

Бурбаев А.М.

**СБОРКА, ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

СБОРНИК ЗАДАЧ



**Санкт-Петербург
2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

А.М. Бурбаев

**СБОРКА, ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
СБОРНИК ЗАДАЧ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.02 – Опотехника и специальности
12.05.01 – Электронные и оптико-электронные приборы и системы
специального назначения в качестве учебного пособия для
самостоятельной работы студентов с целью реализации основных
образовательных программ высшего образования бакалавриата и
специалитета

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

Бурбаев А.М. Сборка, юстировка и контроль опико-электронных приборов. Сборник задач. Учебное пособие для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Сборка, юстировка и контроль опико-электронных приборов». – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 102 с.

В учебном пособии представлены задачи, решение которых позволит закрепить знания, полученные студентами при изучении дисциплин «Сборка, юстировка и контроль опико-электронных приборов», «Сборка, юстировка и контроль опических приборов», «Юстировка и контроль опико-электронных информационно-измерительных приборов и систем», глубже понять физический смысл лабораторного практикума и грамотно оценить предлагаемую методику контроля и юстировки. Формулировке задач предшествует краткое изложение научных основ соответствующего раздела дисциплин и необходимые формулы для выполнения численных расчётов при решении задач.

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии в качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего образования по направлению подготовки бакалавриата 12.03.02 «Оптехника», специалитета 12.05.01 «Электронные и опико-электронные приборы и системы специального назначения».



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Бурбаев А.М., 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ФОКУСИРОВКА ИЗОБРАЖЕНИЯ, СХОДИМОСТЬ ПУЧКОВ И УСТРАНЕНИЕ ПАРАЛЛАКСА.....	6
1.1 Основные понятия и определения.....	6
1.2 Общие вопросы фокусировки изображения.....	6
1.3 Фокусировка телескопических систем.....	9
1.4 Фокусировка оптической системы микроскопа.....	12
1.5 Задачи №№ 1 – 66.....	14
1.6 Пример решения задач.....	23
2. РЕГУЛИРОВКА УВЕЛИЧЕНИЯ И МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	25
2.1 Общие вопросы юстировки увеличения и масштаба изображения.....	25
2.2 Юстировка нормального увеличения объектива отсчётного микроскопа или профильного проектора.....	27
2.3 Юстировка масштаба изображения в телескопических системах.....	28
2.4 Задачи №№ 67 – 76	29
2.5 Пример решения задач.....	30
3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ. ЦЕНТРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ К ВНЕШНИМ КОНСТРУКТОРСКИМ БАЗАМ.....	31
3.1 Понятие о базах и базировании схемных элементов оптических приборов.....	31
3.2 Автоколлимационный метод центрировки линзовых компонентов объектива с результативной обработкой базовых поверхностей оправ.....	32
3.3 Методы и средства контроля расположения оптических баз деталей и сборочных единиц по отношению к реальным и виртуальным базам механических деталей, устройств и приборов.....	33
3.4. Задачи №№ 77 – 101.....	35
4. УСТРАНЕНИЕ НАКЛОНА, ПОВОРОТА И УВОДА ИЗОБРАЖЕНИЯ, РАЗВОРОТА ШКАЛ И СЕТОК.....	38
4.1 Определение понятий о типовых погрешностях оптических приборов и причины их возникновения.....	38
4.2 Предотвращение наклона изображения в оптических	

системах с плоскими зеркалами.....	39
4.3 Задачи №№ 102 – 114	40
5. СВОЙСТВА И ЮСТИРОВКА ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ.....	44
5.1 Расчётные формулы геометрической оптики для параллельного хода лучей.....	44
5.2 Расчётные формулы для сходящегося хода лучей.....	50
5.3 Влияние поворота плоского зеркала на направление отражённого луча и наклон (поворот) изображения.....	53
5.4 Влияние поворота углового зеркала на направление отражённого луча и наклон изображения.....	55
5.5 Классификация зеркально-призмных систем.....	58
5.6 Задачи №№ 115 – 153.....	59
6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ КОНТРОЛЯ, ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЮСТИРОВКИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ, ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	66
6.1 Задачи №№ 154 –201.....	67
6.2 Пример решения задачи.....	74
7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	75
7.1 Критерии качества изображения и принципы, положенные в основу методики расчёта допусков на дефекты оптических деталей и систем.....	75
7.2 Формулы для расчёта допусков на оптические поверхности и детали, перпендикулярные к оси пучка лучей.....	78
7.3 Формулы для расчёта допусков на наклонные оптические поверхности и пластинки.....	81
7.4 Задачи №№ 202 – 280.....	83
7.5 Примеры решения задач.....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптико-электронные приборы находят широкое применение в самых различных сферах человеческой деятельности: науке, технике и производстве, при исследовании природных ресурсов и для контроля окружающей среды, медицине и астрономии, военном деле и др. С их помощью успешно решаются разнообразные задачи исследования физических явлений, контроля параметров производимых изделий, оценки пространственного положения объектов.

Неуклонно повышаются требования к точности приборов и их быстродействию, информативности и надёжности работы. Всё это приводит к усложнению конструкции приборов и повышению требований к технологии их изготовления, особенно к завершающим операциям – сборке, юстировке и контролю, которые решающим образом определяют качество выпускаемых изделий. В связи с этим от разработчика приборов требуется грамотный и квалифицированный подход к проектированию, в котором, пожалуй, на первое место выступает такой показатель качества создаваемого изделия, как технологичность конструкции и, не в последнюю очередь, – в сборке, юстировке и контроле.

Данное учебное пособие направлено на закрепление знаний, получаемых бакалаврами и специалистами в ходе изучения курсов по дисциплинам « Сборка, юстировка и контроль оптико-электронных приборов», «Юстировка и контроль оптико-электронных информационно-измерительных приборов и систем». Эти дисциплины направлены на решение компетенций, связанных со способностью к оценке технологичности и технологическому контролю конструкторских решений, разработке научно обоснованных методик юстировки, типовых процессов контроля параметров механических, оптических и оптико-электронных узлов; к участию в монтаже, наладке, настройке, юстировке и испытаниях, обслуживании, эксплуатации и ремонте оптической техники.

Приведённые в пособии задачи охватывают как общие вопросы сборки и юстировки оптико-электронных приборов, так и специальные вопросы юстировки и контроля, встречающиеся в процессе сборки современных оптических приборов различного назначения. Решение задач поможет студенту глубже понять физические принципы, положенные в основу работы приборов, целенаправленно выявлять первичные погрешности изготовления деталей и сборки приборов и определять их влияние на выходные характеристики приборов, находить компенсаторы погрешностей независимого типа.

1. ФОКУСИРОВКА ИЗОБРАЖЕНИЯ, СХОДИМОСТЬ ПУЧКОВ И УСТРАНЕНИЕ ПАРАЛЛАКСА

1.1 Основные понятия и определения

Юстировка – это действие по приведению оптической системы прибора в рабочее состояние, при котором прибор удовлетворяет всем требованиям технических условий. Выполняют юстировку путём обеспечения необходимого взаимного расположения и взаимодействия схемных, прежде всего оптических, элементов между собой или по отношению к конструкторским базам сборочных единиц и корпусных деталей.

Поверка средств измерения – это совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерения метрологическим характеристикам.

Выверка – процесс введения поправок, имеющий целью приведение прибора в рабочее состояние (например, установка теодолита по уровню, выверка накладного регулируемого уровня).

Параллаксом в оптических приборах называют видимый сдвиг изображения предмета (автоколлимационного изображения перекрестия, шкалы) относительно делений шкалы, сетки, индекса или любой фиксированной точки поля зрения, наблюдаемый при поперечных сдвигах глаза в пределах выходного зрачка системы в том случае, когда изображение предмета не совпадает с плоскостью шкалы или сетки.

1.2 Общие вопросы фокусировки изображения

Задачей операции фокусировки является совмещение плоскости изображения наблюдаемого, измеряемого, используемого в качестве эталона (образца, меры), исследуемого или излучающего свет объекта – с заданной плоскостью (плоскостью анализа), в которой может располагаться либо фотоплёнка, либо визирная сетка, либо измерительная шкала (нониус), либо щель спектрального прибора, либо фотоприёмник (например, линейка или матрица ПЗС), либо фокальная плоскость последующего компонента оптической системы. Погрешность выполнения операции фокусировки в общем случае приводит к размытию изображения в плоскости анализа, а в визуальных приборах ещё и к появлению параллакса, приводящих в итоге к погрешности измерения, к ухудшению других показателей качества прибора.

К задачам фокусировки относят также задачи нахождения положения и размера изображения предмета через линзу. Положение изображения T' точки предмета T через оптическую систему возможно определить с помощью следующих формул [1 (с.64-68), 2 (с.54)]:

по формуле Ньютона

$$z \cdot z' = -f'^2; \quad (1)$$

по формуле отрезков

$$1/a' - 1/a = 1/f'; \quad (2)$$

по формуле расстояния между сопряжёнными точками (для тонкой линзы)

$$l = -z + 2f' - f'^2/z' = f'(2 - \beta - \beta^{-1}). \quad (3)$$

Здесь z , z' – передний и задний фокусные отрезки, т.е. соответственно расстояния от переднего фокуса F до осевой точки предмета и от заднего фокуса F' до изображения этой точки; a , a' – передний и задний главные отрезки, т.е. соответственно расстояния от передней главной точки до осевой точки предмета и от задней главной точки до изображения точки предмета; β – линейное или поперечное увеличение в сопряжённой плоскости изображения, причём

$$\beta = y'/y = -z'/f' = f'/z, \quad (4)$$

где y , y' – высота предмета от оптической оси и высота его изображения в сопряжённой плоскости.

Зависимость между продольными смещениями фокусных элементов и величиной возникающей расфокусировки изображения определяют по следующей формуле [1 (с.64-68), 2 (с.54)]:

$$\Delta l = (1 - V_0^2 + V_0 \Delta V) \cdot \Delta z_l \quad (5)$$

где Δl – величина расфокусировки; V_0 – линейное увеличение линзы (объектива) в исходном положении; ΔV – малое приращение линейного увеличения, соответствующее малому смещению линзы Δz_l .

Из этой формулы видно, что следует различать три частных случая.

1. $|V_0| \ll 1$; ($|z_0| \gg f'$), где z_0 – передний отрезок при исходном положении линзы, – случай объектива зрительной трубы или фотоаппарата, когда точка предмета A от переднего фокуса F линзы находится слева на расстоянии, измеряемом большим числом её фокусных расстояний f' ; при этом расфокусировка

$$\Delta l \approx \Delta z_l, \quad (6)$$

т.е. изображение точки A' смещается вместе с линзой, как бы будучи с ней неизменно связано.

2. $|V_0| = 1$; $(|z_0| = f')$ – случай оборачивающей системы однократного увеличения, когда точка предмета A расположена слева от линзы на двойном фокусном расстоянии, или случай коллектива, когда точка A совпадает с передней главной точкой линзы.

$$\text{При } V_0 = -1^{\times} \quad \Delta l = \Delta z_n^2 / f', \quad (7)$$

$$\text{а при } V_0 = +1^{\times} \quad \Delta l = -\Delta z_n^2 / f'. \quad (8)$$

Следовательно, при малом смещении линзы в любом направлении из исходного положения, когда её линейное увеличение равно ± 1 , изображение смещается всегда в одном и том же направлении и так, что расстояние l между сопряжёнными точками A и A' в обоих случаях возрастает на малую величину второго порядка. Направления же смещений изображения для увеличений $+1$ и -1 противоположны друг другу.

3. $|V_0| \gg 1$; $(|z_0| \ll f')$ – случай микрообъектива, когда точка предмета A расположена слева от переднего фокуса F линзы на близком расстоянии, значительно меньшем её фокусного расстояния. Для величины смещения изображения получим

$$\Delta l \approx (1 - V_0^2) \Delta z_n \approx -V_0^2 \Delta z_n. \quad (9)$$

Видно, что здесь изображение движется в ускоренном масштабе в сторону, противоположную направлению смещения линзы, так что расстояние l между сопряжёнными точками A и A' быстро изменяется – уменьшается или возрастает.

Приведённые выше формулы не позволяют найти расфокусировку, когда точка предмета A расположена близко к переднему фокусу F линзы или переходит через него, так как в этих случаях увеличение V_0 очень велико или соответственно переходит через ∞ . Между тем этот случай нередко встречается при юстировке линзовых систем, например, окуляра. Здесь необходимо воспользоваться формулой Ньютона, в которой достаточно большой отрезок $z' = a$ удобно выразить в диоптрийной мере по формуле:

$$A = 1000/a, \quad (10)$$

где A – сходимости пучка лучей, создающих изображение точки, в диоптрийной мере, а a – расстояние до точки изображения в миллиметрах.

Таким образом, после замен получаем формулу

$$\Delta z_{\text{л}} = \frac{f'^2 A}{1000}, \quad (11)$$

которую ещё называют «формулой окуляра».

