диаметр выходного зрачка  $D' = 3$  мм,  $a_p' = 15$  мм,  $L = 36$  мм.

7.21. Вычислить радиусы кривизны телескопической линзы, изготовленной из стекла с показателем преломле-



## 7.1. Основные характеристики объективов и окуляров

Объективы					Окуляры				
№ по пор.	$f'$ , мм	1:K	$2\omega^\circ$	$D_{об}$ , мм	№ по пор.	$f'$ , мм	$2\omega'^\circ$	$s'_{F''}$ , мм	$s'_{P''}$ , мм
1	125	1:8	7	15,625	1	30	35	23,5	29,5
2	146,25	1:10	9	14,625	2	25	40	9,0	13,76
3	150	1:6	7,5	25	3	29,25	45	27,1	32,5

ния  $n = 1,5$ , если видимое увеличение  $\Gamma_T = -2\times$ , а длина системы  $L = d = 54$  мм.

7.22. Вычислить радиусы кривизны телескопической линзы при  $\Gamma_T = 2\times$  (см. условия задачи 7.21).

7.23. Какие из объективов и окуляров, основные характеристики которых приведены в табл. 7.1, наилучшим образом соответствуют телескопической системе с  $\Gamma_T = -5\times$ ,  $2\omega = 7^\circ$  и  $D' = 3$  мм? Принять  $k_\omega = 1$ . Входной зрачок системы может совпадать с оправой объектива или быть вынесенным вперед перед объективом на расстояние не более 6 мм.

7.24. Какой из окуляров, основные характеристики которых приведены в табл. 7.1, наилучшим образом подходит для телескопической системы с видимым увеличением  $\Gamma_T = -5\times$ , при  $a_P = 0$ , если  $\Delta z_P = 0$ , а  $f_{об} = 125$  мм?

## 7.2. Основные характеристики и размеры объективов и окуляров

Объективы						
№ по пор.	$f'$ , мм	1:K	$2\omega^\circ$	$\Sigma d$ , мм	$-s_F$ , мм	$s'_{F''}$ , мм
1	179,9	1:5	10	13,68	178,29	172,87
2	150	1:6	6	9,3	147,3	139,91
3	120	1:4	7	9,6	118,3	117,8
Окуляры						
№ по пор.	$f'$ , мм	$2\omega'^\circ$	$\Sigma d$ , мм	$-s_F$ , мм	$s'_{P''}$ , мм	$s'_{P''}$ , мм
1	30,1	45	42	9,6	27,5	33,5
2	25	45	31	7,4	9,1	13,2
3	20	40	15,1	14,9	14,9	18,23

7.25. Определить удаление выходного зрачка для телескопической системы, имеющей видимое увеличение  $\Gamma_T = -5\times$ , если  $f'_{\text{об}} = 125$  мм,  $\Delta z_P' = -2$  мм и  $a_P = 0$ . Данные по окулярам взять из табл. 7.1.

7.26. Рассчитать телескопические очки, образованные монокулярами, построенными по схеме Галилея с двукратным увеличением, при длине системы  $L = 25$  мм,  $a_P' = 25$  мм. Определить смещение окуляра, компенсирующего недостатки глаз, имеющих: а) дальнорукость 3 дптр, б) близорукость 3 дптр.

7.27. Используя условие задачи 7.26, определить расстояния между объективом и окуляром, которые обеспечиваются механизмом перемещения, если  $\bar{A}_d = \pm 5$  дптр. Как изменится расстояние между объективом и окуляром, если с помощью рассчитанных очков рассматривать предметы, расположенные от объектива на расстоянии 450 мм?

7.28. Вычислить положение входного зрачка в трубе Галилея, состоящей из тонкого объектива с фокусным расстоянием  $f'_{\text{об}} = 90$  мм и тонкого окуляра с фокусным расстоянием  $f'_{\text{ок}} = -30$  мм, если глаз удален от окуляра на расстояние  $a_P' = 12,6$  мм,  $\Delta z_P' = 0$ . Какое угловое поле будет иметь труба, если относительное отверстие объектива  $D/f'_{\text{об}} = 1:5$ , а коэффициент виньетирования  $k_\omega = 0,5$ ?

7.29. По данным, приведенным в табл. 7.2, подобрать (не пересчитывая) объектив и окуляр для зрительной трубы Кеплера с видимым увеличением  $\Gamma_T = -6\times$ , угловым полем  $2\omega = 6^\circ$ , диаметром выходного зрачка  $D' = 5$  мм,  $\Delta z_P' = 0$ , если допускаемое отклонение относительного изменения видимого увеличения не должно превышать 2 %, т. е.  $\frac{\Delta \Gamma_T}{\Gamma_T} \times 100 \% \leq 2 \%$ .

Определить расстояние между объективом и окуляром ( $d_3 = ?$ ) и полную длину системы ( $\Sigma d + s_P' = ?$ ).

7.30. Телескопическая система, состоящая из зрительной трубы с видимым увеличением  $\Gamma_T = 10\times$  и насадки, выполненной в виде трубы Галилея, может иметь три ступени увеличения: 20, 10 и  $5\times$ . Определить: а) при каких положениях насадки это достигается? б) какие значения должно иметь видимое увеличение насадки? в) какое фокусное расстояние должен иметь объектив насадки, если известно, что входной зрачок зрительной трубы удален от объектива трубы на  $a_{P \text{ зр. тр}} = -20$  мм, а последний компонент насадки может быть расположен не ближе 4 мм от объектива зрительной трубы?

7.31 Два компонента с фокусными расстояниями  $f'_1 = 100$  мм и  $f'_2 = 20$  мм, образуют панкратический объектив телескопической системы. Наименьшее допустимое расстояние между компонентами  $d = 10$  мм, а эквивалентная фокальная плоскость не может быть расположена на расстоянии ближе 10 мм от второго компонента. Определить возможный перепад увеличений в системе.

7.32. В призмённом монокуляре с видимым увеличением  $\Gamma_T = 4\times$  для оборачивания изображения применяется призма АкР-90°, изготовленная из стекла БК10 ( $\lambda_e$ ). Монокуляр имеет следующие значения характеристик:  $f'_{об} = 80$  мм,  $1 : f'_{об}/D = 1 : 4$ ,  $2\omega = 6^\circ$ ,  $a_P = -5$  мм,  $k_\omega = 0,5$ . Определить, какая из поверхностей призмы должна иметь наибольший диаметр сечения проходящего светового пучка, если  $A_d = 15$  дптр? На каких расстояниях от поверхностей призмы должны располагаться объектив и плоскость изображения?

7.33. Рассчитать зрительную трубу с симметричной оборачивающей системой и со следующими значениями характеристик:  $\Gamma_T = 10\times$ ;  $2\omega = 5^\circ$ ;  $D' = 4$  мм;  $L = 400$  мм;  $k_\omega = 0,8$ ;  $a_P = -12$  мм;  $f'_{ок} = 20$  мм;  $s'_{F', ок} = 9,3$  мм;  $s_{F, ок} = -6,7$  мм.

7.34. Вычислить фокусные расстояния, диаметры и угловые поля тонких объектива и окуляра для зрительной трубы с электронно-оптическим преобразователем, если  $\Gamma_T = 5\times$ ;  $\beta_a = -0,6\times$ ;  $D_{фк} = 20$  мм;  $L_a = 36$  мм;  $L = 260$  мм;  $a_P = 0$ ;  $a'_P = 12$  мм;  $D = 30$  мм.

## ГЛАВА 8

### ФОТООБЪЕКТИВ И ОПТИКА ПЕРЕДАЮЩИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР

Приведем формулы, необходимые при решении задач данной главы.

Масштаб съемки, равный абсолютному значению линейного увеличения, определяется выражением

$$|\beta| = \left| -\frac{L}{2f'} \left( 1 - \sqrt{1 - 4 \frac{f'}{L}} \right) + 1 \right|,$$

где  $L$  — дистанция съемки — расстояние от плоскости предмета до плоскости пленки;

$$L = f' \left( 2 - \beta - \frac{1}{\beta} + \frac{\Delta_{HH'}}{f'} \right). \quad (8.1)$$

Здесь  $\Delta_{HH'}$  — расстояние между главными точками объектива. Поскольку  $\Delta_{HH'} \ll L$ , то в предлагаемых задачах величиной  $\Delta_{HH'}$  пренебрегаем.

Подвижка объектива для фокусировки на конечные дистанции (фокусирующая подвижка) относительно положения, соответствующего бесконечно удаленному предмету, выражается формулой

$$z' = \frac{L}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4f'}{L}} \right) - f'. \quad (8.2)$$

Угловое поле объектива  $2\omega$  определяется размерами кадра  $a \times b$  и фокусным расстоянием  $f'$ :

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f'}.$$

Глубину резкости можно найти по допустимому диаметру  $\delta'$  кружка рассеяния лучей, вызванного расфокусировкой. Глубина резкости в пространстве изображений относительно плоскости наводки составляет  $\Delta z' = \pm K\delta'$ . Положение переднего плана относительно плоскости пленки

$$L_1 = \frac{(z' + \Delta z' + f')^2}{z' + \Delta z'}.$$

Положение заднего плана относительно плоскости пленки

$$L_2 = \frac{(z_1 - \Delta z' + f')^2}{z' - \Delta z'}.$$

Сдвиг изображения подвижных предметов за время экспонирования составляет

$$\delta l' = v |\beta| t,$$

где  $v$  — скорость движения объекта в направлении, перпендикулярном к оптической оси.

Фотографическую разрешающую способность  $N_\Phi$  объектива можно найти по формуле

$$\frac{1}{N_\Phi} = \frac{1}{N_o} + \frac{1}{N_c},$$

где  $N_o$  — визуальная разрешающая способность объектива;  $N_c$  — разрешающая способность слоя фотоматериала.

Разрешающая способность телевизионной системы (без учета объектива)

$$N_T = 0,46 \frac{n_z}{h_\Phi},$$

где  $n_z$  — число строк развертки (для широковещательного телевидения СССР  $n_z = 625$ );  $h_\Phi$  — высота рабочей поверхности фотокаатода.

Разрешающая способность передающей телевизионной головки с учетом объектива  $N_r$

$$\frac{1}{N_r} = \frac{1}{N_o} + \frac{1}{N_T}. \quad (8.3)$$

Освещенность фотографического изображения

$$E'_v = \frac{\tau \pi L_v}{4K^2 (1 - \beta^2)},$$

где  $\tau$  — коэффициент пропускания объектива.

Световая экспозиция

$$H_v = E'_v t.$$

Выдержка

$$t = \frac{10}{SE'_v} = \frac{40K^2 (1 - \beta)^2}{S \tau \pi L_v},$$

где  $S$  — светочувствительность фотоматериала в единицах ГОСТа.

## Задачи

8.1. Рассчитать шкалу дальности для фотоаппарата «ФЭД-микрон», снабженного объективом «Гелиос-89» с фокусным расстоянием 30 мм, для дистанций съемки 1; 1,5; 3; 5 и 10 м.

8.2. Рассчитать шкалу дальности для фотоаппарата «ЛОМО-135», снабженного объективом «Индустар-73» с фокусным расстоянием 40 мм, для дистанций съемки 1; 1,2; 1,5; 2; 3; 5 и 10 м.

8.3. Необходимо провести съемку с экрана телевизора (диагональ экрана 23 см) так, чтобы изображение диагонали экрана покрыло диагональ кадра  $24 \times 36$  мм фотоаппарата

«Зенит-Е», снабженного объективом «Гелиос-44» с фокусным расстоянием 58 мм. Минимальная дистанция съемки этим объективом 0,55 м. Определить дистанцию съемки. Осуществима ли съемка без применения удлинительных колец?

8.4. Определить фокусирующую подвижку объектива «Гелиос-44», если минимальная дистанция съемки составляет 0,55 м.

8.5. Определить фокусирующую подвижку объектива «Гелиос-89» ( $f' = 30$  мм), если минимальная дистанция съемки составляет 1 м.

8.6. Рассчитать удлинительное кольцо для объектива «Гелиос-44», обеспечивающего съемку в диапазоне от 0,55 м до дистанции, обеспечиваемой фокусировкой объектива. Фокусирующая подвижка объектива определяется минимальной дистанцией съемки, равной 0,55 м.

8.7. Фотоаппарат «ФЭД-микрон» снабжен объективом «Гелиос-89» (формат кадра  $18 \times 24$  мм). Фотоаппараты ЛОМО-135М и «Зенит-Е» имеют формат кадра  $24 \times 36$  мм и снабжены соответственно объективами «Индустар-73» ( $f' = 40$  мм) и «Гелиос-44» ( $f' = 58$  мм). Какой из трех аппаратов обладает максимальным угловым полем?

8.8. Какова минимальная дистанция съемки портрета человека с помощью объектива «Гелиос-40» ( $f' = 85$  мм) фотоаппаратом «Зенит-Е»? Высоту объекта съемки взять равной 30 см. Принять во внимание, что размер поля изображения видоискателя составляет  $20 \times 28$  мм.

8.9. Необходимо сфотографировать здание шириной 100 м и высотой 15 м. Максимальная дистанция съемки, определяемая шириной улицы, составляет 80 м. В распоряжении фотографа имеются фотоаппарат «Зенит-Е» и набор объективов: «Мир-32» ( $f' = 24$  мм), «Мир-20» ( $f' = 20$  мм), «Мир-1» ( $f' = 37$  мм) и «Гелиос-44» ( $f' = 58$  мм). Какой объектив гарантирует получение снимка всего здания? Каким объективом необходимо воспользоваться, принимая во внимание, что размер поля изображения видоискателя составляет  $20 \times 28$  мм?

8.10. Выбрать объектив для съемки здания (см. условия предыдущей задачи) фотоаппаратом «Зоркий-4» (формат кадра  $24 \times 36$  мм; снабжен телескопическим визиром) из следующего набора: «Юпитер-8» ( $f' = 50$  мм), «Юпитер-12» ( $f' = 35$  мм), «Орион-15» ( $f' = 28$  мм).

8.11. Фотоаппаратом «Зенит-Е» с объективом «Гелиос-44» необходимо сфотографировать машинописный текст форматом  $250 \times 180$  мм, без применения удлинительных колец.

Весь текст должен просматриваться в видоискателе с размером поля изображения  $20 \times 28$  мм. Определить дистанцию и масштаб съемки, а также высоту изображения букв на пленке, если высота букв текста составляет 2,2 мм.

8.12. Установлено, что максимальная выдержка при съемке с рук малоформатными аппаратами (размер кадра  $24 \times 36$  мм) со штатными объективами с фокусными расстояниями  $f' = 40 \div 58$  мм, составляет  $1/30$  с. Определить максимальную выдержку при съемке следующими объективами: «Вега-13» ( $f' = 100$  мм), «Телемар-22» ( $f' = 200$  мм) и «Тайр-3» ( $f' = 300$  мм).

8.13. Аэрофотографирование ведется с самолета, лежащего на высоте 5000 м со скоростью 450 км/ч, фотоаппаратом с объективом, имеющим  $f' = 300$  мм. Допустимый сдвиг изображения за время экспонирования составляет 0,03 мм. Какова максимальная выдержка?

8.14. Велосипедист едет со скоростью 40 км/ч. Его необходимо сфотографировать с расстояния 25 м под прямым углом к траектории его движения без заметного смазывания изображения с помощью объектива с фокусным расстоянием 58 мм. Последующее увеличение негатива при печати  $4\times$ . Объектив при съемке должен оставаться неподвижным. Какова максимальная выдержка?

8.15. Для определения точной траектории движения искусственного спутника Земли ведется его фотографирование с помощью неподвижного телескопа с объективом, имеющим  $f' = 1000$  мм. Спутник пролетает в зените над телескопом на высоте 200 км со скоростью 7,8 км/с. Определить максимальную выдержку, при которой сдвиг изображения не превышает 0,02 мм.

8.16. Фотографирование выполнено объективом с фокусным расстоянием  $f' = 58$  мм на формат кадра  $24 \times 36$  мм. Какое увеличение необходимо получить при печати негатива для того, чтобы при рассматривании отпечатка с расстояния 250 мм создалось естественное впечатление? Какой формат бумаги можно использовать при печати:  $9 \times 12$ ,  $9 \times 14$ ,  $10 \times 15$  см?

8.17. Фотографирование выполнено аппаратом «Киев-30», снабженным объективом с фокусным расстоянием 23 мм, на формат кадра  $13 \times 17$  мм. В описании к фотоаппарату сказано, что хорошие снимки можно получить при формате отпечатка  $9 \times 12$  см. Будет ли при этом обеспечено естественное впечатление? Если нет, то какой формат отпечатка необходим для этого?

8.18. С какого максимального расстояния и в каком масштабе можно сфотографировать газетный текст (высота букв 1,5 мм) объективом с фокусным расстоянием 58 мм и фотографической разрешающей способностью в пределах кадра не хуже  $20 \text{ мм}^{-1}$ ?

8.19. Какую фотографическую разрешающую способность должен иметь объектив, который позволил бы сфотографировать на кадр  $24 \times 36 \text{ мм}$  машинописную страницу с высотой букв текста 2,2 мм? Определить фокусное расстояние объектива, если расстояние от текста форматом  $300 \times 210 \text{ мм}$  до плоскости изображения составляет 600 мм.

8.20. С какого максимального расстояния можно сфотографировать машинописный текст с высотой букв 2,2 мм с применением объектива МТО-1000 ( $f' = 1000 \text{ мм}$ ). Фотографическая разрешающая способность на краю кадра составляет  $18 \text{ мм}^{-1}$ . Разместится ли вся машинописная страница на кадре  $24 \times 36 \text{ мм}$ ? Принять во внимание, что площадь страницы, заполненная текстом, составляет  $180 \times 250 \text{ мм}$ .

8.21. Объективом «Гелиос-44» ( $f' = 58 \text{ мм}$ ) на формат кадра  $24 \times 36 \text{ мм}$  выполнено фотографирование экрана телевизора размером  $360 \times 480 \text{ мм}$ . Фотографическая разрешающая способность объектива в центре кадра составляет  $40 \text{ мм}^{-1}$ , разрешающая способность на экране телевизора в центре кадра — 500 телевизионных строк (вдоль строки). Какая разрешающая способность будет получена на негативе?

8.22. Передающая камера для учебного телевидения с размером светочувствительной мишени  $9 \times 12 \text{ мм}$  предназначена для передачи рукописного текста, написанного лектором на доске. Расстояние от доски до объектива камеры 7 м. Число строк разложения 625. Разрешающая способность объектива  $60 \text{ мм}^{-1}$ . Высоту букв на доске принять равной 100 мм. Определить фокусное расстояние объектива телевизионной камеры, обеспечивающее одновременно четкую передачу текста и захват доски размером  $2 \times 1,2 \text{ м}$ .

8.23. Объектив «Юпитер-8» ( $f' = 50 \text{ мм}$ ) установлен на дистанцию съемки  $L = 4 \text{ м}$ . Найти передний и задний планы при диафрагменном числе  $K = 5,6$  и диаметре пятна рассеяния  $\delta' = 0,04 \text{ мм}$ .

8.24. Объективом «Индустар-69» ( $f' = 28 \text{ мм}$ ) необходимо сфотографировать пространство от 3 м до бесконечности. Определить диафрагменное число и дистанцию фокусировки, если  $\delta' = 0,03 \text{ мм}$ .



8.25. Определить «начало бесконечности» при съемке объективом «Юпитер-8» ( $f' = 50$  мм) при  $K = 11; 8; 5,6; 4$  и  $2$ , полагая  $\delta' = 0,04$  мм.

8.26. Сравнить глубину резкости при съемке фотоаппаратами «Зенит-Е» с объективом «Гелиос-44» и «ФЭД-микрон» с объективом «Гелиос-89» ( $f' = 30$  мм) при одинаковых условиях:  $K = 2$ ,  $L = 3$  м. Диаметр пятна рассеяния принять в первом случае  $\delta' = 0,04$  мм, а во втором —  $\delta' = 0,03$  мм.

8.27. Фотоаппарат «ЛОМО-компакт» имеет формат кадра  $24 \times 36$  мм и снабжен объективом «Минитар» ( $f' = 32$  мм). Определить передний план при установке объектива на гиперфокальное расстояние. Сравнить полученные значения с аналогичными значениями для фотоаппарата ФЭД-2, снабженного объективом «Индустар-26М» ( $f' = 52$  мм). Какими преимуществами на основании приведенных данных обладает фотоаппарат «ЛОМО-компакт» по сравнению с фотоаппаратом «ФЭД-2»?

8.28. При каком диафрагменном числе необходимо провести съемку фотоаппаратом «ЛОМО-компакт» с объективом «Минитар» ( $f' = 32$  мм), чтобы передний план располагался на расстоянии  $2,5$  м, а задний план — на бесконечности. Принять диаметр пятна рассеяния  $\delta' = 0,04$  мм. Определить дистанцию фокусировки.

8.29. Определить разрешающую способность в центре поля для передающей телевизионной головки, снабженной объективом ОКС1-10 и видеоконсом ЛИ-415 с размерами фотокатода  $9,5 \times 12,7$  мм. Фотографическая разрешающая способность объектива в центре поля составляет  $65 \text{ мм}^{-1}$ . Разрешающая способность пленки КН-1 составляет  $140 \text{ мм}^{-1}$ . Число строк разложения  $n_z = 625$ .

8.30. Определить визуальную разрешающую способность объектива передающей телевизионной головки, снабженной трубкой типа суперортикон ЛИ-17 с размерами фотокатода  $24 \times 32$  мм, которая обеспечивает удовлетворительную по качеству передачу текста с высотой букв  $2,2$  мм. Высота страницы текста  $100$  мм.

8.31. Определить минимальную светочувствительность фотографического материала, обеспечивающего нормальную световую экспозицию при съемке изображения с экрана телевизора размером  $360 \times 480$  мм и яркостью  $40 \text{ кд/м}^2$  на кадр  $24 \times 36$  мм с помощью объектива с  $K = 2$  и коэффициентом пропускания  $\tau = 0,8$ .

8.32. Определить выдержку при фотографировании Луны объективом МТО-1000 ( $K = 10$ ) при использовании фото-

графической пленки «Фото-32» ( $S = 32$  единиц ГОСТа). Яркость поверхности Луны  $2500 \text{ кд/м}^2$ . Коэффициент пропускания объектива  $\tau = 0,6$ .

8.33. Передающая телевизионная трубка типа видикон ЛИ-415 нормально работает при рабочей освещенности фотокатода, равной 10 лк. Определить яркость объекта, расположенного на большом расстоянии от камеры, необходимую для получения рабочей освещенности фотокатода при использовании объектива с  $K = 2$  и  $\tau = 0,7$ .

8.34. Определить теоретическое предельно возможное значение диафрагменного числа для фотообъектива при выполненном условии синусов.

8.35. Для негативной фотопленки «Фото-32» коэффициент передачи контраста при  $N = 40 \text{ мм}^{-1}$  составляет  $T = 0,65$  и при  $N = 30 \text{ мм}^{-1}$  —  $T = 0,75$ . У объектива «Гелиос-44» в центре поля при тех же пространственных частотах коэффициент передачи контраста соответственно равен 0,55 и 0,65. Определить контраст фотографического изображения миры, у которой контраст составляет 0,5 при указанных выше пространственных частотах.

8.36. Определить коэффициент передачи контраста телевизионной головки для предельной частоты, соответствующей 625 телевизионным строкам, если в ней использованы объектив «Мир-10Т», коэффициент передачи контраста которого определяется по приближенной формуле  $T \approx 1 - 0,0125 N$ , и телевизионная трубка ЛИ-17 с высотой рабочей поверхности фотокатода 24 мм и  $T = 0,15$  для предельной частоты.

## ГЛАВА 9

### ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ И ПРОЕКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

Приведем формулы, необходимые при решении задач этой главы.

Сила света источника

$$I_v \approx \frac{\Phi_v}{2\pi},$$

где  $\Phi_v$  — световой поток.

Габаритная яркость источника света

$$L_v \approx \frac{\Phi_v}{4\pi Q},$$

где  $Q$  — площадь проекции светящегося тела на плоскость, перпендикулярную к оптической оси.

Дистанция оформления светового пучка прожектора, начиная с которой освещенность становится функцией расстояния  $\rho$ ,

$$\rho_0 = \frac{D}{d} f',$$

где  $D$  — диаметр выходного зрачка прожектора;  $d$  — диаметр светящегося тела источника света;  $f'$  — фокусное расстояние оптической системы прожектора.

Освещенность, создаваемая прожектором на расстоянии  $\rho$  от него,

$$E_v = \tau_a \frac{I_{v, \text{пр}}}{\rho^2},$$

где  $\tau_a$  — коэффициент пропускания атмосферы;  $I_{v, \text{пр}} = I_v \tau_{o.c} (D/d)^2$ ;  $\tau_{o.c}$  — коэффициент пропускания оптической системы.

Освещенность в плоскости изображения

$$E_v = \pi L_v \tau_{o.c} \sin^2 \sigma'_A,$$

где  $L_v$  — габаритная яркость источника света;  $\sigma'_A$  — апертурный угол оптической системы в пространстве изображений.

Для осветительных систем, являющихся составной частью проектора, с точностью до соблюдения закона синусов справедлив инвариант

$$I = \sin \sigma_K d = \sin \omega D,$$

где  $\sigma_K$  — апертурный угол конденсора;  $d$  — диаметр светящегося тела источника света (если светящееся тело имеет прямоугольную форму, то  $d$  — меньший из двух размеров);  $\omega$  — половина угла поля объектива.

Для осветительных систем, являющихся составной частью микроскопа, с точностью до соблюдения закона синусов справедлив следующий инвариант:

$$I = \sin \sigma_{\text{кол}} d = 2y A_{\text{об}},$$

где  $\sigma_{\text{кол}}$  — апертурный угол коллектора — детали осветительной системы, расположенной у источника света;  $2y$  — линейное поле объектива микроскопа;  $A_{\text{об}} = n \sin \sigma_A$  — числовая апертура объектива микроскопа.

## Задачи

9.1. Конденсор, в передней фокальной плоскости которого расположено светящееся тело ртутной лампы ДРШ-500М, используется в установке контактной печати. Световой диаметр конденсора 100 мм. Расстояние пластины со светочувствительным материалом от задней главной плоскости конденсора составляет 100 мм. Габаритная яркость дуги лампы  $130 \text{ Мкд/м}^2$ , а диаметр светящегося тела  $d = 4,5 \text{ мм}$ . Определить фокусное расстояние конденсора и освещенность в плоскости светочувствительного материала, если допустимый угол расходимости лучей  $2\omega = 1^\circ$ . Коэффициент пропускания конденсора принять равным  $\tau_{\text{о.с}} = 0,8$ . Изменится ли освещенность, если пластину со светочувствительным материалом расположить на расстоянии 150 мм от задней главной плоскости конденсора?

9.2. Определить освещенность, создаваемую ртутной лампой ДРШ-500М (данные приведены в задаче 9.1), на расстоянии  $p = 500 \text{ мм}$  от светящегося тела без оптической системы. Во сколько раз возрастет освещенность в той же плоскости, если светящееся тело лампы поместить в переднюю фокальную плоскость конденсорной линзы с  $f' = 100 \text{ мм}$ ? Потерями света в линзе пренебречь.

9.3. Светящееся тело лампы накаливания размером  $2,8 \times 2 \text{ мм}$  проецируется на экран линзой со световым диаметром 30 мм. Расстояние экрана от линзы составляет 5000 мм. Полный световой поток лампы 250 лм. Определить освещенность изображения. Потерями света в линзе пренебречь. Зависит ли освещенность изображения от фокусного расстояния линзы, т. е. от линейного увеличения?

9.4. Изображение Солнца сфокусировано на листе бумаги с помощью линзы с фокусным расстоянием 50 мм и световым диаметром 10 мм. Определить диаметр изображения, пренебрегая aberrациями, и освещенность, полагая яркость Солнца, равной  $1,5 \times 10^9 \text{ кд/м}^2$ , а его угловой диаметр  $2\omega = 30'$ , коэффициент пропускания линзы  $\tau_{\text{о.с}} = 0,9$ .

9.5. В прожекторе используется дуговая ксеноновая лампа типа ДКСШ 3000-3 с полным световым потоком

105 клм, светящееся тело которой имеет форму круга с диаметром 4,3 мм. Диаметр выходного зрачка прожектора  $D = 500$  мм;  $\tau_{o.c} = 0,8$ ;  $\tau_a = 0,75$ . Определить освещенность на расстоянии 5000 м от прожектора, принимая во внимание, что фокусное расстояние оптической системы равно 1000 мм.

9.6. Определить освещенность, создаваемую прожектором (см. условия задачи 9.5), на расстояниях 50 и 100 м.

9.7. В прожекторе использован источник с силой света  $I_v = 1000$  кд, диаметр которого  $d = 10$  мм. Диаметр выходного зрачка прожектора  $D = 200$  мм, коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Определить световой поток, падающий от прожектора на приемную площадку размером  $10 \times 10$  мм, расположенную от прожектора на расстоянии  $p = 100$  м. Фокусное расстояние оптической системы  $f' = 250$  мм.

9.8. Прожектор имеет источник света диаметром  $d = 5$  мм. Полный световой поток составляет 6000 лм. Определить диаметр выходного зрачка прожектора, при котором освещенность, создаваемая на расстоянии  $p = 1$  км, была бы равна 2 лк. Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ , атмосферы  $\tau_a = 0,5$ .

9.9. Оптическая система фотоувеличителя состоит из лампы накаливания, матированная поверхность колбы которой имеет яркость  $2500$  кд/м<sup>2</sup>, конденсора и объектива «Индустар-50У». Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,6$ . Фокусное расстояние объектива составляет 52 мм. Определить освещенность фотографической бумаги на столе увеличителя при диафрагменных числах объектива  $K = 3,5$  и  $K = 5,6$ , если формат отпечатка составляет  $12 \times 18$  см, а формат негатива  $24 \times 36$  мм. Выходной зрачок объектива совпадает с задней главной плоскостью.

9.10. В диапроекторе используется лампа К220-100 с размером проекции светящегося тела  $8 \times 8$  мм и световым потоком 1650 лм. Объектив проектора имеет  $f' = 80$  мм и  $K = 4$ . Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,7$ . Определить освещенность экрана, расположенного на расстоянии 3 м от объектива проектора.

9.11. Определить угол охвата конденсора диапроектора (см. условия задачи 9.10), приняв во внимание, что формат кадра равен  $24 \times 36$  мм.

9.12. В диапроекторе используется галогенная лампа КГМ12-200 с размером проекции светящегося тела  $4,5 \times 4,5$  мм и световым потоком 5000 лм. Определить диаметр выходного зрачка объектива, обеспечивающего получение освещенности экрана 200 лк, если расстояние экрана от объ-

ектива равно 3 м. Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,6$ .

9.13. Определить световой поток, выходящий из диапроектора (см. условия задачи 9.12), с учетом того, что формат кадра составляет  $24 \times 36$  мм, а фокусное расстояние объектива равно 100 мм. Определить также угол охвата конденсора диапроектора.

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

9.15. Определить освещенность экрана микропроектора, в котором используется галогенная лампа КГМ9-75 (габаритная яркость 30 Мкд/м<sup>2</sup>). В микропроекторе применяются сменные объективы  $10 \times 0,30$ ;  $40 \times 0,65$  и  $60 \times 0,95$ , а также проекционный окуляр  $10\times$ . Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,3$ .

9.16. Определить размер экрана при кинопроекции, на котором создается освещенность 100 лк. В кинопроекторе используется лампа К30-400 с габаритной яркостью 22 Мкд/м<sup>2</sup>. Объектив кинопроектора имеет  $f' = 80$  мм,  $K = 1,8$ . Коэффициент пропускания обтюлятора  $\tau_{об} = 0,5$ , а коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,7$ . Проектор предназначен для демонстрации обычных фильмов с форматом кадра  $20,7 \times 15,2$  мм.

9.17. В любительском кинопроекторе использована лампа К12-90 и объектив с  $f' = 18$  мм и  $K = 1,4$ . Световой поток лампы 2500 лм, а размеры проекции светящегося тела  $3,5 \times 4,5$  мм. Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,7$ , а обтюлятора —  $\tau_{об} = 0,5$ . Формат кадра  $4,5 \times 3,3$  мм. В осветительной системе кинопроектора установлен контротражатель в виде вогнутого сферического зеркала, увеличивающий полезный световой поток на 30%. Определить полезный световой поток при кинопроекции.

9.18. Определить полезный световой поток в кинопроекторе (см. условия задачи 9.17), если в нем использовать галогенную лампу КГМ12-200 с размером проекции светящегося тела  $4,5 \times 4,5$  мм и световым потоком 5000 лм.

9.19. Определить угол охвата конденсора кинопроектора, данные которого приведены в задаче 9.17.

9.20. Полезный световой поток диапроектора составляет 50 лм. Формат кадра  $24 \times 36$  мм. Определить размер экрана, на котором освещенность составляет 100, 50, 25 лк.

В оптических фотоэлектрических системах светочувствительную поверхность приемника часто устанавливают в плоскости изображения источника. При таком расположении приемника поток излучения, поступающий на светочувствительную поверхность, можно определить по одной из следующих формул:

$$\Phi'_e = \pi L_e \sin^2 \sigma'_A Q'_n, \quad (10.1)$$

где  $Q'_n$  — площадь изображения источника, которое вписывается в светочувствительную поверхность приемника;

$$\Phi'_e = \pi L_e \sin^2 \sigma'_A Q_{\text{пр}}, \quad (10.2)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  — площадь светочувствительной поверхности приемника, которая перекрывается изображением источника.