1.3 Фокусировка телескопических систем

В соответствии с критерием Рэлея качество изображения точки остаётся первоклассным, пока волновые aberrации оптической системы не превосходят величины $\lambda/4$ - четверти длины волны света. Для видимой области спектра ($\lambda_{\text{cp}} = 0,55 \text{ мкм}$) допустимые волновые aberrации визуальных систем не должны быть больше величины

$$\Delta_{\text{в}} = 0,14 \text{ мкм}.$$

Однако на все «технологические» aberrации, возникающие за счёт погрешностей изготовления и сборки оптических деталей, рекомендуется выделить только часть этого допуска, не более [3]

$$(\Delta_{\Sigma})_{\text{доп}} = 0,1 \text{ мкм}.$$

При определении допуска на расфокусировку визуальных телескопических систем стрелку кривизны сферического волнового фронта, образованного пучком лучей, исходящих из осевой точки достаточно удалённого предмета, в плоскости входного зрачка системы приравнивают этой величине

$$(\Delta h_{\text{в}})_{\text{доп}} = 0,1 \text{ мкм}, \quad (12)$$

а расстояние Z_{∞} , начиная с которого и до бесконечности все удалённые предметы представляются наблюдателю одинаково резкими, называют «началом бесконечности» или «практической бесконечностью». Это расстояние равно

$$Z_{\infty} = 1,25 (d_p)^2 \text{ м}, \quad (13)$$

где d_p – диаметр рабочего входного зрачка телескопической системы в мм.

Расстоянию Z_{∞} в пространстве предметов соответствует отрезок $\Delta z'$ в пространстве изображений, который называют случайной погрешностью продольного наведения. Величину этой погрешности определяют по формуле

$$\Delta z' = \frac{0,2\text{мм}}{\sigma_A'^2}, \quad (14)$$

где σ_A' - задний апертурный угол объектива телескопической системы (угловая апертура рабочего пучка лучей в пространстве изображений) Величину $\pm \Delta z'$ часто принимают в качестве допуска на расфокусировку визуальных телескопических систем (т.е. на продольную установку шкал и сеток).

При несовпадении плоскости изображения предмета с плоскостью сетки на величину $z_{\text{ок}}$ угловой параллакс за окуляром прибора составит

$$\vartheta'_{\text{ок}} = \frac{t_{\text{max}} \cdot z_{\text{ок}}}{f_{\text{ок}}^2} \cdot 3440', \quad (15)$$

где t_{max} - наибольшее возможное поперечное смещение зрачка глаза в пределах выходного зрачка диаметром D' [1], причём

$$t_{\text{max}} = \frac{D'-1}{2}, \text{ если } D' \geq d_{\text{зг}} = 2\text{мм} \text{ и } t_{\text{max}} = \frac{1}{4} D', \text{ если } D' \leq 2\text{мм}. \quad (16)$$

Продольное перемещение окуляра $z_{\text{ок}}$, необходимое для перефокусировки с резкого изображения сетки на резкое изображение предмета, можно также выразить и в диоптрийной мере $A_{\text{дптр}}$, в этом случае формулу (15) можно переписать:

$$\vartheta'_{\text{ок}} = \frac{t_{\text{max}} \cdot A_{\text{дптр}}}{1000} \cdot 3440'. \quad (17)$$

Часто, в процессе юстировки (совмещения сетки с плоскостью резкого изображения бесконечно далёкого предмета) установку сетки осуществляют неподвижным глазом по признаку одновременной её резкости с изображением бесконечно удалённого объекта (например, сетки коллиматора). При этом вероятная остаточная величина их несовмещения может составить в миллиметрах:

$$(z_{\text{ок}})_{\text{ост}} \leq \Delta z = \frac{0,2}{\sigma_p^2} \cdot 10^{-3}, \text{ где } \sigma_p = \frac{D'_p}{2f_{\text{ок}}}.$$

В последней формуле D'_p - рабочее, т.е. действующее значение выходного зрачка. Например, если $D' \geq d_{\text{зг}} = 2\text{мм}$, $D'_p = 2\text{мм}$, а если $D' \leq d_{\text{зг}}$, то $D'_p = D'$.

За окуляром же эта величина несоответствия изображений сетки и предмета, которую по праву можно также назвать «практической бесконечностью» (со стороны окуляра), составит в метрах

$$(z'_{ок})_{\infty} = \frac{f'_{ок}{}^2}{(z'_{ок})_{ост}} \geq f'_{ок}{}^2 / \Delta z \geq 1,25(D'_p)^2 \text{ м}, \quad (18)$$

или в диоптрийной мере

$$A_{резк} = \frac{1}{(z'_{ок})_{\infty}} = \frac{0,8}{(D'_p)^2} \text{ дптр}, \quad (19)$$

где $A_{резк}$ – вероятная погрешность наведения на резкость по признаку одновременной резкости изображений при наблюдении в окуляр.

При подстановке в формулу (17) $A = A_{резк}$ получаем формулу для остаточного углового параллакса за окуляром в угловых минутах:

$$\begin{aligned} (g'_{ок})_{ост} &= \frac{t_{\max} \cdot A_{резк}}{1000} \cdot 3440' = \frac{(D'-1) \cdot 0,2}{2 \cdot 1000} \cdot 3440' = 0,34(D'-1), \text{ при } D' \geq 2 \text{ мм}; \\ (g'_{ок})_{ост} &= \frac{D'}{4} \cdot \frac{0,8}{(D')^2} \cdot 3,44 = \frac{0,68}{D'}, \text{ при } D' < 2 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (20)$$

Воспользовавшись формулой для поперечного линейного параллакса:

$p = t_{\max} \frac{z_{ок}}{f'_{ок}}$, аналогичным путём можно получить формулу для остаточного поперечного параллакса в передней фокальной плоскости окуляра, в миллиметрах:

$$\begin{aligned} p_{ост} &= \frac{t_{\max} \cdot A_{резк}}{1000} \cdot f'_{ок} = f'_{ок} (D'-1) \cdot 10^{-4} \text{ мм, при } D' \geq d_{зг} = 2 \text{ мм}; \\ p_{ост} &= \frac{D' \cdot 0,8}{4(D')^2 \cdot 1000} \cdot f'_{ок} = \frac{2f'_{ок}}{D'} \cdot 10^{-4} \text{ мм, при } D' < d_{зг} = 2 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (21)$$

Приведём формулы, устанавливающие соотношение между одноимёнными, сопряжёнными характеристиками телескопической системы, оцениваемыми для пространства предметов и пространства изображений – перед объективом и за окуляром.

Для углового параллакса:
$$\mathcal{G}_{об} = \frac{\mathcal{G}_{ок}}{\Gamma_T}, \quad (22)$$

где $\mathcal{G}_{об}$ - угловой параллакс в пространстве предметов (т.е. перед объективом), а Γ_T - видимое увеличение телескопической системы.

Для продольных отрезков:
$$a_{об} = a_{ок} \cdot \Gamma_T^2. \quad (23)$$

Для сходимости пучков в диоптрийной мере:

$$(A_{дптр})_{ок} = (A_{дптр})_{об} \cdot \Gamma_T^2. \quad (24)$$

Формула для оценки погрешности визирования удалённого объекта из-за параллакса (например, с помощью прицела):

$$\mathcal{G}'_{об} = \frac{D \cdot z'}{2 \cdot f'^2_{об}} \cdot 3440', \quad (25)$$

где D – диаметр входного зрачка, а z' – погрешность совмещения сетки с задней фокальной плоскостью объектива.

1.4 Фокусировка оптической системы микроскопа

Оптическая система микроскопа реализует двухступенчатое увеличение изображения предмета – сначала объективом, а затем окуляром. Действие микрообъектива характеризуется его линейным увеличением ($\beta_{об}$ или $V_{об}$), причём

$$\beta_{об} = -\Delta_0 / f'_{об}, \quad (26)$$

где $\Delta_0 = z'$ – оптический интервал или оптическая длина тубуса (расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, совмещённым с плоскостью изображения).

Изображение, создаваемое объективом, рассматривают в окуляр, который действует как лупа, с видимым увеличением

$$\Gamma_{ок} = 250 / f'_{ок}. \quad (27)$$

Таким образом, видимое увеличение всего микроскопа

$$\Gamma_m = \beta_{об} \cdot \Gamma_{ок}. \quad (28)$$

По отношению ко всему микроскопу рассматриваемый предмет расположен в его передней фокальной плоскости, и видимое увеличение микроскопа можно определить так же, как и у лупы

$$\Gamma_m = 250 / f'_m, \quad (29)$$

где f'_m – заднее фокусное расстояние микроскопа.

Для линейного поля микроскопа в пространстве предметов применяют формулу:

$$2y = \frac{500 \cdot tgw'}{\Gamma_m}, \quad (30)$$

где w' – половина угла поля зрения окуляра.

Довольно часто, в особенности в измерительных микроскопах, применяют телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов, для чего апертурную диафрагму помещают в задней фокальной плоскости объектива. Это даёт значительные преимущества как в процессе эксплуатации приборов, так и при их юстировке. Для рассматриваемого случая справедлива формула, связывающая диаметр выходного зрачка микроскопа с его увеличением и числовой апертурой объектива:

$$D' = 2r' = \frac{500A}{\Gamma_m}. \quad (31)$$

Оптимальное значение диаметра выходного зрачка микроскопа и зрительной трубы, предназначенных для контроля фокусировки, качества изображения и других измерений, находится в диапазоне

$$D' = 0,7 \div 1,2 \text{ мм}. \quad (32)$$

Зависимость между перемещением всего микроскопа (или точки предмета по отношению к микроскопу) и расфокусировкой изображения, наблюдаемого в окуляр, выражается формулой

$$z_m = \frac{62,5 \cdot A}{\Gamma_m^2}, \quad (33)$$

где z_m – в миллиметрах, а A – в диоптриях.

Таким образом, при удалении микроскопа от точки наблюдения – её изображение оказывается перед передним фокусом окуляра, а сходимости пучка за окуляром $A_{\text{дптр}}$ – имеет положительный знак, что эквивалентно введению за окуляром микроскопа положительной очковой линзы. Если же наблюдатель с эметропическим (нормальным) зрением для восстановления резкого изображения попытается перефокусировать окуляр, то он будет вынужден установить окуляр (по его диоптрийной шкале) на отсчёт « $-A_{\text{дптр}}$ », то есть ввернуть. И, наоборот: при смещении микроскопа к

точке предмета изображение её оказывается за передним фокусом окуляра, а сходимость пучка за окуляром приобретает отрицательный знак.

Величину остаточного параллакса в отсчётном микроскопе при условии, что микроскоп фокусируют на плоскость штрихов шкалы **по признаку одновременной резкости изображений сетки и штрихов шкалы**, определяют по следующей формуле

$$(p_{ок})_{ост} = \frac{0,1 \cdot \beta_{об}}{A} \text{ мкм.} \quad (34)$$

Полученная формула даёт точно такой же результат, что и формула (21), приведённая выше, но значительно быстрее.

Поскольку допуск на параллакс в отсчётных микроскопах всегда относят к пространству предметов (где располагается образцовая мера), при решении задач используют следующее неравенство:

$$(p_{ок})_{ост} \leq p_{доп} \cdot \beta_{об}, \quad (35)$$

где $p_{доп}$ — составляющая погрешности отсчёта (измерения) из-за параллакса.

1.5 Задачи

1. В коллиматоре с фокусным расстоянием объектива $f' = 1 \text{ м}$ от нагрева появился параллакс сетки в 0,001 дптр (в пространстве предметов). На сколько градусов изменилась температура трубы коллиматора, если она изготовлена из углеродистой стали, имеющей коэффициент линейного расширения $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Изменение фокусного расстояния самого объектива в расчёт не принимать.

2. Вычислите расстояние между двумя сетками C_1 и C_2 , которые расположены вблизи переднего фокуса $F_{ок}$ окуляра увеличения $\Gamma_{ок} = 12,5^\times$, если разность сходимостей пучков лучей, измеренная с помощью диоптрийной трубки по изображениям C'_1 и C'_2 этих сеток за окуляром, составляет 0,4 дптр.

3. Определите линейное перемещение окуляра с увеличением $\Gamma_{ок} = 10^\times$, необходимое для изменения сходимости пучка параксиальных лучей на 1 дптр.

4. Фокусное расстояние окуляра можно приблизительно определить, измерив величину a продольного перемещения окуляра при изменении его диоптрийной установки на m делений. Для бинокля Б6×30 получили $a \approx 4 \text{ мм}$ при $m = 10 \text{ дптр}$. Вычислите фокусное расстояние окуляра.

5. На какой угол необходимо повернуть окуляр спирального микрометра для коррекции близорукости глаза в 4 дптр, если $\Gamma_{ок} = 10^\times$, шаг окулярной резьбы $t = 1,5 \text{ мм}$, а число заходов резьбы $k = 2$.

6. В театральном бинокле предусмотрено продольное перемещение объективов для коррекции аметропии (близорукости и дальнозоркости) глаз наблюдателя. Фокусное расстояние объективов $f'_{об} = 25 \text{ мм}$, увеличение бинокля $\Gamma = 2,5^\times$. Каковы должны быть пределы перемещения объективов, если необходимо корригировать аметропию в пределах $\pm 5 \text{ дптр}$. Как проверить установку «нуля диоптрийной шкалы» механизма фокусировки?

7. Известно, что погрешность совмещения сетки с плоскостью резкого изображения, создаваемого объективом, может достигать величины

$$\Delta z = \frac{0,2 \text{ мкм}}{\sigma'^2_{A'}}, \text{ где } \sigma'_{A'} - \text{апертурный угол рабочего пучка лучей.}$$

Определите, какой разности сходимостей, в диоптриях, между изображениями предмета и сетки за окуляром эта величина соответствует.

8. Используя условие задачи № 7, укажите, с какой точностью и с какой стороны (со стороны окуляра или со стороны объектива) лучше контролировать установку сетки в фокальной плоскости объектива трубы? Какие для этого контроля необходимы дополнительные приборы?