Для бесконечно удаленного источника формулы (10.1) и (10.2) соответственно имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi'_e &= \frac{\pi L_e}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 Q'_n; \\ \Phi'_e &= \frac{\pi L_e}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 Q_{\text{пр}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.3)$$

Если бесконечно удаленный источник имеет угловой размер  $2\omega$ , то размер его изображения

$$2y' = 2f' \operatorname{tg} \omega.$$

Для источника излучения, расположенного на конечном расстоянии, формулы (10.1) и (10.2) соответственно принимают вид:

$$\begin{aligned} \Phi'_e &= \frac{\pi L_e}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \frac{\beta_P^2}{(\beta_P - \beta)^2} Q'_n; \\ \Phi'_e &= \frac{\pi L_e}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \frac{\beta_P^2}{(\beta_P - \beta)^2} Q_{\text{пр}}, \end{aligned}$$

где  $\beta_P$  — линейное увеличение в зрачках;  $\beta$  — линейное увеличение в сопряженных плоскостях.

Линейный размер изображения источника, расположенного на конечном расстоянии,

$$y' = y\beta.$$

При расчете оптических фотоэлектрических систем, регистрирующих излучение звезд и планет, пользуются звездными величинами:

$$m = -2,5 \lg E_v - 13,89,$$

где  $m$  — звездная величина;  $E_v$  — освещенность, создаваемая звездой у границы земной атмосферы.

Соответствующая энергетическая освещенность от звезды

$$E_e = E_v / K,$$

где  $K$  — световая эффективность излучения звезды.

Световой поток, поступающий от звезды во входной зрачок оптической системы, определяется формулой

$$\Phi_v = \tau_a E_v \frac{\pi D^2}{4}. \quad (10.4)$$

В паспорте на приемник излучения обычно приводятся его интегральная чувствительность по световому потоку и относительная спектральная чувствительность (спектральная характеристика). Тогда абсолютная спектральная чувствительность

$$S(\lambda) = S_{\max} s(\lambda) = 680 s(\lambda) S \frac{\int v(\lambda) M_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int s(\lambda) M_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda}, \quad (10.5)$$

где  $S_{\max}$  — максимальная абсолютная спектральная чувствительность;  $s(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность;  $v(\lambda)$  — относительная спектральная световая эффективность излучения;  $M_{e,\lambda}(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической светимости источника.

Реакция приемника на поток излучения, поступающий на его светочувствительную поверхность, определяется выражением

$$i = S\Phi'_e.$$

## Задачи

10.1. Определить силу фототока, вырабатываемого приемником, при попадании на его светочувствительную поверхность излучения от точечного монохроматического источника с силой излучения  $I_e = 10 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$  и длиной волны



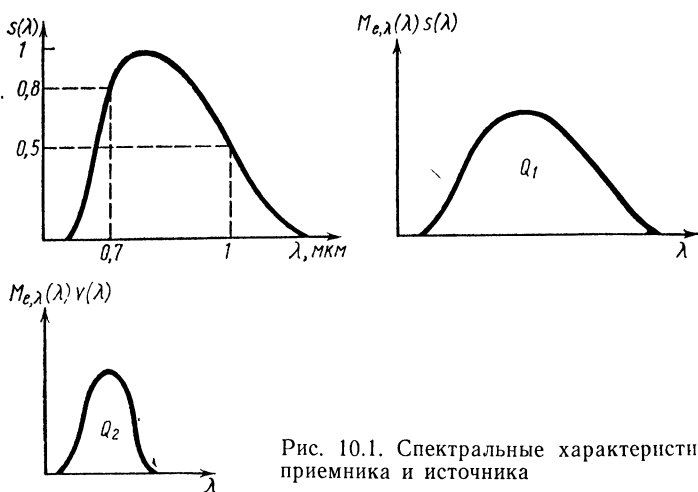


Рис. 10.1. Спектральные характеристики приемника и источника

$\lambda = 1,0$  мкм. Источник расположен от приемника на расстоянии  $r = 1$  м, угол падения лучей на поверхность приемника  $\varepsilon = 0$ . Максимальная спектральная чувствительность приемника  $S_{\max} = 10$  мА·Вт<sup>-1</sup>, площадь светочувствительной поверхности приемника  $Q_{\text{пр}} = 100$  мм<sup>2</sup>, спектральная характеристика приемника приведена на рис. 10.1.

10.2. Болометр имеет интегральную чувствительность  $S = 10$  В·Вт<sup>-1</sup> и площадь светочувствительной поверхности  $Q_{\text{пр}} = 4$  мм<sup>2</sup>. На расстоянии  $r = 2$  м от приемника расположен точечный источник. Угол падения лучей на приемник  $\varepsilon = 0$ . Найти силу света источника, если его световая эффективность  $K = 2$  лм·Вт<sup>-1</sup>, а болометр должен давать реакцию  $u = 2$  мВ.

10.3. На расстоянии  $r = 0,5$  м от приемника расположен точечный монохроматический источник, дающий излучение с длиной волны  $\lambda = 0,7$  мкм. Площадь светочувствительной поверхности приемника  $Q_{\text{пр}} = 10$  мм<sup>2</sup>, угол падения лучей на приемник  $\varepsilon = 0$ . Максимальная спектральная чувствительность приемника  $S_{\max} = 5$  мА·Вт<sup>-1</sup>, спектральная характеристика приведена на рис. 10.1. Определить силу излучения источника, если реакция приемника на излучение источника  $i = 0,16$  мкА.

10.4. В задней фокальной плоскости объектива, имеющего фокусное расстояние  $f' = 8000$  мм, относительное отверстие  $D/f' = 1:4$  и коэффициент пропускания  $\tau_{0,c} = 0,8$ , установлен болометр с интегральной чувствительностью  $S =$

$= 1000 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Определить реакцию болометра на излучение звезды второй звездной величины со световой эффективностью излучения  $K = 45 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , если коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

10.5. Оптическая фотоэлектрическая система регистрирует излучение звезд. Характеристики оптической системы: фокусное расстояние  $f' = 4000 \text{ мм}$ , относительное отверстие  $D/f' = 1:4$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . В задней фокальной плоскости оптической системы установлен болометр с интегральной чувствительностью  $S = 500 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Определить максимально возможную звездную величину звезды, регистрируемой фотоэлектрической системой, если коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ , световая эффективность излучения звезды  $K = 50 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , а болометр должен давать реакцию  $u = 2 \text{ мкВ}$ .

10.6. Определить относительное отверстие объектива с фокусным расстоянием  $f' = 1000 \text{ мм}$ , предназначенного для регистрации с помощью болометра излучения звезды первой звездной величины со световой эффективностью излучения  $K = 50 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Болометр установлен в задней фокальной плоскости объектива, имеет интегральную чувствительность  $S = 500 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и должен давать реакцию  $u = 0,2 \text{ мкВ}$ . Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ , атмосферы  $\tau_a = 0,72$ .

10.7. Звезда шестой звездной величины создает на поверхности Земли освещенность  $E_v = 8 \cdot 10^{-9} \text{ лк}$ . Излучение звезды регистрируется оптической фотоэлектрической системой, имеющей диаметр входного зрачка  $D = 1000 \text{ мм}$  и коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Определить интегральную чувствительность приемника, установленного в задней фокальной плоскости оптической системы, если реакция приемника на излучение звезды  $i = 0,05 \text{ мкА}$ .

10.8. В задней фокальной плоскости объектива с относительным отверстием  $D/f' = 1:1$ , диаметром входного зрачка  $D = 100 \text{ мм}$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$  установлен приемник излучения с интегральной чувствительностью  $S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 2 \text{ мм}$ . Найти реакцию приемника на световой поток от Луны яркостью  $L_v = 2500 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , если угловой размер Луны  $2\omega = 0,009$ , а коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

10.9. В задней фокальной плоскости объектива, имеющего фокусное расстояние  $f' = 120 \text{ мм}$ , диаметр входного зрачка  $D = 60 \text{ мм}$  и коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} =$

$= 0,8$ , установлен приемник с интегральной чувствительностью  $S = 100 \text{ мкА} \cdot \text{лм}^{-1}$ . Светочувствительная поверхность приемника круглая. Определить диаметр приемника и угловое поле объектива в пространстве предметов, если сила тока, вырабатываемого приемником при засветке его излучением от дневного неба яркостью  $L_v = 1,5 \cdot 10^4 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , должна составлять  $i = 10 \text{ мкА}$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

10.10. Луна имеет яркость  $L_v = 2500 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$  и угловой размер  $2\omega = 0,009$ . Излучение Луны регистрируется с помощью приемника, установленного в задней фокальной плоскости объектива. Приемник имеет интегральную чувствительность  $S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$  и диаметр светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 1 \text{ мм}$ . Какова будет реакция приемника на излучение от Луны, регистрируемое двумя различными объективами со соединяющими характеристиками: 1) фокусное расстояние  $f'_1 = 50 \text{ мм}$ ; диаметр входного зрачка  $D_1 = 50 \text{ мм}$ ; коэффициент пропускания  $\tau_{o.c1} = 0,6$ ; 2) фокусное расстояние  $f'_2 = 120 \text{ мм}$ ; диаметр входного зрачка  $D_2 = 60 \text{ мм}$ ; коэффициент пропускания  $\tau_{o.c2} = 0,8$ ? Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ .

10.11. Излучение бесконечно удаленного источника, имеющего угловой размер  $2\omega = 0,02$  и яркость  $L_v = 1000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , регистрируется оптической фотоэлектрической системой. Фокусное расстояние системы  $f' = 250 \text{ мм}$ , диаметр входного зрачка  $D = 100 \text{ мм}$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Приемник излучения с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 6 \text{ мм}$  установлен в задней фокальной плоскости. Определить интегральную чувствительность приемника, если его реакция на излучение источника  $i = 20,4 \text{ мкА}$ , а коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,6$ .

10.12. В задней фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f' = 100 \text{ мм}$  установлен приемник с интегральной чувствительностью  $S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 2 \text{ мм}$ . Приемник регистрирует излучения Луны яркостью  $L_v = 2500 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ . Угловой размер Луны  $2\omega = 0,009$ . Найти относительное отверстие объектива, при котором приемник вырабатывает ток  $i = 12 \text{ мкА}$ . Какова будет реакция приемника, если при этом же диаметре входного зрачка объектива его фокусное расстояние увеличить до  $300 \text{ мм}$ ? Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ , оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,6$ .

10.13. Излучение от источника размером  $b \times c = 20 \times 30 \text{ мм}^2$  регистрируется оптической фотоэлектрической системой, имеющей фокусное расстояние  $f' = 100 \text{ мм}$ , диаметр входного зрачка  $D = 40 \text{ мм}$ , диаметр выходного зрачка  $D' = 30 \text{ мм}$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Источник расположен на расстоянии —  $z = 500 \text{ мм}$  от переднего фокуса оптической системы. Приемник излучения с интегральной чувствительностью  $S = 10 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 3 \text{ мм}$  установлен в плоскости изображения источника. Определить яркость источника, если реакция приемника на его излучение составляет  $i = 8,82 \text{ мкА}$ . Поглощением излучения в атмосфере пренебречь.

10.14. Источник света яркостью  $L_v = 10^6 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$  и размером  $b \times c = 30 \times 40 \text{ мм}^2$  дает изображение после оптической системы. Излучение источника регистрируется приемником с интегральной чувствительностью  $S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 1 \text{ мм}$ . Приемник расположен в плоскости изображения источника. Определить реакцию приемника, если излучение источника регистрируется двумя различными оптическими системами со следующими характеристиками: 1) фокусное расстояние  $f'_1 = 100 \text{ мм}$ ; диаметр входного зрачка  $D_1 = 100 \text{ мм}$ ; коэффициент пропускания  $\tau_{o.c1} = 0,8$ ; 2) фокусное расстояние  $f'_2 = 200 \text{ мм}$ ; диаметр входного зрачка  $D_2 = 100 \text{ мм}$ ; коэффициент пропускания  $\tau_{o.c2} = 0,8$ . Расстояние от переднего фокуса оптической системы до источника —  $z = 5 \text{ м}$  для обоих случаев. Поглощением излучения в атмосфере пренебречь.

10.15. Оптическая фотоэлектрическая система с фокусным расстоянием  $f' = 80 \text{ мм}$ , диаметром входного зрачка  $D = 20 \text{ мм}$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{o.c} = 0,9$  создает изображение источника в натуральную величину на светочувствительной поверхности приемника. Линейное увеличение в зрачках оптической системы  $\beta_r = 1$ . Яркость источника  $L_v = 5 \cdot 10^5 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , диаметр источника  $d_{\text{и}} = 5 \text{ мм}$ . Определить интегральную чувствительность приемника, если диаметр его светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 4 \text{ мм}$ , а реакция на излучение источника  $i = 6,93 \text{ мкА}$ . Поглощением излучения в атмосфере пренебречь.

10.16. Источник излучения с энергетической яркостью  $L_e = 10 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  и диаметром  $d_{\text{и}} = 2 \text{ м}$  расположен на расстоянии —  $z_1 = 100 \text{ м}$  от переднего фокуса оптической системы. Фокусное расстояние оптической системы  $f' = 100 \text{ мм}$ , коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Излучение источника регистрируется болометром, установленным в

плоскости изображения источника. Болومتر имеет интегральную чувствительность  $S = 0,1 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и диаметр светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 3 \text{ мм}$ . Определить относительное отверстие оптической системы, при котором реакция болометра на излучение источника будет  $u = 1,57 \text{ мВ}$ . Какова будет реакция болометра, если источник будет находиться от переднего фокуса оптической системы на расстоянии —  $z_2 = 50 \text{ м}$ ? Коэффициент пропускания атмосферы на обоих расстояниях  $\tau_a = 0,8$ .

10.17. В задней фокальной плоскости оптической системы с относительным отверстием  $D/f' = 1:1$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{0.c} = 0,8$  установлен приемник излучения с интегральной чувствительностью  $S = 20 \text{ А} \cdot \text{лм}^{-1}$ . Диаметр светочувствительной поверхности приемника  $d_{\text{пр}} = 20 \text{ мм}$ . Найти реакцию приемника на излучение от ночного неба яркостью  $L_v = 10^{-4} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ , если коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,8$ . Какова будет реакция приемника на излучение ночного неба при отсутствии оптической системы?

10.18. Излучение Луны регистрируется оптической фотоэлектрической системой, имеющей фокусное расстояние  $f' = 160 \text{ мм}$ , относительное отверстие  $D/f' = 1:2$ , коэффициент пропускания  $\tau_{0.c} = 0,8$ . Приемник излучения установлен в плоскости изображения Луны и имеет интегральную чувствительность  $S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}$ , диаметр рабочей поверхности  $d_{\text{пр}} = 1,5 \text{ мм}$ . Найти яркость Луны, если ее угловой размер  $2\omega = 0,009$ , а реакция приемника на излучение Луны составляет  $i = 4 \text{ мкА}$ . Какова реакция приемника на излучение Луны без оптической системы?

10.19. Приемник излучения с интегральной чувствительностью  $S = 30 \text{ мкА} \cdot \text{лм}^{-1}$  регистрирует излучение монохроматического источника с длиной волны  $\lambda = 0,7 \text{ мкм}$ . Спектральная характеристика приемника и спектральные кривые, характеризующие излучение источника, с которым определялась интегральная чувствительность приемника, приведены на рис. 10.1. Площади, ограниченные кривыми  $M_{e,\lambda}(\lambda) s(\lambda)$  и  $M_{e,\lambda}(\lambda) v(\lambda)$ , построенными в одинаковых масштабах, составляют  $Q_1 = 250 \text{ мм}^2$ ,  $Q_2 = 50 \text{ мм}^2$ . Определить поток излучения, даваемый источником, если реакция приемника  $i = 1,64 \text{ мкА}$  и весь поток излучения от источника попадает на приемник.

10.20. Лазер дает поток излучения  $\Phi_e = 1 \text{ мВт}$  с длиной волны  $\lambda = 1 \text{ мкм}$ . Излучение лазера регистрируется приемником, характеристики которого приведены в задаче 10.19. Определить реакцию приемника на излучение лазера при

условии, что весь поток излучения лазера поступает на светочувствительную поверхность приемника.

10.21. Монохроматический источник излучения диаметром  $d_{\text{и}} = 0,2$  м с энергетической яркостью  $L_e = 100 \text{ Вт} \times \times \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  излучает на длине волны  $\lambda = 1$  мкм.

Излучение регистрируется оптической фотоэлектрической системой с фокусным расстоянием  $f' = 100$  мм, относительным отверстием  $D/f' = 1:1$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{0.c} = 0,8$ . Расстояние от переднего фокуса оптической системы до источника —  $z = 10$  м. В плоскости источника установлен приемник излучения, характеристики которого приведены в задаче 10.19. Диаметр светочувствительной поверхности приемника  $d_{\text{пр}} = 2,5$  мм. Определить реакцию приемника на излучение источника. Какова будет реакция, если в плоскости изображения источника установить болометр с интегральной чувствительностью  $S = 0,1 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 1$  мм? Поглощением излучения в атмосфере пренебречь. Линейное увеличение в зрчках оптической системы  $\beta_p = 1$ .

10.22. Излучение бесконечно удаленного монохроматического источника с длиной волны  $\lambda = 0,7$  мкм, имеющего энергетическую яркость  $L_e = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  и угловой размер  $2\omega = 0,02$ , регистрируется оптической фотоэлектрической системой с фокусным расстоянием  $f' = 200$  мм и коэффициентом пропускания  $\tau_{0.c} = 0,7$ . В плоскости изображения источника установлен приемник излучения, характеристики которого приведены в задаче 10.19, диаметр светочувствительной поверхности приемника  $d_{\text{пр}} = 2$  мм. Определить относительное отверстие оптической системы, при котором реакция приемника будет  $i = 0,114$  мкА. Найти реакцию приемника, если при таком же диаметре входного зрчка оптической системы ее фокусное расстояние будет  $f' = 80$  мм. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,2$ .

10.23. Тепловой источник в форме круглого плоского диска диаметром  $d_{\text{и}} = 20$  мм имеет температуру  $T = 1200$  К. Оптическая система с фокусным расстоянием  $f' = 60$  мм и диаметром входного зрчка  $D = 20$  мм проецирует изображение источника на светочувствительную поверхность приемника с линейным увеличением  $\beta = 0,2$ . Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{0.c} = 0,8$ , линейное увеличение в зрчках  $\beta_p = 1$ . Излучение источника регистрируется болометром с интегральной чувствительностью  $S = 1 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и диаметром светочувствительной поверхности

$d_{\text{пр}} = 3$  мм. Определить коэффициент теплового излучения источника, если реакция болометра на излучение источника  $u = 3,07$  мВ.

10.24. Излучение теплового источника, имеющего коэффициент теплового излучения  $\varepsilon = 0,54$  и диаметр  $d_{\text{и}} = 1$  м, регистрируется оптической системой. Характеристика оптической системы: диаметр входного зрачка  $D = 500$  мм, относительное отверстие  $D/f' = 1:2$ , коэффициент пропускания  $\tau_{\text{о.с}} = 0,8$ . Приемник излучения (болометр) расположен в плоскости изображения источника и имеет интегральную чувствительность  $S = 200$  мВ·Вт<sup>-1</sup>, диаметр светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 2$  мм. Определить температуру источника, если реакция приемника на его излучение  $u = 36$  мкВ, а расстояние от переднего фокуса оптической системы до источника —  $z = 200$  м. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_{\text{а}} = 0,6$ .

10.25. Определить основные характеристики оптической системы астрогида, предназначенного для слежения за планетой Венера, звездная величина которой  $m = -4,77$ , на фоне ночного неба яркостью  $L_{\text{в}} = 10^{-4}$  кд·м<sup>-2</sup>. Приемник излучения установлен в задней фокальной плоскости оптической системы и имеет интегральную чувствительность  $S = 20$  А·лм<sup>-1</sup>, диаметр светочувствительной поверхности  $d_{\text{пр}} = 20$  мм. Ток, вырабатываемый приемником при засветке излучением от Венеры, должен быть  $i_{\text{в}} = 5,62$  мкА, при засветке излучением от ночного неба  $i_{\text{н}} = 0,08$  мкА. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_{\text{а}} = 0,8$ , оптической системы  $\tau_{\text{о.с}} = 0,8$ . Считать, что интегральная чувствительность приемника одинакова для обоих излучателей.

## ГЛАВА 11

### ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ И ГОЛОГРАФИИ

Минимальный размер сечения лазерного пучка, называемый *перетяжкой*, определяется формулой

$$2y = 2 \sqrt{\frac{\lambda R_{\text{э}}}{2\pi}}, \quad (11.1)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера;  $R_{\text{э}}$  — эквивалентный конфокальный параметр лазерного пучка.

Плоский угол расходимости лазерного пучка, измеренный в радианах,

$$2\omega = 2 \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi R_0}} = \frac{2\lambda}{\pi y}. \quad (11.2)$$

Если энергия импульса излучения лазера  $Q_e$ , то поток излучения в импульсе

$$\Phi_e = Q_e/t, \quad (11.3)$$

где  $t$  — длительность импульса.

При прохождении лазерного пучка через оптическую систему этот пучок преобразуется. Положение изображения перетяжки преобразованного пучка относительно заднего фокуса оптической системы определяется по формуле

$$z' = - \frac{z}{\left(\frac{z}{f'}\right)^2 + \left(\frac{R_0}{2f'}\right)^2},$$

где  $z$  — расстояние от переднего фокуса оптической системы до перетяжки исходного пучка.

Конфокальный параметр преобразованного лазерного пучка

$$R'_0 = R_0 \frac{4f'^2}{4z^2 + R_0^2}. \quad (11.4)$$

Если излучение лазера сконцентрировано в изображении перетяжки, то энергетическая освещенность в этой плоскости

$$E'_e = \frac{\tau_{0.c} \Phi_e}{\pi y'^2}, \quad (11.5)$$

где  $2y'$  — размер изображения перетяжки преобразованного лазерного пучка.

Для уменьшения расходимости лазерного пучка применяют афокальную (телескопическую) систему, угловое увеличение которой определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{2y}{2y'} = - \frac{f'_1}{f'_2}, \quad (11.6)$$

где  $2\omega'$  — плоский угол расходимости преобразованного лазерного пучка.

В общем случае афокальная система имеет соответствующую дефокусировку компонентов.



Если лазер используется для облучения объекта как вторичного источника, то диаметр облученной поверхности определяется выражением

$$d_0 = 2\omega r, \quad (11.7)$$

где  $r$  — расстояние от лазера до объекта;  $2\omega$  — угол расходимости лазерного пучка в радианах.

Сила излучения лазера

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\pi\omega^2}, \quad (11.8)$$

а создаваемая им энергетическая освещенность на объекте

$$E_e = \tau_a \frac{I_e}{r^2}. \quad (11.9)$$

Если объект имеет коэффициент диффузного отражения  $\rho$ , то его энергетическая яркость, как вторичного источника, определяется по формуле (5.3).

## Задачи

11.1. Энергия импульса излучения рубинового лазера  $Q_e = 10$  Дж. Определить силу излучения и силу света лазера в импульсе, если длительность импульса  $t = 5$  мс, длина волны излучения  $\lambda = 0,6943$  мкм, а плоский угол расходимости лазерного пучка  $2\omega = 20'$ . При решении задачи воспользоваться данными прил. 1.4. Максимальная световая эффективность излучения  $K_m = 680$  лм·Вт<sup>-1</sup>.

11.2. Плоский угол расходимости лазера «Сигнал»  $2\omega = 3'$ . Определить фокусные расстояния компонентов афокальной системы типа трубы Галилея, при которых можно получать на поверхности Луны при ее облучении пятно диаметром  $d_{\text{л}} = 34,2$  км, если расстояние Земля — Луна  $p = 380\,000$  км. Длина афокальной системы  $L_c = 180$  мм.

11.3. Лазер дает поток излучения  $\Phi_e = 314$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,01$ . Определить фокусные расстояния компонентов афокальной системы типа трубы Галилея, при которых на расстоянии  $p = 1$  км можно получить энергетическую освещенность  $E_e = 160$  Вт·м<sup>-2</sup>. Расстояние между компонентами афокальной системы  $L_c = 225$  мм. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,5$ , оптической системы —  $\tau_{o.c} = 0,8$ . Какова будет энергетическая освещенность, создаваемая лазером на этом же расстоянии без афокальной системы?

11.4. Для уменьшения расходимости лазерного пучка применяется афокальная система, компоненты которой имеют фокусные расстояния  $f'_1 = -20$  мм и  $f'_2 = 200$  мм. Лазер дает поток излучения  $\Phi_e = 62,8$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,004$ . На каком расстоянии от афокальной системы может находиться облучаемый объект, если на его поверхности необходимо создать энергетическую освещенность  $E_e = 50$  Вт·м<sup>-2</sup>? Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ , атмосферы —  $\tau_a = 0,5$ .

11.5. Плоский угол расходимости лазерного пучка  $2\omega = 0,002$ . Для уменьшения расходимости используется афокальная система, фокусные расстояния компонентов которой  $f'_1 = -20$  мм,  $f'_2 = 200$  мм. Найти поток излучения лазера, при котором на расстоянии  $p = 2$  км будет создана энергетическая освещенность  $E_e = 10$  Вт·м<sup>-2</sup>. Коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ , атмосферы —  $\tau_a = 0,5$ .

11.6. Лазер излучает поток  $\Phi_e = 62,8$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,02$ . Для уменьшения расходимости применена афокальная система с фокусными расстояниями компонентов  $f'_1 = -25$  мм и  $f'_2 = 250$  мм. Определить энергетическую освещенность, создаваемую лазером на расстоянии  $p = 1$  км, если коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$ , атмосферы —  $\tau_a = 0,5$ .

11.7. Лазер имеет эквивалентный конфокальный параметр  $R_0 = 500$  мм и излучает на длине волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. Для уменьшения расходимости лазерного пучка применяется афокальная система типа трубы Кеплера с фокусными расстояниями компонентов  $f'_1 = 10$  мм,  $f'_2 = 100$  мм. Определить положение перетяжки преобразованного лазерного пучка, если перетяжка исходного пучка расположена в передней фокальной плоскости первого компонента. Найти диаметр пятна на объекте, облучаемом лазером, если расстояние от афокальной системы до объекта  $p = 10$  км.

11.8. Лазер имеет эквивалентный конфокальный параметр  $R_0 = 2000$  мм и создает излучение с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. Излучение лазера концентрируется оптической системой с фокусным расстоянием  $f' = 50$  мм. Определить диаметр изображения перетяжки преобразованного пучка и его расстояние от заднего фокуса, если расстояние от переднего фокуса оптической системы до перетяжки исходного пучка —  $z = 10$  мм.

11.9. Определить фокусное расстояние оптической системы, концентрирующей излучение лазера в пятно диаметром  $2y' = 0,0062$  мм. Лазер имеет конфокальный параметр  $R_0 = 1800$  м и создает излучение с длиной волны  $\lambda = 0,6943$  мкм. Перетяжка лазерного пучка расположена в передней фокальной плоскости оптической системы.

11.10. Излучение лазера концентрируется оптической системой с фокусным расстоянием  $f' = 25$  мм. Лазер излучает поток  $\Phi_e = 100$  Вт с длиной волны  $\lambda = 0,6943$  мкм. Эквивалентный конфокальный параметр лазера  $R_0 = 2000$  м. Определить энергетическую освещенность в плоскости изображения перетяжки, если коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$ . Перетяжка лазерного пучка расположена в передней фокальной плоскости.

11.11. Излучение лазера с длиной волны  $\lambda = 0,6943$  мкм концентрируется оптической системой с фокусным расстоянием  $f' = 30$  мм. Эквивалентный конфокальный параметр лазера  $R_0 = 2000$  мм. Определить поток излучения, создаваемый лазером, если при коэффициенте пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,9$  в плоскости изображения перетяжки создается энергетическая освещенность  $E'_e = 2,15 \cdot 10^{11}$  Вт·м<sup>-2</sup>. Перетяжка лазерного пучка расположена в передней фокальной плоскости оптической системы.

11.12. Определить силу фототока, вырабатываемого приемником, при попадании на его светочувствительную поверхность излучения лазера, отраженного от объекта. Лазер излучает поток  $\Phi_e = 314$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,001$ . Объект, имеющий коэффициент диффузного отражения  $\rho = 0,7$ , удален от лазера на расстояние  $p = 1$  км. Приемная оптическая система расположена рядом с лазером и имеет следующие характеристики: фокусное расстояние  $f' = 2000$  мм, диаметр входного зрачка  $D = 1000$  мм, коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,9$ . Светочувствительная поверхность приемника диаметром  $d_{пр} = 3$  мм расположена в плоскости изображения объекта. Абсолютная спектральная чувствительность приемника к монохроматическому излучению, создаваемому лазером, составляет  $S(\lambda) = 20$  мА·Вт<sup>-1</sup>. Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,5$ .

11.13. На расстоянии  $p = 1$  км от лазера расположен объект, имеющий коэффициент диффузного отражения  $\rho = 0,35$ . Объект облучается потоком излучения  $\Phi_e = 628$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,002$ . Рядом с лазером

расположена приемная оптическая система, имеющая фокусное расстояние  $f' = 2000$  мм и коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,9$ . В плоскости изображения объекта установлен приемник с диаметром светочувствительной поверхности  $d_{пр} = 2$  мм. Абсолютная спектральная чувствительность приемника к монохроматическому излучению лазера  $S(\lambda) = 32 \text{ мА} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,5$ . Определить относительное отверстие оптической системы, регистрирующей излучение, отраженное от объекта, если приемник должен вырабатывать фототок  $i = 0,1$  мкА.

11.14. Лазер создает поток излучения  $\Phi_e = 200$  Вт с плоским углом расходимости  $2\omega = 0,002$ . На расстоянии  $r = 1$  км от лазера расположен объект. Излучение лазера, диффузно отраженное от объекта, регистрируется оптической фотоэлектрической системой, расположенной рядом с лазером. Характеристики оптической системы: фокусное расстояние  $f' = 1000$  мм, диаметр входного зрачка  $D = 500$  мм, коэффициент пропускания  $\tau_{o.c} = 0,8$ . В плоскости изображения объекта установлена светочувствительная поверхность приемника диаметром  $d_{пр} = 3$  мм. Абсолютная спектральная чувствительность приемника к монохроматическому излучению лазера  $S(\lambda) = 2 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a = 0,2$ . Определить коэффициент диффузного отражения объекта, если приемник вырабатывает фототок  $i = 0,16$  мкА.

11.15. Для получения голограммы применяется афокальная система типа трубы Кеплера, которая должна преобразовать перетяжку лазерного пучка размером  $2y = 5$  мм в изображение перетяжки размером  $2y' = 100$  мм. Перетяжка исходного пучка расположена в передней фокальной плоскости первого компонента. Определить фокусные расстояния компонентов афокальной системы, если расстояние между главными плоскостями компонентов афокальной системы  $L_c = 420$  мм.

11.16. Для получения голограммы в плоскости изображения перетяжки лазерного пучка необходимо создать энергетическую освещенность  $E'_e = 5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Преобразование лазерного пучка осуществляется афокальной системой типа трубы Кеплера, фокусные расстояния компонентов которой  $f'_1 = 10$  мм,  $f'_2 = 200$  мм. Перетяжка исходного лазерного пучка размером  $2y = 5$  мм расположена в передней фокальной плоскости первого компонента. Определить поток излучения, создаваемый лазером, если коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_{o.c} = 0,8$ .

## ГЛАВА 12

### ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДВОЙНОЙ СИММЕТРИИ

---

Оптические системы с двумя плоскостями симметрии обладают в сопряженных плоскостях линейным увеличением, зависящим от ориентации отрезка относительно плоскостей симметрии. Сориентируем прямоугольную систему координат в плоскости предмета таким образом, чтобы оси  $OX$  и  $OY$  совпадали со следами плоскостей симметрии. Тогда в плоскости изображения точке с координатами  $x$  и  $y$  будет соответствовать сопряженная точка с координатами  $x' = \beta_x x$  и  $y' = \beta_y y$ . Линейное увеличение отрезка, соединяющего начало координат с точкой с координатами  $x$  и  $y$ , определяется формулой

$$\beta = \sqrt{\frac{\beta_x^2 x^2 + \beta_y^2 y^2}{x^2 + y^2}}.$$

Прямая линия изображается системой с двумя плоскостями симметрии в виде прямой. Линейное увеличение для параллельных отрезков одинаково. Окружность радиуса  $r$  изображается в виде эллипса с полуосями  $r\beta_x$  и  $r\beta_y$ . Если пучком эллиптического сечения, преобразованным из круглого, необходимо перекрыть прямоугольник размером  $x \times y$ , то потери энергии минимальны, когда полуоси эллипса составляют

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2} x \text{ и } b = \frac{\sqrt{2}}{2} y.$$

При разработке оптических систем двойной симметрии необходимо ограничивать применение цилиндрических линз, так как их изготовление представляет определенные технологические трудности. Цилиндрические линзы следует по возможности заменять сферическими.

#### Задачи

12.1. Пучок света от лазера проходит через квадратную диафрагму со стороной 2 мм. Найти увеличения анаморфотной оптической системы, трансформирующей этот пучок в параллельный с размером сечения  $4 \times 16$  мм. Выбрать оптиче-

скую систему с минимальным числом цилиндрических компонентов.

12.2. Полупроводниковый лазер излучает с площадки размером  $0,005 \times 0,1$  мм. Плоские углы расходимости в главных сечениях  $2\omega_x = 20^\circ$ ,  $2\omega_y = 1^\circ$ . Рассчитать фокусные расстояния компонентов анаморфотной системы, формирующей параллельный пучок квадратного сечения со стороной 2 мм. Найти углы расходимости этого пучка в двух главных сечениях.