9. Зрительная труба имеет увеличение $\Gamma = 20^\times$, диаметр входного зрачка $D_p = 14 \text{ мм}$. С какой точностью можно проверить установку нуля диоптрийной шкалы окуляра у данной трубы?

10. Какое зеркало можно считать плоским, если оно применяется для установки трубы на бесконечность автоколлимационным методом?

11. Трубу с фокусным расстоянием объектива $f' = 600 \text{ мм}$ и увеличением $\Gamma = 30^\times$ установили на бесконечность по Луне. Для этого трубу выносили на улицу. При поверке трубы автоколлимационным методом в помещении лаборатории, где температура равна 20° C , обнаружен за окуляром трубы параллакс автоколлимационного изображения сетки в $0,5 \text{ дптр}$ отрицательного знака (окуляр из положения установки на резкое изображение собственной сетки пришлось завинчивать по окулярной резьбе). Какая температура была на улице, если корпус трубы изготовлен из стали $35 (\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$.

12. При установке трубы на бесконечность автоколлимационным методом использовалось зеркало, которое оказалось не плоским, а сферическим с радиусом кривизны R . С какой точностью (погрешностью) трубу можно установить на бесконечность?

13. В зеркальной фотокамере «Любитель» применяется фотообъектив триплет Т-22 ($f'_1 = 75 \text{ мм}$, $D:f' = 1:4,5$; разрешающая способность в центре $R = 28 \text{ лин/мм}$).

Наводка на резкость в пределах от ∞ до $1,3 \text{ м}$ осуществляется с помощью объектива видоискателя большего фокусного расстояния f'_2 . Перемещения обоих объективов кинематически взаимосвязаны посредством зубчатой передачи. Необходимо рассчитать допуски на

отклонение фокусных расстояний обоих объективов от номинальных величин.

Указание. Фокусное расстояние f'_2 объектива видоискателя можно найти из условия, что при изменении установки фотокамеры по шкале от ∞ до 1,3 м объектив видоискателя, как более длиннофокусный, опережает при своём передвижении основной объектив примерно на 2 мм.

14. Требуется подсчитать, с какой точностью можно установить панкратическую линзу в однолинзовой панкратической системе [4, стр.52-60] в правильное (расчётное) положение при увеличении $\beta = -1^x$ и с какой точностью это нужно сделать, если увеличение панкратики изменяется в пределах от $\beta_{\min} = -\frac{3}{4}$ до $\beta_{\max} = -2\frac{1}{2}$. Допуск на расфокусировку за окуляром ± 1 дптр, $f'_{ок} = 25$ мм. Фокусное расстояние панкратической линзы $f'_л = 30$ мм.

15. Какое расстояние Z допустимо между индексом и миллиметровой шкалой, если точность снятия отсчетов по шкале невооруженным глазом с расстояния 250 мм должна быть не ниже $\pm 0,1$ мм? Расчеты выполните для двух случаев:

- 1) поперечные сдвиги глаза ничем не ограничены;
- 2) перед глазом поставлена неподвижная диафрагма диаметром 20 мм.

16. Дайте определение понятию «параллакс». Какое влияние оказывает параллакс на работу глаза с оптическим прибором? Как можно уменьшить его влияние?

17. Какой величины допустима фокусность (f_{\min}) защитного стекла панорамы ПГ, если при замене поврежденного стекла запасным не должен возникать заметный параллакс или заметная нерезкость изображения далеких предметов относительно штрихов сетки? Подсчитайте все остальные допуски, необходимые для изготовления защитного стекла, а именно N , ΔN , $\theta_{кл.}$.

18. В панораме ПГ 4 x 16 со стороны объектива наблюдается параллакс сетки обратного знака величины $2'$. Куда и насколько смещена сетка панорамы относительно фокуса объектива, если фокусное расстояние объектива 80 мм, относительное отверстие 1:5?

19. На правую трубу стереотрубы АСТ 10 x 45 надевается телескопическая насадка 2 x 60. В правой трубе помещена угломерная сетка. Найдите допуск на нетелескопичность насадки, если точность измерения горизонтальных углов составляет 0 – 01 деления угломера. Как можно проконтролировать телескопичность насадки?

20. Оборачивающая система работает при увеличении $\beta_0 = -1^x$. С какой точностью система должна быть установлена посередине между сопрягаемыми плоскостями изображения объекта и окулярной сетки, чтобы

параллакс за окуляром не превосходил ± 2 дптр? Фокусные расстояния оборачивающей системы $f'_{\text{л}} = 30$ мм, а окуляра $f'_{\text{ок}} = 20$ мм.

21. С помощью поворотной плоскопараллельной пластинки, помещенной между двумя трубами, можно обе трубы установить на бесконечность, с некоторой ограниченной точностью. Не повысится ли точность установки трубы, если перед пластинкой поставить плоское зеркало, а трубу взять автоколлимационную?

22. Микроскоп с объективом, имеющим увеличение $\beta_0 = -100^{\times}$, после установки на резкость смещают вдоль оси на 0,02 мм в первом случае ближе к предмету, а во втором случае - от предмета.

Определите в каждом случае величину возникающей расфокусировки изображения предмета за объективом, если в исходном положении микроскопа этот предмет резко изображался в плоскости полевой диафрагмы окуляра, расположенной на расстоянии $\Delta = 150$ мм от заднего фокуса объектива.

23. На диоптрийном кольце окуляра бинокля Б 8х30 уместилось бы в пределах одного полного оборота около 23,5 диоптрийных делений. Чему равен шаг и число заходов окулярной резьбы диоптрийного механизма, если фокусное расстояние окуляра $f'_{\text{ок}} = 16$ мм?

24. Близорукий человек установил окуляры галилеевского бинокля увеличения $\Gamma = 2^{\times}$ по своим глазам так, чтобы резко видеть далекие предметы. Будет ли он резко видеть те же предметы, наблюдая через перевернутый бинокль?

25. На каком наименьшем расстоянии может читать через бинокль Б 8х30 мелкий текст театральной программы молодой человек двадцати лет с нормальным зрением (эмметроп с объемом аккомодации 10 дптр), если окуляры бинокля имеют диоптрийную подвижку в пределах ± 6 дптр?

Решите ту же задачу для случая наблюдения через театральный бинокль 2,5 - кратного увеличения при прочих равных условиях.

26. Для испытания качества изображения оптической системы стереотрубы АСТ 10х45 решили воспользоваться штриховой мирой, расположенной перед трубой на расстоянии L. Изображение миры за окуляром можно рассматривать через дополнительную телескопическую трубку ДТ 4х16.

На каком наименьшем расстоянии можно поместить штриховую миру, чтобы ее смог резко видеть молодой наблюдатель (эмметроп двадцати лет с объемом аккомодации 10 дптр), используя как диоптрийную установку окуляра самой стереотрубы (пределы ± 5 дптр), так и диоптрийную установку окуляра дополнительной трубки ДТ (пределы ± 6 дптр)?

27. Докажите, что призма Аббе А-0 при размерах, указанных в табл.4.6. [9, стр.178] и при $n = 1,5$ ровно, не дает смещения изображения (расфокусировки) при ее включении в сходящийся ход лучей.

28. Какой величины расфокусировку изображения вызовет призма Пехана П-0, если ее ввести в сходящийся ход лучей? Призма изготовлена из оптического стекла сорта ТК23 ($n_e = 1,5891$), размер ее входной грани $\alpha = 40$ мм.

Указание. Данные о призме смотрите в справочнике [9, табл.4.6 стр.179].

29. Для устранения параллакса сетки панорамы применяют прокладку под объектив. С какой точностью следует ее изготовить по толщине, если допуск на параллакс в пространстве предметов задан в $2'$, а фокусное расстояние объектива панорамы равно 80 мм при относительном отверстии 1:5?

30. При включении какого из трех сменных объективов микроскопа (8x0,20; 40x0,65; 90x1,25) выходной зрачок будет иметь наибольший и наименьший размеры?

31. Окуляр от бинокля Б6×30 применяется в микроскопе с объективом 8×0,20. Чему равен диаметр выходного зрачка микроскопа?

32. В визире угловое зеркало с углом $\sigma = 45^\circ$ заменяли пента-призмой, сохранив прежнее положение ребра. Легко убедиться, нарисовав обе схемы, что центрировка системы сохранилась и при установке призмы. Можно ли восстановить фокусировку, не смещая ни объектив, ни сетку?

33. При сдвиге пентапризмы, расположенной между объективом и сеткой визирной трубы, за окуляром с увеличением $\overline{\Gamma_{ок}}$ появился параллакс между изображением и сеткой величиной ΔA диоптрий. В каком направлении и на сколько сдвинулась пентапризма?

34. Чтобы близорукий с аметропией $A = -5$ дптр резко видел изображение, полученное в первом случае с помощью микрообъектива 5x0,15, а во втором случае – с помощью объектива зрительной трубы с фокусным расстоянием $f'_{об} = 125$ мм, необходимо сместить вдоль оси или окуляры (в обоих случаях окуляры имеют одинаковое увеличение $\overline{\Gamma_{ок}} = 10^x$) на величину $Z_{ок}$, или же в первом случае – микрообъектив на величину Z_1 , а во втором случае – объектив зрительной трубы на величину Z_2 . Найдите все эти три величины.

35. Отсчетный микроскоп составлен из объектива 5x0,15 и окуляра $\overline{\Gamma_{ок}} = 12,5^x$. Какова будет величина остаточного параллакса, после того как микроскоп фокусируют на плоскость шкалы по резкости изображения? Допустим ли такой параллакс, если отсчеты по шкале должны сниматься с точностью до $\pm 0,5$ мкм?

36. Отсчетный микроскоп составлен из объектива 5x0,15 и окуляра $\overline{\Gamma_{ок}} = 12,5^x$. На какую величину и в каком направлении необходимо сместить весь микроскоп, чтобы устранить расфокусировку между изображением основной шкалы и сеткой окуляра, если величина

расфокусировки замерена по диоптрийной шкале окуляра в направлении от изображения шкалы к сетке и составляет **+ 5 дптр**.

37. Микроскоп, составленный из объектива $2 \times 0,03$ и окуляра $\Gamma_{\text{ок}} = 10^\times$, сместили вдоль оси из номинального положения на 1 мм. Определите:

- 1) какой величины расфокусировка в диоптриях появилась за окуляром?
- 2) какой величины остаточный параллакс между сеткой и изображением предмета возник при этом?

38. Микроскоп, состоящий из объектива $3 \times 0,05$ и окуляра 10^\times , изображает предмет в бесконечности. Если этот микроскоп сместить на 1 мм по оси в направлении от предмета, то изображение за окуляром получится на конечном расстоянии. Где следует поместить экран, на котором получится резкое изображение предмета? Каково будет увеличение изображения на экране?

39. При фокусировке вертикально расположенного автоколлимационного микроскопа на полированную поверхность (рис. 1) замечено, что за окуляром изображение C'' сетки, отраженной от этой поверхности, расположено на таком расстоянии, что между ним и изображением самой сетки C разность сходимостей пучков равна 3 дптр. В какую сторону (вверх или вниз) и на какую величину следует сместить весь микроскоп, чтобы изображение C'' совместились с самой сеткой C ? С какой чувствительностью необходимо при этом смещать микроскоп, чтобы совместить C'' и C в пределах глубины резкости?

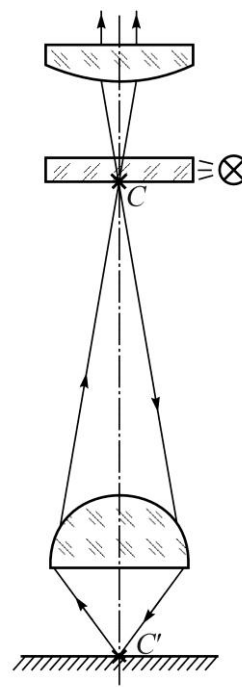


Рис.1. Вертикальный автоколлимационный микроскоп

40. Для перемены увеличения скачком применяют поворотную галилеевскую систему небольшого увеличения $\Gamma_r = 2^\times - 3^\times$, расположенную перед основной визирной трубой, например, с увеличением $\Gamma_o = 5^\times$.

В каком случае строже требования к телескопичности галилеевской системы:

- 1) когда она поворачивается через 180° ?
- 2) когда она поворачивается через 90° и имеет три рабочих положения?

41. В галилеевской системе с увеличением $\Gamma = 3^\times$ нетелескопичность при прямом ходе лучей равна $- 2$ дптр. Чему равна нетелескопичность этой же системы при обратном ходе лучей?

42. При смещении тонкой плоскопараллельной пластинки от объектива визирной трубы до сетки за окуляром с увеличением $\overline{\Gamma}_{ок} = 12,5^x$ между изображением предмета и штрихами сетки появился параллакс **0,5 дптр**. Во сколько раз фокусное расстояние пластинки превосходит фокусное расстояние объектива?

43. Какой наибольшей величины воздушный промежуток можно допустить между неподвижной и поворотной пластинками (сетками) спирального окуляр-микрометра, если точность отсчета долей делений миллиметровой шкалы, расположенной перед отсчетным микроскопом, должна быть не ниже $\pm 0,1$ мкм? Микроскоп состоит из объектива $5 \times 0,15$ и окуляра с увеличением $\overline{\Gamma}_{ок} = 12,5^x$.

44. Объектив телескопической системы имеет остаточную сферическую aberrацию $\delta S' = 0,2$ мм при координате на зрачке $\rho = 3/4$ (рис. 2). Оцените величину параллакса визирной трубы с таким объективом в пространстве предметов в угловой мере, если $f'_{об} = 100$ мм; $D : f = 1 : 5$.