12.3. В широкоэкранном кинотеатре отношение ширины экрана к его высоте составляет 2,55:1. Формат кинокадра  $23,16 \times 18,16$  мм. Какую анаморфозу должна иметь анаморфотная афокальная насадка, устанавливаемая перед съёмочным объективом?

12.4. Анаморфотная система должна создать изображение предмета со следующими увеличениями во взаимно перпендикулярных сечениях:  $\beta_I = -3$ ;  $\beta_{II} = -5$ . Расстояние плоскости изображения от плоскости предмета составляет 180 мм. Определить положения компонентов относительно плоскости предмета и их фокусные расстояния.

12.5. Можно ли решить предыдущую задачу, используя два тонких компонента, один из которых сферический, а второй цилиндрический?

12.6. Объектив проецирует изображение квадрата со стороной 50 мм на расстояние 500 мм от последней поверхности. Рассчитать фокусные расстояния компонентов двухкомпонентной анаморфотной насадки, трансформирующей квадрат в прямоугольник размером  $50 \times 100$  мм. Расстояние первого компонента насадки от последней поверхности объектива принять равным 20 мм, а расстояние между компонентами 50 мм.

12.7. Из лазера выходит цилиндрический пучок лучей диаметром 2 мм. Определить уравнение сечения этого пучка после прохождения анаморфотной системы, состоящей из двух трубок Галилея, имеющих во взаимно перпендикулярных плоскостях угловые увеличения  $\gamma_1 = 1/3$  и  $\gamma_2 = 1/2$ .

Изменится ли сечение пучка, если использовать две трубки Галилея, одна из которых выполнена из сферических линз и имеет угловое увеличение  $\gamma_1 = 1/2$ , а вторая — из цилиндрических линз с  $\gamma_2 = 1/1,5$ ?

12.8. Определить увеличения анаморфотной телескопической насадки, которая обеспечивает полное перекрытие лазерным пучком диаметром 3 мм щели размером  $2 \times 10$  мм с минимальными потерями световой энергии.

12.9. С помощью объектива, предназначенного для съемки широкоэкранных фильмов и снабженного анаморфотной насадкой с анаморфозой  $A = 2$ , сфотографирован прямоугольный равнобедренный треугольник с горизонтально расположенной гипотенузой. Определить угол  $\varphi$  между равными сторонами треугольника на снимке.

12.10. Изменяется ли форма изображения квадрата при вращении его вокруг собственной оси симметрии в оптической системе с анаморфозой? Какую траекторию описывают вершины квадрата в плоскости изображения? Можно ли квадрат трансформировать в параллелограмм и ромб?

## ГЛАВА 13

### АБЕРРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

Теория аббераций играет важную роль в проектировании и расчете оптических систем. При разработке оптических систем со средними оптическими характеристиками наиболее эффективна теория аббераций 3-го порядка, которая позволяет находить приближенные конструктивные решения, осуществлять синтез оптических систем и определять принципиальные оптические схемы.

Благодаря использованию свойств апланатических точек поверхностей применение теории аббераций 3-го порядка может в ряде случаев оказаться весьма эффективным и при расчете более сложных оптических систем.

Абберации оптических систем делятся на монохроматические и хроматические.

Монохроматические абберации могут быть разделены на абберации 3-го порядка и абберации высшего порядка, а хроматические — на абберации 1-го порядка, 3-го порядка и высших порядков.

Следует заметить, что теория аббераций 3-го порядка наиболее эффективна при расчете оптических систем, состоящих из компонентов (линз), которые в первом приближении можно считать тонкими. В этом случае все пять монохроматических аббераций тонкого компонента описываются только двумя основными параметрами  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$ , так как  $\bar{\pi}$  практически постоянно и равно 0,7, а хроматические — одним параметром  $C$ .

Ниже приведены основные формулы, необходимые при абберационном расчете и проектировании оптических систем.

Универсальные выражения для поперечных составляющих аббераций 3-го порядка имеют вид:

$$\begin{aligned} -2n'_i \alpha'_i \Delta y'_i &= \frac{\sigma_p (\sigma_p^2 + \psi_p^2)}{\alpha_p^3} S_{I1}^k + \\ &+ \frac{(3\sigma_p^2 + \psi_p^2) \omega_q}{\alpha_p^2 \beta_q} S_{II1}^k + \frac{\sigma_p \omega_q^2}{\alpha_p \beta_q^2} \left( 3 S_{III1}^k + I^2 S_{IV1}^k \right) + \frac{\omega_q^3}{\beta_q^3} S_{V1}^k; \\ -2n'_i \alpha'_i \Delta x'_i &= \frac{\psi_p (\sigma_p^2 + \psi_p^2)}{\alpha_p^3} S_{I1}^k + \\ &+ 2 \frac{\sigma_p \psi_p \omega_q}{\alpha_p^2 \beta_q} S_{II1}^k + \frac{\psi_p \omega_q^2}{\alpha_p \beta_q^2} \left( S_{III1}^k + I^2 S_{IV1}^k \right), \end{aligned}$$

где  $\Delta y'_i$  и  $\Delta x'_i$  — поперечные составляющие аббераций в меридиональном и сагитальном сечениях в  $i$ -м пространстве;  $\sigma_p$  и  $\psi_p$  — апертурные углы в  $p$ -м пространстве;  $\alpha_p$  — угол первого параксиального луча с оптической осью в  $p$ -м пространстве;  $\omega_q$  — полевой угол в  $q$ -м пространстве;  $k$  — число компонентов в системе;  $S_{I1}^k, S_{II1}^k, S_{III1}^k, S_{IV1}^k, S_{V1}^k$  — суммы аббераций 3-го порядка;  $I$  — инвариант Лагранжа — Гельмгольца.

**Формулы связи аббераций 3-го порядка с суммами аббераций для различных условий нормировки.** Ниже приведены формулы для различных расположений предмета и условий нормировки.

**Предмет расположен на бесконечности** (условия нормировки  $\alpha_1 = 0, \alpha = 1, \beta_1 = 1, h_1 = f' = 1, n = n' = 1$ ): продольная сферическая абберация

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{S}_1;$$

меридиональная кома

$$\Delta y'_k = -\frac{3}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \operatorname{tg} \omega_1 \bar{S}_{II};$$



отступление от условия изопланазии

$$\eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,p} - s'_0} + \frac{\Delta f'}{f'} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{S}_{II};$$

астигматическая разность

$$z'_s - z'_m = f' \operatorname{tg}^2 \omega_1 \bar{S}_{III};$$

кривизна поверхности Петцваля

$$z'_n = -\frac{y'^2}{2} \frac{\bar{S}_{IV}}{f'};$$

дисторсия

$$\Delta y'_D = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^3 \omega_1 \bar{S}_V;$$

хроматизм положения

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = s'_{\lambda_1} - s'_{\lambda_2} = f' \bar{S}_{I \text{ xp}} = f' \sum_1^k \bar{h} C = f' \sum_1^k \bar{h} \bar{C} (\alpha' - \alpha);$$

хроматизм увеличения

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} &= \frac{y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{S_{II \text{ xp}}}{I} = \\ &= -f' S_{II \text{ xp}} = -f' \sum_1^k \bar{H} \bar{C} (\alpha' - \alpha), \end{aligned}$$

где  $\bar{S}_I, \bar{S}_{II}, \bar{S}_{III}, \bar{S}_{IV}, \bar{S}_V$  — приведенные суммы монохроматических aberrаций 3-го порядка;  $\bar{S}_{I \text{ xp}}, \bar{S}_{II \text{ xp}}$  — приведенные суммы хроматических aberrаций 1-го порядка;  $\sigma'$  — апертурный угол в пространстве изображения;  $\omega_1$  — полевой угол в пространстве предметов;  $y'$  — размер изображения;  $\bar{h}$  и  $\bar{H}$  — приведенные высоты пересечения 1-го и 2-го параксиальных лучей с компонентом;  $k$  — число компонентов.

**Предмет расположен на конечном расстоянии:**

а) условия нормировки  $\alpha_1 = \beta^\times$ ;  $\alpha' = 1$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $n_1 = n' = 1$ ;  $h_1 = s_1 \alpha_1$ :

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' S_I;$$

$$\Delta y'_k = -\frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \operatorname{tg} \omega_1 S_{II};$$

$$\eta = -\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \sigma'}{I} S_{II};$$

$$z'_s - z'_m = \operatorname{tg}^2 \omega_1 S_{III};$$

$$z'_n = -\frac{1}{2} y'^2 S_{IV};$$

$$\Delta y'_D = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^3 \omega_1 S_V;$$

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = S_{I \text{ xp}} = \sum_1^k hC = \sum_1^k h\bar{C} (\alpha' - \alpha);$$

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{S_{I \text{ xp}}}{I} = \frac{\sum_1^k HC}{I} = \frac{\sum_1^k H\bar{C} (\alpha' - \alpha)}{I},$$

где  $I = n_1 \alpha_1 y_1 = \beta^\times (s_P - s)$ ;  $\eta = \frac{\Delta s'}{s'_{0,P} - s'_0} + \frac{\Delta \beta_0}{\beta_0}$ .

б) условия нормировки  $\alpha_1 = \beta_0^\times$ ;  $\alpha' = 1$ ;  $\beta_1 = 0$ ;  $h_1 = s_1 \alpha_1$ ;  $n_1 = n' = 1$  (телецентрический ход главного луча в пространстве предметов):

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' S_I;$$

$$\Delta y'_k = -\frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \left( \frac{y}{y_0} \right) S_{II} = -\frac{3}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \left( \frac{y'}{y'_0} \right) S_{II};$$

$$\eta = -\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \sigma'}{I} S_{II} = -\frac{1}{2} \frac{\operatorname{tg}^2 \sigma'}{y'_0} S_{II};$$

$$z'_s - z'_m = \left( \frac{y}{y_0} \right)^2 S_{III} = \left( \frac{y'}{y'_0} \right)^2 S_{III};$$

$$\Delta y'_D = -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{y_0} \right)^3 S_V = -\frac{1}{2} \left( \frac{y'}{y'_0} \right)^3 S_V;$$

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = S_{I \text{ xp}} = \sum_1^k hC = \sum_1^k h\bar{C} (\alpha' - \alpha);$$

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{S_{I \text{ xp}}}{I} = \frac{\sum_1^k HC}{y'_0} = \frac{\sum_1^k H\bar{C} (\alpha' - \alpha)}{y'_0},$$

где  $y$  и  $y'$  — размеры реального предмета и изображения;  $y_0$  и  $y'_0$  — параксиальные размеры.

**Выражения сумм аберраций тонкого компонента при условиях нормировки**  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $h_1 = f' = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ . В этом случае справедливы формулы:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= \bar{P}; \\ \bar{S}_{II} &= \bar{H} \bar{P} + \bar{W}; \\ \bar{S}_{III} &= \bar{H}^2 \bar{P} + 2\bar{H} \bar{W} + 1; \\ \bar{S}_{IV} &= \bar{\pi} = \frac{1}{n} \approx 0,7; \\ \bar{S}_V &= \bar{H}^3 \bar{P} + 3\bar{H}^2 \bar{W} + 3,7\bar{H},\end{aligned}$$

где  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$  и  $\bar{\pi}$  — основные параметры тонкого компонента;  $\bar{S}_I$ ,  $\bar{S}_{II}$ ,  $\bar{S}_{III}$ ,  $\bar{S}_{IV}$ ,  $\bar{S}_V$  — приведенные суммы аберраций.

В случае, когда зрачок совпадает с компонентом ( $\bar{H} = 0$ ), формулы принимают вид:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= \bar{P}; \\ \bar{S}_{II} &= \bar{W}; \\ \bar{S}_{III} &= 1; \\ \bar{S}_{IV} &= \bar{\pi} = 0,7; \\ \bar{S}_V &= 0.\end{aligned}$$

**Параметры элементов оптических систем.** Суммы аберраций зеркала при условии  $s_1 = \infty$ ,  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $n' = -n = -1$ ,  $h_1 = f' = 1$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\bar{S}_I &= -1/4; \\ \bar{S}_{II} &= -\bar{H}/4 + 1/2; \\ \bar{S}_{III} &= -\bar{H}^2/4 + \bar{H} - 1; \\ \bar{S}_{IV} &= 1; \\ \bar{S}_V &= -\bar{H}^3/4 + 3\bar{H}^2/2 - 2\bar{H}.\end{aligned}$$

Если входной зрачок совпадает с вершиной зеркала ( $\bar{H} = 0$ ), то  $\bar{S}_I = -1/4$ ,  $\bar{S}_{II} = -1/2$ ,  $\bar{S}_{III} = -1$ ,  $\bar{S}_{IV} = 1$ ,  $\bar{S}_V = 0$ .

Связь между  $P$ ,  $W$  и  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$  тонкого компонента выражается формулами

$$P = (\alpha' - \alpha)^3 \bar{P} + 4\alpha (\alpha' - \alpha)^2 \bar{W} + \alpha (\alpha' - \alpha) \times \\ \times [2\alpha (2 + \pi) - \alpha']; \\ W = (\alpha' - \alpha)^2 \bar{W} + \alpha (\alpha' - \alpha) (2 + \pi).$$

Связь между основными параметрами  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$  тонкого компонента при его обращении записывается в виде выражений

$$\overleftarrow{\bar{P}} = \bar{P} - 4\bar{W} + 5,4; \\ \overleftarrow{\bar{W}} = -\bar{W} + 2,7,$$

где  $\overleftarrow{\bar{P}}$  и  $\overleftarrow{\bar{W}}$  — основные параметры того же тонкого компонента, вычисленные в обратном ходе лучей, т. е. справа налево. Из приведенных формул следует, что в тонкой симметричной системе  $\bar{W} = 1,35$ .

Связь между основными параметрами  $\bar{P}$ ,  $\bar{W}$ ,  $\bar{C}$  тонкого компонента, состоящего из двух одинаковых симметрично расположенных тонких компонентов, через основные параметры  $\bar{P}_{1/2}$ ,  $\bar{W}_{1/2}$ ,  $\bar{C}_{1/2}$  его составляющих можно записать в виде

$$\bar{W}_{1/2} = 2(\bar{W} - 0,68); \quad \bar{W} = 1,35; \\ \bar{P}_{1/2} = 4(\bar{P} - \bar{W} + 0,26); \quad \bar{P} = \frac{1}{4} \bar{P}_{1/2} - \bar{W}_{1/2} + 2,45; \\ \bar{C}_{1/2} = \bar{C}; \\ f'_{1/2} = 2f'.$$

Выражения для  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  тонкой линзы имеют вид

$$\bar{P} = \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \left[ 1 - \left( 2 + \frac{1}{n} \right) \alpha_2 + \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \alpha_2^2 \right]; \\ \bar{W} = \frac{n}{n-1} \left[ 1 - \frac{(n+1)}{n} \alpha_2 \right]; \\ \bar{P} = \bar{P}_0 + \left[ 1 - \frac{1}{(n+1)^2} \right] \left[ \bar{W} - \frac{1}{2(2+n)} \right]^2,$$

где  $n$  — показатель преломления стекла линзы;  $\alpha_2$  — угол первого параксиального луча в стекле;  $\bar{P}_0 = \frac{(4n-1)n}{4(2+n)(n-1)^2}$ .

В табл. 13.1 приведены числовые значения основных параметров  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  для оптической системы, состоящей из одной или двух тонких линз, в зависимости от формы линзы и показателя преломления. Основные параметры сферического зеркала  $\bar{P} = -1/4$ ,  $\bar{W} = 1/2$ .








**Формулы аберраций 3-го порядка.** Для плоскопараллельной пластинки:

$$\begin{aligned}\Delta s' &= \frac{1}{2} \frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \sigma; \\ \Delta y'_k &= \frac{3}{2} \frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \sigma \operatorname{tg} \omega_1; \\ z'_m &= \frac{3}{2} \frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \omega_1; \\ z'_s &= \frac{1}{2} \frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \omega_1; \\ z'_s - z'_m &= -\frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^2 \omega_1; \\ \Delta y'_D &= \frac{1}{2} \frac{(n^2-1)}{n^3} d \operatorname{tg}^3 \omega_1; \\ \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} &= \frac{(n-1)}{n^2 \nu} d; \\ \Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2} &= \frac{(n-1)}{n^2 \nu} d \operatorname{tg} \omega_1;\end{aligned}$$

для тонкой линзы при условиях нормировки  $s_1 = \infty$ ,  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1,0$ ,  $h_1 = f' = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $H_1 = \bar{\beta}_1 \bar{a}_P$ :

$$\begin{aligned}\Delta s' &= -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{P}; \\ \Delta y'_k &= -\frac{3}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \operatorname{tg} \omega_1 [\bar{a}_P \bar{P} + \bar{W}]; \\ \eta &= \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' [\bar{a}_P \bar{P} + \bar{W}]; \\ z'_s - z'_m &= f' \operatorname{tg}^2 \omega_1 [\bar{a}_P^2 \bar{P} + 2\bar{a}_P \bar{W} + 1]; \\ \Delta y'_D &= -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^3 \omega_1 [\bar{a}_P^3 \bar{P} + 3\bar{a}_P^2 \bar{W} + 3,7\bar{a}_P];\end{aligned}$$

13.1. Основные параметры линз

$n$														
	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$	$\bar{W}$	$\bar{P}$
1,50	3,00	9,00	-0,33	2,32	1,35	3,32	2,18	4,17	0,51	0,83	1,35	1,67	1,35	1,92
1,55	2,82	7,94	-0,17	1,96	1,30	3,07	2,09	3,82	0,59	0,83	1,35	1,57	1,35	1,86
1,60	2,67	7,11	-0,03	1,62	1,35	2,88	2,01	3,54	0,65	0,83	1,35	1,50	1,35	1,81
1,65	2,54	6,44	0,07	1,50	1,35	2,73	1,95	3,31	0,71	0,83	1,35	1,45	1,35	1,78
1,70	2,43	5,90	0,16	1,36	1,35	2,59	1,89	3,12	0,76	0,84	1,35	1,41	1,35	1,74
1,75	2,33	5,44	0,24	1,26	1,35	2,48	1,84	2,96	0,80	0,86	1,35	1,38	1,35	1,72
1,80	2,25	5,06	0,30	1,17	1,35	2,40	1,80	2,82	0,83	0,87	1,35	1,35	1,35	1,69
1,85	2,18	4,74	0,37	1,11	1,35	2,33	1,77	2,70	0,85	0,89	1,35	1,34	1,35	1,68
1,90	2,11	4,46	0,42	1,06	1,35	2,27	1,73	2,60	0,88	0,90	1,35	1,32	1,35	1,66
1,95	2,05	4,21	0,46	1,03	1,35	2,21	1,70	2,50	0,90	0,91	1,35	1,31	1,35	1,64
2,00	2,00	4,00	0,53	1,00	1,35	2,17	1,68	2,43	0,92	0,92	1,35	1,30	1,35	1,64

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{f'}{v};$$

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{\bar{a}_P}{f' v},$$

где  $\bar{a}_P$  — приведенное положение входного зрачка относительно линзы.

В случае, если входной зрачок совпадает с линзой ( $\bar{a}_P = 0$ ), формулы принимают вид:

$$\Delta s' = -\frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{P};$$

$$\Delta y'_k = -\frac{3}{2} f' \operatorname{tg}^2 \sigma' \operatorname{tg} \omega_1 \bar{W};$$

$$\eta = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \sigma' \bar{W};$$

$$z'_s = -0,85 f' \operatorname{tg}^2 \omega_1;$$

$$z'_m = -1,85 f' \operatorname{tg}^2 \omega_1;$$

$$z'_s - z'_m = f' \operatorname{tg}^2 \omega_1;$$

$$\Delta y'_D = 0;$$

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = -\frac{f'}{v};$$

$$\frac{\Delta y_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0;$$

для сферического зеркала при бесконечно удаленном предмете:

$$\Delta s' = -\frac{1}{8} \frac{m^2}{f'};$$

$$\Delta y'_k = \frac{3}{4} \frac{m^2}{f'} \operatorname{tg} \omega_1 \left( -\frac{1}{2} \bar{s}_P + 1 \right);$$

$$z'_m = \frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \omega_1 \left( -\frac{3}{4} \bar{s}_P^2 + 3\bar{s}_P - 2 \right);$$

$$z'_s = \frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^2 \omega_1 \left( -\frac{1}{4} \bar{s}_P^2 + \bar{s}_P \right);$$

$$z'_s - z'_m = f' \operatorname{tg}^2 \omega_1 \left( -\frac{1}{4} \bar{s}_P^2 + \bar{s}_P - 1 \right);$$

$$\Delta y'_D = \frac{1}{2} f' \operatorname{tg}^3 \omega_1 \left( -\frac{1}{4} \bar{s}_P^3 + \frac{3}{2} \bar{s}_P^2 - 2\bar{s}_P \right),$$

где  $m$  — координаты на входном зрачке;  $f'$  — фокусное расстояние зеркала;  $\bar{s}_P$  — приведенное положение входного зрачка относительно вершины зеркала.

Если входной зрачок совпадает с вершиной зеркала ( $\bar{s}_P = 0$ ), то

$$\begin{aligned}\Delta s' &= -\frac{1}{8} \frac{m^2}{f'}; \\ \Delta y'_k &= \frac{3}{4} \frac{m^2}{f'} \operatorname{tg} \omega_1; \\ z'_m &= -f' \operatorname{tg}^2 \omega_1; \\ z'_s &= 0; \\ \Delta y'_D &= 0.\end{aligned}$$

Если входной зрачок совпадает с центром кривизны зеркала, т. е.  $s_P = r = 2f'$ , то

$$\begin{aligned}\Delta s' &= -\frac{m^2}{8f'}, \quad \Delta y'_k = 0, \quad z'_m = z'_s = f' \operatorname{tg}^2 \omega_1, \\ z'_s - z'_m &= 0, \quad \Delta y'_D = 0.\end{aligned}$$

**Хроматические аберрации.** Они делятся на группы в зависимости от того, к какой области принадлежат лучи, образующие изображение: аберрации 1-го порядка (в параксиальной области), аберрации 3-го порядка и аберрации высшего порядка.

В параксиальной области появляются хроматические аберрации: хроматизм положения, хроматизм увеличения и вторичный спектр.

Для оптической системы, состоящей из бесконечно тонких компонентов, *хроматизм положения* определяется формулой

$$\begin{aligned}\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} &= s'_{\lambda_1} - s'_{\lambda_2} = \frac{1}{n' \alpha'^2} S_{\text{Ixp}} = \frac{1}{n' \alpha'^2} \sum_1^k hC = \\ &= \frac{1}{n' \alpha'^2} \sum_1^k h \frac{\delta \alpha}{\delta \frac{1}{n}} \delta \frac{dn}{n} = \frac{1}{n' \alpha'^2} \sum_1^k h \bar{C} (\alpha' - \alpha) = \\ &= \frac{1}{n' \alpha'^2} \sum_1^k h^2 \Phi \bar{C},\end{aligned}$$



где  $\bar{C} = \sum_1^m \frac{\delta\alpha}{\delta \frac{1}{n}} \delta \frac{dn}{n}$  при  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha' = 1$ ;  $h_1 = f' = 1$ .

Хроматизм положения для одного тонкого компонента, состоящего из  $m$  тонких линз,

$$\begin{aligned} \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} &= \frac{1}{n' \alpha'^2} S_{\text{Ixp}} = \frac{h}{n' \alpha'^2} \sum_1^m C = \frac{h}{n' \alpha'^2} \sum_1^m \bar{C} (\alpha' - \alpha) = \\ &= \frac{h^2}{n' \alpha'^2} \sum_1^m \bar{C} \Phi = - \frac{h^2}{n' \alpha'^2} \sum_1^m \frac{\Phi}{v}. \end{aligned}$$

Для одной тонкой линзы хроматизм положения

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = - \frac{h^2}{n' \alpha'^2} \frac{\Phi}{v};$$

если  $s_1 = \infty$ ,  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $h_1 = f'$ ,  $n_1 = n' = 1$ , то

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = - \frac{f'}{v};$$

если  $s_1 \neq \infty$ ,  $h_1 = s_1 \alpha_1$ ,  $n_1 = n' = 1$ , то

$$\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = - \frac{s'^2}{f' v}.$$

Хроматизм увеличения для системы, состоящей из бесконечно тонких компонентов, определяется выражением

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} &= \frac{y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{S_{\text{Ixp}}}{I} = \frac{\sum_1^k HC}{I} = \\ &= \frac{\sum_1^k H \frac{\delta\alpha}{\delta \frac{1}{n}} \delta \frac{dn}{n}}{I} = \frac{\sum_1^k H \bar{C} (\alpha' - \alpha)}{I} = \frac{\sum_1^k H h \bar{C} \Phi}{I}. \end{aligned}$$

Хроматизм увеличения для одного тонкого компонента, состоящего из  $m$  линз, вычисляется по формуле

$$\frac{\Delta y_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = - \frac{Hh}{I} \sum_1^m \frac{\Phi}{v}.$$

Для одной тонкой линзы хроматизм увеличения может быть определен по формуле

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = -\frac{Hh}{If'v}.$$

Если  $s_1 = \infty$ ,  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha' = 1$ ;  $h_1 = f' = 1$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $I = -1$ ;  $H_1 = \beta_1 a_P$ , формула принимает вид

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = \frac{a_P}{f'v}.$$

В случае  $s_1 \neq \infty$ ,  $h_1 = s_1$ ,  $\alpha_1, \beta_1 = 1$

$$\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = -\frac{a_P s}{(a_P - s)} \frac{1}{f'v} = -\frac{a'_P s'}{(a'_P - s')} \frac{1}{f'v}.$$

Условие ахроматизации для системы из тонких компонентов имеет вид:

$$\sum_1^m \frac{\Phi}{v} = 0.$$

Для тонкого двухлинзового объектива с учетом условия масштаба

$$\sum_1^2 \Phi = 1;$$

$$\Phi_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2}; \quad \Phi_2 = -\frac{v_2}{v_1 - v_2}.$$

Вторичный спектр двухлинзового тонкого объектива может быть вычислен по формуле

$$\Delta s'_{\lambda_0, \lambda_1} = -f' \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{v_1 - v_2} = s'_{\lambda_0} - s'_{\lambda_1}$$

при  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = s'_{\lambda_1} - s'_{\lambda_2} = 0$ ,

где  $f'$  — фокусное расстояние объектива;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — частные относительные дисперсии;  $v_1$  и  $v_2$  — коэффициенты дисперсии.

**Волновые aberrации.** В общем случае волновая aberrация вычисляется по формуле

$$N = \int_0^{\sin \sigma'} \Delta y' d(\sin \sigma').$$

Когда апертурный угол в пространстве изображений мал,

$$N = \int_0^{\sigma_A} \Delta s' \sigma' d\sigma' - \int_0^{\sigma_A} \xi \sigma' d\sigma',$$

где  $\sigma_A$  — апертурный угол;  $\Delta s'$  — продольная сферическая aberrация;  $\xi$  — смещение плоскости наименьшего пятна рассеяния.

Волновые aberrации, вызванные дефокусировкой, определяются по формуле

$$\frac{N}{\lambda} = \frac{1}{2\lambda} \xi \sigma'^2.$$

Если  $\lambda = 0,000546$ ,

$$\frac{N}{\lambda} = 850 \xi \sigma'^2.$$

Рассматривая  $\Delta y' = \Delta s' \sigma'$  как функцию от  $\sigma'$  или  $\sin \sigma'$ , можно вычислить  $N$  графически, как площадь, заключенную между кривой  $\Delta y'$  и ординатами  $\sin \sigma'$  или  $\sigma'$ .

Существуют приближенные формулы (с учетом aberrаций 3-го и 5-го порядков) вычисления волновых aberrаций для случая, когда  $\sin \sigma'$  невелик:

$$\frac{N}{\lambda} = (70 - 110K) \Delta s'_3 \sigma_A'^2, \text{ если } K < 0;$$

$$\frac{N}{\lambda} = (70 + 40K) \Delta s'_3 \sigma_A'^2, \text{ если } 0 < K < 1;$$

$$\frac{N}{\lambda} = 110 \Delta s'_{кр} \sigma_A'^2, \text{ если } K > 1;$$

$$\frac{N}{\lambda} = 70 \Delta s'_3 \sigma_A'^2, \text{ если } K = 0,$$

где  $K = \Delta s'_{кр} / (\Delta s'_3)$ ;  $\Delta s'_{кр}$  и  $\Delta s'_3$  — продольная сферическая aberrация для края и зоны соответственно.

Формулы справедливы для  $\lambda = 0,000589$ . Если необходимо вычислить волновую aberrацию для  $\lambda = p$ , то полученное значение необходимо умножить на  $0,000589/p$ .

**Формулы для расчета однолинзового, двухлинзового и трехлинзового конденсоров и объективов на минимум сферической aberrации 3-го порядка.** Общее условие минимума

сферической аберрации 3-го порядка для системы из тонких линз

$$\frac{d \sum_1^m P}{d\alpha} = 0,$$

где  $\sum_1^m P = \sum_1^m \left( \frac{\delta\alpha}{\delta \frac{1}{n}} \right)^2 \delta \left( \alpha \frac{1}{n} \right)$ ;  $m$  — число поверхностей.

Из этой формулы могут быть получены выражения для углов  $\alpha$ , образованных первым параксиальным лучом с оптической осью, соответствующие системе с минимальной сферической аберрацией 3-го порядка.

Далее по найденным углам  $\alpha$  могут быть вычислены радиусы по известной рекуррентной формуле

$$r = h \frac{\delta n}{\delta(\alpha n)}.$$

Приведем формулы для углов  $\alpha$  при разных условиях нормировки.

*Одна линза* при  $\alpha_1 = \beta_0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $s_1 \neq \infty$ :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_0; \\ \alpha_2 &= \frac{2n+1}{2(n+2)} (1 + \beta_0); \\ \alpha_3 &= 1, 0; \end{aligned}$$

при  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $s_1 = \infty$ :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0; \\ \alpha_2 &= \frac{2n+1}{2(n+2)}; \\ \alpha_3 &= 1. \end{aligned}$$

*Две линзы* при  $\alpha_1 = \beta_0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $s_1 \neq \infty$ :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_0; \\ \alpha_2 &= \frac{1+2n}{2+n} \frac{3\beta_0+1}{4}; \\ \alpha_3 &= \frac{\beta_0+1}{2}; \end{aligned}$$

$$\alpha_4 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{\beta_0+3}{4};$$

$$\alpha_5 = 1;$$

при  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $s_1 = \infty$ :

$$\alpha_1 = 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{1}{4};$$

$$\alpha_3 = 1/2;$$

$$\alpha_4 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{3}{4};$$

$$\alpha_5 = 1, 0.$$

Три линзы при  $\alpha_1 = \beta_0$ ,  $\alpha' = 1, 0$ ,  $s_1 \neq \infty$ :

$$\alpha_1 = \beta_0;$$

$$\alpha_2 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{5\beta_0+1}{6};$$

$$\alpha_3 = \frac{2\beta_0+1}{3};$$

$$\alpha_4 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{\beta_0+1}{2};$$

$$\alpha_5 = \frac{\beta_0+2}{3};$$

$$\alpha_6 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{\beta_0+5}{6};$$

$$\alpha_7 = 1, 0;$$

при  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1, 0$ ,  $s_1 = \infty$ :

$$\alpha_1 = 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{1}{6};$$

$$\alpha_3 = 1/3;$$

$$\alpha_4 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{1}{2};$$

$$\alpha_5 = 2/3;$$

$$\alpha_6 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{5}{6};$$

$$\alpha_7 = 1, 0.$$

**Апланатические точки.** У сферической преломляющей поверхности имеются три пары сопряженных точек, для которых выполняется условие синусов и отсутствует сферическая абберрация. Такие точки называются *апланатическими*.

Первая пара апланатических точек совпадает с вершиной поверхности  $A_1$  и  $A'_1$ , т. е. для них выполняется условие  $s = s' = 0$ , а линейное увеличение  $\beta_0 = 1^\times$ .

Вторая пара апланатических сопряженных точек  $A_{II}$  и  $A'_{II}$  находится в центре кривизны поверхности, т. е. для них выполняется условие  $s = s' = r$  и линейное увеличение  $\beta_0 = n/n'$ .

Для третьей пары апланатических точек  $A_{III}$ ,  $A'_{III}$  выполняются условия

$$s = r \left( 1 + \frac{n'}{n} \right);$$

$$s' = r \left( 1 + \frac{n}{n'} \right);$$

линейное увеличение  $\beta_0 = n^2/n'^2$ .

Используя свойства и соотношения для апланатических точек, можно образовать апланатические мениски шести типов.

**Рекомендации по выявлению ошибок в изготовлении оптических деталей и сборке узлов.** При контроле отдельных линз или склеенных компонентов в цеховых условиях материал линз (т. е. марки стекол) не проверяется. Соответствие конструктивных параметров (радиусов и толщин) и фокусного расстояния приведенным на чертеже еще не гарантирует отсутствие ошибок, обусловленных применением стекол других марок (имеется значительное число марок бесцветного оптического стекла, имеющего весьма близкие показатели преломления для основной длины волны  $e$ , но различные дисперсии). Ошибки такого рода проявляются в собранной системе при контроле хроматических абберраций.

При сборке оптической системы из одиночных линз и склеенных компонентов вероятен разброс в значениях воздушных промежутков, непосредственный контроль которых невозможен. Кроме того, возможно перевертывание линз и компонентов, т. е. установка их в положение, обратное по отношению к расчетному, когда первый радиус линзы (компонента) становится последним и наоборот. Вероятность такой неправильной установки особенно велика, когда наруж-

ные радиусы оптических поверхностей компонента или линзы близки по значению.

Большой разброс в значениях воздушных промежутков может быть обнаружен без разборки оптической системы путем измерения расстояния между первой и последней поверхностями — суммарной толщины. Определение воздушного промежутка, который с наибольшей вероятностью выполнен с ошибкой, осуществляется с помощью таблицы влияния воздушных промежутков на аберрации сопоставлением измеренных аберраций с расчетными.

### Задачи

13.1. Для вогнутой сферической преломляющей поверхности, имеющей радиус 100 мм и разделяющей две оптические среды, найти положение апланатических точек относительно вершины поверхности, если: а)  $n_1 = 1,5$  и  $n_2 = 1$ ; б)  $n_1 = 1$  и  $n_2 = 1,5$ .

13.2. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют для каждой пары апланатических точек сферической поверхности.

13.3. Вычислить второй радиус апланатического мениска при условии, что  $s_1 = 0$ ,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $\beta_{a.m} = n_{a.m}^\times$ ,  $d_{a.m} = 5,0$  мм. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют в этом мениске.

13.4. Вычислить второй радиус апланатического мениска при условии, что  $s_1 = 0$ ,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $\beta_{a.m} = n_{a.m}^{2 \times}$ ,  $d_{a.m} = 5$  мм. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют, и найти  $s'_2$ .

13.5. Вычислить радиусы апланатического мениска при условии, что  $\beta_{a.m} = n_{a.m}^\times$ ,  $s_1 = -50$ ,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $d_{a.m} = 5$  мм. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют в таком мениске, и найти  $s'_2$ .

13.6. Вычислить радиусы апланатического мениска при условии, что  $\beta_{a.m} = 1/n_{a.m}^\times$ ,  $s_1 = -50$  мм,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $d_{a.m} = 5$  мм. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют в таком мениске, и найти  $s'_2$ .

13.7. Вычислить радиусы апланатического мениска при условии, что  $\beta_{a.m} = 1^\times$ ,  $s_1 = -50$  мм,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $d_{a.m} = 5$  мм. Показать, какие аберрации 3-го порядка отсутствуют, и найти  $s'_2$ .

13.8. Вычислить радиусы и толщину апланатического мениска с исправленной кривизной ( $S_{IV} = 0$ ) при условии, что  $\beta_{a.m} = n_{a.m}^\times$ ,  $s_1 = -50$  мм,  $n = 1,5$ . Показать, какие aberrации 3-го порядка в таком мениске будут отсутствовать, и найти  $s_2'$ .

13.9. Рассчитать апланатический мениск с исправленным астигматизмом 3-го порядка ( $S_{III} = 0$ ) при условии, что  $\beta_{a.m} = 1^\times$ ,  $s_1 = -50$  мм,  $n_{a.m} = 1,5$ ,  $d_{a.m} = 5$  мм.

13.10. Рассчитать апланатический мениск с увеличением  $\beta_{a.m} = n^\times$  и с заданными значениями  $\overline{s_1}$ ,  $n_{a.m}$  и  $S_{IV}$ .

13.11. Определить основные параметры  $\overline{P}$  и  $\overline{W}$  сферического зеркала.

13.12. Вычислить суммы aberrации 3-го порядка сферического зеркала при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $r = -50$  мм,  $s_P = 0$ ,  $h_1 = f' = 1$ .

13.13. Вычислить aberrации 3-го порядка сферического зеркала при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $r = -50$  мм,  $s_P = -25$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 6^\circ$ .

13.14. Вычислить суммы aberrации 3-го порядка и сами aberrации сферического зеркала при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $h_1 = f' = 1$ ;  $\beta_1 = 1$ ,  $s_P = -50$  мм,  $r = -50$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 6^\circ$ .

13.15. Вычислить aberrации 3-го порядка сферического зеркала при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $s_P = 0$ ,  $r = -50$ ,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 6^\circ$ .

13.16. Вычислить астигматизм сферического зеркала при условии:  $r = -50$  мм;  $s_P = 0$ ;  $-25$  мм;  $-50$  мм,  $s_1 = \infty$ ,  $2\omega = 60^\circ$ .

13.17. Вычислить астигматизм сферического зеркала при условии:  $r = 50$  мм;  $s_P = 0$ ;  $25$ ;  $50$ ;  $s_1 = \infty$ ,  $2\omega = 60^\circ$ .

13.18. Вычислить монохроматические aberrации 3-го порядка плоскопараллельной пластинки при условии:  $d = 20$  мм,  $n = 1,5$ ,  $\sigma_A = 30^\circ$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.19. Вычислить монохроматические aberrации 3-го порядка плоскопараллельной пластинки ( $d = 20$  мм,  $n = 1,65$ ), расположенной за объективом с  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.20. Вычислить монохроматические aberrации 3-го порядка и хроматические 1-го порядка призмы AP—90 из стекла марки К8, установленной за объективом с  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.21. Во сколько раз изменились хроматические aberrации 1-го порядка пентапризмы, расположенной в сходя-



щемся пучке лучей при замене марки стекла К8 ( $\lambda_e$ ) маркой ТФ1 ( $\lambda_e$ ), если  $\sin \sigma_A = 0,1$ ;  $2\omega = 12^\circ$ ; диаметр входной грани призмы 20 мм.

13.22. Вычислить хроматизм положения плоскопараллельной пластинки толщиной  $d = 30$  мм из стекла К8; ТК16; Ф1; ТФ5.

13.23. Вычислить астигматизм плоскопараллельной пластинки при условии, что  $d = 30$  мм,  $\omega = 30^\circ$ ,  $n = 1,5$ ;  $1,75$ ;  $2,0$ .

13.24. Определить числовое значение показателя преломления стекла плоскопараллельной пластинки, при котором сферическая aberrация 3-го порядка достигает экстремального значения.

13.25. Определить числовое значение показателя преломления стекла плоскопараллельной пластинки, при котором хроматические aberrации 1-го порядка достигают экстремального значения.

13.26. Вычислить хроматические aberrации 1-го порядка для тонкой гиперхроматической линзы при условии:  $r_1 = \infty$ ,  $r_2 = -10$ ,  $r_3 = \infty$ ,  $s_1 = -20$ ,  $a_P = -10$  для комбинаций ТК16/Ф1.

13.27. Найти радиус склейки тонкой гиперхроматической линзы из стекол марок СТК9/ТФ4, если  $s_1 = -20$  мм, а  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,50$  мм.

13.28. Для тонкой гиперхроматической линзы найти условия, при которых хроматизм положения и хроматизм увеличения 1-го порядка равны нулю.

13.29. Вычислить радиусы кривизны тонкой линзы и монохроматические aberrации 3-го порядка с заданным значением  $\bar{W} = 0$ , если  $n = 1,5$ ,  $f' = 100$  мм,  $a_P = 0$ ,  $D/f' = 1:5$ ,  $s_1 = \infty$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.30. Вычислить монохроматические aberrации 3-го порядка тонкой линзы с заданным значением  $\bar{P} = \bar{P}_{\text{min}}$ , если  $n = 1,5$ ,  $s_1 = \infty$ ,  $f' = 100$  мм,  $a_P = 0$ ,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.31. Сравнить монохроматические aberrации 3-го порядка лупы в виде: а) плосковыпуклой линзы, обращенной плоской поверхностью к глазу; б) выпуклоплоской линзы, обращенной выпуклой поверхностью к глазу; в) симметричной двояковыпуклой линзы при условии:  $f' = 100$  мм;  $D_{\text{гл}} = 5$  мм;  $a_P = 0$ ;  $2\omega = 40^\circ$ ;  $n = 1,5$ .

13.32. Вычислить значения  $\bar{P}_{\text{min}}$  и  $\bar{W}$  для одной линзы при различных значениях показателя преломления  $n =$

$= 1,5 ; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; \dots; 2,5$ . Построить графики функций  $\bar{P}_{\min} = f(n)$  и  $\bar{W} = f(n)$ .

13.33. Вычислить хроматизм увеличения тонкой линзы при условии:  $s_1 = -100$  мм,  $\beta = -1\times$ ,  $a_P = 0$ ,  $-50$ ,  $50$ , линза выполнена из стекла К8 ( $\lambda_e$ ).

13.34. Показать, что хроматические aberrации 1-го порядка не зависят от формы линзы и остаются постоянными при ее оборачивании на  $180^\circ$ .

13.35. Показать, возможно ли для одной тонкой линзы и при каком значении показателя преломления  $n$  выполнение условия  $\bar{P} = 0$ .

13.36. Определить, во сколько раз изменится минимальная сферическая aberrация 3-го порядка тонкой линзы при изменении показателя преломления тонкой линзы с  $n = 1,5$  до  $n = 2,0$ , если  $s_1 = \infty$ .

13.37. Определить, во сколько раз изменятся монохроматические aberrации 3-го порядка тонкой плосковыпуклой линзы при обращении (поворот на  $180^\circ$ ) при условии, что  $s_1 = \infty$ , а  $n = 1,5$ .

13.38. Показать невозможность исправления сферической aberrации 3-го порядка для тонкой линзы при бесконечно удаленном предмете.

13.39. Определить положения входного зрачка для тонкой плосковыпуклой линзы, при которых дисторсия 3-го порядка равна нулю, если  $n = 1,5$  и предмет находится в бесконечности.

13.40. Определить, при каком положении зрачка в плосковыпуклой линзе отсутствует астигматизм 3-го порядка, если линза выполнена из оптического стекла с показателем преломления  $n = 1,5; 1,75; 2,0$ ; вычислить кому 3-го порядка для этого положения зрачка.

13.41. Определить сферическую aberrацию и кому 3-го порядка в системе, состоящей из двух одинаковых тонких плосковыпуклых линз, расположенных выпуклыми поверхностями навстречу друг к другу при  $n = 1,5$ ;  $a_P = 0$ ;  $f' = 100$  мм;  $D/f' = 1:5$ ;  $2\omega = 12^\circ$ .

13.42. Вычислить хроматизм положения 1-го порядка тонкой линзы при условии:  $f' = 100$  мм,  $s_1 = \infty$ ; линза выполнена из стекол К8 ( $\lambda_e$ ); Ф1 ( $\lambda_e$ ).

13.43. Вычислить хроматизм положения 1-го порядка тонкой линзы при условии:  $s_1 = -100$  мм,  $\beta = -1\times$ ; линза выполнена из стекол К8 ( $\lambda_e$ ); ТФ10 ( $\lambda_e$ ).

13.44. Вычислить хроматизм увеличения тонкой линзы

при условии:  $f' = 100$  мм,  $s_1 = \infty$ ,  $a_p = 0$ ,  $-50$ ,  $-100$ ; линза выполнена из стекла К8 ( $\lambda_e$ ).

13.45. Определить положение входного зрачка  $a_p$  для тонкой двояковыпуклой симметричной линзы, при котором кома 3-го порядка равна нулю, если  $n = 1,5$ ,  $s_1 = -\infty$ . Вычислить астигматизм при этом положении входного зрачка, если  $f' = 100$  мм,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.46. Определить положение входного зрачка для тонкой линзы, рассчитанной на минимум сферической aberrации 3-го порядка, при котором кома 3-го порядка равна нулю, если  $n = 1,5$ , предмет находится в бесконечности,  $f' = 100$  мм.

13.47. Определить положение входного зрачка для тонкой плосковыпуклой линзы, при котором астигматизм 3-го порядка равен нулю, если  $n = 1,5$ ;  $s_1 = \infty$ ,  $f' = 100$  мм.

13.48. Определить положение входного зрачка для тонкой выпуклоплоской линзы, при котором астигматизм 3-го порядка равен нулю, если  $n = 1,5$ ,  $s_1 = \infty$ . Вычислить сферическую aberrацию 3-го порядка, если  $f' = 100$  мм и  $D/f' = 1:5$ .

13.49. Определить положение входного зрачка тонкой двояковыпуклой симметричной линзы, при котором астигматизм 3-го порядка равен нулю, если предмет находится в бесконечности и  $n = 1,5$ .

13.50. Вычислить все монохроматические aberrации 3-го порядка тонкой симметричной двояковыпуклой линзы из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ , если  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ,  $s_1 = \infty$ ,  $a_p = -100$  мм.

13.51. Рассчитать очковую анастигматическую тонкую линзу силой 2 дптр, если выходной зрачок линзы совпадает с центром вращения глаза и находится на расстоянии от линзы  $a_{p'} = 25$  мм. Угловое поле линзы  $2\omega = 40^\circ$ , показатель преломления  $n = 1,5163$ ,  $d = 3$  мм.

13.52. Определить, во сколько раз сферическая aberrация 3-го порядка линзы, рассчитанной на минимум сферической aberrации, меньше сферической aberrации 3-го порядка плосковыпуклой, выпуклоплоской и двояковыпуклой симметричной линз, если  $n = 1,5$ ,  $n = 1,7$ ,  $n = 2,0$ ,  $s_1 = -\infty$ .

13.53. Определить положение входного зрачка  $a_p$  для тонкой выпуклоплоской линзы, при котором кома 3-го порядка равна нулю, если  $n = 1,5$ ;  $s_1 = -\infty$ . Определить сферическую aberrацию 3-го порядка при  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ .

13.54. Вычислить числовые значения основных параметров  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  для плосковыпуклой линзы при  $n = 1,5; 1,75; 2,0$ .

13.55. Вычислить числовые значения основных параметров  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  выпуклоплоской линзы при  $n = 1,5; 1,75; 2,0$ .

13.56. Определить положение входного зрачка для тонкой плосковыпуклой линзы, при котором кома 3-го порядка равна нулю, если  $n = 1,5$ ,  $s_1 = -\infty$ . Определить сферическую aberrацию 3-го порядка, если  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ .

13.57. Вычислить основные параметры симметричной двояковыпуклой линзы при  $n = 1,5$ ;

13.58. Вычислить радиусы тонкой линзы, имеющей минимальную сферическую aberrацию 3-го порядка при  $n = 1,5$  и  $n = 1,7$ , если  $f' = 100$  мм, а  $s_1 = -\infty$ .

13.59. Вычислить радиусы тонкой линзы, имеющей минимальную сферическую aberrацию 3-го порядка при  $n = 1,5$ ; если  $s_1 = -100$  мм, и  $\beta = -1^\times$ .

13.60. Вычислить все монохроматические aberrации 3-го порядка тонкой плосковыпуклой линзы из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ , если  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ,  $s_1 = -\infty$ ,  $a_P = -50$ .

13.61. Вычислить все монохроматические aberrации 3-го порядка тонкой выпуклоплоской линзы из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ , если  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ,  $s_1 = -\infty$ ,  $a_P = 0$ .

13.62. Сравнить aberrации 3-го порядка для тонкой выпуклоплоской линзы: а) при расположении предмета в бесконечности ( $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ); б) при расположении предмета на конечном расстоянии ( $\beta = -1^\times$ ,  $s_1 = -200$  мм,  $\sin \sigma_A = 0,1$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ). Входной зрачок совпадает с линзой, а показатель преломления стекла  $n = 1,50$ .

13.63. Сравнить aberrации 3-го порядка для тонкой симметричной двояковыпуклой линзы: а) при расположении предмета на конечном расстоянии ( $\beta = -1^\times$ ,  $s_1 = -200$  мм,  $\sin \sigma_A = 0,1$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ); б) при расположении предмета в бесконечности ( $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ). Входной зрачок совпадает с линзой, а показатель преломления стекла  $n = 1,50$ .

13.64. Вычислить aberrации 3-го порядка тонкого компонента, основные параметры которого  $\bar{P} = 0$ ,  $\bar{W} = 0$ ,  $\bar{C} =$

$= 0$ , при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $a_P = 0$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

13.65. Вычислить аберрации 3-го порядка тонкого компонента, основные параметры которого  $\bar{P} = 0$ ,  $\bar{W} = 0$ ,  $\bar{C} = 0$  при условии:  $s_1 = \infty$ ,  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ,  $a_P = -50$  мм.

13.66. Определить основные параметры компонента, состоящего из двух одинаковых тонких близко расположенных компонентов, если  $\bar{P}_{1/2} = 0$ ,  $\bar{W}_{1/2} = 0$ ,  $\bar{C}_{1/2} = 0$ .

13.67. Вычислить сферическую аберрацию и кому 3-го порядка для системы, состоящей из двух одинаковых тонких и симметрично расположенных компонентов, если  $\bar{P}_{1/2} = \bar{W}_{1/2} = 0$ ;  $f' = 100$  мм;  $D/f' = 1:5$ ;  $2\omega = 12^\circ$ ,  $a_P = 0$ .

13.68. Вычислить суммы аберраций 3-го порядка тонкого компонента, имеющего основные параметры  $\bar{P} = 0$ ,  $\bar{W} = 0$ ,  $\bar{C} = 0$  при условии:  $\beta = -1^\times$ ,  $s_1 = -100$  мм,  $a_P = 0$ .

13.69. Тонкий компонент имеет основные параметры  $\bar{P} = 0$ ,  $\bar{W} = 0$ ,  $\bar{C} = 0$ . Определить значения основных параметров при оборачивании компонента на  $180^\circ$ .

13.70. Вычислить аберрации 3-го порядка тонкого симметричного окуляра, если  $f' = 25$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 40^\circ$ ,  $a_P = -25$ , а основные параметры окуляра имеют значения  $\bar{P} = \bar{W} = 1,35$ ,  $\bar{C} = 0$ .

13.71. При каком значении  $\bar{W}_{1/2}$  в симметричной системе, состоящей из двух тонких одинаковых линз, дисторсия 3-го порядка минимальна, если  $n = 1,75$ ?

13.72. Определить числовые значения  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  тонкого компонента, при которых отсутствует сферическая аберрация и кома 3-го порядка. Вычислить при этих условиях остаточный астигматизм и дисторсию 3-го порядка при условии:  $s_1 = -\infty$ ,  $f' = 100$  мм,  $a_P = 0$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 30^\circ$ .

13.73. Определить числовые значения  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$  тонкого компонента, при которых отсутствуют кома и астигматизм 3-го порядка. Вычислить остаточные сферическую аберрацию и дисторсию 3-го порядка при условии:  $s_1 = -\infty$ ,  $f' = 100$  мм,  $a_P = -100$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $2\omega = 40^\circ$ .

13.74. Найти необходимое числовое значение  $\bar{S}_{III}$  тонкого симметричного окуляра, обеспечивающее выполнение условия,  $z'_m = -z'_s$  (исправление астигматизма «елочкой») при условии:  $s_1 = -\infty$ ,  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ ,  $h_1 = f' = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,

$H_1 = -1$  (выходной зрачок находится в задней фокальной плоскости),  $\bar{S}_{IV} = \bar{\pi} = 0,7$ .

13.75. Вычислить радиусы тонкого однолинзового конденсора, рассчитанного на минимум сферической аберрации 3-го порядка, при условии, что  $\beta_0 = -2^\times$ ,  $s_1 = -50$  мм,  $n = 1,5$ .

13.76. Рассчитать тонкий двухлинзовый конденсор на минимум сферической аберрации 3-го порядка при условии, что  $f' = 50$  мм,  $s_1 = -\infty$ ,  $n = 1,75$ .

13.77. Во сколько раз сферическая аберрация 3-го порядка конденсора с увеличением  $\beta_0 = -1^\times$ , состоящего из двух одинаковых плосковыпуклых линз, обращенных выпуклыми поверхностями друг к другу, меньше, чем у двояковыпуклой симметричной линзы с такими же радиусами кривизны, что и у двухлинзового конденсора, если  $n = 1,5$ ?

13.78. Показать, что в системе из двух тонких линз с равными показателями преломления сферическая аберрация 3-го порядка может быть исправлена. Найти, при каком значении показателя преломления это возможно. Считать, что  $s_1 = -\infty$ .

13.79. Показать, что в системе из трех тонких линз с равными показателями преломления сферическая аберрация 3-го порядка может быть исправлена. Найти, при каком значении показателя преломления это возможно. Считать, что  $s_1 = \infty$ .

13.80. Показать, что в системах, состоящих из двух и трех линз с исправленной сферической аберрацией 3-го порядка, в случае, если входной зрачок совпадает с вершиной первой поверхности и предмет находится в бесконечности, кома 3-го порядка не может быть исправлена.

13.81. Вычислить сферическую аберрацию 3-го порядка и найти диаметр наименьшего кружка рассеяния для конденсора, состоящего из плосковыпуклой линзы, обращенной выпуклой поверхностью к предмету, и апланатического мениска с  $\beta_0 = n$  при условии, что предмет лежит на бесконечности. Фокусное расстояние конденсора  $f' = 50$  мм,  $2\sigma'_{охв} = 60^\circ$ , показатели преломления обеих линз  $n = 1,65$ . При расчете полагать, что линзы тонкие.

13.82. Вычислить сферическую аберрацию 3-го порядка и найти диаметр наименьшего кружка рассеяния для конденсора симметричного вида, состоящего из двух апланатических менисков, между которыми расположены две плосковыпуклые линзы, обращенные выпуклыми поверхностями

ми навстречу друг другу при условии:  $\beta_0 = -1^\circ$ ,  $s_1 = -100$  мм,  $2\sigma_{\text{охв}} = 60^\circ$ , показатели преломления всех линз одинаковы и составляют  $n = 1,65$ . Линзы считать тонкими.

13.83. Вычислить волновую сферическую aberrацию тонкой линзы (выпуклоплоской, плосковыпуклой, симметричной двояковыпуклой), в плоскости наименьшего кружка, если  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:10$ ,  $\lambda = 0,0005$  мм.

13.84. Вычислить волновую aberrацию, вызываемую вторичным спектром тонкого двухлинзового объектива, склеенного из обычных марок стекол и ахроматизованного для видимой области спектра, если  $f' = 1000$  мм,  $D/f' = 1:10$ ,  $s_1 = \infty$ .

13.85. Для объектива микроскопа  $10 \times 0,30$  определить волновую aberrацию на краю поля, вызванную кривизной поверхности, если  $z'_p = -5$  мм,  $\lambda = 0,0005$  мм.

13.86. Вычислить волновую сферическую aberrацию сферического зеркала в плоскости наименьшего кружка, если  $f' = 500$  мм,  $D/f' = 1:5$ ,  $s_1 = \infty$ ,  $\lambda = 0,0005$  мм.

13.87. Во сколько раз изменится волновая сферическая aberrация для точки на оси оптической системы, если  $f'$  увеличить в  $k$  раз? Предмет находится в бесконечности.

13.88. Во сколько раз изменится волновая сферическая aberrация системы, если ее диаметр входного зрачка или числовую апертуру увеличить в  $k$  раз?

13.89. Как изменится волновая сферическая aberrация оптической системы, если ее  $f'$  увеличить в  $k$  раз, а диаметр входного зрачка или числовую апертуру уменьшить в  $k$  раз?

13.90. Объектив зрительной трубы с фокусным расстоянием 150 мм и диафрагменным числом  $K = 6$  имеет следующие конструктивные параметры и aberrации для точки на оси:

Марка стекла		
$r_1 = 94,19$	$d_1 = 6$	БК8
$r_2 = -57,94$	$d_2 = 3$	Ф4
$r_3 = -278,6$		

При  $m = 12,5$   $\Delta s'_e = 0,003$ ;  $\eta = 0,00$  %;  $s'_{f'} - s'_{c'} = -0,024$ .

Фокусное расстояние окуляра зрительной трубы равно 30 мм. Пользуясь теорией aberrаций 3-го порядка, определить: а) aberrации объектива для точки на оси, если он по ошибке будет установлен в перевернутом положении;

б) изменения aberrаций за окуляром для точки на оси; в) какие осевые aberrации окажутся при переворачивании объектива практически неизменными; г) проверить теоретические предположения расчетом хода осевых лучей.

13.91. После изготовления линз и сборки объектива, конструктивные параметры которого приведены ниже, установлено, что сферическая aberrация  $\Delta s'_e = 1$  мм (вместо  $-0,004$  по расчету), а хроматизм положения  $s'_{F'} - s'_{C'} = 0$ . Это совпадает с расчетным значением. Фокусное расстояние практически не отличается от расчетного:  $f' = 175,5$  мм вместо  $175,7$  мм. Радиусы оптических поверхностей линз и их толщины соответствуют чертежам. Суммарная толщина объектива соответствует расчету. Какая ошибка допущена при изготовлении объектива?

Марка стекла $K = 4,39$		
$r_1 = 102,8$	$d_1 = 8$	К8
$r_2 = -98,08$	$d_2 = 1,58$	
$r_3 = -92,47$	$d_3 = 4$	ТФ4
$r_4 = -219,8$		

13.92. Объектив триплет имеет следующие конструктивные параметры и характеристики:

Марка стекла		
$r_1 = 32,496$	$d_1 = 5$	ТК16
$r_2 = -707,1$	$d_2 = 4,23$	
$r_3 = -56,04$	$d_3 = 2$	БФ12
$r_4 = 37,43$	$d_4 = 6,36$	
$r_5 = -2535,8$	$d_5 = 5$	ТК16
$r_6 = -37,978$		

Апертурная диафрагма расположена после четвертой поверхности на расстоянии  $3,36$  мм;  $f' = 100$  мм;  $K = 4$ ;  $2\omega = 44^\circ$ .

Расчетные значения aberrаций составляют: продольная сферическая aberrация для края зрачка  $\Delta s'_e = 0,12$  мм; для края поля  $z'_m = 1,2$  мм;  $z'_s = -1,75$  мм. При изменении воздушных промежутков aberrации меняются следующим образом:



$$\begin{aligned} \text{при } \Delta d_2 = 0,001 \quad \delta(\Delta s'_e) &= -0,0109; & \delta z'_m &= \\ &= -0,00523; \delta z'_s = 0,00012; \\ \text{при } \Delta d_4 = 0,01 \quad \delta(\Delta s'_e) &= -0,00226; & \delta z'_m &= \\ &= 0,0213; \delta z'_s = 0,0071. \end{aligned}$$

В результате измерения aberrаций в собранном объективе установлено, что  $\Delta s'_e = -0,3$  мм;  $z'_m = -0,1$  мм;  $z'_s = -2,1$  мм. Толщины линз, радиусы оптических поверхностей, а также фокусные расстояния линз соответствуют чертежам. Линзы установлены в правильных положениях (не перевернуты). Какая ошибка допущена при сборке?

13.93. Ниже приведены конструктивные параметры ахроматического объектива с фокусным расстоянием  $f' = 104,3$  мм. Фокусные расстояния отдельных линз составляют  $f'_1 = 53,13$  мм;  $f'_{II} = -106,28$  мм. Воспользовавшись теорией aberrаций 3-го порядка, найдите и исправьте ошибку, допущенную при записи конструктивных параметров:

Марка стекла		
$r_1 = 64,56$	$d_1 = 5,7$	ТФ2
$r_2 = -46,26$	$d_2 = 1,9$	К8
$r_3 = -133,27$		

13.94. Измерение aberrаций объектива, конструктивные параметры которого приведены ниже, показало, что сферическая aberrация практически соответствует расчету ( $\Delta s'_e = 0,05$  вместо  $0,01$  мм), а хроматическая разность  $s'_F - s'_C$  составляет для края отверстия 2 мм вместо  $0,1$  мм. Радиусы оптических поверхностей и толщины линз выполнены в соответствии с чертежами. Фокусные расстояния линз и объектива в целом практически не отличаются от расчетных значений. Какая ошибка допущена при изготовлении объектива?

Марка стекла		
$r_1 = 81,66$	$d_1 = 6$	БК8 $f' = 150$ мм, $K = 5$
$r_2 = -61,66$	$d_2 = 3$	Ф4
$r_3 = -503,5$		

13.95. Система из трех сферических зеркал имеет следующие конструктивные параметры:

$$\begin{array}{lll} r_1 = -100 & & n_1 = 1 \\ & d_1 = -30 & n_2 = -1 \\ r_2 = -80 & & \\ & d_2 = 40 & n_3 = 1 \\ r_3 = 200 & & \\ & & n_4 = -1 \end{array}$$

Запись конструктивных параметров в обратном ходе лучей выглядит так:

$$\begin{array}{lll} & n_1 = 1 & \\ r_1 = -200 & & \\ & d_1 = -40 & n_2 = -1 \\ r_2 = 80 & & \\ & d_2 = 30 & n_3 = 1 \\ r_3 = 100 & & \\ & & n_4 = -1 \end{array}$$

Правильна ли эта запись?

13.96. Объектив состоит из двухлинзового склеенного компонента и одиночной линзы. Толщины линз и воздушный промежуток малы по отношению к фокусному расстоянию объектива. Входной зрачок располагается на первой поверхности. Исправление aberrаций объектива выполняется с помощью программы автоматизированной коррекции aberrаций 3-го порядка на ЭВМ. В качестве коррекционных параметров используются углы первого параксиального луча с осью ( $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  и  $\alpha_5$ ). Заданные значения сумм aberrаций 3-го порядка составляют  $\bar{S}_I = \bar{S}_{II} = \bar{S}_{III} = \bar{S}_{I, \text{xp}} = 0$ .

Автоматизированная коррекция не дала положительного результата, несмотря на то что число корригируемых функций (коэффициентов aberrаций) равно числу коррекционных параметров. В чем заключается ошибка?

13.97. Найти ошибки в записи конструктивных параметров объектива, схема которого представлена на рисунке.

$$\begin{array}{lll} r_1 = -50 & n_1 = 1 & \\ & d_1 = 20 & n_2 = 1,5163 \\ r_2 = -70 & & \\ & d_2 = 30 & n_3 = 1 \\ r_3 = -100 & & \\ & d_3 = -30 & n_4 = -1 \\ r_4 = 70 & & \\ & & n_5 = -1 \end{array}$$

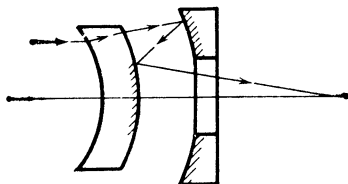


Рис. 13.1. Схема зеркально-линзового объектива

## 1. Идеальная оптическая система

1.1.  $a' = 1100$  мм;  $y' = -300$  мм ( $z = -10$  мм;  $\beta = -10^x$ );

1.2. Так как изображение действительное, то оно перевернутое, т. е.  $\beta = -5^x$ ,  $f' = 300$  мм.

1.3.  $\beta = -5^x$ :

$$\begin{array}{lll} \text{а) } f' = 400 \text{ мм; } & a = -480 \text{ мм; } & L = 2880 \text{ мм;} \\ \text{б) } f' = 410 \text{ мм; } & a = -492 \text{ мм; } & L = 3000 \text{ мм.} \end{array}$$

1.4. На основании формул (1.2) и (1.3) для системы, расположенной в однородных средах, получим:  $a = -120$  мм;  $a' = 600$  мм.

1.5.  $a = -156$  мм;  $a' = 780$  мм;

а) при  $n = n' = 1$  —  $f = f' = 130$  мм; при  $n = 1$  и  $n' = 1,333$   $f' = 173,29$  мм, тогда  $a' = 1039,74$  мм,  $a = -156$  мм;

б)  $a' = 780$  мм;  $a = -207,95$  мм.

1.6.  $\beta = -4^x$ ;  $f' = 40$  мм.

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

1.8. Для тонкого объектива при  $\beta = -0,2^x$   $f' = 55, (5)$  мм,  $a' = 66,7$  мм,  $a = -333, 3$  мм, расстояние  $L$  при этом определяется формулой  $L_{d=0} = -f' (1 - \beta)^2 / \beta$ . Приведенные в табл. 1.2 объективы не тонкие,  $\Delta_{HH'} = \Sigma d + s_{F'} - s_F - 2f' \neq 0$ , поэтому  $L = \Delta_{HH'} + L_{d=0}$ . При  $\beta = -0,2^x$   $L = \Sigma d + s_{F'} + 5,2 f'$ . В результате решения получим:

№ по пор.	1	2	3	4
$L$ , мм . . .	393	389,02	398,82	400,02

Наилучшим образом условиям задачи удовлетворяет объектив № 4.

1.9. Для тонкой линзы  $f' = 77,5$  мм;  $a' = 557,87$  мм;  $y' = -61,99$  мм;  $\beta = -6,2^x$ . Если толщина линзы  $d = 10$  мм, то по формулам (2.6) получим:  $f' = 79,11$  мм;  $s_{H'} = -2,69$  мм;  $s_H = 4,04$  мм. Тогда при  $s_1 = -90$  мм  $a = s_1 - s_H$ ;  $a = -94,04$  мм;  $\beta = -5,3^x$ ;  $a' = 498,47$  мм;  $s_2' = a' + s_{H'}$ ;  $s_2' = 495,78$  мм;  $y' = -53,01$  мм.

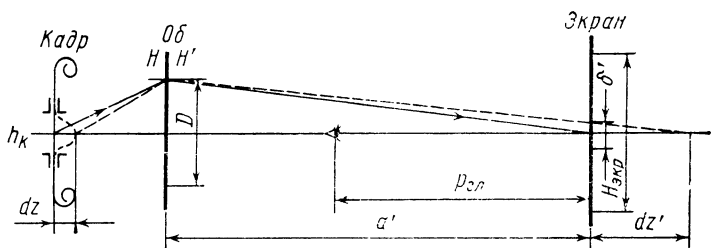


Рис. 14.1. Определение продольного смещения пленки в кадровом окне

1.10. В симметричной линзе при  $d = 0$   $r_1 = -r_2 = 2f'(n - 1)$ . Если  $d \neq 0$ , то радиус кривизны определяется из уравнения  $r_1^2 - 2f'r_1(n - 1) + (n - 1)^2 f'd/n = 0$ .

- а)  $f' = 83,3$  мм;  $r_1 = -r_2 = 85,38$  мм;  
 б)  $f' = 82,87$  мм;  $r_1 = -r_2 = 84,16$  мм;  
 в)  $f' = 85,013$  мм.