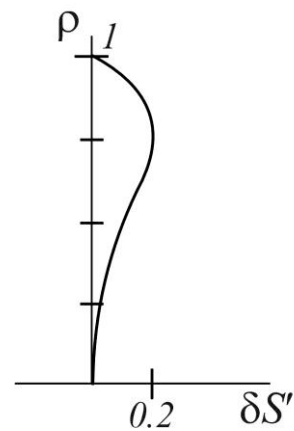


Рис.2. График сферической aberrации объектива

45. Когда требуется наибольшая (наименьшая) чувствительность перемещения, если отсчетный микроскоп на предмет фокусируют:

- 1) смещением только одного микрообъектива;
- 2) смещением только одного окуляра;
- 3) смещением всего микроскопа;
- 4) продольным смещением столика с предметом.

46. Коллиматор с маркой М в фокусе объектива изображен на рис.35 в литературе [10, стр. 48]. Полагая, что точность визирования должна быть не ниже $\pm 0,5'$, рассчитайте допуск на несовмещение марки М с фокусом объектива коллиматора. За счет каких погрешностей возникает это несовмещение? Оцените их влияние.

47. Лазер мощностью Φ_e , с углом расходимости 2ω создаёт энергетическую освещённость E_e на объекте, расположенном на расстоянии p от лазера.

Каким увеличением должна обладать телескопическая система, устанавливаемая после лазера, чтобы увеличить энергетическую

освещённость объекта в 16 раз? Энергетическими потерями в телескопической системе пренебречь.

Какого типа телескопическую систему необходимо применять с лазерами высокой мощности?

48. Объектив телевизионной камеры, имеющий относительное отверстие 1:4, строит изображение на ПЗС-матрице, с размером пикселей 10×10 микрометров.

Чему равен допуск на неточность фокусировки объектива?

49. Телеобъектив зрительной трубы, имеющей видимое увеличение $\Gamma = -20\times$, составлен из двух тонких компонентов с фокусными расстояниями $f_1' = -f_2' = f' = 200$ мм так, что эквивалентное фокусное расстояние объектива $f_{об}' = 2f'$.

Определите расстояние между компонентами объектива и длину трубы.

50. Зрительная труба Галилея с увеличением $\Gamma_T = 3,5\times$ при наблюдении бесконечно удалённых предметов имеет длину 100 мм.

Определите фокусное расстояние объектива, окуляра и расстояние, на которое нужно переместить окуляр, чтобы наблюдать резкое изображение предмета, находящегося на расстоянии 5 м. Компоненты считать тонкими.

51. С помощью зрительной трубы с фокусирующим тубусом, установленной перед входным окном панорамы ПГ, измеряется погрешность установки сетки в фокусе объектива панорамы.

Найти, на сколько и в какую сторону смещена сетка ПГ, если при установке на её резкое изображение пришлось вдвинуть тубус зрительной трубы на 16 мм от того положения, при котором труба была установлена на бесконечность. Фокусные расстояния объектива трубы 320 мм, а объектива ПГ – 80 мм.

52. По какому признаку невозможно проконтролировать фокусировку оптических приборов с многоэлементными фотоприёмниками?

- 1) По максимальной крутизне функции рассеяния точки.
- 2) По параллаксу.
- 3) По резкости изображения.
- 4) По минимальному кружку рассеяния в изображении точки.

53. Какому положению приёмной площадки фотоприёмника типа ПЗС на фокусирующей кривой (рис. 3) соответствует его максимальная чувствительность к расфокусировке?

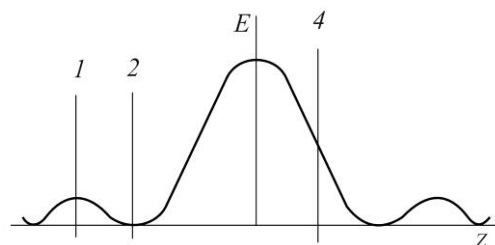


Рис.3. Варианты расположения фотоприёмника на фокусирующей кривой

54. Найти протяжённость пространства, наблюдаемого резко через зрительную трубу благодаря аккомодационной способности глаза. Фокусное расстояние объектива зрительной трубы равно 250 мм, видимое увеличение окуляра равно 10^{\times} . Объём аккомодации глаза наблюдателя 10 диоптрий. Труба настроена на бесконечность и не может быть перефокусирована.

55. Микроскоп имеет объектив с увеличением $\beta = - 8^{\times}$ и окуляр с видимым увеличением $\Gamma = 10^{\times}$. На какое расстояние и в какую сторону сместится изображение после объектива и после всего микроскопа, если объект отодвинуть от микроскопа на 0,1 мм?

56. Микроскоп сфокусировали на плоскость предмета по признаку резкости изображения. Обоснуйте возможность использования микроскопа для измерения линейных размеров предмета по шкале, расположенной в фокальной плоскости окуляра, если погрешность измерения не должна превышать $\pm 0,001$ мм. Линейное увеличение объектива $\beta = - 5^{\times}$, диаметр выходного зрачка микроскопа $d' = 1,2$ мм, фокусное расстояние окуляра $f'_{\text{ок}} = 20$ мм.

57. Определите угол поворота окуляра увеличения $\Gamma_{\text{ок}} = 10^{\times}$ для компенсации аметропии глаза наблюдателя величиной + 4 дптр, если в исходном положении шкала окуляра была установлена на отсчёт «0» дптр. Известно также, что двухзаходная окулярная резьба имеет шаг $t = 1,5$ мм.

58. Как проверить, что установлены:

- 1) диоптрийная шкала галилеевской трубы - на нуль?
- 2) сетка - в переднем фокусе окуляра Кельнера?
- 3) сетка - за передним фокусом окуляра Кельнера в такое положение, когда она за окуляром изображается на расстоянии, соответствующем сходимости пучка в 2 дптр?

Приведите схемы контрольных установок.

59. При каком ходе лучей - прямом или обратном - можно точнее измерить нетелескопичность галилеевской трубы с увеличением $\bar{\Gamma}_T$ с помощью коллиматора, имитирующего бесконечность, и диоптрийной трубки 4x16?

60. Переведите параллакс за окуляром телескопического прибора, равный 3 минутам угла, в диоптрийную меру, если диаметр выходного зрачка $d'_p = 3,6$ мм.

61. Допуск на параллакс перед объективом прибора составляет 2 угловых минуты. Параллакс сетки контролируется с помощью диоптрийной трубки за окуляром прибора. Увеличение прибора $\Gamma = 4^{\times}$, входной зрачок $d_p = 16$ мм. Выразите указанный угловой допуск в диоптрийной мере.

62. При проверке стереотрубы 10×45 на параллакс по Луне замечено, что при качании глаза в пределах всего выходного зрачка перекрестие трубы смещается в обратную сторону на $1/4$ лунного диска. На какую

величину и в какую сторону необходимо переместить объектив для устранения параллакса, если его фокусное расстояние составляет 270 мм?

63. Техническими условиями (ТУ) на зрительную трубу 10×50 допустимый параллакс между изображением предмета, находящегося в бесконечности, и сеткой задан $\vartheta_{\text{доп}} \leq 1'$ (для пространства предметов). Разработать методику проверки зрительной трубы на соответствие ТУ по параллаксу с использованием диоптрийной трубки, располагаемой за окуляром.

64. Оборачивающая система работает при увеличении $V_0 = -1\times$. С какой точностью система должна быть установлена посередине между сопряжёнными плоскостями изображения предмета и сетки, чтобы параллакс за окуляром не превосходил ± 2 дптр. Фокусное расстояние оборачивающей системы $f'_{\text{л}} = 30\text{мм}$, а окуляра $f'_{\text{ок}} = 20\text{мм}$.

65. С какой точностью нужно совместить сетку с фокусом объектива коллиматорного визира, если угловой параллакс между изображением сетки и бесконечно далёким предметом допустим в 1 минуту при выходном зрачке визира в 40 мм? Фокусное расстояние объектива коллиматорного визира равно 120 мм.

66. Какой величины допустима расфокусировка сетки в коллиматорном визире, если её выразить в диоптрийной мере, при диаметре выходного зрачка $d'_p = 60\text{мм}$ и допустимом угловом параллаксе в 1 минуту?

Определите величину остаточного параллакса в угловой мере, если контролировать совмещение сетки упомянутого коллиматорного визира с фокусом объектива по совпадению резкости изображения сетки и далёких предметов, наблюдаемых неподвижным невооружённым глазом. Достаточно ли точность диоптрийной трубки, цена деления шкалы которой равна 0,25 дптр, если воспользоваться этой трубкой для контроля установки сетки в фокусе объектива данного коллиматорного визира?

Каким методом в данном случае наиболее целесообразно контролировать совмещение сетки с фокусом объектива коллиматорного визира?

1.6 Пример решения задач

Требуется установить на бесконечность визирную трубу с объективом фокусного расстояния $f' = 800$ мм, диаметра $D_p = 60$ мм, в поле зрения которой наблюдается предмет, удалённый на 0,5 км (рис. 4). Предлагается вычислить, на сколько нужно передвинуть сетку, чтобы труба после фокусировки на этот предмет оказалась установленной на бесконечность.

С какой точностью необходимо знать расстояние до предмета, по которому производится предварительная установка трубы, чтобы после внесения вычисленной поправки труба оказалась установленной на бесконечность с пренебрежимо малой погрешностью?

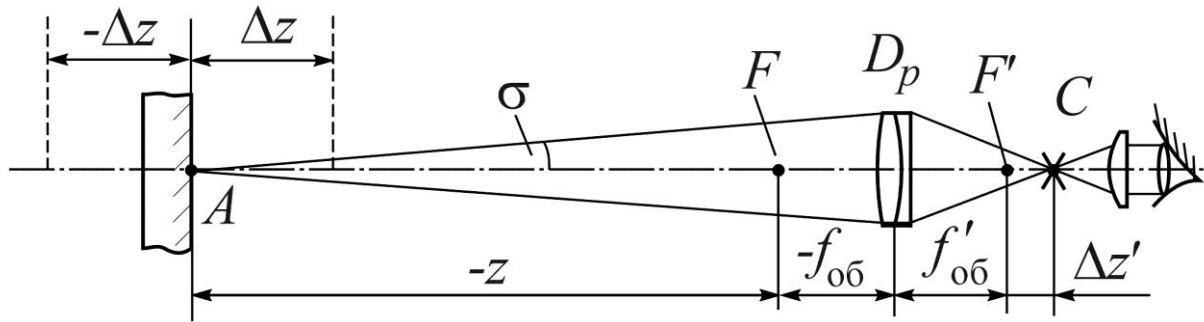


Рис.4. Установка визирной трубы на бесконечность по удалённому объекту

Решение:

Из рисунка видно, что если «местный» предмет, на который сфокусирована труба по признаку одновременной резкости изображений предмета и сетки C трубы, расположен на конечном расстоянии, то сетка C не окажется в заднем фокусе F' объектива, а будет смещена за фокус F' (к окуляру) на расстояние z' . Для нахождения этого расстояния воспользуемся формулой Ньютона:

$$z \cdot z' = -f'^2 .$$

Подстановкой исходных данных в формулу получим

$$z' = -\frac{f'^2}{z} = -\frac{(800)^2}{-0,5\text{км}} = \frac{64 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 10^6} = 1,28 \text{ мм}.$$

После смещения сетки трубы на эту величину она практически будет совмещена с задним фокусом, а труба – сфокусирована на бесконечность.

Определим требуемую точность установки сетки в фокальной плоскости объектива, для чего воспользуемся формулой (14) для случайной погрешности продольного наведения при визуальной фокусировке:

$$\Delta z' = \frac{0,2}{\sigma_A'^2} \text{ мкм} = \frac{0,2\text{мкм}}{(D_p/2f')^2} = \frac{0,2\text{мкм}}{(60/2 \cdot 800)^2} = 142\text{мкм} \approx 0,14\text{мм}.$$

Для чувствительности фокусировки визирной трубы на предмет воспользуемся той же формулой (14) применительно к пространству предметов:

$$\Delta z = \frac{0,2}{\sigma_A^2} \text{ мкм} = \frac{0,2\text{мкм}}{(D_p/2z)^2} = \frac{0,2\text{мкм}}{(30/0,5 \cdot 10^6)^2} = 56 \cdot 10^6 \text{ мкм} = 56\text{м}.$$

Следовательно, и расстояние до «местного» предмета, находящегося на удалении $z = 0,5$ км, достаточно знать (определить, измерить) с погрешностью не более 50 м.

Этот же результат можно было получить, продифференцировав выражение для z , полученное из формулы Ньютона:

$$\Delta z = f'^2 \cdot \frac{\Delta z'}{z'^2} = 800^2 \cdot \frac{0,14}{(1,28)^2} \approx 55 \cdot 10^3 \text{ мм} \approx 55 \text{ м.}$$

Оценим влияние погрешности фокусного расстояния визирной трубы на точность выполнения юстировочной операции. Логарифмическим дифференцированием формулы Ньютона последовательно получим $\ln z + \ln z' = 2 \ln f'$, откуда для случая неблагоприятного сложения погрешностей найдём:

$$\frac{\Delta z}{z} + \frac{\Delta z'}{z'} = 2 \frac{\Delta f'}{f'}$$

После подстановки известных нам величин получим: $\frac{\Delta f'}{f'} \approx 0,1(10\%)$

и $\Delta f' \approx 80 \text{ мм}$. Такое значение допустимой погрешности фокусного расстояния не потребует точного его измерения.

Ответ: Сетку необходимо приблизить к объективу на расстояние $z' = (1,28 \pm 0,14) \text{ мм}$. Расстояние до предмета необходимо знать с погрешностью не более 50 м.

2. РЕГУЛИРОВКА УВЕЛИЧЕНИЯ И МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1 Общие вопросы юстировки увеличения и масштаба изображения

В этом разделе речь пойдёт об отсчётных оптических системах, содержащихся в измерительных приборах, например, микроскопах, профильных проекторах, отсчётных визирных трубах. Но, кроме того, вопросы регулировки увеличения возникают и при юстировке бинокулярных, стереоскопических и некоторых других двойных, совместно работающих систем, когда необходимо с большой точностью обеспечить равенство увеличений, а в дифференциальных отсчётных системах – обусловленную разность увеличений в их ветвях.

Отсчётные микроскопы и другие устройства применяются для точной оценки долей деления основных линейных и круговых шкал, позволяя в десятки и сотни раз уменьшить число делений основных шкал и лимбов, что упрощает и ускоряет технологический процесс их деления и одновременно повышает точность их изготовления, а также точность самих измерительных приборов.

Объективом отсчётного микроскопа, в большинстве случаев, осуществляется сопряжение увеличенного изображения интервала основной

линейной или круговой шкалы со шкалой-нониусом, разбивающей этот интервал точно на N частей, что позволяет в процессе измерения с высокой точностью оценивать доли интервала основной шкалы, не прибегая к нанесению промежуточных штрихов при изготовлении шкал на делительных машинах.

Различие между понятиями увеличение V и масштаб изображения M состоит в следующем. Когда говорят об увеличении, то имеют в виду линейное увеличение в сопряжённых плоскостях, для определения которого справедливы формулы геометрической оптики. Однако при юстировке отсчётных систем очень часто плоскость отсчёта по шкале (плоскость нониуса) не является строго сопряжённой с плоскостью самой шкалы. Здесь говорят о масштабе изображения, который зависит от хода главных лучей.

Как отмечалось выше, в отсчётных микроскопах и измерительных проекторах стремятся применить телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов. Для этого апертурную диафрагму помещают в задней фокальной плоскости микрообъектива и, таким образом, входной зрачок микроскопа оказывается в бесконечности, благодаря чему главные лучи, идущие от края предмета в центр входного зрачка, оказываются параллельными оптической оси. Это имеет то преимущество, что неточность фокусировки микроскопа не приводит к изменению масштаба изображения, а, следовательно, и к погрешности измерений.

Если юстировка осуществлена таким образом, что между изображением шкалы и нониусом отсутствует параллакс, в этом случае понятия (и значения) увеличения и масштаба изображения совпадают, то есть справедливы следующие соотношения

$$M = V = y'/y = -\Delta_0/f' = -z'/f' = f'/z = a'/a = \sin\sigma_A/\sin\sigma'_A. \quad (36)$$

где y и y' – размер предмета (например, интервала основной шкалы) и размер изображения того же предмета через микрообъектив; f' и Δ_0 (или z') – его фокусное расстояние и оптический интервал микроскопа, то есть расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра (плоскостью изображения); z – расстояние от переднего фокуса объектива до плоскости предметов; a и a' – передний (предметный) и задний отрезки, то есть расстояние от передней главной точки микрообъектива до предмета и от его задней главной точки до плоскости изображения; σ_A и σ'_A – передний и задний апертурные углы пучка лучей, создающего изображение осевой точки предмета.

При юстировке отсчётных микроскопов, визирных труб и измерительных проекторов необходимо выполнить два основных требования:

1. Получить резкое изображение объекта измерения (штрихов основной шкалы) в плоскости шкалы-нониуса (сетки) без недопустимого параллакса или нерезкости.

2. Обеспечить номинальное (нормальное, расчётное) увеличение или масштаб изображения, то есть устранить так называемый **рен шкалы**.

Преимущество телецентрического хода лучей проявляется и при юстировке, поскольку позволяет осуществлять эти две операции – регулировку увеличения и фокусировку на резкость – независимо друг от друга.

2.2 Юстировка нормального увеличения объектива отсчётного микроскопа или профильного проектора

Из формулы (36) видно, что изменить масштаб изображения или увеличение можно только двумя способами: изменением или оптического интервала Δ_0 или фокусного расстояния самого объектива f' .

Точность выполнения каждой из этих операций в соответствии с заданным допуском на отклонение масштаба изображения можно определить путём логарифмического дифференцирования формулы (36):

$$\delta M/M = \delta V/V = \delta \Delta_0 / \Delta_0 = - \delta f' / f' . \quad (37)$$

Причём, для первого способа юстировки увеличения

$$\delta \Delta_0 = \Delta_0 \cdot \delta V/V; \quad (38)$$

и соответственно для второго способа

$$\delta f' = - f' \cdot \delta V/V. \quad (39)$$

Второй способ юстировки соответствует варианту конструкции с неизменяемым расстоянием между сопрягаемыми микрообъективом плоскостями предмета и изображения. Вариант такой конструкции следует отнести к нетехнологичным из-за сложного характера юстировки, требующего достаточной квалификации исполнителя, а также наличия вероятности повлиять такой юстировкой на качество изображения. Изменения фокусного расстояния объектива добиваются путём изменения одного из воздушных промежутков между его компонентами. Ниже приводится формула, выведенная для случая двухкомпонентного объектива. В её основу положены две известные формулы, одна из которых под номером (3) приведена выше

$$l = (2 - V - V^{-1})f' = Const;$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d.$$

После дифференцирования формул и преобразований окончательно получим выражение для величины изменения воздушного промежутка между компонентами

$$\delta d = [(1+V)/(1-V)] \times [f_1 \cdot f_2 / f'] \times \delta V/V, \quad (40)$$

где f_1' и f_2' – фокусные расстояния компонентов объектива.

2.3 Юстировка масштаба изображения в телескопических системах

Данную операцию выполняют для отсчётных труб с целью обеспечения требуемой угловой цены деления, например, окулярного микрометра, в некоторых бинокулярных приборах (например, в оптических дальномерах), для обеспечения строгого равенства увеличений труб, при юстировке коллиматоров длиноизмерительных машин – для уравнивания масштабов изображения объективов пинольной и измерительной бабок. Допуск на разность масштабов (в последних двух случаях) составляет обычно 0,2 – 0,02%.

Юстировку осуществляют изменением фокусного расстояния собственно объектива трубы, состоящего из двух-трёх компонентов, или эквивалентного фокусного расстояния системы, составленной из объектива и дополнительного длиннофокусного коллектива, располагаемого обычно вблизи плоскости изображения. В первом случае фокусное расстояние изменяют за счёт воздушного промежутка между компонентами, руководствуясь следующей формулой

$$\Delta d = \Delta f' / f' \times f_1' f_2' / f', \quad (41)$$

либо формулой, преобразованной к виду

$$\Delta d = \Delta f' / f' \times (f_1' + f_2' - d). \quad (42)$$

Так же как и в формуле (40) здесь f_1' и f_2' – фокусные расстояния компонентов объектива, f' – фокусное расстояние объектива, составленного из двух компонентов, $\Delta f'$ – величина изменения фокусного расстояния объектива, а d – расстояние между задней главной плоскостью первого компонента и передней главной плоскостью второго компонента.

Во втором случае регулировку осуществляют перемещением коллектива, которое оказывается в несколько раз менее чувствительным, чем изменение воздушного промежутка между компонентами объектива. Здесь также применима формула для эквивалентного фокусного расстояния системы

$$f'_{\text{экр}} = f_1' f_2' / (f_1' + f_2' - d), \quad (43)$$

дифференцированием которой получают формулу, связывающую приращение воздушного промежутка между компонентами с приращением фокусного расстояния системы

$$\Delta f'_{\text{экр}} = [f_1' f_2' / (f_1' + f_2' - d)^2] \Delta d. \quad (44)$$

Наконец, дифференцированием формулы для видимого увеличения телескопической системы получают один из вариантов формулы, связывающей приращение воздушного промежутка с приращением увеличения

$$\Delta\Gamma = [\Phi_1\Phi_2 / f'_{ок}(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1\Phi_2d)^2] \Delta d. \quad (45)$$

Если предварительно найдено приращение фокусного расстояния объектива, то второй вариант формулы оказывается значительно проще

$$\Delta\Gamma = \Delta f'_{эке} / f'_{ок}. \quad (46)$$

2.4 Задачи

67. Объектив измерительного проектора имеет увеличение $\beta = -20^\times$, переднюю числовую апертуру $\sigma_A = 0,2$ и линейное поле в пространстве предметов $2y = 25\text{ мм}$ (рис. 5). На каком наименьшем расстоянии l_p от плоскости предмета может находиться входной зрачок объектива, чтобы при перемещении предмета в пределах удвоенной дифракционной глубины резкости размеры изображения на экране оставались бы неизменными с точностью до $0,02\text{ мм}$? Считать, что отсчёты на экране производятся по центру кружка рассеяния.

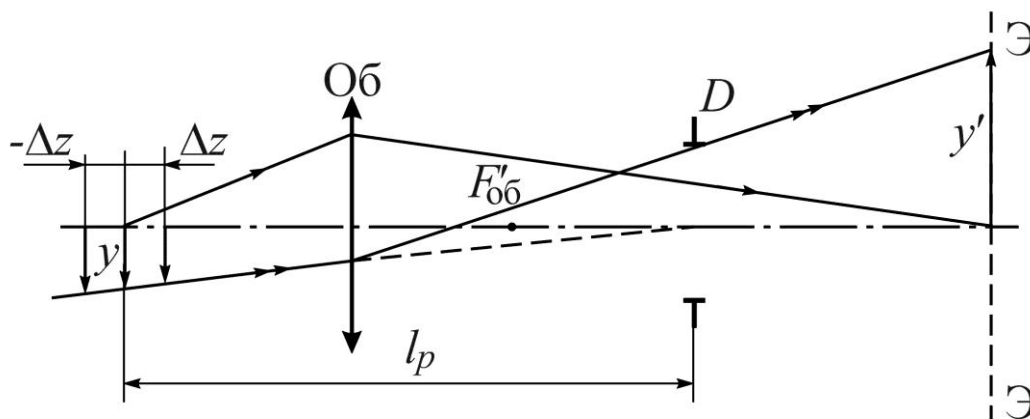


Рис.5. К определению положения входного зрачка объектива измерительного проектора

68. В некоторых телескопических бинокулярных приборах равенство увеличений труб достигается продольным смещением коллектива. Подсчитать, как изменится увеличение трубы, если коллектив силой $\Phi_k = 1\text{ дптр}$ сместить на 1 мм вдоль оси из исходного положения, когда он находился на расстоянии $+10\text{ дптр}$ от плоскости изображения. Фокусное расстояние объектива $f'_{об} = 250\text{ мм}$, увеличение окуляра $\Gamma_{ок} = 12,5^\times$.

69. Определите величину возможного изменения эквивалентного фокусного расстояния системы, составленной из двух линз, при заданном допуске на промежуток между ними $\Delta d = 0,2\text{ мм}$, и найдите величину расфокусировки системы. Фокусное расстояние первой линзы $f'_1 = 40\text{ мм}$,

второй линзы $f_2' = 25$ мм, эквивалентное фокусное расстояние системы двух линз в случае, когда предмет находится в бесконечности, $f_{\infty}' = 16,7$ мм.

70. В телеобъективе отрицательная линза стоит за положительным компонентом на расстоянии d , имеет линейное увеличение $\beta_0 = 4\times$. Определите, какой величины получится расфокусировка изображения, если отрицательную линзу сместить вдоль оси к сетке на величину $\Delta d = 0,5$ мм. Вычислите, кроме того, как при этом изменится величина эквивалентного фокусного расстояния телеобъектива.

71. На какую величину следует «подрезать» прокладное кольцо между торцем тубуса микроскопа и микрообъективом в процессе юстировки, если увеличение микрообъектива оказалось равным $\beta = -8,1\times$ вместо $\beta_0 = -8\times$ при номинальном оптическом интервале $\Delta_0 = 160$ мм.

72. Определите величину изменения воздушного промежутка (d мкм) между тонкими компонентами телеобъектива, которая обеспечивает юстировку его фокусного расстояния с точностью до 1%. Фокусные расстояния компонентов: $f_1' = 100$ мм; $f_2' = -10$ мм. Фокусное расстояние телеобъектива $f_{\text{об}}' = 500$ мм.

73. Какой метод сборки применяют в производстве биноклей для обеспечения равенства увеличений в двух его трубках?

74. Каким способом можно устранить разность увеличений телескопических систем Галилея в поворотном барабане смены увеличений стереомикроскопа МБС-200, оптическая система которого построена по схеме Аббе?

75. Каким путём можно обеспечить постоянство масштаба изображения в отсчётном микроскопе вертикального длиномера ИЗВ-3 при его фокусировке?

76. Телеобъектив составлен из положительного и отрицательного компонентов и имеет фокусное расстояние $f'_{\text{об}} = 333,3$ мм. На сколько следует изменить воздушный промежуток между компонентами, чтобы фокусное расстояние объектива увеличить на 0,1%, если фокусные расстояния компонентов составляют: $f'_1 = 200$ мм, а $f'_2 = -400$ мм?