1.11. При продольных смещениях  $dz$  пленки в кадровом окне изображение осевой точки смещается на расстояние  $dz'$ , при этом на экране вместо точки образуется пятно размером  $\delta'$ . Зритель, находящийся от экрана на расстоянии  $p_{гг}$ , не почувствует ухудшения качества изображения, если пятно будет иметь угловой размер не более углового предела разрешения глаза  $\psi_{гг}$ . Учитывая это, получим ряд формул (рис. 14.1):

$$p_{гг} = \delta' / \psi_{гг}; \quad \delta' = \frac{D dz'}{dz' + a'}; \quad dz' = dz \alpha; \quad \alpha = \beta^2;$$

$$\beta = -H_{экв} / h_k; \quad a' = f' (1 - \beta).$$

На основании этих формул получим:

а)  $p_{гг} = 2,05$  м;

б)  $p_{гг} = 15,1$  м.

1.12. См. решение задачи 1.11:  $dz_1 = 0,116$  мм;  $dz_2 = 0,021$  мм.

1.13. См. табл. 1.1.

1.14. См. табл. 1.1.

1.15. См. табл. 1.1.

1.16. Узловые точки можно найти графически: а) направляя в систему наклонный к оси пучок параллельных между собой лучей; все лучи этого пучка собираются после системы в общей точке задней фокальной плоскости, которую определяет луч, идущий через передний фокус; б) направляя в систему пучок лучей, проходящих через общую точку в передней фокальной плоскости; за системой эти лучи

чи образуют пучок параллельных друг другу лучей, а наклон пучка определит луч, который в пространстве изображений проходит через задний фокус. Через узловые точки проходит луч, имеющий одинаковый наклон с осью до системы и за ней.

1.17. См. табл. 1.1.

1.18. См. табл. 1.1

1.19. Ходом луча, идущего из точки  $B$  через переднюю узловую точку, которая в этой задаче совпадает с главной точкой.

1.20.  $a = -2837,3$  мм;  $y = 833,3$  мм;  $a_{\text{шк}} = -2133,3$  мм.

1.21. На основании формулы (1.8) для  $n = n' = 1$  получим:  $f' = 500$  мм;  $a_{F'} = 200$  мм;  $a_F = -1100$  мм. При расстоянии между компонентами  $d > 50$  мм изображение будет действительным, так как  $f' > 0$ . Если  $\beta = -1^\circ$ , то  $a'_2 = 700$  мм;  $a_1 = -1600$  мм.

1.22.  $a'_2 = 550$  мм;  $y'_2 = -50$  мм.

1.23.  $f'_3 = 500$  мм;  $a_{F'} = 400$  мм;  $a_F = -600$  мм. При  $d = f_1 = 100$  мм  $f'_3 = f'_1$ ,  $a_{F'} = 0$ ,  $a_F = -200$  мм. Если  $n_2 = 1,333$ , то  $f'_3 = 665$  мм;  $a_F = 565$  мм;  $a_F = -765$  мм.

1.24.  $y' = 14,22$  мм.

1.25. См. табл. 1.1.

1.26. См. табл. 1.1.

1.27. См. табл. 1.1.

1.28. См. табл. 1.1.

1.29. См. табл. 1.1.

1.30.  $f' = 150$  мм;  $\Phi = 6, (6)$  дптр;  $\beta = -53^\circ$ .

1.31. По формулам углов и высот вычислить  $h_2$ ,  $\text{tg} \sigma_3$ , а затем  $\beta = \text{tg} \sigma_1 / \text{tg} \sigma_3$ ;  $2y'_2 = 2y_1 \beta$ ;  $a'_2 = h_2 / \text{tg} \sigma_3$ .

а)  $2y'_2 = -10$  мм;  $\beta = -5^\circ$ ;  $a'_2 = 500$  мм, т. е. квадрат изображается оптической системой в виде прямоугольника со сторонами  $2y'_2$  и  $2z'_2$ , соответственно равными 10 и 50 мм. Таким образом, левая сторона изображения находится от системы на расстоянии 450 мм;

б) линейное увеличение для левой стороны  $\beta_{1л} = -4,55^\circ$ ,  $2y'_{2л} = -9,09$  мм,  $a'_{2л} = 454,55$  мм, т. е. квадрат изображается в этом случае в виде трапеции.

1.32.  $2y' = 150,57$  мм.

1.33. Используя программу № 3, (см. прил. 2), вычислим значения  $f'$  и  $a_{F'}$ , которые приведены в таблице ответов к задаче 1.34 п.2.

1.34. Используя программу № 3, введенную в микрокалькулятор при решении задачи 1.33, получим:

- а)  $\Sigma d = 700$  мм;  $d_1 = 550$  мм;  $d_2 = 150$  мм;  $f' = 778,21$  мм;  
 $a'_{F'} = 285,99$  мм;  
 $d_1 = 450$  мм;  $d_2 = 250$  мм;  $f' = 754,72$  мм;  
 $a'_{F'} = 330,19$  мм;
- б)  $\Sigma d = 180$  мм;  $d_1 = 66$  мм;  $d_2 = 114$  мм;  $f' = 273,74$  мм;  
 $a'_{F'} = 97,07$  мм;  
 $d_1 = 54$  мм;  $d_2 = 126$  мм;  $f' = 279,08$  мм;  
 $a'_{F'} = 113,48$  мм;
- в)  $\Sigma d = 600$  мм;  $d_1 = 220$  мм;  $d_2 = 380$  мм;  $f' = 591,40$  мм;  
 $a'_{F'} = 317,38$  мм;  
 $d_1 = 180$  мм;  $d_2 = 420$  мм;  $f' = 676,23$  мм;  
 $a'_{F'} = 317,83$  мм;
- г)  $\Sigma d = 500$  мм;  $d_1 = 440$  мм;  $d_2 = 60$  мм;  $f' = 564,76$  мм;  
 $a'_{F'} = 320,33$  мм;  
 $d_1 = 360$  мм;  $d_2 = 140$  мм;  $f' = 504,03$  мм;  
 $a'_{F'} = 342,34$  мм.

2) В следующей таблице приведены в виде дроби значения  $f/a'_{F'}$ , мм:

Расстояние между глав- ными плос- костями второго и третьего компонентов	Вари- ант	$d_1$	$d_1 + 0,1d_1$	$d_1 - 0,1d_1$
$d_2$	а	769,23/307,69	813,01/276,42	729,93/335,77
	б	276,50/105,07	276,88/93,59	276,12/116,52
	в	628,57/314,29	559,32/270,34	717,39/370,65
	г	535,71/332,14	559,70/320,15	513,70/343,15
$d_2 + 0,1d_2$	а	781,25/304,69	827,81/272,35	739,64/333,58
	б	282,75/98,40	283,39/86,38	282,11/110,36
	в	564,10/225,64	504,59/190,06	639,53/270,74
	г	533,81/332,03	558,45/320,10	511,25/342,94
$d_2 - 0,1d_2$	а	757,58/310,61	798,72/280,35	720,46/337,90
	б	270,51/111,45	270,66/100,47	270,37/122,42
	в	709,68/425,81	627,38/370,15	816,83/498,27
	г	537,63/332,26	560,96/320,19	516,17/343,36

1.35. Выражая через  $f'_1$ ,  $f'_2$  и  $a'_{F'}$  значения  $d$  и  $f'$ , получим:

$$f' = f'_1(1 - a'_{F'} / f'_2); \quad d = f'_1 - \frac{f'_2 a'_{F'}}{f'_2 - a'_{F'}};$$

$f' = 500$  мм;  $d = 60$  мм.

1.36. Предварительно найдем  $\beta = -0,2^x$ , по формулам (1.10) определим  $s = -375$  мм;  $s' = -75$  мм;  $f' = -62,5$  мм;  $r = -125$  мм.

1. 37. а)  $z' = 0$ ;

б)  $z = -3,844 \cdot 10^{11}$  мм,  $z' = 0,067$  мм;

в)  $z_1 = 3,198 \cdot 10^8$  мм,  $z'_1 = 80,04$  мм;  $z_2 = 1,9984 \cdot 10^8$  мм,  $z'_2 = 128,1$  мм.

1.38.  $a'_2 = 52,16$  мм.

1.39. Требуемое значение линейного увеличения  $\beta = -50^x$ , при этом длина зала  $a' = 5,1$  м.

а) при  $a' = 3,5$  м и  $f' = 100$  мм  $\beta = -34^x$ . В этом случае размер изображения, равный  $816 \times 1224$  мм, занимает лишь часть площади экрана;

б) для полного заполнения экрана изображением кадра при длине зала  $a' = 3,5$  м и  $\beta = -50^x$  необходимо применить объектив с фокусным расстоянием  $f'_{\text{тр}} = 68,63$  мм ( $f'_{\text{тр}} = a' / (1 - \beta)$ ). Этого можно достигнуть с помощью насадки с  $f'_{\text{нас}} = f' f'_{\text{тр}} / (f' - f'_{\text{тр}})$  при  $d = 0$ ;  $f'_{\text{нас}} = 218,75$  мм, т. е. оптическая сила насадки  $\Phi_{\text{нас}} = 4,57$  дптр.

1.40. а)  $\beta_2 = -5^x$  — линейное увеличение окуляра, смещенного на  $z_2 = -3$  мм от объектива;

б)  $d_{\text{ок}} = 198$  мм;  $d_{\text{экр}} = 288$  мм;

в) в этом случае  $z'_2 = 78$  мм и  $z_2 = -2,885$  мм; для объектива  $z'_1 = \Delta + z_2$ ,  $z'_1 = 157,115$  мм,  $z_1 = -2,546$  мм. Таким образом, плоскость предметов необходимо отодвинуть от объектива на расстояние  $s_1 = -25,046$  мм ( $s_1 = a_F + +z_1$ ),  $\beta = \beta_1 \beta_2 = 40,85^x$ .

г)  $L = 310,5$  мм (первоначальное). Если учесть, что микроскоп — это двухкомпонентная система с  $f'_M = -1,875$  мм,  $a'_{F'} = 16,406$  мм,  $a_F = -22,5$  мм;  $\Delta_{HH'} = 237,656$  мм, то по формуле (1.1), получим:  $\beta_M = 40,825^x$ ,  $z_M = f' / \beta_M$ ;  $z'_M = -f'_2 / z_M$ ;  $z_M = -0,046$  мм,  $z'_M = 76,427$  мм, т. е. микроскоп проецирует предмет на экран, если он удален от предмета на расстояние  $z_M = -0,046$  мм.

1.41.  $2y' = 10,48$  мм;

а)  $2y' = 5,24$  мм;

б)  $2y' = 1,789$  мм.

1.42. От большого зеркала на 3,85 мм,

1.43. От большого зеркала на 3,85 мм.

1.44. Применяя формулы  $s'_1 = s_1 r_1 / (2s_1 - r_1)$ ;  $s_2 = s'_1 - d$ ;  $s'_2 = s_2 r_2 / (2s_2 - r_2)$ , получим:

а)  $s'_2 = -80$  мм;

б)  $s'_2 = -75$  мм;

в)  $s'_2 = -25$  мм;

г)  $s'_2 = -20$  мм. Так как в конфокальном двухзеркальном резонаторе  $s_1 - s'_2 = d$ , то изображение осевой точки совпадает с предметной точкой.

1.45.  $d = 541,82$  мм.

1.46. Из формулы (1.9) для  $a_F'$  вычислить  $\Phi_2 = 1/f'_2$ , и тогда  $r_2 = 2f'_2$ , а из формулы для  $\Phi$  вычислить  $f'_3 = 1/\Phi_3$ , тогда  $r_2 = -218,79$  мм;  $f'_3 = 212,5$  мм.

1.47. Используя явление полного внутреннего отражения, т. е. принимая  $\varepsilon'_2 = 90^\circ$ , получим  $\sin \varepsilon'_{\max} = \sin \sigma_{\max} = \sqrt{n_{\text{ст}}^2 - n_{\text{об}}^2}$ .

1.48.

Пара стекол	$\sin \sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}$
B722/BT476	0,886966	62,49
B752/B510	0,888484	62,68
B735/B521	0,834736	56,59
B735/B518	0,840179	57,16

1.49.  $\varepsilon_B = 58,107$ .

1.50.

$n$	$r$ , мм, при $H$ , мм			
	100	150	200	300
1,334	113,26	169,89	226,52	339,78
1,515	87,87	131,801	175,73	263,602
1,6582	75,601	113,40	151,20	226,803

1.51. Известно [6], что  $\beta_1 \beta_2 = 1$ ,  $2y_1 = 2y\beta_1$ ,  $2y_2 = 2y/\beta_1$ , т.е.  $|a_1| = |a'_2|$  и  $y = \sqrt{y'y'_2}$ .



$$1.52. f' = -z' \pm \sqrt{z'L}; \quad a' = f' (1 - \beta); \quad a = a' - L.$$

$$1.53. s_1 = \pm \sqrt{(d + d_{\text{пл}}/n_{\text{пл}})^2 + 2f'(d + d_{\text{пл}}/n_{\text{пл}})};$$

а) 150 мм;

б) — 150 мм;

в) 166,13 мм; для вогнутых зеркал решение есть, если  $|d| > |2f'|$ .

$$1.54. \beta = 2^x; \quad a'_3 = -1000 \text{ мм}; \quad y' = 20 \text{ мм}.$$

$$1.55. \text{ а) } \beta = -2^x, \quad y' = -4 \text{ мм};$$

$$\text{ б) } \beta = -0,2668^x, \quad y' = -5,336 \text{ мм}.$$

$$1.56. n_{p+1} = 1,333.$$

## 2. Оптика параксиальных и нулевых лучей

2.1. На основании формул (2.1) и (2.3) получим:

$$s' = \frac{n' rs}{(n' - n)s + nr}; \quad \beta = \frac{nr}{(n' - n)s + nr};$$

а) —1;

б) 0,4286;

в) —3;

г) 0,333.

$$2.2. r = 25 \text{ мм}; \quad n = 1,5 \text{ или } n' = 1.$$

$$2.3. r = -28,57 \text{ мм}.$$

$$2.4. s' = -100 \text{ мм}; \quad \beta = 0,333^x.$$

$$2.5. \text{ а) } \beta = 0,111; \quad s' = 22,2 \text{ мм};$$

$$\text{ б) } \beta = -0,333^x; \quad s' = -33,3 \text{ мм};$$

$$\text{ в) } \beta = -2,08(3)^x; \quad s' = -77,08(3) \text{ мм}.$$

2.6. Расчет выполнен правильно, так как

$$n_1 \alpha_1 dy_1 = \dots = n_5 \alpha_5 dy_5 = -0,01.$$

$$2.7. s'_4 = 64,195 \text{ мм}.$$

2.8. Объектив представляет собой трехлинзовую склеенную (рис. 14.2) оптическую систему с  $r_1 = 15,04 \text{ мм}$ ,  $r_2 = -14,8 \text{ мм}$ ,  $r_3 = 19,78 \text{ мм}$ ,  $r_4 = -8217 \text{ мм}$ .

$$2.9. f' = 42,712 \text{ мм}, \quad s_{f'} = 30,80 \text{ мм}, \quad f = -42,712 \text{ мм}, \\ s_F = -45,29 \text{ мм}, \quad s_H = -2,578 \text{ мм}, \quad s_{H'} = -11,912 \text{ мм}.$$

2.10. При  $h_1 = 150 \text{ мм}$   $\alpha_1 = h_1/s_1 = -1$ . После расчета хода нулевого луча получим  $h_2 = 147,807 \text{ мм}$ ,  $\alpha_3 = 2,087$ , тогда  $s'_2 = 70,82 \text{ мм}$ ,  $a = -152,02 \text{ мм}$ ,  $a' = 72,84 \text{ мм}$ .

$$2.11. r_1 = 23,4 \text{ мм}, \quad r_2 = 198,0 \text{ мм}.$$

$$2.12. s'_2 = 104,79 \text{ мм}, \quad y'_2 = -0,489 \text{ мм}.$$

$$\begin{array}{ll}
2.13. & \alpha_1 = -0,957 \\
& \alpha_2 = -0,184 \\
& \alpha_3 = -0,480 \\
& \alpha_4 = 0,3635 \\
& h_1 = 44,96 \\
& h_2 = 45,14 \\
& h_3 = 46,104
\end{array}$$

2.14.  $\beta = n_1 \alpha_1 / (n_9 \alpha_9)$ . Рассчитывая ход параксиального луча, получим значения  $\alpha_1, \dots, \alpha_9$ . Например, при  $\alpha_1 = -0,1$   $h_1 = 0,2$ ;  $\alpha_9 = 0,0045$ , т. е.  $\beta = -22,2^\times$ .

2.15.  $r_1 = \infty$ ;  $r_2 = -39,63$ ;  $r_3 = 39,63$ ;  $r_4 = \infty$ .

2.16. По программе № 1 (см. прил. 2) получим:

Параметр, мм	а)	б)	в)	г)
$f'$	73,25	262,84	275,31	-95,49
$s_H$	2,5	9,24	-5,64	1,96
$s'_H$	-1,5	5,54	-9,40	-1,96
$s'_F$	71,79	268,39	265,91	-97,45
$s_F$	-70,79	-253,6	-280,95	97,45

2.17. С помощью формул радиусов и толщин получим (см. рис. 14.3):

$$\begin{array}{ll}
r_1 = 63,326, & d_1 = 4,5, \\
r_2 = 342,825, & d_2 = 0,3, \\
r_3 = 37,544, & d_3 = 10,2, \\
r_4 = -201,365, & d_4 = 20,3, \\
r_5 = 24,11, & d_5 = 20,96, \\
r_6 = 62,888, & d_6 = 3,1. \\
r_7 = 123,338, &
\end{array}$$

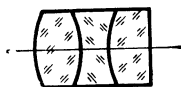


Рис. 14.2. Объектив, склеенный из трех линз

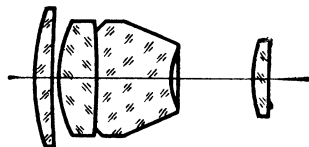


Рис. 14.3. Схема объектива «Юпитер-11»

2.18.  $f_1 = 135,788$  мм,  $f'_{(1,2,3)} = 208,749$  мм.

2.19. Для рассматриваемого случая  $\alpha_7 = 0,8039$ ,  $h_7 = 0,4688$ ,  $\alpha_8 = 1,0207$ . Фокусное расстояние объектива может быть вычислено делением старого значения фокусного расстояния (133, 14 мм) на новое значение  $\alpha_8$ , т. е.  $f'_{\text{нов}} = 130,436$  мм.

2.20. За счет изменения толщины последней линзы. Порядок решения: 1) вычислить угол  $\alpha_7$ ; 2) подставив полученное значение угла  $\alpha_7$  в формулу для угла  $\alpha_8$  при  $\alpha_8 = 1$ , определить значение высоты  $h_7$ ; 3) из формулы  $h_7 = h_8 - \alpha_7 d_8$  вычислить значение  $d_8$ ;  $d_8 = 5,07$  мм. Плоскость изображения по сравнению с исходным вариантом объектива следует сместить от объектива на 0,41 мм.

2.21.  $r_1 = 60$  мм;  $r_2 = -120$  мм.

2.22.  $f'_1 = 79,27$  мм,  $s'_{F'} = 67,7$  мм,  $d_2 = 12$  мм,  $\bar{d} = 15,44$  мм.

а)  $f' = 185,887$  мм;

б)  $f' = 99,83$  мм;

в)  $f' = 134,15$  мм.

### 3. Детали оптических систем

3.1. 1)  $f' = 292,94$  мм,  $f = -292,94$  мм; 2)  $f' = 292,94$  мм;  $f = -219,76$  мм; 3)  $f' = 292,94$  мм,  $f = -193,36$  мм. Заднее фокусное расстояние этой линзы не зависит от показателя преломления последней среды, так как ее вторая поверхность концентрична по отношению к заднему фокусу линзы.

3.2. Линза является концентрической, поскольку  $r_1 = -r_2 = d$ . Для такой линзы главные плоскости совмещены и проходят через общий центр поверхностей. Следовательно,  $s_{H'} = 80$  мм. Фокусное расстояние линзы  $f' = -11171,8$  мм.

3.3.  $n = 2$ . СТФ2 —  $n_e = 1,9554$ .  $s'_{F'} = 0,222$  мм.

3.4. При  $s_1 = 15$  мм  $\beta = 0,9723$ ,  $s' = 10,14$ . При  $s_1 = 25$  мм  $\beta = 1,029$ ,  $s' = 20,15$  мм.

3.5.  $f' = 60,42$  мм.

3.6. Запишем конструктивные параметры системы, образованной при двукратном отражении лучей от преломляющих поверхностей:

$$\begin{aligned} r_1 = 50, \quad r_2 = 80, \quad r_3 = 50, \quad r_4 = 80, \quad d_1 = 5, \quad d_2 = -5, \\ d_3 = 5, \quad n_1 = 1, \quad n_2 = 1,613, \quad n_3 = -1,613, \quad n_4 = 1,613, \\ n_5 = 1. \end{aligned}$$

Рассчитаем параксиальный луч, приняв  $h_1 = 1$ ,  $\alpha_1 = 0$ . Получим:

$$\alpha_2 = \frac{1}{50} \frac{1,613 - 1}{1,613} = 0,007601, \quad h_2 = 1 - 0,007601 \cdot 5 = 0,962,$$

$$\alpha_3 = -\frac{1,613}{1,613} 0,007601 + \frac{0,962}{80} \frac{-1,613 - 1,613}{-1,613} = 0,016449,$$

$$h_3 = 0,962 + 0,016449 \cdot 5 = 1,04425,$$

$$\alpha_4 = -\frac{1,613}{1,613} 0,016449 + \frac{1,04425}{50} \frac{1,613 + 1,613}{1,613} = 0,02531,$$

$$h_4 = 1,04425 - 5 \cdot 0,02531 = 0,91765, \quad \alpha_5 = 1,613 \cdot 0,02532 + \\ + \frac{0,91765}{80} (1 - 1,613) = 0,03381,$$

$$s_{F'} = \frac{h_4}{\alpha_5} = \frac{0,91765}{0,03381} = 27,14.$$

Фокусное расстояние при этом составляет  $f' = \frac{h_1}{\alpha_5} =$   
 $= \frac{1}{0,03381} = 29,58.$

3,7.  $f' = 91,24$  мм.

3.8. Воспользовавшись формулами для расчета параксиального луча, получим  $f' = \frac{r_2}{n_3 - n_2}.$

Номинальное значение фокусного расстояния  $f' =$   
 $= -71\,429$  мм.

Пределы изменения фокусного расстояния  $f' = -29\,412 \div$   
 $\div 166\,667$  мм.

3.9.  $f' = -72,57$ ,  $s_{F'} = -70,02.$

3.10. Воспользовавшись формулами для расчета параксиального луча, для плосковыпуклой линзы, получим  $f' =$   
 $= r / (2n).$  В перевернутом положении  $f' = -\frac{r}{2(n-1)}.$

Следовательно, при переворачивании линзы расположение фокуса отраженных от второй поверхности линзы лучей изменяется.

3.11.

$$s_A = \frac{1}{\frac{n}{d+r_2} - \frac{n-1}{r_1}}, \quad s_{A1} = -23,18, \quad s_{A2} = 36,72.$$

3.12. Воспользовавшись формулой для оптической силы линзы с конечной толщиной, получим  $\Delta\varphi = \frac{(n-1)^2 d}{n} \times$   
 $\times (\rho_1 + \rho_2 + \Delta\rho) \Delta\rho.$  1)  $\Delta\varphi = 1,8 \cdot 10^{-6}$ , 2)  $\Delta\varphi = 1,5 \cdot 10^{-5}.$

3.13.  $d \geq 4,18$  мм.

3.14. Линзу выполнить нельзя, так как ее толщина по краю  $t = -0,21$ .

3.15.  $l_1 = 21,1$  мм,  $l_2 = 24,9$  мм,  $l_3 = 22,9$  м.

3.16.  $l_1 = 68,6$  мм,  $l_2 = 50,5$  мм,  $l_3 = 58,6$  мм.

3.17. Зеркало установить невозможно, поскольку оно врезается в плоскость как первой, так и второй диафрагм:  $z_1 = -0,9$  мм;  $z_2 = -1,1$  мм.

3.18.  $l_1 = 32,5$  мм,  $l_2 = 20,9$  мм,  $l_3 = 36,9$  мм.

3.19.  $l_1 = 3,1$  мм,  $l_2 = 2$  мм,  $l_3 = 3,6$  мм.

3.20.  $l = 60,8$  мм.

3.21. Диаметр входного зрачка бинокля по заданию равен 24 мм. Диаметр полевой диафрагмы составляет  $D_{п.д} = 2 \cdot 120 \cdot \operatorname{tg} 4^\circ 30' = 18,8$  мм. Поскольку задано расстояние грани призмы от меньшей из двух диафрагм, то для расчета светового диаметра призм следует пользоваться формулой

$$D = 2 \left( z + a \frac{D_1}{D_2 - D_1} \right) \frac{\operatorname{tg} \sigma \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \sigma}.$$

Призмы должны быть одинаковыми, поэтому  $c = 4$  (для одной призмы БР —  $180^\circ$   $c = 2$ ). Для расчета располагаем призмы так, чтобы их ближайшие грани соприкасались, но значение  $z$  принимаем при этом равным 22 мм. Находим далее  $\operatorname{tg} \gamma = \frac{1,571}{4} = 0,393$  и  $\operatorname{tg} \sigma = \frac{24 - 18,8}{2 \cdot 120} = 0,0217$ .

Из приведенной формулы определяем  $D = 20,9$  мм.

3.22.  $D = 21,2$  мм.

3.23. Не будет.

$$3.24. \quad n = \sqrt{1 + \left( \frac{\sin \sigma_{\max}}{\sin \varepsilon} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varepsilon} \right)^2};$$
$$n = \sqrt{1 + (1,414 \sin \sigma_{\max} + 1)^2}.$$

3.25.  $n \geq 1,693$ ; стекло СТК12,  $n_e = 1,695$ ;  $D = 54,5$  мм.

3.26. Призму установить невозможно, так как длина хода в призме превышает расстояние между диафрагмами.

3.27. 1)  $\sin \sigma_A = 0,89$ ; 2)  $\sin \sigma_A = 0,56$ ; 3)  $\sin \sigma_A = 0,55$ .

3.28. Определяем числовую апертуру световода  $\sin \sigma_A = 0,56$ ;  $\sigma_A = 34^\circ$ . Для лучей, идущих на край поля с края выходного зрачка, максимальный угол с осью волокна составляет  $\sigma = \sigma_{A \text{ об}} + \omega \leq 34^\circ$ . Отсюда  $\sin \sigma_{A \text{ об}} \leq \sin 28^\circ$ .  $\sin \sigma_{A \text{ об}} = 0,469$  и диафрагменное число  $K = \frac{1}{2 \sin \sigma_{A \text{ об}}}$ .

Относительное отверстие  $1:K = 1:1,07$ .

3.29. На расстоянии  $z = 81,4$  мм от вершины первой поверхности волоконного жгута.

3.30. Для центральной точки поля  $D' = 14$  мм, для крайней —  $D' = 21,4$  мм.

3.31. Построением изображений двух взаимно перпендикулярных стрелок определяем, что для исходного положения, изображенного на рис. 3.7, а, горизонтальная стрелка остается горизонтальной, сохраняющей свое направление. Вертикальная стрелка оказывается перевернутой на  $180^\circ$ . Повернем головную призму на  $90^\circ$  по часовой стрелке, если смотреть в направлении стрелки А. Убеждаемся, что изображение повернулось на  $90^\circ$  в направлении против часовой стрелки. Чтобы вернуть изображение в первоначальное положение, призму Дове следует повернуть на угол  $45^\circ$  по часовой стрелке, если смотреть со стороны изображения. Следовательно, призма Дове должна вращаться с частотой, в 2 раза меньшей, чем частота вращения головной призмы. Для системы, изображенной на рис. 3.7, б, призму Дове следует вращать в противоположную сторону, но с частотой, по-прежнему в 2 раза меньшей частоты вращения головной призмы. Наличие телескопической системы Кеплера в сочетании с призмами (см. рис. 3.7, в) не влияет на направление и частоту вращения компенсационной призмы Дове.

3.32. Простейшей призмой является призма Дове. Ее гипотенузная грань должна быть ориентирована под углом  $45^\circ$  по отношению к оси  $OU$  в направлении, указанном стрелкой  $\phi$  (см. рис. 3.8).

3.33. Простейшей призмой, способной работать в сходящемся пучке лучей, является призма А —  $0^\circ$  (призма Аббе). Ее ориентация не отличается от ориентации призмы Дове.

3.34. При вращении головного зеркала вокруг оси  $OU$  (см. рис. 3.8) в направлении стрелки  $\psi$  изображение останется неподвижным, если компенсационная призма будет вращаться в направлении стрелки  $\phi$  с частотой, в 2 раза меньшей частоты вращения головного зеркала.

3.35. Проверим выполнимость поставленной задачи для двух ориентировок плоской поверхности: 1) первая поверхность плоская; поскольку  $K = 1$ , то  $\text{tg } \sigma_1 = 0,5$ ;  $\sin \sigma_1 = -0,4472$ ;  $\sin \sigma_3 = 0$ .

$$\sin \sigma_{\text{зпред}} = \frac{-0,4472 \pm \sqrt{(1,49^2 - 1)(1,49^2 - 0,4472^2)}}{1,49^2} = 0,506;$$

$\sin \sigma_3 < 0,506$ ; полного внутреннего отражения не проис-

ходит; 2) вторая поверхность плоская; тогда  $\sin \sigma_1 = 0$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,4472$ ;

$$\sin \sigma_{\text{зпред}} = \frac{\sqrt{1,49^2 - 1}}{1,49^2} = 0,498;$$

полное внутреннее отражение отсутствует. Таким образом, обе ориентации являются допустимыми.

Определим оптимальную ориентацию плоской поверхности. Если первая поверхность плоская, то

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{0 + 0,4472}{\sqrt{1,49^2 - 0,4472^2} - 1} = 1,0615;$$

$\varphi = 46,7^\circ$ . При противоположной ориентации плоской поверхности  $\sin \sigma_1 = 0$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,4472$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{0,4472}{\sqrt{1,49^2} - 0,89443} = 0,7509;$$

$\varphi = 36,9^\circ$ . Следовательно, плоская поверхность должна быть второй по ходу луча света. При такой ориентации толщина линзы не влияет на результаты расчета. Определим угол  $\varphi$  для первой от края зоны  $\operatorname{tg} \sigma_3 = \frac{99,8}{200} = 0,499$ ;  $\sin \sigma_3 = 0,4465$ ;  $\cos \sigma_3 = 0,8948$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,7501$ ;  $\varphi = 36,88^\circ$ . Аналогично для следующей зоны находим  $\operatorname{tg} \varphi = 0,7494$ ;  $\varphi = 36,85^\circ$ .

3.36. Плоская поверхность должна быть второй по ходу луча света.  $h_1 = 57,7$  мм,  $\varphi = 48,29^\circ$ ,  $h_1 = 57,5$  мм,  $\varphi = 48,24^\circ$ ,  $h_1 = 57,3$ ,  $\varphi = 48,19^\circ$ .

3.37.  $h_1 = 17,2$  мм,  $\varphi = 48,59^\circ$ ;  $h_1 = 17,15$ ,  $\varphi = 48,52^\circ$ .

$$3.38. \sin \sigma_{1\text{пред}} = -\sqrt{\frac{n^2 - 1}{n^2 + 3}} \sin \sigma_A = 0,483 \text{ и} \\ \sin \sigma_A = 0,776.$$

#### 4. Ограничение пучков лучей в оптических системах

4.2.  $D' = 18,8$  мм;  $a_{p'} = -25$  мм;  $D_{\text{св}} = 19$  мм.

4.3.  $a_{p_1} = 86$  мм;  $a_{p'} = -37,5$  мм;  $D/f' = 1:10$ ;  $\beta_p = 0,437$ .

4.4.  $D = 16,65$  мм;  $D' = 10$  мм;  $2\omega_1 = 5^\circ 45'$ ;  $2\omega_2 = 58^\circ$ .

4.5. Для определения положения выходного зрачка и апертурной диафрагмы необходимо сделать расчет хода ну-

левого луча, проходящего через центр входного зрачка под произвольным углом  $\alpha_1$ . Высота этого луча на первой поверхности будет  $h_1 = s_P \alpha_1$ . Тогда положение апертурной диафрагмы относительно пятой поверхности определяется по формуле

$$s_{P'_5} = h_5 / \alpha_5.$$

Если, например, принять  $\alpha_1 = 0,1$ , то  $h_1 = 8,299$ ,  $h_5 = 2,6754$ ;  $\alpha_5 = 0,1918$ ;  $s_{P'_5} = 13,95$  мм;  $s_{P'} = -8,95$ .

4.6. Выполнив расчет нулевого луча от апертурной диафрагмы в обратном ходе через предшествующую часть системы, найдем положение входного зрачка  $s_P$ . Расчет этого же луча в прямом ходе через последующую часть системы позволяет определить положение выходного зрачка  $s_{P'}$ .  $s_P = 10,159$  мм;  $s_{P'} = -13,32$  мм.

4.7. Используется формула (1.8) оптической силы двухкомпонентной системы и определяется расстояние между компонентами  $d = 70$ . Диаметр апертурной диафрагмы 26,7 мм.

4.8. Фокусное расстояние двухзеркальной системы с известными конструктивными параметрами вычисляется по формуле

$$f' = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 - 2d)}.$$

$d = -60$ ;  $D' = 45,4$ ;  $s_{P'} = -27,25$ .

4.9.  $D/f' = 1:10$ ;  $s_P = 300$  мм.

4.10. Оправа второго компонента является выходным зрачком реверсивного телеобъектива. Диаметр этой оправы  $D' = 62,5$  мм.

4.11. Оправа выпуклого зеркала является выходным зрачком двухзеркального объектива. Диаметр этой оправы  $D' = 148,8$  мм.