2.5 Пример решения задач

Требуется определить величину и точность требуемого изменения толщины прокладного кольца под буртиком микрообъектива в отсчётном микроскопе сферометра ИЗС-7 для установления нормального увеличения, если интервал между изображениями двух соседних штрихов основной миллиметровой шкалы превышает интервал между крайними витками биштриховой спирали Архимеда окулярного микрометра ОМС-3 на величину $t = 2,5$ мкм, измеренную с помощью самого же окулярного микрометра как разность отсчётов по микрометровой шкале при точной

наводке в нулевой биштрих одного штриха, а затем в десятый биштрих другого (соседнего) штриха основной шкалы. Допускаемая (по техническим условиям) разность отсчётов $0,5$ мкм. В схеме применён телецентрический объектив МО-22 $5\times 0,15$ с фокусным расстоянием $f'_{об}=25,53$ мм.

Решение:

Поскольку конструкция отсчётного микроскопа предполагает, что регулировка увеличения микрообъектива должна производиться изменением оптической длины тубуса, для решения задачи воспользуемся формулой (38)

$$\delta\Delta_0 = \Delta_0 \cdot \delta V/V = V f'_{об} \times m/M = 5 \times 25,53 \times 2,5/1000 = 0,32 \text{ мм},$$

где $M=1000$ мкм – количество микрометров, которое должно содержаться в интервале между соседними штрихами основной шкалы.

Если в приведённой формуле вместо m подставить $m_{дон}=0,5$ мкм, то получим $(\delta\Delta_0)_{дон} \approx 0,06$ мм.

Поскольку фактическое увеличение больше нормального, оптический интервал Δ_0 необходимо уменьшить, а, следовательно, кольцо подрезать на $0,32$ мм с точностью не хуже $0,06$ мм.

Ответ: Толщину прокладного кольца необходимо уменьшить на $0,32$ мм с погрешностью не более $0,06$ мм.

3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ. ЦЕНТРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ К ВНЕШНИМ КОНСТРУКТОРСКИМ БАЗАМ

3.1 Понятие о базах и базировании схемных элементов оптических приборов

Решение задач данного раздела опирается на понятия и определения, изложенные в государственном стандарте ГОСТ 21495-76 «Базирование и базы в машиностроении». Одним из основополагающих понятий этого ГОСТа является «**базирование**», которое определяется как «придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат». При этом «**базой**» называется «поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования».

Одной из задач технологии сборки оптических приборов является обеспечение функционирования оптической системы прибора в соответствии с техническими требованиями, предъявленными к нему. Решение этой задачи достигается юстировкой, то есть осуществлением

определённого взаимоориентирования или **БАЗИРОВАНИЯ** оптических элементов системы. В отличие от механических деталей, базирование которых предусматривает непосредственный контакт поверхностей сопрягаемых деталей, оптические детали предназначены для преобразования электромагнитного излучения определённой области спектра и представляют собой материальные тела, ограниченные поверхностями, определённым образом обработанными и взаимоориентированными. Среди этих поверхностей можно выделить полированные сферические, плоские и несферические поверхности, выполняющие преобразование электромагнитного излучения оптического диапазона. Эти поверхности называют исполнительными [5]. Таким образом, строгое взаимоориентирование оптических элементов системы предполагает вполне определённое взаимное расположение прежде всего исполнительных поверхностей оптических деталей. Однако этого оказывается недостаточно. Дело в том, что для оптической детали, пропускающей сквозь себя пучок света, свойство материала, из которого она изготовлена, наряду с характеристикой исполнительных поверхностей, имеет определяющее значение.

В связи с этим для определения базирования оптических деталей вдоль оси оптической системы приходится использовать такие нематериальные элементы оптических деталей, как главные и узловые точки, точки фокусов и центров кривизны, а для контроля точности базирования – различные оптические методы. В этом заключается специфичность базирования оптических деталей по сравнению с базированием деталей механических.

По аналогии с приведённым выше определением понятия «база» (механической детали) в отношении оптических деталей можно сформулировать следующее определение: «Поверхности, линии или точки (материальные или нематериальные), а также их совокупности, принадлежащие оптическим деталям и служащие для базирования, называются базами оптических деталей». И далее: «Конструкторская база – база оптической детали (сборочной единицы), используемая для определения положения детали или СЕ в изделии».

К оптическим (нематериальным) конструкторским базам относятся: главные и узловые точки отдельных линз (линзовых компонентов) и целых объективов, точки фокусов и центров кривизны поверхностей, оптическая и визирная оси, нормаль к отражающей или преломляющей плоскости, главные и фокальные плоскости, главное сечение клина и призмы, ребро углового зеркала, оптического клина.

3.2 Автоколлимационный метод центровки линзовых компонентов объектива с результативной обработкой базовых поверхностей оправ (метод Линника-Радченко)

В насыпной конструкции объектива с линзами, установленными в оправы, с целью обеспечения центрирования линзовых компонентов, при котором центры кривизны их сферических поверхностей окажутся совмещёнными с общей осью (называемой оптической осью объектива) с заданной точностью, применяют результативную обработку оправ. Этот метод сборки объективов называют ещё методом Линника-Радченко. Суть его заключается в том, что линзу, имеющую некоторую «собственную децентрировку», закрепляют в оправе (предусмотренным конструкцией способом, например, завальцовкой), имеющей припуски на обточку по диаметру и на подрезку торцов. Далее оправу с линзой закрепляют в центрировочном патроне токарно-арматурного станка. Наблюдая в автоколлимационный прибор типа ЮС-13М (трубку Забелина), за биением автоколлимационных изображений перекрестия, полученных от поверхностей линзы при вращении шпинделя станка, поочередно, с помощью регулировочных винтов центрировочного патрона устраняют эти биения. Этим самым совмещают центры кривизны сферических поверхностей линзы, то есть её оптическую ось, с осью вращения шпинделя станка. Далее обтачивают диаметр оправы до заданного размера и подрезают оба её торца. Геометрическая ось сформированной таким образом цилиндрической поверхности оправы оказывается совмещённой с оптической осью линзы, а её опорные торцы – перпендикулярными этой оси.

Подобным образом «результативно» можно обработать базовые поверхности оправ клиньев, сеток, лимбов, плоских зеркал и отражательных призм.

3.3 Методы и средства контроля пространственного расположения оптических баз деталей и сборочных единиц по отношению к реальным и виртуальным базам механических деталей, устройств и приборов

Контроль расположения оптических баз деталей по отношению к базам механических оправ, в которых эти детали закреплены, требует, как упоминалось выше, применения оптических методов. Как правило, контроль осуществляют одним из двух методов: либо путём сравнения испытуемых изделий с образцовыми средствами (изделиями), либо абсолютным методом – путём поворота (перевёртывания) изделия на 180° , при котором контролируемое отклонение выявляется в удвоенном масштабе.

Встречаются задачи юстировки и контроля, в которых в качестве баз выступают оси вращения, направления перемещения, линии разметки, нанесённые на поверхность базовой детали (корпуса) штангенинструментом. В этих случаях рекомендуется: в первом случае применить метод поворота на 180° , во втором случае – визирный метод,

предполагающий использование визирной трубы, например ППС-11, и точечной марки (указателя, диафрагмы), устанавливаемой на подвижной каретке, перемещаемой по направляющим, а в третьем случае – отвесы и ту же визирную трубу. Часто поверхности направляющих сами могут служить базой, приложив к которой плоское зеркало или призму можно выставить автоколлимационную трубу требуемым образом.

Отвесность или горизонтальность визирных осей, осей вращения или образующих цилиндрических поверхностей устанавливают и контролируют с применением брусовых и рамных уровней, нивелиров, точных пентапризм, точных угольников, жидкостных горизонтов (уровней) и др.

Типовой задачей юстировки, которую следует отнести к данному разделу дисциплины, является центрировка угломерного круга (лимба) – совмещение центра его делений с осью вращения специальных устройств измерительных приборов, таких как теодолиты, круглые столы, измерительные бабки, делительные головки. К специальным устройствам относят алидады и визирные трубы теодолитов, планшайбы, шпиндели и патроны (цанги) круглых столов, измерительных бабок и делительных головок. При этом целью юстировки является устранение эксцентриситета лимбов (угломерных кругов) измерительных приборов.

Эксцентриситет лимба, в случае одностороннего отсчётного устройства, приводит к погрешности измерения угла. Для компенсации влияния эксцентриситета лимба на точность измерения в конструкциях приборов применяют два отсчётных устройства, располагая их по двум диаметрально противоположным концам диаметра лимба. Однако, если эксцентриситет достигает значительной величины, возникает погрешность измерения, вызванная теперь уже реном – изменением цены деления отсчётного микроскопа, поскольку штрихи круговой шкалы, в отличие от шкалы линейной, располагаются радиально, то есть под углом друг к другу.

Допустимый эксцентриситет лимба для оптических систем с односторонним отсчётным устройством рассчитывают по формуле

$$(\Delta e)_{\text{доп}} = \frac{(\Delta \varphi)_{\text{доп}} \cdot R_{\text{ш}}}{2},$$

где $(\Delta \varphi)_{\text{доп}}$ - допустимая погрешность измерения, вызванная эксцентриситетом, в радианах; $R_{\text{ш}}$ - радиус шкалы (круга), в миллиметрах.

Предельно допустимую величину эксцентриситета лимба для оптических систем с двухсторонним отсчётом определяют по формуле

$$e_{\text{max}} = \frac{\Delta \alpha'' \cdot R}{2\nu''},$$

где $\Delta\alpha''$ - погрешность отсчитывания, в угловых секундах; ν'' - наименьшее деление на круге, в угловых секундах; R - радиус круга.

3.4 Задачи

77. По какому признаку можно судить о совмещении оптической оси линзы с осью вращения шпинделя при её центрировании на станке?

78. Направляющие прямолинейного движения необходимо установить в одном случае параллельно, а в другом перпендикулярно визирной оси трубы с точностью до $\pm 1'$ (угл. минута). Как это сделать?

79. Как проверить установку визирной оси трубы:

- 1) параллельно оси вращения, не совпадающей с геометрической осью самой трубы;
- 2) перпендикулярно оси вращения?

80. Предложите способ установки визирной оси трубы над линией разметки, нанесённой разметочным инструментом на плоскости основания прибора, и параллельно самой плоскости с допустимой погрешностью $10''$.

81. Как проверить с точностью до $10''$ взаимную перпендикулярность визирных осей двух труб, расположенных в горизонтальной плоскости и обращённых друг к другу в одном случае объективами, а в другом – окулярами.

82. Как поверить и выверить (отрегулировать) накладной брусковый уровень с цилиндрической ампулой, который служит для контроля горизонтального расположения плоских и цилиндрических поверхностей (например, валов), для чего корпус уровня на своей нижней рабочей поверхности имеет призматическую выемку, а сверху – ещё и установочную ампулу, расположенную в поперечном отверстии корпуса. Эта ампула служит для контроля правильной установки уровня на цилиндрических поверхностях. Цена деления поперечной ампулы составляет 3 – 6 угловых минут.

Один конец оправы основной ампулы закреплён внутри корпуса с помощью упругого шарнира, функцию которого выполняет плоская пружина. Другой конец оправы в вертикальном направлении поджат спиральной пружиной к регулировочному винту, а в горизонтальном направлении фиксирован двумя встречными винтами.

Какой чувствительности винты следует предусмотреть для регулировки параллельности оси уровня оси (ребру) призмы и опорной плоскости? Каковы требования к параллельности ребра призмы и её опорной плоскости? Цена деления уровня $10''$, длина оправы уровня $\ell = 50\text{ мм}$, а длина призмы $L = 100\text{ мм}$.

83. Как с высокой точностью проверить, что плоское зеркало:

- 1) перпендикулярно оси вращения,
- 2) параллельно оси вращения,
- 3) совмещено с осью вращения?

Примечание. Положение зеркала относительно оси вращения можно регулировать, например, с помощью юстировочных винтов.

84. Как проверить и выверить накладной цилиндрический уровень, скреплённый с опорной пластинкой? Цена деления уровня $10''$, длина опорной пластинки $l=60$ мм. С какой точностью в линейной мере следует обработать опорную поверхность пластинки для обеспечения её параллельности оси ампулы уровня, если погрешность нуля-пункта не должна превышать $\frac{1}{4}$ деления?

85. Предложите способ, а еще лучше несколько способов, для проверки перпендикулярности горизонтальной оси вращения карданова подвеса по отношению к его вертикальной оси вращения с точностью до $10''$.

86. Какими способами можно проверить параллельность оптической оси объектива (рис. 6) по отношению к геометрической оси его оправы?

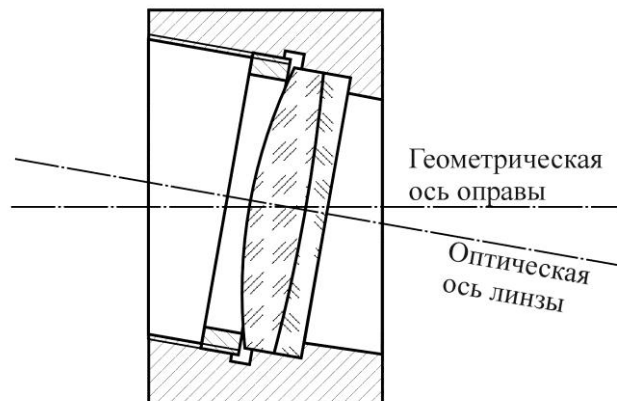


Рис. 6. Децентрированная линза в оправе

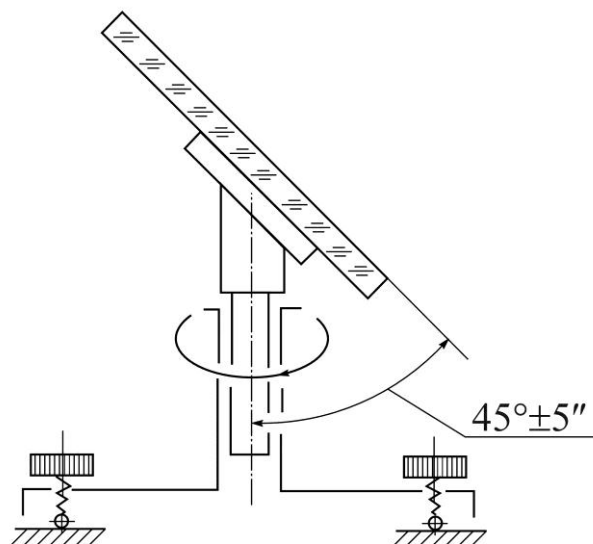
87. Что представляет собой особая ось в однолинзовой панкратической системе? Как можно установить на эту ось сетку панкратической трубы [4, стр.59, рис.22]?