4.12.  $2\omega = 46^\circ$ ;  $2\omega = 28^\circ$ ;  $2\omega = 18^\circ$ .

4.131.  $D_{\Pi, \text{д}} = 25$  мм.

4.14. Учитывая, что  $\Phi_2 = -2\Phi_1$ , по формуле оптической силы двухкомпонентной системы вычисляем оптическую силу первого компонента:

$$\Phi_1 = \frac{1 \pm \sqrt{1 + 4(2d)\Phi}}{2(2d)} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 2 \cdot 60}{500}}}{2 \cdot 2 \cdot 60} = \frac{1 \pm 1,4}{240}.$$



$\Phi_1 = 0,01$ . Отрицательное значение  $\Phi_1$  отбрасываем, следовательно,  $f'_1 = 100$  мм;  $j'_2 = -50$  мм.

Размер изображения оправы второго компонента через первый компонент в обратном ходе лучей  $D'_2 = 125$  мм. Это изображение будет мнимым. Расстояние от первого компонента до изображения составляет  $c = 150$  мм.

Из двух отверстий пространства предметов  $D_1 = 50$  мм и  $\bar{D}'_2 = 125$  мм наименьший диаметр имеет  $D_1$ , следовательно, оправка первого компонента является входным зрачком, т. е.  $D = 50$  мм.

Половина углового поля в пространстве предметов при отсутствии виньетирования

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{\bar{D}'_2 - D}{2c} = \frac{125 - 50}{2 \cdot 150} = 0,25; \omega_1 = 14^\circ.$$

Половина углового поля в пространстве предметов при полном виньетировании

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{\bar{D}'_2 + D}{2c} = \frac{125 + 50}{2 \cdot 150} = 0,583; \omega_2 = 30^\circ 15'.$$

Таким образом,  $D/f' = 1:10$ ;  $2\omega_1 = 28^\circ$ ;  $2\omega_2 = 60^\circ 30'$ .

4.15.  $2\omega_{\max} = 42^\circ 40'$ ;  $2\omega_{\min} = 11^\circ 10'$ .

4.16.  $a_{F'} = 29,3$  мм;  $2\omega = 11^\circ 30'$ .

4.17.  $2\omega = 5^\circ 40'$ ;  $k_\omega = 0,9$ .

4.18.  $2\omega = 10^\circ 50'$ ;  $2\omega' = 12^\circ$ .

4.19.  $2\omega = 3^\circ$ ;  $2\omega' = 6^\circ 20'$ .

4.20.  $2\omega = 3^\circ 40'$ ;  $D/f' = 1:8$ .

4.21. По формуле отрезков определяем положение и размер изображений диафрагмы, расположенной внутри объектива, и оправы второго компонента. Эти изображения находим через первый компонент в обратном ходе лучей. Входным зрачком объектива будет мнимое изображение диафрагмы в обратном ходе лучей через первый компонент. Диаметр входного зрачка  $D = 16$  мм. Расстояние от первого компонента до входного зрачка  $a_{P1} = 100$  мм. Оправы первого и второго компонентов являются виньетирующими диафрагмами. Большее виньетирование вносит оправка первой линзы диаметром  $D_1 = 20$  мм.

Половина углового поля при отсутствии виньетирования определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{D_1 - D}{2a_{P1}} = \frac{20 - 16}{2 \cdot 100} = 0,02; \omega_1 = 1^\circ 10'.$$

Половина углового поля при коэффициенте виньетирования  $k_{\omega} = 0,5$  определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{D_1}{2a_{P1}} = \frac{20}{2 \cdot 100} = 0,1; \omega_2 = 5^{\circ}50'.$$

Окончательно получаем:  $D/f' = 1:5$ ;  $2\omega_1 = 2^{\circ}20'$ ;  $2\omega_2 = 11^{\circ}40'$ ;  $D_{\text{п.д}} = 16$  мм.

4.22. Диаметр апертурной диафрагмы 30 мм, диаметр оправы объектива 34,67 мм.

4.23.  $2\omega = 2^{\circ}50'$ .

4.24.  $f'_1 = -40$  мм;  $f'_2 = 40$  мм;  $2\omega = 74^{\circ}$ ;  $2\omega' = 28^{\circ}$ ;  $D/f' = 1:1,5$ .

4.25. Определяем фокусное расстояние объектива  $f' = 88$  мм. Тогда диаметр входного зрачка  $D = 44$  мм. При коэффициенте виньетирования  $k_{\omega} = 0,8$  линейный размер сечения наклонного пучка для края поля  $2m = k_{\omega} D = 35,2$  мм. Высота верхнего луча наклонного пучка на первом компоненте  $h_1 = 35,2 - 22 = 13,2$  мм. Далее используем формулу углов и высот для верхнего луча:

$$\operatorname{tg} \sigma_2 = \operatorname{tg} \sigma_1 + \frac{h_1}{f'_1} = -0,1317 + \frac{13,2}{120} = -0,0217;$$

$$h_2 = h_1 - d \operatorname{tg} \sigma_2 = 13,2 + 80 \cdot 0,0217 = 14,94;$$

$$D_2 = 2h_2 = 29,88 \text{ мм.}$$

## 5. Оптическая система как передатчик энергии излучения

5.1.  $r = 1$  м.

5.2.  $L_v = 184$  кд·м<sup>-2</sup>.

5.3.  $I_v = 100$  кд.

5.4.  $r = 1$  м;  $\Phi_v = 0,011$  лм.

5.5. Определяется яркость бумаги как вторичного источника. Так как расстояние между бумагой и фотоэлементом в 7 раз больше поперечного размера бумаги, то по отношению к фотоэлементу бумагу можно считать точечным источником с силой света  $I_v = L_v Q$  ( $Q$  — площадь бумаги). Затем находим освещенность от бумаги на фотоэлементе, а по освещенности — световой поток  $\Phi_v = 3,75 \cdot 10^{-4}$  лм.

5.6.  $L_v = 50,9$  кд·м<sup>-2</sup>.

5.7.  $r = 4,9$  м.

5.8.  $L_{v,A} = 26,4$  кд·м<sup>-2</sup>;  $L_{v,C} = 52,5$  кд·м<sup>-2</sup>.

$$5.9. I_{v1} = 20 \text{ кд.}$$

$$5.10. r = 14,1 \text{ мм.}$$

5.11. Установка плоского зеркала по другую сторону от источника света эквивалентна добавлению второго источника с силой света  $I'_v = \tau_0 I_v$ . Освещенность на экране от двух источников

$$E_v = \frac{I_v}{r_1^2} + \frac{\tau_0 I_v}{(r_1 + 2r_2)^2} = \frac{100}{1^2} + \frac{0,9 \cdot 100}{(1 + 2 \cdot 0,5)^2} = 122,5 \text{ лк.}$$

5.12. Освещенность в точках, удаленных от центра плоской поверхности, изменяется в соответствии с зависимостью  $E_{v,\varepsilon} = E_v \cos^3 \varepsilon$ , где  $E_v$  — освещенность в центре (под лампой);  $\varepsilon$  — угол падения лучей на плоскую поверхность;  $I_v = 1000$  кд; диаметр круга 34,6 м.

$$5.13. I_v(\varepsilon) = \frac{I_{v0}}{\cos^3 \varepsilon}; \Phi_v = 78,5 \text{ лм.}$$

$$5.14. M_v = 500 \text{ лм} \cdot \text{м}^{-2}.$$

$$5.15. r = 1120 \text{ м.}$$

$$5.16. \Phi_e = 7,35 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.}$$

5.17. Определяем энергетическую освещенность на светочувствительной поверхности термоэлемента:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{Q_{\text{тэ}}} = \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Энергетическая освещенность от источника, имеющего форму круглого плоского диска, определяется по формулам (5.1) и (5.2):

$$E_e = \pi L_e \sin^2 \omega = M_e \sin^2 \omega,$$

$$\text{где } \sin \omega = \frac{d}{2r} = \frac{20}{2 \cdot 560} = 0,0178.$$

Следовательно,

$$M_e = \frac{E_e}{\sin^2 \omega} = \frac{100}{0,0178^2} = 3,14 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Коэффициент теплового излучения источника определяется по закону Стефана — Больцмана

$$\varepsilon = \frac{M_e}{\sigma T^4} = \frac{3,14 \cdot 10^5}{5,67 \cdot 10^{-8} (2000)^4} = 0,348.$$

5.18. Определяем освещенность на бумаге по формуле (5.3):

$$E_v = \frac{\pi L_v}{\rho} = \frac{3,14 \cdot 15}{0,5} = 94,1 \text{ лк.}$$

Энергетическая освещенность на поверхности бумаги

$$E_e = \frac{E_v}{K} = \frac{94,1}{3} = 31,4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Далее см. решение задачи 5.17.  $T = 2050 \text{ К.}$

5.19. Аналогично решению задачи 5.17 определяем энергетическую освещенность в плоскости входного зрачка оптической системы. Затем находим площадь входного зрачка оптической системы  $Q_{\text{вх.зр}} = \Phi_e / E_e$  и его диаметр  $D =$

$$= \sqrt{\frac{4 Q_{\text{вх.зр}}}{\pi}} = 0,3 \text{ м.}$$

5.20.  $E_e = 1190 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}; E_v = 10^5 \text{ лк.}$

5.21.  $\Phi_v = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ лм.}$

5.22.  $\Phi_v = 2,82 \cdot 10^{-5} \text{ лм}; \Phi_e = 6,27 \cdot 10^{-7} \text{ Вт.}$

5.23.  $\tau = 0,42.$

5.24.  $\Phi_v = 87 \text{ 261 лм.}$

5.25.  $T = 2000 \text{ К.}$

5.26. В 78,5 раза. При наличии микрокалькулятора «Электроника» Б 3-34 воспользоваться программой № 5 (см. прил. 2).

5.27.  $M_{v,\lambda} = 330,8 \text{ лм} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$ . При наличии микрокалькулятора «Электроника» Б 3-34 воспользоваться программой № 5 (см. прил. 2).

5.28.  $\Phi_e = 4,92 \text{ Вт;}$  увеличится в 5,06 раза.

5.29.  $T = 1500 \text{ К.}$

5.30.  $Q = 10 \text{ мм}^2.$

5.31.  $\varepsilon = 0,35.$

5.32.  $\Phi_e = 0,0106 \text{ Вт.}$

5.33.  $E'_v = 355 \text{ лк.}$

5.34.  $\Phi'_v = 1,77 \cdot 10^{-8} \text{ лм.}$

5.35.  $D/f' = 1:11.$

5.36.  $\Phi'_e = 0,0129 \text{ Вт.}$

5.37. Освещенность, создаваемая Солнцем на поверхности Земли, определяется по формуле (5.1), а освещенность изображения Солнца в задней фокальной плоскости — по формуле (5.5). Отношение освещенностей

$$\frac{E'_v}{E_v} = \frac{1}{4} \tau_{\text{о.с}} \left( \frac{D}{f'} \frac{1}{\omega} \right)^2 = \frac{1}{4} 0,8 \left( \frac{1}{1} \frac{1}{0,005} \right)^2 = 8 \cdot 10^3.$$

5.38. Используя формулу (1.1) идеальной оптической системы, получаем квадратное уравнение относительно линейного увеличения  $\beta$ . Корни этого уравнения

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{L}{f'} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( 2 - \frac{L}{f'} \right)^2 - 1} = \\ &= \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{216}{30} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( 2 - \frac{216}{30} \right)^2 - 1} = \\ &= -2,6 \pm 2,4; \beta_1 = -5; \\ \beta_2 &= -0,2; E'_{v1} = 2,18 \text{ лк}; E'_{v2} = 54,5 \text{ лк}.\end{aligned}$$

5.39.  $E'_v = 3,16 \text{ лк}; E'_v = 4,05 \text{ лк}.$

5.40.  $D = 50 \text{ мм}.$

5.41.  $d_{\text{пр}} = 10 \text{ мм}; 2\omega = 3^\circ 40'.$

5.42.  $L_v = 162 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$

5.43.  $\Phi'_v = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ лм}.$

5.44.  $L_v = 637 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$

5.45.  $I_v = 1250 \text{ кд}.$

5.46. Находим яркость Солнца через земную атмосферу по формуле (5.1):

$$L_v = \frac{E_v}{\pi \sin^2 \omega} = \frac{10^5}{3,14 \cdot 0,045^2} = 1,57 \cdot 10^9 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Определяем освещенность изображения Солнца, создаваемого оптической системой, по формуле (5.5):

$$E'_v = \frac{0,8 \cdot 3,14 \cdot 1,57 \cdot 10^9}{4} \left( \frac{1}{2} \right)^2 = 2,46 \cdot 10^9 \text{ лк}.$$

Диаметр изображения Солнца, создаваемого оптической системой ( $2y' = 2\omega f' = 0,009 \cdot 100 = 0,9 \text{ мм}$ ), получается больше диаметра площадки приемника, расположенной в плоскости изображения. Следовательно, световой поток, поступающий на эту площадку,

$$\Phi'_v = E'_v \frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4} = 2,46 \cdot 10^9 \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} 10^{-6} = 48,3 \text{ лм}.$$

5.47.  $E'_v = 1,88 \cdot 10^3 \text{ лк}; E'_{v, \omega} = 0,902 \cdot 10^3 \text{ лк}.$

5.48.  $k_\omega = 0,6.$

## 6. Лупа и микроскоп

6.1. а)  $60 < \bar{\Gamma}_{\text{п}} < 120;$

б)  $85 < \bar{\Gamma}_{\text{п}} < 170;$

$\bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 16^{\times} \text{ и } \bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 25^{\times}.$

$\bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 16^{\times} \text{ и } \bar{\Gamma}_{\text{ок}} = 25^{\times}.$

- в)  $125 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 250$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 25^x$   
 г)  $200 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 400$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .  
 д)  $325 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 650$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .  
 е)  $425 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 1250$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .  
 ж)  $625 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 1250$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .
- 6.2. а)  $50 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 100$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .  
 б)  $100 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 200$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 20^x$ .  
 в)  $150 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 300$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 20^x$ .  
 г)  $250 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 500$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 20^x$ .  
 д)  $325 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 650$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 20^x$ .  
 е)  $425 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 850$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .  
 ж)  $625 < \bar{\Gamma}_{\Pi} < 1250$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 12,5^x$ .
- 6.3. а)  $D' = 1,29$  мм;  $2y = 0,55$  мм.  
 б)  $D' = 0,81$  мм;  $2y = 0,45$  мм.
- 6.4. а)  $D' = 0,96$  мм;  $2y = 1,15$  мм.  
 б)  $D' = 0,82$  мм;  $2y = 0,45$  мм.  
 в)  $D' = 0,68$  мм;  $2y = 0,29$  мм.
- 6.5. а)  $4 \times 0,12$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$ ;  $T_a = 0,394$  мм;  $T_B = 0,017$  мм;  
 $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$ ;  $T_a = 0,156$  мм;  $T_B = 0,017$  мм.  
 б)  $10 \times 0,30$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$ ;  $T_a = 0,063$  мм;  $T_B = 0,03$  мм;  
 $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$ ;  $T_a = 0,025$  мм;  $T_B = 0,003$  мм,  
 в)  $40 \times 0,65$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$ ;  $T_a = 0,004$  мм;  $T_B = 0,001$  мм;  
 $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$ ;  $T_a = 0,002$  мм;  $T_B = 0,001$  мм.
- 6.6. а)  $f' = 16$ ,  $A = 0,30$ ;  $T_a = 0,004$  мм;  $T_B = 0,003$  мм.  
 б)  $f' = 6,3$ ,  $A = 0,65$ ;  $T_a = 0,001$  мм;  $T_B = 0,001$  мм.  
 в)  $f' = 2,5$ ,  $A = 1,25$ ;  $T_a = 0,001$  мм;  $T_B = 0,00016$  мм,
- 6.7. а)  $10 \times 0,25$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 25^x$ .  
 б)  $25 \times 0,50$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 10^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 20^x$ .  
 в)  $100 \times 1,25$ ;  $\bar{\Gamma}_{OK} = 6,3^x$  и  $\bar{\Gamma}_{OK} = 16^x$ .
- 6.8.  $\delta = 0,00038$  мм.
- 6.9.  $\delta = 0,00022$  мм.
- 6.10.  $\delta = 0,00019$  мм.
- 6.11. а)  $\bar{\Gamma} = 10^x$ ; б)  $\bar{\Gamma} = 11^x$ .
- 6.12. а)  $\delta = 0,0014$  мм; б)  $\delta = 0,0009$  мм; в)  $\delta = 0,0007$  мм.

г)  $\delta = 0,00055$  мм; д)  $\delta = 0,0004$  мм; е)  $\delta = 0,0003$  мм;

ж)  $\delta = 0,0002$  мм.

6.13. а)  $\bar{\Gamma}_M = 120^\times$ ; б)  $\bar{\Gamma}_M = 180^\times$ .

6.14. а)  $\bar{\Gamma}_M = 100^\times$ ;  $2y = 1,4$  мм;

б)  $\bar{\Gamma}_M = 400^\times$ ;  $2y = 0,35$  мм.

6.15.  $\lambda = 0,00064$  мм.

6.16.  $D' = 1,0$  мм;  $a_{p'} = 28,6$  мм.

При решении использовать формулу (1.1) при  $n = n' = 1$ ,  $\Delta_{HH'} = 0$  и формулу отрезков.

6.17.  $f'_{об} = 4,28$  мм.

6.18.  $D_{ад} = 7,00$  мм,

6.19.  $D_{ад} = 5,6$  мм.

6.20.  $\Delta_0 = 200$  мм.

6.21.  $\bar{\Gamma}_M = -87,5^\times$ .

## 7. Телескопические системы

7.1. а)  $\psi_{д,1} = 4,38''$  или  $\psi_{д,2} = 3,75''$ ;

б)  $\psi = 7,5''$ .

7.2.  $\Gamma_T = 3^\times$ ;  $2\omega = 5^\circ 43' 12''$  ( $5.72^\circ$ );  $D' = 2,33$  мм.

7.3.  $2y = 314,4$  м;  $\delta_1 = 50,9$  мм; глаз через бинокль сможет различать предметы с угловым предельным размером  $\psi = 7,5''$ , т. е.  $\delta_2 = 109,08$  мм.

7.4. Теодолит — это точный прибор, поэтому  $\psi = 120''/D$ , т. е.  $\psi_{дифр} = 2''$ , и глаз через прибор будет различать детали предметов под углом  $\psi = 2''$ . Тогда  $\delta = \psi p$ ,  $\delta = 29,09$  мм.

7.5. а)  $D_{об} = 28,34$  мм;

б)  $D_{об} = 38,34$  мм.

7.6. При  $y = 2,6$  м,  $p = 50$  м и  $\delta = 0,5$  из формул  $\text{tg}\omega = y/p$  и  $\psi = \delta/p$  получим  $2\omega = 5,96^\circ$ ,  $\psi = 0,01$  или  $\psi = 0,573^\circ$ . Цена деления сетки  $\Delta y_{сет} = \psi f'_{об} = 2$  мм;  $f'_{об} = 200$  мм;  $f'_{ок} = 50$  мм;  $D_{пд} = 20,8$  мм.

7.7.  $\Gamma_T = 6^\times$ ;  $2\omega = 1,15^\circ$ ;  $D' = 2$  мм;  $f'_{об} = 150$  мм;  $f'_{ок} = 25$  мм;  $D = 12$  мм;  $D_{п,д} = 3$  мм.

7.8.  $f'_{об} = 80$  мм;  $f'_{ок} = 20$  мм;  $L = 100$  мм; так как полевая диафрагма не задана, то угловое поле будет определяться размером оправы коллективной линзы окуляра, поэтому  $\text{tg}\omega_1 = -(D_{ок} - 2m_2)/(2L)$ , где  $m_2 = -m_1/\Gamma_T$ ,  $m_1 = D/2 = 10$  мм,  $m_2 = 2,5$  мм;  $2\omega_1 = 7,44^\circ$ ;  $2\omega' = 29,15^\circ$ ;  $a_p = 0$ .

7.9  $f'_{об} = 160 \text{ мм}$ ;  $f'_{ок} = -40 \text{ мм}$ ;  $L = 120 \text{ мм}$ ;  $D = 20 \text{ мм}$ ;  
из формулы  $\text{tg } \omega = \frac{D_{об}}{2(a'_{р} \Gamma_T + L) \Gamma_T}$

получим  $2\omega = 2,9^\circ$ .

7.10. При решении задачи следует учитывать, что линейное увеличение призмы с крышей  $\beta_{пр} = -1^x$ . Видимое увеличение монокуляра зависит от угловых пределов разрешения  $\psi = \Delta_{min}/H$  прибора и требуемого для глаза  $\psi' = 1/250$ :  $\Gamma_T = \psi'/\psi = 8^x$ ;  $f'_{об} = 200 \text{ мм}$ ;  $f'_{ок} = 25 \text{ мм}$ ;  $2\omega = 6^\circ$ .

7.11.  $a_p = -8 \text{ мм}$ .

7.12.  $f'_1 = 140 \text{ мм}$ ;  $f'_2 = -40 \text{ мм}$ ;  $z'_{ок} = 4,03 \text{ мм}$ .

7.13. Фокусное расстояние линзы шара  $f_{ш} = \frac{nr}{2(n-1)}$ . Полагая  $D' = D_{ок}$ , получим  $\text{tg } \omega = D_{ок}/[2(L - r_2)]$ ;  $d = L - (r_1 + r_2)$ . Принимая  $k_\omega = 0,5$ , можно получить:  $2\omega = 1^\circ 04'$ ;  $f'_{об} = 75 \text{ мм}$ ;  $f'_{ок} = 15 \text{ мм}$ ;  $\Gamma_T = -5^x$ ;  $L = 90 \text{ мм}$ ;  $d = 30 \text{ мм}$ ;  $D' = D_{ок} = 1,5 \text{ мм}$ ;  $D = 7,5 \text{ мм}$ .

7.14.  $a_p = -136 \text{ мм}$ .

7.15. Обозначим удаление выходного зрачка зрительной трубы при наличии коллектива от задней главной плоскости окуляра через  $\bar{a}'_{р'}$ , тогда искомое удаление  $a'_{р',k} = \bar{a}'_{р'} - (f'_{об} - s'_{F',ок})$ . Используя данные задачи, получим  $a'_{р',k} = 13,75 \text{ мм}$ ; если коллектив убрать, то  $a'_{р'} = 20 \text{ мм}$ .

7.16.  $2\omega = 6,01^\circ$ ;  $\Gamma_T = 10^x$ ;  $D = 30 \text{ мм}$ ;  $f'_1 = 200 \text{ мм}$ ;  $f'_3 = f'_{ок} = 20 \text{ мм}$ .

7.17. Если глаз аккомодирован на расстояние  $p' = -250 \text{ мм}$ , то:

а) при  $p_1 = -14915,2 \text{ мм}$   $p_1 - p_2 = 2339,6 \text{ мм}$ ,

б) при  $p_1 = -15331,06 \text{ мм}$   $p_1 - p_2 = 1398,92 \text{ мм}$ ;

если глаз аккомодирован на бесконечность, то:

а)  $p_{1\infty} = -220016 \text{ мм}$ ,

б)  $p_{1\infty} = -366693 \text{ мм}$ .  $R_c = B \Gamma_T / (\Delta \epsilon'_{min})$ ,  $R_c = 20,6 \text{ км}$ .

7.18. По формулам (7.10)–(7.12) найдем:

$f'_{об} = 184,8 \text{ мм}$ ;  $f'_{ок} = 25,2 \text{ мм}$ ;  $D_{фк} = 19,37 \text{ мм}$ ;  $D_{эк} = 11,62 \text{ мм}$ ;  $a'_{р'} = 19,5 \text{ мм}$ .

7.19. Применяя рекомендованный порядок расчета, получим:  $f'_1 = 300 \text{ мм}$ ;  $D = 48 \text{ мм}$ ;  $2m_1 = 38,4 \text{ мм}$ ;  $D_1 = 39,71 \text{ мм}$ ; так как  $D_1 < D$ , следует принять  $D_1 = D = 48 \text{ мм}$ , чтобы не срезались лучи осевого пучка;  $f'_3 = f'_4 = 79,74 \text{ мм}$ ;  $d_3 = 15,52 \text{ мм}$ ;  $D_2 = 26,22 \text{ мм}$ ;  $D_3 = D_4 = 12,76 \text{ мм}$ ;  $f'_2 = 69,027 \text{ мм}$ ;  $D_{пл} = 26,22 \text{ мм}$ ;  $\text{tg } \omega_4 =$



$= 0,1644$ ;  $2m_3 = 10,208$  мм;  $2m_5 = 0,96$  мм;  $\text{tg } \omega_5 = 0,1484$ ;  $D_5 = 29,41$  мм; принимая  $\Delta z'_p = 0$ , получим  $s'_{p'} = 22,28$  мм;  $\text{tg } \omega' = -0,5239$ ;  $2\omega' = 55,3^\circ$ ;  $D_6 = 26,54$  мм.

7.20.  $f'_{06} = 60$  мм;  $f'_{ок} = -24$  мм;  $2\omega' = 12,46^\circ$ ;  $D = 7,5$  мм;  $a_p = 183,75$  мм;  $D_{об\ k_{\omega}=0,5} = 16,05$  мм;  $D_{об\ k_{\omega}=1} = 23,6$  мм;  $D_{ок\ k_{\omega}=0,5} = 4,77$  мм;  $D_{ок\ k_{\omega}=1} = 6,27$  мм.

7.21. Приравняв оптическую силу линзы нулю, получим формулу телескопической линзы  $r_1 - r_2 = (n - 1) d/n$ . Видимое увеличение телескопической линзы  $\Gamma_T = r_1/r_2$ . Из совместного решения приведенных формул получим:

$$r_1 = \frac{\Gamma_T (n-1) d}{n (\Gamma_T - 1)}; r_2 = \frac{(n-1) d}{n (\Gamma_T - 1)};$$

$r_1 = 12$  мм;  $r_2 = -6$  мм.

7.22.  $r_1 = 36$  мм;  $r_2 = 18$  мм.

7.23. Анализ содержания приведенной таблицы позволяет сделать вывод о том, что наилучшим образом соответствует заданным характеристикам комбинация объектива № 3 и окуляра № 1.

Комбинация объектив — окуляр, удовлетворяющая условию $\Gamma_T = -5^x$	$a_p$ , мм	Оценка пригодности	Необходимый диаметр объектива $D_{об} = 2m_1 + 2a_p \text{tg } \omega$ , мм	Оценка пригодности
1—2	—6	+	15,734	—
2—3	—11,25	—	16,376	—
3—1	0	+	15	+

7.24. Подходит окуляр № 1, пересчитанный на  $f'_{ок} = 25$  мм.

7.25. По формуле (7.4), для соответствующих окуляров получим:  $s'_{p'} = 22,58$  мм;  $s'_{p'} = 12$  мм;  $s'_{p'} = 26,16$  мм.

7.26. По формуле (7.6):  $f'_{06} = 50$  мм;  $f'_{ок} = -25$  мм; по формуле (7.5):

а) для дальнорядного глаза окуляр следует отодвинуть на 1,63 мм;

б) для близорядного — придвинуть к объективу на —2,206 мм,

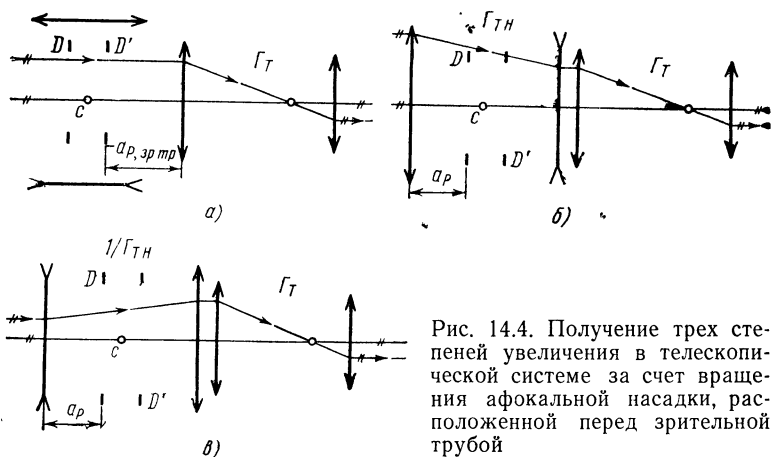


Рис. 14.4. Получение трех степеней увеличения в телескопической системе за счет вращения афокальной насадки, расположенной перед зрительной трубой

7.27.  $\Delta_{+5} = 2,5$  мм;  $\Delta_{-5} = -4,167$  мм;  $L_{+5} = 27,5$  мм;  $L_{-5} = 20,833$  мм. При  $s_1 = -450$  мм  $z_1 = -400$  мм, тогда  $z'_1 = 6,25$  мм и  $L = 31,25$  мм. При пользовании в этом случае очками расстояние между объективом и окуляром должно изменяться в пределах 27,083—33,75 мм.

7.28.  $a_p = 293,4$  мм;  $2\omega = 3,5^\circ$ .

7.29. Подходит комбинация 3—3, так как при  $a_p = -0,22$  мм обеспечивается  $s'_{p'} = 18,23$  мм и  $D_{об} = 30,025 > D_1 = 30,023$  мм,  $d_3 = 132,7$  мм;  $\Sigma d + s'_{p'} = 175,6$  мм.

7.30. Три ступени увеличения можно получить, если двукратную насадку установить в одно из положений, показанных на рис. 14.4. В положении а насадка не действует и увеличение системы  $\Gamma_{T\Sigma} = \Gamma_T = 10^\times$ ; в положении б  $\Gamma_{T\Sigma} = \Gamma_T/\Gamma_{TH} = 20^\times$  и в положении в  $\Gamma_{T\Sigma} = \Gamma_T/\Gamma_{TH} = 5^\times$ . При этом выходной зрачок насадки должен всегда совпадать с входным зрачком зрительной трубы. Это обеспечивается, когда центр с вращения насадки будет расположен посередине между входным и выходным зрачком, который, в свою очередь, совпадает с входным зрачком зрительной трубы. При  $a_p = a'_{1,p}$  из формулы (354) [6] можно получить  $a_p = (\Gamma_{TH} - 1)f'_{1,H}/(\Gamma_{T,H}^2 + 1)$ . Из условий задачи следует, что  $a_p = a'_{1,p} = -4 - (-20) = 16$  мм. Решая уравнение  $f'_{1,H} = a_p(\Gamma_{T,H}^2 + 1)/(\Gamma_{T,H} - 1)$ , получим  $f'_{1,H} = 80$  мм, тогда  $f'_{2,H} = -40$  мм,  $L_{нас} =$

= 40 мм и центр вращения будет расположен в 24 мм от первой поверхности объектива зрительной трубы.

7.31. Для решения следует воспользоваться формулами

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2} \text{ и } a'_{F'} = f' (1 - d/f'_1).$$

Последовательно задавая значения  $d$ , начиная с  $d = 10$  мм, получить значения  $f'$  и  $a'_{F'}$ . Исследования выполнить на микрокалькуляторе по программе №2 (см. прил. 2). При  $d = 10$  мм  $f'_{\min} = 18$  (18) мм,  $a'_{F'} = 16,36$  мм; при  $d = 80$  мм  $f'_{\max} = 50$  мм,  $a'_{F'} = 10$  мм. Дальнейшее увеличение  $d$  бессмысленно, так как  $a'_{F'}$  будет меньше 10 мм. Максимальный перепад увеличений равен отношению  $f'_{\max}/f'_{\min} = 2,75$ .

7.32. Решение выполнить по формулам (7.7) — (7.9). Предварительно найти  $f'_{ок} = 20$  мм; из формулы  $b_2 = f'^2_{ок}/1000$  получим:  $b_2 = 6$  мм;  $A = 1,07$  мм;  $2y' = 8,385$  мм;  $\bar{D}_0 = 2,07$  мм;  $\bar{D}_1 = 8,804$  мм;  $\bar{D}_2 = 8,55$  мм;  $b_1 = 64,296$  мм.

7.33.  $f'_1 = 200$  мм;  $D = 40$  мм;  $2m_1 = 32$  мм;  $D_1 = 33,05$  мм; принимаем  $D_1 = D = 40$  мм;  $f'_3 = f'_4 = 76,58$  мм;  $d_3 = 26,84$  мм;  $D_2 = 17,46$  мм;  $D_3 = D_4 = 15,316$  мм;  $2m_3 = 12,25$  мм;  $f'_2 = 64,642$  мм;  $D_{п.д} = 17,46$  мм;  $2\omega' = 47,17$ ;  $D_5 = 19,784$  мм;  $\text{tg}\omega = 0,114$ ;  $\text{tg}\omega_5 = 0,0937$ ;  $m_5 = 0,534$  мм;  $s_{p'} = 11,608$  мм;  $D_6 = 13,34$  мм.

7.34.  $f'_{об} = 200$  мм;  $f'_{ок} = 24$  мм;  $2\omega = 5,72^\circ$ ;  $D_{об} = D = 30$  мм;  $D_{ок} = 12$  мм;  $2\omega' = 28,07^\circ$ .

## 8. Фотообъектив и оптика передающих телевизионных систем

8.1.  $z' = 0,96$  мм;  $z' = 0,63$ ;  $z' = 0,31$ .

8.2.  $z' = 1,74$  мм;  $z' = 1,43$  мм;  $z' = 1,13$  мм;  $z' = 0,83$  мм;  $z' = 0,55$  мм;  $z' = 0,325$  мм;  $z' = 0,16$  мм.

8.3.  $p = 750$  мм. Возможна съемка без удлинительных колец.

8.4.  $z' = 7,89$  мм.

8.5.  $z' = 0,96$  мм.

8.6. При дистанции съемки  $L = 550$  мм фокусирующая подвижка объектива «Гелиос-44» по формуле (8.2) равна

$$z' = 275 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 58}{550}} \right) - 58 = 7,89 \text{ мм.}$$

Чтобы обеспечить съемку с удлинительным кольцом с дистанции 550 мм и ближе необходимо высоту кольца сделать равной 7,89 мм. Тогда при установке дистанционного кольца объектива на деление, соответствующее бесконечности, объектив будет сфокусирован на дистанцию съемки 550 мм, а при установке дистанционного кольца на деление, соответствующее 550 мм,  $z' = 2 \cdot 7,89 = 15,78$  мм, а дистанция съемки  $L = 15,78 + 2,58 + \frac{58^2}{15,78} \approx 345$  мм.

8.7. Максимальным угловым полем обладает фотоаппарат «ЛОМО-135М»,  $2\omega = 56,8^\circ$ . Угловые поля фотоаппаратов «Зенит-Е» и «ФЕД-микрон» составляют соответственно  $40,9^\circ$  и  $53^\circ$

8.8.  $L = 1089$  мм.

8.9. «Мир-32». В видоискателе видно все здание только при использовании объектива «Мир-20».

8.10. «Орион-15».

8.11.  $|\beta| = 0,111$ ;  $L = 644$  мм; высота изображения букв 0,24 мм.

8.12.  $1/60$  с;  $1/125$  с;  $1/250$  с.

8.13. Масштаб съемки составляет  $|\beta| = \frac{300}{5\,000\,000} = 6 \cdot 10^{-5}$ .

Скорость движения изображения равна скорости движения предмета, умноженной на масштаб съемки, т. е.

$$v' = \frac{450 \cdot 10^6}{3600} 6 \cdot 10^{-5} = 7,5 \text{ мм/с.}$$

Выдержка не должна превышать  $t = \frac{0,03}{7,5} = 1/250$  с.

8.14.  $1/1000$  с.

8.15.  $1/20000$  с. ?

8.16.  $|\beta| = 4,31$ ;  $10 \times 15$  см.

8.17. При формате отпечатка  $9 \times 12$  см естественное впечатление обеспечено не будет. Необходимый формат  $13 \times 18$  см.

8.18.  $L = 817$  мм;  $|\beta| = 0,083$ .

8.19. Установлено, что для удовлетворительного фотографического воспроизведения текста высота изображения букв и цифр должна превышать минимальный разрешаемый элемент не менее чем в 5 раз. Так, при разрешающей способности  $40 \text{ мм}^{-1}$  минимальная высота изображения букв составляет  $\frac{1}{40} 5 = 0,125$  мм.

Определяем масштаб съемки:  $|\beta| = 300/36 = 0,12$ ;  $|\beta_2| = 210/24 = 0,144$ , следовательно,  $|\beta| = 0,114$ . Высота изображения букв составит  $2,2 \cdot 0,114 = 0,25$  мм, а необходимая разрешающая способность должна быть не менее  $1:(0,25:5) = 20 \text{ мм}^{-1}$ . Фокусное расстояние объектива определяем по формуле (8.1):

$$f' = \frac{600}{2 + 0,114 + 8,77} = 55,1 \text{ мм.}$$

8.20.  $L = 10$  м. Размер изображения текста машинописной страницы составит  $22,7 \cdot 31,5$  мм и, следовательно, изображение разместится в кадре  $24 \times 36$  мм.

8.21.  $N = 6,5 \text{ мм}^{-1}$ .

8.22. Определяем разрешающую способность передающей телевизионной головки по формуле (8.3)

$$\frac{1}{N_r} = \frac{1}{60} + \frac{9}{0,46 \cdot 625} = 0,048;$$

$N_r = 20,8 \text{ мм}^{-1}$ . Находим минимальную высоту изображения текста:  $5/20,8 = 0,24$  мм. Минимально допустимый масштаб изображения  $|\beta| = 0,24/100 = 0,0024$ . При этом размеры изображения доски составят  $(2000 \times 0,0024) \times (1200 \times 0,0024) = 5,8 \times 2,9$  мм. Максимальный масштаб определяем из условия заполнения кадра изображением доски. По вертикали этот масштаб равен  $|\beta_v| = 12/2000 = 0,006$ , а по горизонтали —  $|\beta_r| = 9/1200 = 0,0075$ . Следовательно, максимальный масштаб равен 0,006. Определяем диапазон допустимых фокусных расстояний объектива по формуле (8.1), принимая во внимание, что  $\beta < 0$ . Находим  $f' = 16,7 \div 41,5$  мм.

8.23.  $L_1 = 2990$  мм,  $L_2 = 6095$  мм.

8.24. Задний план должен находиться в бесконечности. Следовательно, фокусировка должна быть осуществлена на плоскость, отстоящую от заднего фокуса на расстояние  $\Delta z' = K \cdot 0,03$ . Передний план будет сфокусирован на плоскость, расположенную от заднего фокуса на расстоянии  $2 \cdot \Delta z' = 2 \cdot K \cdot 0,03$ . Определим значение фокусировочной подвижки при установке объектива на дистанцию съемки  $L = 3$  м по формуле (8.2):

$$z' = 1500 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4,28}{3000}} \right) - 28 = 0,266.$$

Плоскость пленки должна быть помещена посередине между изображениями заднего и переднего планов, т. е.  $\Delta z' = 0,133$  мм. Дистанция фокусировки составляет при этом

$$L = \frac{(\Delta z + f')^2}{\Delta z'} = \frac{(0,133 + 28)^2}{0,133} = 5950 \text{ мм};$$

а диафрагменное число  $K = 0,133/0,3 = 4,4$ .

8.25.  $L_\infty = 5780$  мм; 7913 мм; 11 260 мм; 15 725 мм; 31 350 мм.

8.26. Для фотоаппарата «Зенит-Е»  $L_2 - L_1 = 396$  мм; для фотоаппарата «ФЭД-микрон»  $L_2 - L_1 = 1200$  мм.

8.27. Для объектива «Минитар» гиперфокальное расстояние составляет 9207 мм, передний план  $L_1 = 4635$  мм; для объектива «Индустар-26М» — соответственно 24 247 мм и 12 175 мм. Фотоаппарат «ЛОМО-компакт» обладает существенно большей глубиной резкости при одинаковых условиях съемки, чем фотоаппарат «ФЭД-2».

8.28.  $K = 5,3$ ;  $L = 4940$  мм.

8.29.  $N_f = 24 \text{ мм}^{-1}$ .

8.30.  $N_f = 24 \text{ мм}^{-1}$ .

8.31.  $N_{об} = 54$  единиц ГОСТа. Поскольку пленка с такой чувствительностью не выпускается, то необходимо использовать пленку «ФОТО-65», имеющую чувствительность около 65 ед. ГОСТ.

8.32.  $t = 1/38$  с. Можно сфотографировать и с выдержкой  $1/30$  с, так как передержка, равная примерно 13 %, не сказывается на качестве фотографий.

8.33.  $L_v = 72,8 \text{ кд/м}^2$ .

8.34. При соблюдении закона синусов справедливо соотношение  $\sin \sigma'_A = D/(2f')$ , где  $\sigma'_A$  — апертурный угол в пространстве изображений, а  $D$  — диаметр входного зрачка объектива. Поскольку  $\sin \sigma'_A \leq 1$ , а  $K = f':D$ , то предельное теоретическое значение  $K$  при  $\sigma'_A = 90^\circ$  составляет 0,5.

8.35. При  $N = 40 \text{ мм}^{-1}$   $\kappa_T = 0,18$ ; при  $N = 30 \text{ мм}^{-1}$   $\kappa_T = 0,24$ .

8.36.  $T = 0,13$ .

## 8. Осветительные и проекционные системы

9.1 Конденсор работает как прожектор, поскольку проецирует источник света на бесконечность. Фокусное расстояние находим по размеру источника света и допустимому углу расходимости лучей:  $f' = \frac{d}{2 \tan \omega} = \frac{4,5}{2 \tan 30'} = 257,8 \text{ мм}$ .

Дистанция оформления светового пучка составляет  $p_0 = \frac{D}{d} f' = \frac{100}{4,5} 257,8 = 5729$  мм.

Так как  $p < p_0$ , то  $E_v = \pi L \sin^2 \sigma'_A = 0,8 \cdot 130 \cdot 10^6 \cdot \sin^2 30' = 24880$  лк. При изменении положения пластины со светочувствительным материалом освещенность не изменится.

9.2.  $E_v = 8270$  лк. Увеличится в 25 раз.

9.3.  $E_v = 100,4$  лк. Освещенность не зависит от линейного увеличения, так как в формулу для ее вычисления входят только яркость источника света и апертурный угол в пространстве изображений, а последний зависит от диаметра линзы и расстояния изображения от линзы.

9.4. Диаметр изображения равен 0,44 мм.  $E = 4,2 \times 10^6$  лк.

9.5.  $E_v = 2,7$  лк.

9.6. Дистанция оформления светового пучка составляет 116,3 м. Освещенность на расстояниях 50 и 100 м одинакова и составляет

$$E_v = 0,8 \frac{\pi}{4\pi} \frac{105 \cdot 10^3}{\frac{(4,3)^2}{4} \frac{\pi}{10^6}} \left( \frac{4,3}{2 \cdot 1000} \right)^2 = 6,7 \cdot 10^3 \text{ лк.}$$

9.7.  $\Phi_v = 3,2 \cdot 10^{-3}$  лм.

9.8.  $D = 512$  мм.

9.9. Определяем увеличение объектива  $\beta = -120/24 = -180/36 = -5$ . Расстояние изображения от выходного зрачка, равное расстоянию изображения от задней главной плоскости, составляет  $a' = 6 \cdot 52 = 312$  мм. Диаметр выходного зрачка объектива составляет: при  $K = 3,5 D' = 52/3,5 = 14,9$  мм; при  $K = 5,6 D' = 52/5,6 = 9,3$  мм. Выходная апертура составляет соответственно  $\sin \sigma'_A \approx \frac{14,9}{2 \cdot 312} =$

$$= 0,0238 \text{ и } \sin \sigma'_A \approx \frac{9,3}{2 \cdot 312} = 0,0151.$$

Освещенность  $E_v = 0,6 \pi \cdot 2500 \cdot 0,0238^2 = 2,7$  лк и  $E_v = 0,6 \cdot \pi \cdot 2500 \cdot 0,0151^2 = 1,2$  лк.

9.10.  $E_v = 50$  лк.

9.11.  $2\sigma_K = 84,9^\circ$ .

9.12.  $D' = 13,8$  мм.

9.13.  $\Phi_v = 145$  лм;  $2\sigma_K = 80,8^\circ$ .

9.14.  $\sin \sigma_{\text{кол}} = 0,32$ .

9.15.  $E_v = 254; 74,7; 70, 8$  лк.

9.16.  $2830 \times 2080$  мм.

$$9.17. \Phi_v = 10,8 \text{ лм.}$$

$$9.18. \Phi_v = 16,8 \text{ лм.}$$

$$9.19. 2\sigma_K = 68,4^\circ.$$

$$9.20. 577 \times 866; 816 \times 1225; 1155 \times 1732 \text{ мм.}$$

## 10. Оптические фотоэлектрические системы

$$10.1. i = 5 \text{ мкА.}$$

$$10.2. I_v = 100 \text{ кд.}$$

$$10.3. I_e = 1 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

$$10.4. u = 19,5 \text{ мкВ.}$$

10.5. Определяем поток излучения, поступающий на светочувствительную поверхность приемника:

$$\Phi'_e = \frac{u}{S} = \frac{2}{500 \cdot 10^6} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт,}$$

а затем поток излучения, поступающий во входной зрачок оптической системы:

$$\Phi_e = \frac{\Phi'_e}{\tau_{0,c}} = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{0,8} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Вт.}$$

Этому потоку излучения соответствует световой поток

$$\Phi_v = \Phi_e K = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 50 = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ лм.}$$

Чтобы получить такой световой поток, звезда должна создать в плоскости входного зрачка оптической системы освещенность, определяемую по формуле (10.5):

$$E_{vзр} = \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 1^2} = 3,19 \cdot 10^{-7} \text{ лк,}$$

а соответствующая освещенность у границы земной атмосферы

$$E_v = \frac{E_{vзр}}{\tau_a} = \frac{3,19 \cdot 10^{-7}}{0,8} = 3,95 \cdot 10^{-7} \text{ лк.}$$

Такую освещенность создает звезда, имеющая звездную величину, определяемую по формуле (10.4):  $m = -2,5 \lg \times \times 3,95 \cdot 10^{-7} - 13,89 = 2,11$

$$10.6. D/f' = 1:5.$$

$$10.7. S = 10 \text{ А} \cdot \text{лм}^{-1}.$$

$$10.8. i = 16 \text{ мкА.}$$

$$10.9. d_{\text{пр}} = 8,2 \text{ мм; } 2\omega = 4^\circ.$$

10.10. Для первого объектива изображение Луны вписывается в светочувствительную поверхность приемника, для



второго объектива изображение перекрывает светочувствительную поверхность;  $i_1 = 3 \text{ мкА}$ ,  $i_2 = 3,7 \text{ мкА}$ .

$$10.11. S = 20 \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}.$$

10.12.  $D/f' = 1:1$ . Если при постоянном диаметре входного зрачка фокусное расстояние объектива увеличить до 300 мм, то относительное отверстие  $D/f' = 1:3$ . При  $f' = 300 \text{ мм}$  изображение Луны будет перекрывать светочувствительную поверхность приемника.  $i = 6,6 \text{ мкА}$ .

10.13. Определив линейное увеличение оптической системы  $\beta = f'/z = 100/(500) = 0,2$ , убеждаемся, что изображение источника перекрывает светочувствительную поверхность приемника, следовательно, освещенность в плоскости изображения определяется по формуле  $E_v' = \Phi_v'/Q_{\text{пр}}$ .

Линейное увеличение в зрачках  $\beta_p = D'/D = 30/40 = 0,75$ . Яркость источника определяется по формуле (5.4):

$$L_v = 2000 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}.$$

$$10.14. i_1 = 5,8 \text{ мА}; i_2 = 2,28 \text{ мА}.$$

$$10.15. S = 100 \text{ мкА} \cdot \text{лм}^{-1}.$$

10.16. При расстоянии от переднего фокуса оптической системы до источника —  $z = 100 \text{ мм}$  изображение вписывается в светочувствительную поверхность приемника, а при расстоянии —  $z = 50 \text{ м}$  — перекрывает светочувствительную поверхность:  $D/f' = 1:1$ ;  $u = 3,55 \text{ мкВ}$ .

10.17.  $i_1 = 0,078 \text{ мкА}$ . Освещенность на поверхности Земли от ночного неба определяем по формуле (5.1.) в которой  $\omega = 90^\circ$ , так как угловой размер полусферы  $2\omega = 180^\circ$ .  $E_v = 0,8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 1^2 = 2,51 \cdot 10^{-4} \text{ лк}$ ;  $i_2 = E_v Q_{\text{пр}} S = 2,51 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 10^6 = 1,58 \text{ мкА}$ .

$$10.18. L_v = 2500 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}; i = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ мкА}.$$

10.19. Абсолютную спектральную чувствительность приемника находим по формуле (10.6):

$$S(\lambda) = 0,8 \cdot 30 \cdot 680 \frac{50}{250} = 3265,6 \text{ мкА} \cdot \text{Вт}^{-1};$$

$$\Phi_e = \frac{i}{S(\lambda)} = \frac{1,63}{3265,6} = 0,5 \text{ мВт}.$$

$$10.20. i = 2,04 \text{ мкА}.$$

$$10.21. i = 0,4 \text{ мкА}; u = 4,85 \text{ мкВ}.$$

$$10.22. D/f' = 1:2,5; i = 0,45 \text{ мкА}.$$

10.23. Сначала аналогично решению задачи 10.13 находим энергетическую яркость источника  $L_e = 1,12 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \times \times \text{ср}^{-1}$ . В соответствии с законом Стефана — Больцмана оп-

ределяем энергетическую яркость абсолютно черного тела  $L_e^0 = 3,74 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $\varepsilon = 0,3$ .

10.24. Определив энергетическую яркость источника  $L_e = 9730 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ , находим его температуру по закону Стефана — Больцмана:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\pi L_e}{\varepsilon \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{3,14 \cdot 9730}{0,54 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}}} = 1000 \text{ К.}$$

10.25. Определяем освещенность, создаваемую Венерой у границ земной атмосферы, по формуле (10.4):

$$\lg E_v = -\frac{m + 13,89}{2,5} = -\frac{-4,77 + 13,89}{2,5} = -3,65;$$

$$E_v = 2,24 \cdot 10^{-4} \text{ лк,}$$

а затем находим освещенность в плоскости входного зрачка оптической системы

$$E_{v \text{ зр}} = E_v \tau_a = 2,24 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8 = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ лк.}$$

Световой поток от Венеры, поступающий на светочувствительную поверхность приемника,

$$\Phi'_{v, B} = \frac{i_{vB}}{S} = \frac{5,62}{20 \cdot 10^6} = 2,81 \cdot 10^{-7} \text{ лм,}$$

а соответствующий ему световой поток, поступающий во входной зрачок оптической системы,

$$\Phi_{v, B} = \frac{\Phi'_{vB}}{\tau_{o.c}} = \frac{2,81 \cdot 10^{-7}}{0,8} = 3,51 \cdot 10^{-8} \text{ лм.}$$

Тогда диаметр входного зрачка оптической системы определяется по формуле (10.5):

$$D = \sqrt{\frac{4\Phi_{v, B}}{\pi E_{v \text{ зр}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,51 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot 1,79 \cdot 10^{-4}}} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм.}$$

Световой поток, поступающий на светочувствительную поверхность приемника от ночного неба,

$$\Phi'_{vн} = \frac{l_n}{S} = \frac{0,08}{20 \cdot 10^6} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ лм.}$$

Соответствующее ему относительное отверстие оптической системы найдем по формуле (10.3):

$$\frac{D}{f'} = \sqrt{\frac{4\Phi'_{\text{вн}}}{\tau_a \tau_{0,c} \pi L_v Q_{\text{пр}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 10^{-9}}{0,8 \cdot 0,8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}} = 0,5 = 1 : 2.$$

Фокусное расстояние оптической системы  $f' = 100$  мм, а ее угловое поле в пространстве предметов

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{d_{\text{пр}}}{2f'} = \frac{20}{2 \cdot 100} = 0,1; 2\omega = 12^\circ.$$

## 11. Оптические системы для лазеров и голографии

11.1. Поток излучения лазера определяем по формуле (11.3):

$$\Phi_e = \frac{10}{5 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ср},$$

а соответствующую ему силу излучения — по формуле (11.8):

$$I_e = \frac{2 \cdot 10^3}{3,14 (3 \cdot 10^{-3})^2} = 7,08 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Пользуясь прил. 1.4, с помощью линейного интерполирования определяем относительную спектральную световую эффективность излучения для длины волны  $\lambda = 0,6943$  мкм,  $v(\lambda) = 0,0063$ . Тогда сила света лазера

$$I_v = I_e v(\lambda) = 7,08 \cdot 10^7 \cdot 0,0063 = 3,03 \cdot 10^5 \text{ кд}.$$

11.2. Чтобы на поверхности Луны получить пятно диаметром  $d_{\text{л}} = 34,2$  км, необходимо после афокальной системы иметь пучок, плоский угол расходимости которого определяем по формуле (11.7):

$$2\omega' = \frac{d_{\text{л}}}{p} = \frac{34,2}{3,8 \cdot 10^5} = 9 \cdot 10^{-5}.$$

Следовательно, афокальная система должна иметь угловое увеличение, определяемое по формуле (11.6):

$$\gamma = \frac{9 \cdot 10^{-5}}{9 \cdot 10^{-4}} = 0,1.$$

При длине оптической системы  $L_c = 180$  мм фокусные расстояния ее компонентов будут  $f'_1 = -20$  мм;  $f'_2 = 200$  мм.

11.3. Определяем силу излучения лазера по формуле (11.8)

$$I_e = \frac{314}{3,14 (0,005)^2} = 4 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

Энергетическая освещенность, создаваемая лазером на расстоянии  $\rho = 1$  км, определяется по формуле (11.9)

$$E_e = 0,5 \frac{4 \cdot 10^6}{10^6} = 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Для получения на таком же расстоянии энергетической освещенности  $E_e = 160 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  необходимо, чтобы сила излучения после афокальной системы

$$I'_e = \frac{E_e \rho^2}{\tau_a} = \frac{160 \cdot 10^6}{0,5} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}.$$

С учетом коэффициента пропускания оптической системы поток излучения после афокальной системы будет определяться формулой

$$\Phi'_e = \Phi_e \tau_{o.c} = 314 \cdot 0,8 = 251,2 \text{ Вт}.$$

Плоский угол расходимости лазерного пучка, вышедшего из афокальной системы, находим по формуле (11.8)

$$\omega' = \sqrt{\frac{\Phi'_e}{\pi I'_e}} = \sqrt{\frac{251,2}{3,14 \cdot 3,2 \cdot 10^8}} = 5 \cdot 10^{-4}; 2\omega' = 10^{-3}.$$

Тогда угловое увеличение афокальной системы согласно формуле (11.6) будет  $\gamma = 0,1$ , а фокусные расстояния ее компонентов  $f'_1 = -25$  мм;  $f'_2 = 250$  мм.

11.4.  $\rho = 2$  км.

11.5.  $\Phi_e = 3,14$  Вт.

11.6.  $E_e = 9 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

11.7. Плоский угол расходимости лазерного пучка находим по формуле (11.2):

$$2\omega = 2 \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi R_9}} = 2 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,6328 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 500}} = 9 \cdot 10^{-4}.$$

Так как угловое увеличение афокальной системы  $\gamma = 0,1$ , то плоский угол расходимости преобразованного лазерного пучка  $2\omega' = 9 \cdot 10^{-5}$ , а диаметр пятна на объекте  $d_0 = 900$  мм. Перетяжка преобразованного лазерного пучка (изображение перетяжки) будет находиться в задней фокальной плоскости второго компонента.

11.8.  $2y' = 0,045$  мм;  $z' = 0,025$  мм.

11.9. Определяем эквивалентный конфокальный параметр преобразованного лазерного пучка по формуле (11.1):

$$R_9' = \frac{2\pi y'^2}{\lambda} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0031^2}{0,6943 \cdot 10^{-3}} = 0,087 \text{ мм}.$$

Так как перетяжка исходного лазерного пучка расположена в передней фокальной плоскости, то фокусное расстояние оптической системы определяем по формуле (11.4):

$$f' = \frac{1}{2} \sqrt{R_9 R_9'} = \frac{1}{2} \sqrt{1800 \cdot 0,087} = 6,26 \text{ мм}.$$

11.10.  $E_e' = 2,09 \cdot 10^{11}$  Вт·м<sup>-2</sup>.

11.11.  $\Phi_e = 150$  Вт.

11.12. Определяем энергетическую яркость объекта как вторичного источника  $L_e = 44,6$  Вт·м<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>. Так как лазер расположен рядом с приемной оптической системой, то размер изображения облученной поверхности можно определить по формуле  $d_0' = 2\omega f' = 0,001 \cdot 2000 = 2$  мм.

После этого находим реакцию приемника  $i = 0,25$  мкА.

11.13.  $D/f' = 1:2$ .

11.14.  $\rho = 0,2$ .

11.15.  $f_1' = 20$  мм,  $f_2' = 400$  мм.

11.16. Так как увеличение афокальной системы  $\gamma = 0,05$ , то размер изображения перетяжки будет  $2y' = 100$  мм. Чтобы в плоскости изображения создать энергетическую освещенность  $E_e' = 5$  Вт·м<sup>-2</sup>, необходимо на выходе афокальной системы иметь поток излучения, определяемый по формуле (11.5):

$$\Phi_e' = E_e' \pi y'^2 = 5 \cdot 3,14 \cdot 50^2 \cdot 10^{-6} = 3,92 \cdot 10^{-2} \text{ Вт};$$

$$\Phi_e = 49,1 \text{ мВт}.$$

## 12. Оптические системы двойной симметрии

12.1. Для трансформации лазерного пучка с сохранением его параллельности необходимо использовать анаморфотную афокальную систему. Определяем угловое увеличение этой афокальной системы в главных сечениях  $\gamma_x = 2/4 = 0,5$  и  $\gamma_y = 2/16 = 0,125$ . Возможно применение двух последовательно расположенных афокальных систем с  $\gamma_x = 0,5$  и  $\gamma_y = 0,125$ , выполненных из цилиндрических линз. При этом число цилиндрических линз составит по крайней мере четыре. В соответствии с заданием число цилиндрических компонентов должно быть минимальным, поэтому следует применить две афокальные системы, одна из которых выполнена из сферических линз, а другая — из цилиндрических. Тогда  $\gamma_x = \gamma_{сф}\gamma_{ц, x}$  и  $\gamma_y = \gamma_{сф}\gamma_{ц, y}$ . Возможны два решения: 1)  $\gamma_{сф} = 0,125$ ;  $\gamma_x = 4$ ; 2)  $\gamma_{сф} = 0,5$ ;  $\gamma_y = 0,25$ .

12.2.  $f'_x = 5,76$  мм;  $f'_y = 114,6$  мм;  $2\omega'_x = 0,00044$  рад;  $2\omega'_y = 0,00044$  рад.

12.3.  $A = 2$ .

12.4.  $a_1 = -45$  мм;  $a_{II} = -30$ ;  $f'_I = 33,75$  мм;  $f'_{II} = 25$  мм.

12.5. Нельзя, так как это противоречит условию постоянства расстояния между плоскостями изображения и предмета.

12.6.  $f'_I = 111,63$  мм;  $f'_{II} = -50$  мм.

12.7.  $\frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{4} = 1$ . Сечение пучка не изменится.

12.8.  $\gamma_x = 1,06$ ;  $\gamma_y = 0,212$ .

12.9.  $\varphi = 53,1^\circ$ .

12.10. Форма изображения квадрата изменяется, так как линейное увеличение его сторон зависит от их направления. Траектория — эллипс. При вращении изображение квадрата при определенных ориентациях относительно плоскостей симметрии системы принимает форму параллелограмма и ромба.

## 13. Аберрационный расчет оптических систем

13. 1. а)  $s = -166,67$  мм;  $s' = -250$  мм

б)  $s = -250$  мм;  $s' = -166,7$  мм

13.2. Для апланатических точек 1-го рода ( $s = s' = 0$ ) отсутствуют сферическая аберрация, кома и астигматизм 3-го порядка, т. е.  $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ .

Для апланатических точек 2-го рода ( $s = s' = r$ ) отсутствуют сферическая aberrация и кома 3-го порядка, т. е.  $S_I = S_{II} = 0$ .

Для апланатических точек 3-го рода отсутствуют сферическая aberrация, кома и астигматизм 3-го порядка, т. е.  $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ .

13.3. а)  $r_2 = -5,0$  мм; б) отсутствуют сферическая aberrация и кома 3-го порядка.

13.4. а)  $r_2 = -3,0$  мм; б) отсутствуют сферическая aberrация, кома и астигматизм 3-го порядка; в)  $s'_2 = -7,5$  мм.

13.5. а)  $r_1 = -50$  мм,  $r_2 = -33$  мм; б) отсутствуют сферическая aberrация и кома 3-го порядка; в)  $s'_2 = -82,5$  мм.

13.6. а)  $r_1 = -20$  мм,  $r_2 = -17$  мм; б) отсутствуют сферическая aberrация и кома 3-го порядка; в)  $s'_2 = -17$  мм.

13.7. А. Обе поверхности 2-го рода:

а)  $r_1 = -50$  мм,  $r_2 = -55$  мм;

б) отсутствуют сферическая aberrация и кома 3-го порядка;

в)  $s'_2 = -55$  мм.

Б. Обе поверхности 3-го рода:

а)  $r_1 = -29$  мм,  $r_2 = -10,2$  мм;

б) отсутствуют сферическая aberrация, кома и астигматизм 3-го порядка;

в)  $s'_2 = -25,5$  мм.

13. 8. а)  $r_1 = -50$  мм,  $r_2 = -50$  мм,  $d = 33,3$  мм;

б) отсутствуют сферическая aberrация, кома и кривизна поверхности;

в)  $s'_2 = -125$  мм.

13. 9.  $r_1 = -20$  мм,  $r_2 = -10,2$  мм.

$$13.10 \quad r_1 = s_1, r_2 = \frac{(1-n)}{n} \cdot \frac{1}{\left( S_{IV} + \frac{1-n}{nr_1} \right)},$$

$$d = r_1 - \frac{(1-n)^2}{n^2} \cdot \frac{1}{\left( S_{IV} + \frac{1-n}{nr_1} \right)}.$$

13.11.  $\bar{P} = -0,25$ ;  $\bar{W} = 0,5$ .

13.12.  $\bar{S}_I = -0,25$ ;  $\bar{S}_{II} = 0,5$ ;  $\bar{S}_{III} = -1$ ;  $\bar{S}_{IV} = 1$ ;  
 $\bar{S}_V = 0$ .

$$13.13. \Delta s' = +0,031 \text{ мм}; \eta = 0,125^0/0; z'_m = 0,009 \text{ мм}; \\ z'_s = -0,026; \Delta y'_D = -0,1^0/0.$$

$$13.14. S_I = -0,25; S_{II} = 0; S_{III} = 0; S_{IV} = 1; S_V = 0; \\ \Delta s' = 0,031 \text{ мм}; \eta = 0; z'_m = 0,034; z'_s = -0,034; \Delta y'_D = 0^0/0.$$

$$13.15. \Delta s' = 0,031 \text{ мм}; \eta = 0,25^0/0; z'_m = +0,068; z'_s = 0; \\ \Delta y'_D = 0^0/0.$$

$$13.16. a_P = 0 \text{ мм}; z'_m = 6,25^0 \text{ мм}; z'_s = 0; a_P = -25 \text{ мм}; \\ z'_m = -1,026 \text{ мм}; z'_s = -2,639 \text{ мм}; a_P = -50 \text{ мм}; z'_m = \\ = -3,349 \text{ мм}; z'_s = -3,349 \text{ мм}.$$

$$13.17. a_P = 0 \text{ мм}; z'_m = -6,25; z'_s = 0; a_P = 25 \text{ мм}; z'_m = \\ = 1,026 \text{ мм}; z'_s = 2,639 \text{ мм}; a_P = 50 \text{ мм}; z'_m = 3,349 \text{ мм}; \\ z'_s = 3,349 \text{ мм}.$$

$$13.18. \Delta s' = 0,95 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,30 \text{ мм}; z'_m = 0,13 \text{ мм}; z'_s = \\ = 0,04 \text{ мм}; z'_s - z'_m = -0,09; \Delta y'_D = 0,0044 \text{ мм};$$

$$13.19. \Delta s' = 0,04 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,01 \text{ мм}; z'_m = 0,11 \text{ мм}; \\ z'_s = 0,04 \text{ мм}; z'_s - z'_m = -0,07 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0,004 \text{ мм}.$$

$$13.20. \Delta s' = 0,04 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,01; z'_m = 0,11 \text{ мм}; z'_s = \\ = 0,04 \text{ мм}; z'_s - z'_m = -0,07 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0,004 \text{ мм}; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = \\ = 0,07; \Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,007 \text{ мм}.$$

13.21 Хроматические аберрации увеличатся в 2 раза.

$$13.22. \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,105 \text{ мм}; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,122 \text{ мм}; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = \\ = 0,193; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,295 \text{ мм}.$$

$$13.23. z'_s - z'_m \approx -3,8 \text{ мм при всех значениях } n.$$

$$13.24. \text{ При } n = \sqrt{3}.$$

$$13.25. \text{ При } n = 2.$$

$$13.26. \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0,24 \text{ мм}; \frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 1,21^0/0.$$

$$13.27. r_2 = -9,27 \text{ мм}.$$



13.28.  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0$  при 1)  $s = 0$ ; 2)  $r_2 = \infty$ ;

3)  $v_2 = v_3$ ;  $\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0$  при

1)  $s = 0$ ; 2)  $a_P = 0$ ; 3)  $r_2 = \infty$ ; 4)  $v_2 = v_3$ .

13.29.  $r_1 = 55,55$  мм;  $r_2 = -500$  мм;  $\Delta s' = -1,62$  мм;  
 $\Delta y'_k = 0$ ;  $z'_s - z'_m = 1$  мм;  $\Delta y'_D = 0$ .

13.30.  $\Delta s' = -1,07$  мм;  $\Delta y'_k = -0,22$  мм;  $z'_z - z'_m = 1$  мм;  $\Delta y'_D = 0$ ;

13.31. 1)  $\Delta s' = -0,27$  мм;  $\Delta y'_k = -0,10$  мм;  $z'_s - z'_m = 13,2$  мм;  $\Delta y'_D = 0$ ; 2)  $\Delta s' = -0,07$  мм;  $\Delta y'_k = -0,01$  мм;  $z'_z - z'_m = 13,2$  мм;  $\Delta y'_D = 0$ ; 3)  $\Delta s' = -0,10$  мм;  $\Delta y'_k = 0,04$  мм;  $z'_s - z'_m = 13,2$  мм;  $\Delta y'_D = 0$ .

13.32.  $\bar{P}_{\min} = 2,143$ ; 1,667; 1,360; 1,147; 0,992; 0,975;  
 $\bar{W} = 0,143$ ; 0,139; 0,135; 0,132; 0,128; 0,125.

13.33.  $\frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0$ ;  $-3,12\%$ ;  $-1,04\%$ .

13.34. Это следует из формулы для определения хроматизма положения тонкой линзы.

13.35. Возможно при  $n = 0,25$ , что нереально.

13.36. В 2,45 раза.

13.37. В 3,88 раза.