88. Рассчитайте допуск на децентрированность сетки, установленной перед панкратикой, $\left(\beta_{min} = -\frac{3^x}{4} ; \beta_{max} = -\frac{5^x}{2} ; f'_{ок} = 25 \text{ мм} \right)$, если видимый за окуляром сдвиг изображения в плоскости полевой диафрагмы допустим до $\pm 15'$. Как можно устранить децентрированность сетки?

89. У сменных окуляров, применяемых в бинокулярных микроскопах, оптическая ось должна совпадать с их геометрической осью для того, чтобы не появлялась непараллельность осей выходящих пучков. Подсчитайте допуски на децентрировку глазной и коллективной линз окуляра Гюйгенса 10-кратного увеличения, если фокусные расстояния линз равны: глазной – $f'_{Гл}=19,8$ мм, коллективной – $f'_K=39,3$ мм. Расстояние между их главными плоскостями составляет $d=27,9$ мм. Предложите способ контроля центрировки окуляров для бинокулярных микроскопов. Конструкция окуляра Гюйгенса приводится в литературе [2, на рис. 43 и 9, на рис. 6.32, а].

90. Предложите способ (лучше несколько способов) контроля установки плоского зеркала под углом $45^\circ \pm 5''$ к собственной оси вращения (рис. 7).

Рис.7. Зеркало, установленное под углом 45° к оси вращения



91. Рассчитайте допустимый эксцентриситет лимба горизонтальных углов технического теодолита Т-30 при условии, что отсчет снимается по двум диаметрально противоположным верньерам (верньер – нониус круговой шкалы) и сравните его с тем допуском на эксцентриситет, который следовало бы задать при отсчитывании углов поворота алидады теодолита только по одному верньеру. Рабочий диаметр угломерного круга 72 мм, цена деления круга $10'$, точность отсчёта $1'$, средняя квадратическая погрешность измерения углов из одного приёма $30''$.

92. Предложите простые способы нахождения положения центра очковой линзы, т.е. точки пересечения линзы с ее оптической осью, и испытайте их практически. Кратко опишите и поясните рисунками предлагаемые Вами способы.

93. Предложите способы, позволяющие увидеть, визуализировать:

- 1) центр вогнутого сферического зеркала и оптическую ось линзы,
- 2) фокусы параболоида, эллипсоида и гиперболоида.

Кратко опишите предлагаемые Вами способы, поясните их простыми рисунками.

94. Визирная ось телескопической трубки в корпусе квадратного сечения должна быть параллельна всем четырем боковым граням с точностью $\pm 10''$. Приведите все возможные методы контроля, позволяющие проверить выполнение этого требования, дайте сравнительную оценку каждого метода с точки зрения простоты, удобства и точности контроля. Каким требованиям должен отвечать корпус трубки?

95. Как проконтролировать у автоколлимационной трубы:

- 1) перпендикулярность визирной оси по отношению к опорному торцу;
- 2) параллельность визирной оси по отношению к оси цилиндрического корпуса?

При каких условиях выполняются оба эти требования?

96. Как проверить, что ребро Р углового зеркала установлено строго параллельно оси вращения столика? Предложите различные варианты способа контроля и выберите оптимальный.

97. Предложите и обоснуйте возможные способы контроля установки визирной оси трубы в строго отвесное или горизонтальное положение.

98. Какими способами можно проконтролировать взаимную параллельность визирных и оптических осей труб бинокулярной системы?

99. В книге [11] на рис.57 показана схема автоколлимационной трубки ЮС-13. На наклонном плоском зеркале 8 нанесено (процарапано в слое алюминиевого покрытия) прозрачное перекрестие, центр которого должен совпадать с точкой пересечения оптических осей передвижного объектива 2 и микроскопа 3. Сколько действенных подвижек имеет зеркало 8, на что они влияют, какие дефекты вызывают? Как можно проконтролировать установку зеркала в правильное положение?

100. Рассчитайте допуск на угол наклона оси окуляра к оптической оси трубки бинокля Б 8х30, если пределы диоптрийной наводки окуляра равны ± 5 дптр, а его фокусное расстояние $f'_{ок} = 16$ мм.

101. У пентапризм, применяемых в дальномерах в качестве концевых отражателей, верхняя плоскость Б должна быть параллельна главному сечению, т.е. перпендикулярна рабочим граням (рис. 8). Какими способами можно проконтролировать выполнение этого требования?

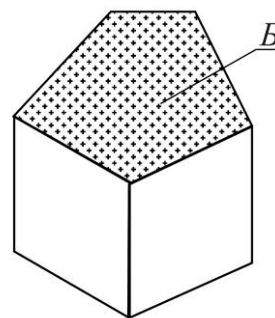


Рис.8. Пентапризма с верхней базовой плоскостью

4. УСТРАНЕНИЕ НАКЛОНА, ПОВОРОТА И УВОДА ИЗОБРАЖЕНИЯ, РАЗВОРОТА ШКАЛ И СЕТОК

4.1 Определение понятий о типовых погрешностях оптических приборов и причины их возникновения

Задачи, перечисленные в названии раздела, также можно назвать типовыми задачами юстировки оптических приборов. Под **наклоном изображения** понимается наклон плоскости изображения по отношению к плоскости экрана или фотопластинки, к плоскости окулярной сетки или к плоскости ПЗС- матрицы. Дефект этот вызывает нерезкость изображения на краю поля зрения, разномасштабность изображения по полю. Под **поворотом плоскости изображения** понимают поворот изображения вокруг оптической оси. Это приводит к взаимной непараллельности

изображений штрихов шкалы и штрихов нониуса, спектральных линий и изображения щели, а кроме того – к отклонению от линии горизонта или линии отвеса изображений «естественных» объектов – поверхности спокойного моря, вертикальной стены дома, заводской трубы или опоры линии электропередачи. Следует быть внимательным, поскольку в технической литературе (по-видимому, для краткости изложения) этот дефект может так же называться наклоном изображения.

Понятие **увод изображения** используется применительно к угломерным приборам с качающимся визиром или головным зеркалом (призмой). При правильной установке идеального угломерного прибора на местности его визирная ось при наведении по высоте должна описывать плоскость меридиана, а при наведении по горизонту (при угле места $i = 0$) визирная ось должна описывать горизонтальную плоскость. Вследствие неизбежных погрешностей изготовления и ориентирования угломерных приборов на местности действительная траектория визирной оси отступает от вышеуказанных номинальных: возникает отклонение визирной оси от плоскости меридиана – так называемый увод по вертикали (или увод от отвеса), – и её отклонение от линии горизонта – увод по горизонту. Эти отклонения могут привести к погрешностям измерения углов.

4.2 Предотвращение наклона изображения в оптических системах с плоскими зеркалами

Причинами наклона изображения могут стать просчёты конструктора или неопытность оптика-механика, а поворота плоскости изображения – ещё и погрешности расположения базовых поверхностей конструкции прибора. Необходимо помнить, что наклонами **одиного плоского зеркала**, при которых его нормаль выходит из плоскости падения осевого луча, вносится поворот изображения, когда пытаются привести изображение в нужную точку поля зрения (экрана) при наличии погрешностей расположения баз. С помощью **углового (двойного) зеркала**, обладающего особыми направлениями (осями), устранение децентрировки (бокового сдвига) и поворота изображения можно осуществить независимо одно от другого.

В процессе проектирования оптической системы прибора, при осуществлении её компоновки нередко возникает задача о нахождении направления нормали плоского зеркала (орта \mathbf{N}) по известным направлениям падающего (орт \mathbf{A}) и отражённого (орт \mathbf{A}') лучей. Это бывает необходимо при проверке правильности задания направления оси пучка в приборе. Имели место случаи, когда к удивлению разработчика изображение на экране собранного прибора вопреки ожидаемому оказывалось повёрнутым на 90° по отношению к номинальному (требуемому). В справочнике [2] на основе компланарности рассматриваемых векторов, равенства друг другу скалярных произведений

ортов падающего \mathbf{A} и отражённого \mathbf{A}' лучей на орт нормали \mathbf{N} , а также единичности орта нормали \mathbf{N} выводится интересующее нас выражение

$$\mathbf{N} = \frac{(A'_x - A_x) \mathbf{i} + (A'_y - A_y) \mathbf{j} + (A'_z - A_z) \mathbf{k}}{\sqrt{2} \sqrt{1 - (\mathbf{A}\mathbf{A}')}}. \quad (101)$$

4.3 Задачи

102. Объектив измерительного прибора проектирует с увеличением $12\times$ изображение штрихов линейной шкалы, установленной на каретке, на экран прибора, где расположен индекс. Между экраном и объективом на расстоянии 100 мм от экрана установлено плоское зеркало, отклоняющее осевой луч пучка на 70° от вертикали (с которой совпадает оптическая ось объектива). После выведения изображения шкалы на середину экрана (угловыми юстировочными подвижками зеркала) обнаружился наклон изображения штрихов шкалы к горизонту на угол примерно 3° . Полагая, что центр экрана и центр шкалы занимают в корпусе прибора номинальное положение, определите сдвиг объектива в поперечном направлении по отношению к меридиональной плоскости, проходящей через две указанные точки и перпендикулярной плоскостям экрана и шкалы. Также следует учесть, что направление перемещения каретки со шкалой параллельно указанной плоскости.

103. Вращается ли изображение предмета, который рассматривают через призму Дове с крышей, если ось вращения призмы параллельна ребру крыши? Что изменится, если угол крыши не строго прямой, а имеет некоторую ошибку?

104. При склейке призм 1, 2 и 3 оборачивающей системы Малафеева-Порро 2-го рода, применяемой в бинокулярном микроскопе, требуется обеспечить параллельность направления оси выходящего пучка лучей по отношению к оси падающего пучка (допуск $10'$) и отсутствие поворота изображения (допуск $15'$). В окулярной коробке (рис. 9), которая для изменения расстояния между выходными зрочками бинокулярного микроскопа может поворачиваться на конической оси, призмная система устанавливается нерабочей шлифованной плоскостью призмы 2 на дно коробки, являющейся конструкторской базой. Как обеспечить и проверить выполнение обоих требований при склейке призмной системы?

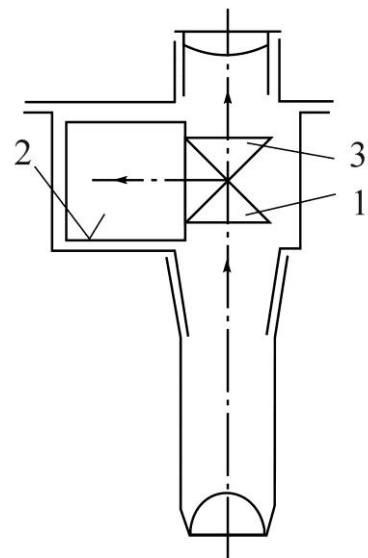


Рис. 9 Конструкция тубуса бинокулярного микроскопа с оборачивающей системой Малафеева-Порро 2-го рода

105. Векторным, матричным или каким-либо другим аналитическим способом покажите, в каком направлении и с какой угловой скоростью будет вращаться изображение часовой стрелки, если на циферблат часов смотреть через неподвижное плоское зеркало.

106. Прямоугольная призма $AP - 90^\circ$ расположена в параллельном ходе лучей - перед объективом визирной трубы. Можно ли влияние поворота, призмы на угол α вокруг оси, параллельной падающему лучу, скомпенсировать поворотом призмы на угол β вокруг оси, параллельной выходящему лучу? Чему в таком случае должно быть равно отношение углов α и β ? Какое направление займет отражающая грань призмы при взаимокompенсации этих поворотов призмы?

107. Пентапризма расположена перед объективом визирной трубы в параллельном ходе лучей. Можно ли влияние поворота призмы на угол α вокруг оси, параллельной падающему лучу, скомпенсировать поворотом призмы на угол β вокруг оси, параллельной выходящему лучу? Каково соотношение между углами α и β ?

108. Показать, что будет наблюдаться в панораме при панорамировании по горизонту, если крышу с нижней прямоугольной призмы перенести на отражающую грань призмы Дове.

109. В угломерном приборе при измерении вертикальных углов (рис. 10) изображение штрихов лимба **1**, передаваемое отсчетной оптической системой, состоящей из объективов **2** и **4**, а также призм **3** и **5**, в плоскость сетки трубы, вращается вокруг центра перекрестия **C**. Докажите, что отклонение угла между осью вращения и нормалью отражающей грани призмы **5** от 45° не нарушит соответствия угла поворота трубы и изображения лимба.