13.38.  $\bar{P} = 0$  при  $n = 0,25$ , что нереально.

13.39.  $a_P = 0$ .

13.40. а)  $\bar{a}_P \approx -0,33$ ;  $\Delta y'_k = 0$ ; б)  $\bar{a}_P = -0,43$ ;  $\Delta y'_k = 0$ ;  
в)  $\bar{a}_P = -0,5$ ;  $\Delta y'_k = 0$ .

13.41.  $\Delta s' = -0,86$  мм;  $\Delta y'_k = -0,20$  мм.

13.42.  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = -1,57$  мм;  $-2,73$  мм.

13.43.  $\Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = -3,13$  мм;  $-7,95$  мм.

$$13.44. \frac{\Delta y'_{\lambda_2, \lambda_2}}{\Delta y'_0} = 0; -0,78\%; -1,56\%.$$

$$13.45. a_P = -40 \text{ мм}; z'_s - z'_m = 0,47 \text{ мм}.$$

$$13.46. a_P = -6,7 \text{ мм}.$$

$$13.47. a_P = -33,3 \text{ мм}.$$

13.48. Астигматизм 3-го порядка исправлен быть не может;

$$\Delta s' = -1,16 \text{ мм}.$$

13.49. Астигматизм 3-го порядка исправлен быть не может.

$$13.50. \Delta s' = -1,66 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,30 \text{ мм}; z'_s - z'_m = 1,66 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0,15 \text{ мм}.$$

13.51. Имеют место два решения:

$$1) r_1 = 25,25 \text{ мм и } r_2 = 26,87 \text{ мм};$$

$$2) r_1 = 50,80 \text{ мм и } r_2 = 62,03 \text{ мм при } d = 3 \text{ и } n = 1,5163.$$

$$13.52. n = 1,5; 4,2 \text{ раза}; 1,08 \text{ раза}; 1,55 \text{ раза};$$

$$n = 1,7; 4,3 \text{ раза}; 1,01 \text{ раза}; 1,9 \text{ раза};$$

$$n = 2,0; 4,6 \text{ раза}; 1,14 \text{ раза}; 2,48 \text{ раза}.$$

$$13.53. a_P = 14,2 \text{ мм}; \Delta s' = -1,16 \text{ мм}.$$

$$13.54. n = 1,5; \bar{W} = 3,0; \bar{P} = 9,0;$$

$$n = 1,75; \bar{W} = 2,33; \bar{P} = 5,44;$$

$$n = 2,00; \bar{W} = 2,00; \bar{P} = 4,00.$$

$$13.55. n = 1,5; \bar{W} = -0,33; \bar{P} = 2,32; n = 1,75; \bar{W} = 0,24; \bar{P} = 1,26; n = 2,00; \bar{W} = 0,53; \bar{P} = 1,00.$$

$$13.56. a_P = -33,3 \text{ мм}; \Delta s' = -4,5 \text{ мм}.$$

$$13.57. n = 1,5; \bar{W} = 1,35; \bar{P} = 3,32; n = 1,75; \bar{W} = 1,35; \bar{P} = 2,48; n = 2,0; \bar{W} = 1,35; \bar{P} = 2,17.$$

$$13.58. n = 1,5; r_1 = 58,38 \text{ мм}; r_2 = 348,4 \text{ мм}; n = 1,7; r_1 = 63,6 \text{ мм}; r_2 = -700 \text{ мм}.$$

$$13.59. r_1 = r_2 = 50 \text{ мм}.$$

$$13.60. \Delta s' = -4,5 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,225; z'_s - z'_m = 0,25 \text{ мм}; \Delta y'_D = -0,014 \text{ мм}.$$

$$13.61. \Delta s' = -1,16 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,050 \text{ мм}; z'_s - z'_m = 1,0 \text{ мм}; \\ \Delta y'_D = 0.$$

$$13.62. s_1 = \infty; \Delta s' = -1,16 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0,050 \text{ мм}; z'_s - \\ - z'_m = 1,0 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0; s_1 = -200 \text{ мм}; \Delta s' = -21,84 \text{ мм}; \\ \Delta y'_k = 2,016 \text{ мм}; z'_s - z'_m = 4,0 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0.$$

$$13.63. s_1 = \infty; \Delta s' = -1,66 \text{ мм}; \Delta y'_k = -0,20 \text{ мм}; z'_s - \\ - z'_m = 1,0 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0; s_1 = -200 \text{ мм}; \Delta s' = -2,96 \text{ мм}; \\ \Delta y'_k = 0; z'_s - z'_m = 4,00 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0.$$

$$13.64. \Delta s' = 0; \Delta y'_k = 0; z'_s - z'_m = 1,0 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0; \\ \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0; \frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0.$$

$$13.65. \Delta s' = 0; \Delta y'_k = 0, \quad z'_s - z'_m = 1,0 \text{ мм}; \Delta y'_D = \\ = -0,1 \text{ мм}; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0; \frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0.$$

$$13.66. \bar{W} = 0,68 \quad \bar{P} = 0,42; \bar{C} = 0.$$

$$13.67. \bar{P} = 2,45; \bar{W} = 1,35; \Delta s' = -1,22 \text{ мм}; \Delta y'_k = \\ = -0,20 \text{ мм}.$$

$$13.68. S_I = 1280; S_{II} = -540; S_{III} = 200; S_{IV} = 0,014; \\ S_V = 0.$$

$$13.69. \bar{P} = 5,4; \bar{W} = 2,7; \bar{C} = 0.$$

$$13.70. \Delta s' = -0,17 \text{ мм}; \Delta y'_k = 0; z'_s - z'_m = -1,16 \text{ мм}; \\ \Delta y'_D = -0,603 \text{ мм}; \Delta s'_{\lambda_1, \lambda_2} = 0; \frac{\Delta y'_{\lambda_1, \lambda_2}}{y'_{\lambda_0}} = 0.$$

$$13.71. \text{ При } \bar{W}_{1/2} = 2,38.$$

$$13.72. \bar{P} = 0; \bar{W} = 0; z'_s - z'_m = 7,18 \text{ мм}; \Delta y'_D = 0.$$

13.73.  $\bar{P} = \bar{W} = 1$ ;  $\Delta s' = -0,50$  мм;  $\Delta y'_D = -4,10$  мм.

13.74.  $\bar{S}_{III} = -0,35$ .

13.75.  $r_1 = 43,75$  мм;  $r_2 = -26,92$  мм.

13.76.  $r_1 = 71,43$  мм;  $r_2 = 1500$  мм;  $r_3 = 34,88$  мм;  
 $r_4 = 21,56$  мм.

13.77. Приблизительно в 34 раза.

13.78. При  $n = 2,5$ .

13.79. При  $n = 1,75$ .

13.80. Кома 3-го порядка исправлена быть не может, так как  $\bar{W} = \frac{1}{2(2+n)}$ , определяющее ее при  $\bar{P}_{min} = 0$ , ни при каких значениях  $n$  не равна нулю.

13.81.  $\emptyset = 0,52$  мм.

13.82.  $\emptyset = 1,04$  мм.

13.83.  $N/\lambda = 0,08$ ;  $N/\lambda = 0,31$ ;  $N/\lambda = 0,11$ . При решении можно воспользоваться формулой волновой аберрации.

13.84.  $N/\lambda = 1,06$ . При решении можно воспользоваться формулой волновой аберрации.

13.85.  $N/\lambda = 3,82$ .

13.86.  $N/\lambda = 0,70$ .

13.87. Увеличится в  $k$  раз.

13.88. Увеличится в  $k^4$  раз.

13.89. Уменьшится в  $k^3$  раз.

13.90. а)  $\Delta s'_{III} \approx -2,81$  мм;  $\eta_{III} \approx 0,94\%$ ;  $s'_F - s'_C = 0$ ; б)  $\delta\sigma' = 27$ ;  $\delta\eta = 0,94\%$ ;  $\delta(s'_F - s'_C) \approx 0$ ; в) хроматизм положения; г)  $\Delta s' = -2,73$  мм;  $s'_F - s'_C = 0$ ;  $\eta = 0,85\%$ .

13.91. Радиусы поверхностей первой линзы имеют близкие значения и поэтому неразличимы при сборке без применения специальных измерительных средств (пробного стекла или сферометра). При сборке первая линза установлена в перевернутом положении.

13.92. Ошибка допущена вследствие разных воздушных промежутков так, что  $\Delta d_2 = -\Delta d_4$ . Приращения аберраций по отношению к системе с расчетными значениями конструктивных параметров составляют  $\delta\Delta s'_e = -0,3 - 0,12 = -0,42$  мм;  $\delta z'_m = -0,1 - 1,2 = -1,3$  мм;  $\delta z'_s = -2,1, +1,75 = -0,35$  мм. Пользуясь таблицей влияния воздушных промежутков на аберрации, находим, что при одновременном изменении воздушных промежутков

$\Delta d_2 = 0,01$  мм и  $\Delta d_4 = -0,01$  мм,  $\delta \Delta s'_e = -0,0109 + 0,0023 = -0,0086$ ;  $\delta z'_m = -0,0052 - 0,0213 = -0,0265$  мм;  $\delta z'_s = 0,0001 - 0,0071 = -0,007$  мм. Нетрудно видеть, что при  $\Delta d_2 = 0,5$  мм и  $\Delta d_4 = -0,5$  мм произойдут следующие изменения аберраций:  $\delta \Delta s'_e = -0,43$  мм;  $\delta z'_m = -1,33$  мм;  $\delta z'_s = -0,35$  мм. Эти изменения несущественно отличаются от полученных. При сборке не выдержаны требуемые воздушные промежутки  $d_2$  и  $d_4$ , в связи с чем допущены ошибки  $\Delta d_2 = 0,5$  мм и  $\Delta d_4 = -0,5$  мм. Различия в приращениях аберраций вызваны нелинейностью зависимости приращений аберраций от изменения толщин.

13.93. Поскольку объектив ахроматический и обладает положительной оптической силой, то положительная линза должна быть выполнена из стекла с меньшей дисперсией (из крона), а отрицательная линза — из стекла с большей дисперсией (из флинта). В записи конструктивных параметров следует поменять местами марки стекол.

13.94. Поскольку монохроматическая аберрация (сферическая) практически соответствует расчету, а хроматизм положения значительно отличается от расчетного значения, то ошибка обусловлена применением марки стекла с другим коэффициентом дисперсии. По ГОСТ 3514—76 определяем марку стекла, которое при показателе, близком к показателю стекла БК-8, для основной длины волны  $e$  имеет другой коэффициент дисперсии. Таким стеклом является ЛФ10. В результате расчета хода лучей нетрудно убедиться, что при замене БК8 на ЛФ10 хроматическая разность  $s'_f - s'_c = -2$  мм.

13.95. Запись неверна. Знаки радиусов кривизны должны быть обратными.

13.96. Ошибка заключается в том, что в компоненте, у которого толщины линз и воздушные промежутки малы по отношению к фокусному расстоянию, астигматизм  $S_{III}$  не зависит от углов  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  и  $\alpha_5$ , образованных параксиальным лучом и осью. Поэтому  $S_{III}$  не может быть корректируемой функцией.

13.97. Следует записать:  $r_4 = -70$ ;  $n_5 = 1$ .

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

## 1.1. Показатели преломления некоторых сред

Среда	$n_e$	$n_D$	Среда	$n_e$	$n_D$
Стекло:			Стекло:		
ЛК4	1,4922	1,4903	ТФ4	1,7462	1,7398
К1	1,5001	1,4982	ТФ5	1,7617	1,7550
К2	1,5023	1,5004	ТФ10	1,8138	1,8060
К8	1,5183	1,5163	СТФ2	1,9554	1,9441
БК6	1,5421	1,5399	СТФ3	2,1683	2,1696
БК8	1,5489	1,5467	СТФ11	2,0711	2,0557
БК10	1,5713	1,5688	В510	—	1,510
ТК14	1,6155	1,6130	В518	—	1,518
ТК16	1,6152	1,6126	В521	—	1,521
ТК21	1,6600	1,6568	В722	—	1,722
СТК9	1,7460	1,7424	В735	—	1,735
БФ12	1,6298	1,6259	В752	—	1,752
ЛФ10	1,5509	1,5480	ВТ476	—	1,476
Ф1	1,6169	1,6128	В077	1,5163	—
Ф4	1,6285	1,6242	Вода	1,334	1,333
Ф6	1,6070	1,6031	Кедровое масло	—	1,515
ТФ1	1,6522	1,6475	Монобром- нафталин	—	1,6582
ТФ2	1,6776	1,6725	Полиметил- метакрилат	1,49	—

Расстояние от Земли до Луны  $384,4 \cdot 10^3$  км. Угловой размер Луны, видимый с Земли,  $2\alpha_L = 31'$ .

## 1.2. Единая изотермическая кривая

$x$	$y \cdot 10^2$	$x$	$y \cdot 10^2$	$x$	$y \cdot 10^2$
0,10	$4,7 \cdot 10^{-13}$	0,66	61,45	1,14	96,12
0,15	$7,91 \cdot 10^{-6}$	0,67	63,78	1,15	95,63
0,20	$7,37 \cdot 10^{-4}$	0,68	66,06	1,16	95,11
0,21	$0,188 \cdot 10^{-2}$	0,69	68,25	1,17	94,56
0,22	$0,437 \cdot 10^{-2}$	0,70	70,42	1,18	93,99
0,23	$0,931 \cdot 10^{-2}$	0,71	72,48	1,19	93,39
0,24	$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,72	74,48	1,20	92,77
0,25	$3,45 \cdot 10^{-2}$	0,73	76,42	1,21	92,14
0,26	$6,10 \cdot 10^{-2}$	0,74	78,28	1,22	91,50
0,27	0,102	0,75	80,05	1,23	90,85
0,28	0,162	0,76	81,74	1,24	90,19
0,29	0,254	0,77	83,36	1,25	89,51
0,30	0,380	0,78	84,91	1,26	88,82
0,31	0,550	0,79	86,36	1,27	88,12
0,32	0,774	0,80	87,74	1,28	87,41
0,33	1,062	0,81	89,94	1,29	86,70
0,34	1,425	0,82	90,26	1,30	85,98
0,35	1,870	0,83	91,40	1,31	85,26
0,36	2,41	0,84	92,46	1,32	84,53
0,37	3,051	0,85	93,45	1,33	83,79
0,38	3,801	0,86	94,35	1,34	83,05
0,39	4,667	0,87	95,19	1,35	82,30
0,40	5,648	0,88	95,95	1,36	81,55
0,41	6,76	0,89	96,63	1,37	80,80
0,42	8,00	0,90	97,24	1,38	80,04
0,43	9,36	0,91	97,78	1,39	79,09
0,44	10,84	0,92	98,26	1,40	78,53
0,45	12,45	0,93	98,68	1,41	77,77
0,46	14,18	0,94	99,04	1,42	77,01
0,47	16,02	0,95	99,34	1,43	76,26
0,48	17,97	0,96	99,59	1,44	75,51
0,49	20,03	0,97	99,78	1,45	74,76
0,50	22,17	0,98	99,90	1,46	74,01
0,51	24,39	0,99	99,97	1,47	73,27
0,52	26,70	1,00	100,00	1,48	72,52
0,53	29,06	1,01	99,98	1,49	71,78
0,54	31,48	1,02	99,91	1,50	71,04
0,55	33,92	1,03	99,79	1,51	70,30
0,56	36,45	1,04	99,63	1,52	69,56
0,57	38,98	1,05	99,44	1,53	68,83
0,58	41,52	1,06	99,20	1,54	68,10
0,59	44,08	1,07	98,92	1,55	67,38
0,60	46,63	1,08	98,60	1,56	66,66
0,61	49,17	1,09	98,26	1,57	65,94
0,62	51,70	1,10	97,88	1,58	65,20
0,63	54,20	1,11	97,47	1,59	64,51
0,64	56,67	1,12	97,04	1,60	63,80
0,65	59,08	1,13	96,59	1,61	63,10

$x$	$y \cdot 10^2$	$x$	$y \cdot 10^2$	$x$	$y \cdot 10^2$
1,62	62,41	1,90	45,46	2,95	14,53
1,63	61,73	1,92	44,43	3,00	13,83
1,64	61,05	1,94	43,42	3,10	12,57
1,65	60,38	1,96	42,43	3,20	11,41
1,66	59,72	1,98	41,47	3,30	10,38
1,67	59,06	2,00	40,54	3,40	9,47
1,68	58,40	2,05	38,27	3,50	8,66
1,69	57,75	2,10	36,14	3,60	7,92
1,70	57,11	2,15	34,14	3,70	7,26
1,71	56,47	2,20	32,28	3,80	6,67
1,72	55,84	2,25	30,53	3,90	6,14
1,73	55,21	2,30	28,87	4,00	5,65
1,74	54,59	2,35	27,31	4,50	3,83
1,75	53,98	2,40	25,85	5,00	2,68
1,76	53,37	2,45	24,47	6,00	1,421
1,77	52,76	2,50	23,18	7,00	0,820
1,78	52,16	2,55	21,96	8,00	0,505
1,79	51,57	2,60	20,83	9,00	0,327
1,80	50,99	2,65	19,76	10,00	0,223
1,81	49,84	2,70	18,75	15,00	$4,78 \cdot 10^{-2}$
1,82	49,84	2,75	17,79	20,00	$1,58 \cdot 10^{-2}$
1,84	48,70	2,80	16,88	30,00	$32,5 \cdot 10^{-4}$
1,86	47,60	2,85	16,05	40,00	$10,5 \cdot 10^{-4}$
1,88	46,52	2,90	15,28	50,00	$4,36 \cdot 10^{-4}$
					0

## 1.3. Спектральный коэффициент теплового излучения вольфрама

$\lambda$ , нм	$T$ , К							
	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
300	0,488	0,486	0,483	0,481	0,478	0,475	0,473	0,470
325	0,476	0,474	0,472	0,470	0,469	0,467	0,465	0,463
350	0,469	0,468	0,467	0,466	0,465	0,464	0,463	0,462
375	0,476	0,475	0,473	0,472	0,471	0,470	0,469	0,468
400	0,479	0,476	0,474	0,471	0,468	0,466	0,463	0,460
425	0,473	0,470	0,467	0,463	0,460	0,457	0,453	0,450
450	0,470	0,466	0,463	0,459	0,455	0,452	0,449	0,445
500	0,459	0,456	0,453	0,450	0,447	0,444	0,441	0,438
550	0,453	0,451	0,448	0,446	0,443	0,441	0,439	0,436
600	0,447	0,445	0,443	0,441	0,438	0,436	0,434	0,432
650	0,440	0,438	0,436	0,434	0,432	0,420	0,428	0,426
700	0,436	0,434	0,431	0,429	0,427	0,425	0,423	0,420
750	0,430	0,426	0,422	0,418	0,414	0,410	0,405	0,401
800	0,418	0,409	0,401	0,392	0,383	0,375	0,365	0,357
900	0,398	0,387	0,376	0,365	0,354	0,342	0,331	0,320
1000	0,375	0,347	0,351	0,339	0,327	0,315	0,302	0,290



#### 1.4. Относительная спектральная световая эффективность

$\lambda$ , нм	300	400	500	600	700
0	—	0,0004	0,323	0,631	0,0041
10	—	0,0012	0,503	0,503	0,0021
20	—	0,0040	0,710	0,381	0,00105
30	—	0,0116	0,862	0,265	0,00052
40	—	0,023	0,954	0,175	0,00025
50	—	0,038	0,995	0,107	0,00012
60	—	0,060	0,995	0,061	0,00006
70	—	0,091	0,952	0,032	0,00003
80	0,00004	0,139	0,870	0,017	0,000015
90	0,00012	0,208	0,757	0,0082	—

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 2

#### ПРОГРАММЫ РАСЧЕТОВ НА МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРЕ «ЭЛЕКТРОНИКА Б 3-34»

##### Программа № 1. Расчет кардинальных элементов линзы

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
00	«ИП» «В»	6L	24	«ИП» «6»	66
01	«ИП» «А»	6—	25	«+»	10
02	«—»	11	26	«ИП» «С»	6I
03	«ИП» «1»	61	27	«÷»	13
04	«÷»	13	28	«ИП» «8»	68
05	«П» «5»	45	29	«—»	11
06	«ИП» «В»	6L	30	«F» «1/X»	23
07	«÷»	13	31	«П» «0»	40
08	«П» «7»	47	32	«С/П»	50
09	«ИП» «3»	63	33	«/—/»	0L
10	«X»	12	34	«ИП» «9»	69
11	«П» «9»	49	35	«X»	12
12	«ИП» «С»	6I	36	«С/П»	50
13	«ИП» «В»	6L	37	«ИП» «0»	60
14	«—»	11	38	«+»	10
15	«ИП» «2»	62	39	«С/П»	50
16	«÷»	13	40	«ИП» «0»	60
17	«П» «6»	46	41	«ИП» «А»	6—
18	«ИП» «С»	6I	42	«X»	12
19	«÷»	13	43	«ИП» «С»	6I
20	«ИП» «9»	69	44	«÷»	13
21	«X»	12	45	«/—/»	0L
22	«П» «8»	48	46	«П» «Д»	4Г
23	«ИП» «5»	65	47	«С/П»	50

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
48	«ИП» «9»	69	54	«X»	12
49	«ИП» «1»	61	55	«С/П»	50
50	«X»	12	56	«ИП» «Д»	6Г
51	«ИП» «2»	62	57	«+»	10
52	«÷»	13	58	«С/П»	50
53	«ИП» «Д»	6Г			

## Инструкция работы с программой № 1

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. Включите микрокалькулятор                  | Нажимаемые клавиши |
| 2. Перейдите в режим «Программирование»       | «F» «ПРГ»          |
| 3. Занесите программу                         | « » « »            |
| 4. Перейдите в режим «Автоматическая работа»  | «F» «АВТ»          |
| 5. Занесите исходные данные в регистры памяти |                    |
| $r_1$ в RG 1                                  | «П» «1»            |
| $r_2$ в RG 2                                  | «П» «2»            |
| $d$ в RG 3                                    | «П» «3»            |
| $n_1$ в RG A                                  | «П» «A»            |
| $n_2$ в RG B                                  | «П» «B»            |
| $n_3$ в RG C                                  | «П» «C»            |
| 6. Вычислите значение $f'$                    | «B/O» «C/П»        |
| 7. Вычислите значение $s_H'$                  | «C/П»              |
| 8. Вычислите значение $s_F'$                  | «C/П»              |
| 9. Вычислите значение $s_H$                   | «C/П»              |
| 10. Вычислите значение $s_F$                  | «C/П»              |

**Программа № 2.** Расчет фокусного расстояния и положения фокуса в двухкомпонентной системе, расположенной в воздухе

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
00	«ИП» «1»	61	09	«X»	12	18	«ИП» «4»	64
01	«F» «1/X»	23	10	«/-/»	0L	19	«ИП» «3»	63
02	«П» «4»	44	11	«ИП» «4»	64	20	«X»	12
03	«ИП» «2»	62	12	«+»	10	21	«/-/»	0L
04	«F» «1/X»	23	13	«ИП» «5»	65	22	«↗»	0E
05	«П» «5»	45	14	«+»	10	23	«1»	01
06	«ИП» «3»	63	15	«F» «1/X»	23	24	«+»	10
07	«X»	12	16	«П» «5»	45	25	«ИП» «5»	65
08	«ИП» «4»	64	17	«C/П»	50	26	«X»	12
						27	«C/П»	50

# Инструкция работы с программой № 2

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. Включите микрокалькулятор                  | Нажимаемые клавиши |
| 2. Перейдите в режим «Программирование»       | «F» «ПРГ»          |
| 3. Занесите программу                         | « » « »            |
| 4. Перейдите в режим «Автоматическая работа»  | «F» «АВТ»          |
| 5. Занесите исходные данные в регистры памяти |                    |
| $f'_1$ в RG 1                                 | «П» «1»            |
| $f'_2$ в RG 2                                 | «П» «2»            |
| $d$ в RG 3                                    | «П» «3»            |
| 6. Вычислите значение $f'$                    | «В/О» «С/П»        |
| 7. Вычислите значение $a'_{f'}$               | «С/П»              |

**Программа № 3.** Расчет оптической силы, фокусного расстояния и положения фокуса трехкомпонентной системы, расположенной в воздухе

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
00	«ИП» «0»	60	13	«ИП» «B»	6L	26	«ИП» «1»	6I
01	«ИП» «3»	63	14	«×»	12	27	«ИП» «B»	6L
02	«×»	12	15	«П» «C»	4I	28	«×»	12
03	«/—/»	0L	16	«ИП» «0»	60	29	«ИП» «0»	60
04	«1»	01	17	«ИП» «4»	64	30	«+»	10
05	«+»	10	18	«×»	12	31	«ИП» «A»	6—
06	«П» «B»	4L	19	«/—/»	01	32	«+»	10
07	«ИП» «1»	61	20	«ИП» «C»	6I	33	«С/П»	50
08	«ИП» «4»	64	21	«+»	10	34	«F» «1/X»	23
09	«×»	12	22	«П» «C»	4I	35	«С/П»	50
10	«/—/»	0L	23	«ИП» «2»	62	36	«ИП» «C»	6I
11	«1»	01	24	«×»	12	37	«×»	12
12	«+»	10	25	«П» «A»	4—	38	«С/П»	50

# Инструкция работы с программой № 3

- |   |                    |
|---|--------------------|
| 1. Включите микрокалькулятор                  | Нажимаемые клавиши |
| 2. Перейдите в режим «Программирование»       | «F» «ПРГ»          |
| 3. Занесите программу                         | « » « »            |
| 4. Перейдите в режим «Автоматическая работа»  | «F» «АВТ»          |
| 5. Занесите исходные данные в регистры памяти |                    |
| $\Phi_1$ в RG 0                               | «П» «0»            |
| $\Phi_2$ в RG 1                               | «П» «1»            |
| $\Phi_3$ в RG 3                               | «П» «2»            |
| $d_1$ в RG 3                                  | «П» «3»            |
| $d_2$ в RG 4                                  | «П» «4»            |
| 6. Вычислите значение $\Phi$                  | «В/О» «С/П»        |
| 7. Вычислите значение $f'$                    | «С/П»              |
| 8. Вычислите значение $a'_{f'}$               | «С/П»              |

**Программа № 4. Расчет фокусного расстояния и положения  
фокуса трехкомпонентной системы**

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
00	«ИП» «5»	65	29	«ИП» «B»	6L
01	«ИП» «0»	60	30	«X»	12
02	«÷»	13	31	«П» «C»	4[
03	«П» «B»	4L	32	«ИП» «8»	68
04	«ИП» «6»	66	33	«ИП» «4»	64
05	«ИП» «1»	61	34	«X»	12
06	«÷»	13	35	«ИП» «6»	66
07	«П» «9»	49	36	«÷»	13
08	«ИП» «7»	67	37	«/—/»	0L
09	«ИП» «2»	62	38	«ИП» «C»	6[
10	«÷»	13	39	«+»	10
11	«П» «A»	4—	40	«П» «C»	4[
12	«ИП» «3»	63	41	«ИП» «A»	6—
13	«ИП» «0»	60	42	«X»	12
14	«÷»	13	43	«П» «A»	4—
15	«П» «B»	4L	44	«ИП» «9»	69
16	«ИП» «4»	64	45	«ИП» «B»	6L
17	«ИП» «1»	61	46	«X»	12
18	«÷»	13	47	«ИП» «8»	68
19	«П» «C»	4[	48	«+»	10
20	«ИП» «B»	6L	49	«ИП» «A»	6—
21	«/—/»	0L	50	«+»	10
22	«1»	01	51	«F» «1/X»	23
23	«+»	10	52	«ИП» «7»	67
34	«П» «B»	4L	53	«X»	12
25	«ИП» «C»	6[	54	«C/П»	50
26	«/—/»	0L	55	«ИП» «C»	6[
27	«1»	01	56	«X»	12
28	«+»	10	57	«C/П»	50

*Инструкция работы с программой № 4*

1. Включите микрокалькулятор
2. Перейдите в режим «Программирование»
3. Занесите программу
4. Перейдите в режим «Автоматическая работа»
5. Занесите исходные данные в регистры памяти

$f'_1$  в RG 0

$f'_2$  в RG 1

$f'_3$  в RG 2

$d_1$  в RG 3

$d_2$  в RG 4

$n_2$  в RG 5

$n_3$  в RG 6

$n_4$  в RG 7

6. Вычислите значение  $f'$
7. Вычислите значение  $a'$

Нажимаемые  
клавиши

«F» «ПРГ»

« » « »

«F» «ABT»

«П» «0»

«П» «1»

«П» «2»

«П» «3»

«П» «4»

«П» «5»

«П» «6»

«П» «7»

«B/O» «C/П»

«C/П»

**Программа № 5. Расчет  $M_{e,\lambda}^0(\lambda)$ ,  $\lambda_m$  и  $[M_{e,\lambda}^0]_{\max}$   
по заданным значениям  $\lambda$ ,  $T$**

Адрес	Нажимаемые клавиши	Код	Адрес	Нажимаемые клавиши	Код
00	«5»	05	17	«÷»	13
01	«ИП» «3»	63	18	«С/П»	50
02	«F» «ху»	24	19	«ИП» «6»	66
03	«П» «5»	45	20	«ИП» «4»	64
04	«ИП» «3»	63	21	«÷»	13
05	«ИП» «4»	64	22	«С/П»	50
06	«X»	12	23	«ИП» «4»	64
07	«ИП» «2»	62	24	«ИП» «7»	67
08	← «ху» →	14	25	«÷»	13
09	«÷»	13	26	«П» «9»	49
10	«F» «e <sup>x</sup> »	16	27	«5»	05
11	«1»	01	28	«ИП» «9»	69
12	«—»	11	29	«F» «ху»	24
13	«ИП» «5»	65	30	«ИП» «8»	68
14	«X»	12	31	«X»	12
15	«ИП» «1»	61	32	«С/П»	50
16	← «ху» →	14			

*Инструкция работы с программой № 5*

1. Включите микрокалькулятор
2. Перейдите в режим «Программирование»
3. Занесите программу
4. Перейдите в режим «Автоматическая работа»
5. Занесите исходные данные в регистры памяти
 

3,74 · 10 <sup>8</sup>	в RG 1
14 380	в RG 2
$\lambda$	в RG 3
$T$	в RG 4
2896	в RG 6
1000	в RG 7
13 010	в RG 8
6. Вычислите значение  $M_{e,\lambda}^0(\lambda)$
7. Вычислите значение  $\lambda_m$
8. Вычислите значение  $[M_{e,\lambda}^0]_{\max}$

Нажимаемые  
клавиши

«F» «ПРГ»  
« » « »  
«F» «АВТ»

«П» «1»  
«П» «2»  
«П» «3»  
«П» «4»  
«П» «6»  
«П» «7»  
«П» «8»  
«В/О» «С/П»  
«С/П»  
«С/П»

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Вычислительная** оптика: Справочник/Под общ. ред. М. М. Русинова Л.: Машиностроение, 1984. 424 с.
2. **Заказнов Н. П.** Прикладная геометрическая оптика. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.
3. **Лазарев Л. П.** Инфракрасные и световые приборы самонаведения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1976. 568 с.
4. **Прикладная** оптика /Под ред. А. С. Дубовика, М.: Недра, 1982. 612 с.
5. **Справочник** конструктора оптико-механических приборов /Под общ. ред. В. А. Панова Л.: Машиностроение, 1980. 744 с.
6. **Теория** оптических систем /Б.Н. Бегунов, Н. П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. М.: Машиностроение. 1981. 432 с.
7. **Фефилов Б. В.** Задачник по прикладной оптике М.: Высшая школа, 1974. 160 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие. . . . .	3
Условные обозначения . . . . .	5
Глава 1. Идеальная оптическая система . . . . .	7
Глава 2. Оптика параксиальных и нулевых лучей . . . . .	26
Глава 3. Детали оптических систем. . . . .	33
Глава 4. Ограничение пучков лучей в оптических системах . . . . .	44
Глава 5. Оптическая система как передатчик энергии излучения . . . . .	52
Глава 6. Лупа и микроскоп . . . . .	65
Глава 7. Телескопические системы . . . . .	69
Глава 8. Фотообъектив и оптика передающих телевизионных систем . . . . .	82
Глава 9. Осветительные и проекционные системы . . . . .	89
Глава 10. Оптические фотоэлектрические системы . . . . .	94
Глава 11. Оптические системы для лазеров и голографии . . . . .	102
Глава 12. Оптические системы двойной симметрии . . . . .	108
Глава 13. Аберрационный расчет оптических систем . . . . .	110
Ответы и решения . . . . .	138
Приложение 1. Справочный материал. . . . .	181
Приложение 2. Программы расчетов на микрокалькуляторе «Электроника БЗ-34» . . . . .	184
Список литературы . . . . .	189

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

*Лев Николаевич Андреев,  
Александр Пантелеймонович Грамматин,  
Станислав Иванович Кирюшин,  
Владимир Иванович Кузичев*

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕОРИИ  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Редактор *Е. В. Григорин-Рябова*  
Художественный редактор *С. С. Водчиц*  
Технический редактор *Н. М. Харитонова*  
Корректор *Л. Я. Шабашова*

ИБ № 4847

---

Сдано в набор 04.08.86.	Подписано в печать 24.11.86.	T-20847.
Формат 84×108 <sup>1</sup> / <sub>32</sub> .	Бумага кн.-журн. № 2.	Гарнитура литературная.
Печать высокая.	Усл. печ. л. 10,08.	Усл. кр.-отт. 10,29.
Тираж 4700 экз.	Заказ 1954	Уч.-изд. л. 9,51.
		Цена 30 к.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,  
107076, Москва, Стромынский пер., 4

---

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
129041, Москва, Б. Переяславская, 46



30 коп.