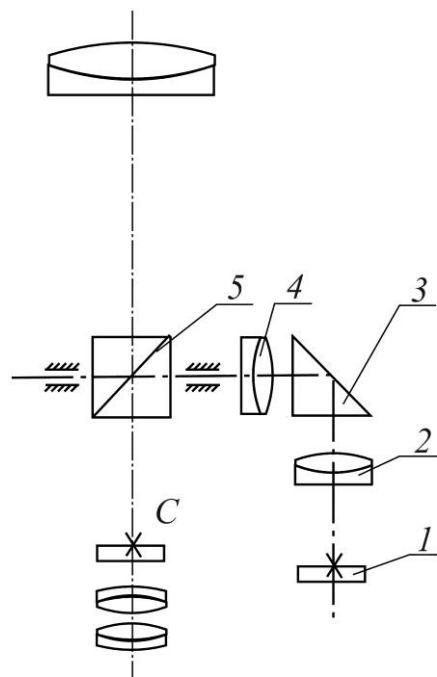


Рис. 10 Оптико-кинематическая схема прибора для измерения вертикальных углов

110. В описании к авторскому свидетельству на изобретение ГДР № 97946 говорится, что в зрительной трубе с призмной оборачивающей системой 1,2 (рис. 11) окуляр и окулярная призма вращаются вокруг вертикальной оси. Для компенсации возникающего при этом поворота изображения оборачивающая система также вращается. С каким передаточным отношением вращение от окулярного тубуса должно передаваться на ось вращения оборачивающей системы? Найдите две принципиальные ошибки в оптико-кинематической схеме устройства. Напомним, что передаточное отношение определяют по формуле

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

111. С целью устранения взаимного разворота изображений в бинокулярной насадке при повороте тубусов для раздвижки по глазной базе предложено использовать асимметричную схему (рис. 12). В тубусах насадки устанавливают разные зеркальные элементы, в одном - угловое зеркало с двугранным углом 90° , в другом - одиночное зеркало.

Докажите, что взаимный разворот изображений при повороте тубусов вокруг вертикальной оси отсутствует только в том случае, если отражающая плоскость зеркала 1 и ребро углового зеркала 2 установлены под углом 45° к оси поворота.

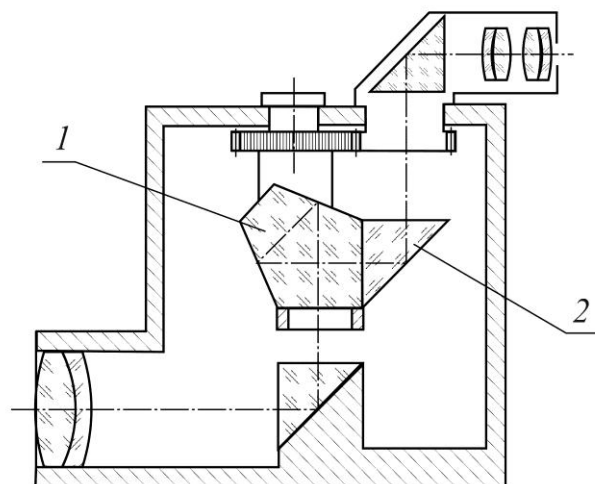


Рис. 11 Зрительная труба с поворотным окуляром

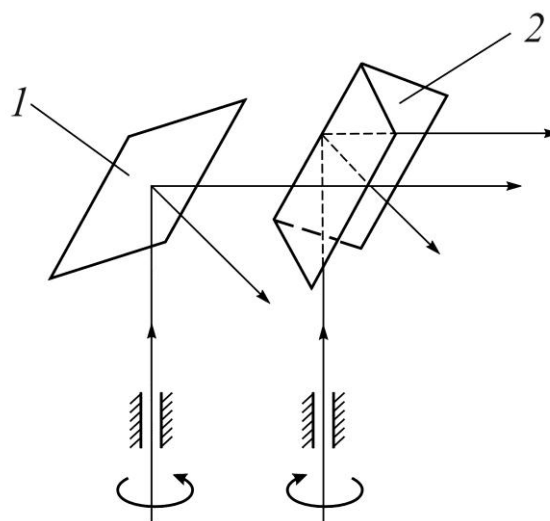


Рис. 12 Асимметричная схема окулярных тубусов бинокулярной насадки

112. В стереомикроскопах типа МБС расстояние между выходными зрочками окуляров изменяют разворотами окулярных тубусов в противоположные стороны на равные углы γ вокруг вертикальных взаимно параллельных осей вращения (рис. 13).

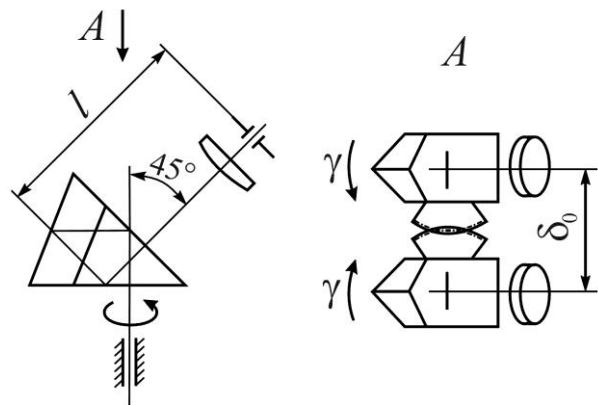


Рис. 13 Оптико-кинематическая схема раздвижки тубусов стереомикроскопа МБС

Выведите формулу, связывающую изменение расстояния между выходными зрочками с углом разворота тубусов, если оси тубусов наклонены к осям вращения под углом 45° , а при исходном положении оси тубусов взаимно параллельны и расположены друг от друга на расстоянии $\delta = 58 \text{ мм}$.

113. Появится ли наклон изображения, если повернуть вокруг падающего луча как вокруг оси следующие призмы:

- 1) $AP - 0^\circ$ (Дове) и $АкР - 0^\circ$ (Дове с крышей);
- 2) $BC - 0^\circ$ (ромб) и $БкС - 0^\circ$ (ромб с крышей);
- 3) $BP - 180^\circ$ и $ВкР - 180^\circ$;
- 4) $BR - 180^\circ$ и $БкР - 180^\circ$ (трипель-призма)?

114. Определите, на какой угол отклонится выходящий осевой луч и на какой угол повернется вокруг этого луча изображение, если повернуть вокруг падающего осевого луча:

- 1) плоское зеркало (рис. 14,а);
- 2) угловое зеркало (рис. 14,б);
- 3) систему, составленную из плоского и углового зеркала (рис. 14,в)?

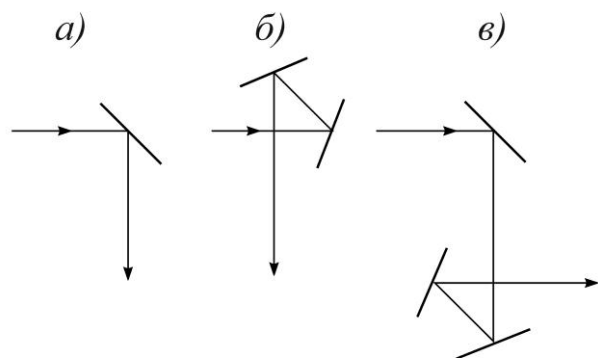


Рис. 14 К анализу влияния поворота вокруг падающего осевого луча: а) плоского зеркала, б) углового зеркала, в) системы, составленной из плоского и углового зеркал

5. СВОЙСТВА И ЮСТИРОВКА ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ

5.1 Расчётные формулы геометрической оптики для параллельного хода лучей

Орт \mathbf{A} направления луча, отражённого от плоского зеркала или преломлённого плоскостью, разделяющей две среды с различными показателями преломления, можно найти из следующих векторных выражений [2]:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N} (\mathbf{A}\mathbf{N}), \quad (47)$$

и соответственно

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' &= \frac{n}{n'} \mathbf{A} - \mathbf{N} \left\{ \frac{n}{n'} (\mathbf{A}\mathbf{N}) - \sqrt{1 + \left(\frac{n}{n'}\right)^2 [(\mathbf{A}\mathbf{N})^2 - 1]} \right\} = \\ &= \frac{n}{n'} \mathbf{A} + \mathbf{N} \left(\frac{n}{n'} \cos \varepsilon - \cos \varepsilon' \right), \end{aligned} \quad (48)$$

где \mathbf{A} – орт направления падающего луча; \mathbf{N} – орт направления нормали отражающей или преломляющей плоскости, направленный навстречу падающему лучу; n, n' – показатели преломления первой и второй сред, разделяемых преломляющей плоскостью; $\varepsilon, \varepsilon'$ – угол падения и угол преломления луча на плоскости; $\mathbf{A}\mathbf{N}$ – скалярное произведение ортов.

Скалярное произведение двух ортов, как известно, равно или произведению их модулей на косинус угла между ортами, или сумме произведений их проекций (направляющих косинусов) на одноимённые оси: $\mathbf{A}\mathbf{N} = |\mathbf{A}| |\mathbf{N}| \cos(\mathbf{A} \wedge \mathbf{N}) = \cos(\mathbf{A} \wedge \mathbf{N}) = A_x N_x + A_y N_y + A_z N_z$.

Значение угла преломления ε' можно найти также из выражения для закона преломления

$$n' \sin \varepsilon' = n \sin \varepsilon. \quad (49)$$

При последовательных отражениях луча от двух плоских зеркал, составляющих так называемое угловое зеркало, с ортами нормалей \mathbf{N}_1 и \mathbf{N}_2 , векторное выражение для орта \mathbf{A}'' направления дважды отражённого луча, полученное последовательным применением формулы (47), будет содержать четыре слагаемых вида

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N}_1(\mathbf{A}\mathbf{N}_1) - 2\mathbf{N}_2(\mathbf{A}\mathbf{N}_2) + 4\mathbf{N}_2(\mathbf{N}_1\mathbf{N}_2) (\mathbf{A}\mathbf{N}_1). \quad (50)$$

Вводя вместо ортов направлений двух нормалей \mathbf{N}_1 и \mathbf{N}_2 пары зеркал орт \mathbf{p} направления ребра, образованного пересечением этих зеркал, и угол σ между зеркалами, формулу (50) можно преобразовать к виду [6, Ч.I, стр. 103]

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} \cos 2\sigma + 2\mathbf{p} (\mathbf{A}\mathbf{p}) \sin^2\sigma - [\mathbf{A}\mathbf{p}] \sin 2\sigma. \quad (51)$$

Орт \mathbf{p} направления ребра углового зеркала и угол σ между зеркалами можно найти по ортам \mathbf{N}_1 и \mathbf{N}_2 нормалей зеркал из следующих формул:

$$\mathbf{p} = -\frac{[\mathbf{N}_1\mathbf{N}_2]}{\sin \sigma}; \quad \cos \sigma = -\mathbf{N}_1\mathbf{N}_2. \quad (52)$$

Угол σ между зеркалами считается положительным, если от первого по ходу луча зеркала ко второму он откладывается против направления движения часовой стрелки.

Векторное произведение ортов \mathbf{A} и \mathbf{B} выражается вектором, длина которого численно равна площади параллелограмма, построенного на этих ортах, приведённых к общему началу. Этот вектор направлен перпендикулярно к ортам \mathbf{A} и \mathbf{B} в ту сторону, откуда кратчайший поворот от \mathbf{A} к \mathbf{B} кажется наблюдателю, смотрящему с указанной стороны, совершаемым против часовой стрелки. В развёрнутом виде это векторное произведение записывается следующим образом:

$$[\mathbf{A}\mathbf{B}] = \begin{vmatrix} i & j & k \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = (A_y B_z - A_z B_y)i + (A_z B_x - A_x B_z)j + (A_x B_y - A_y B_x)k.$$

Модуль векторного произведения ортов равен

$$|[\mathbf{A}\mathbf{B}]| = |\mathbf{A}||\mathbf{B}|\sin(A \wedge B) = \sin(A \wedge B).$$

При трёх последовательных отражениях луча от плоских зеркал с ортами направления нормалей \mathbf{N}_1 , \mathbf{N}_2 , и \mathbf{N}_3 для орта \mathbf{A}''' направления выходящего луча, трижды используя формулу (47), можно получить выражение, содержащее уже восемь слагаемых [2, стр.13, (5)].

Выражение для того же орта \mathbf{A}^k (где k – число отражений в плоских зеркалах) можно также получить из матричной формулы вида

$$A^k = M^k A = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{pmatrix}, \quad (53)$$

где M^k – матрица действия зеркальной системы, составленная из девяти элементов $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{33}$ и записанная в тех же осях координат, в которых задан орт \mathbf{A} направления падающего луча.

Перемножение матриц выполняется по известному правилу «строки на столбцы». Матрица действия зеркальной системы квадратная, а матрица орта \mathbf{A} – одностолбцовая. После перемножения элементов этих матриц снова получим одностолбцовую матрицу для орта луча, отражённого k раз в системе плоских зеркал:

$$A^k = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}A_X & m_{12}A_Y & m_{13}A_Z \\ m_{21}A_X & m_{22}A_Y & m_{23}A_Z \\ m_{31}A_X & m_{32}A_Y & m_{33}A_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_X^k \\ A_Y^k \\ A_Z^k \end{pmatrix}. \quad (54)$$

Матрицу M' действия плоского зеркала можно получить из следующего равенства: $\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N}(\mathbf{A}\mathbf{N}) = M'\mathbf{A}$

$$M' = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - 2N_X^2 & -2N_XN_Y & -2N_XN_Z \\ -2N_XN_Y & 1 - 2N_Y^2 & -2N_YN_Z \\ -2N_XN_Z & -2N_YN_Z & 1 - 2N_Z^2 \end{pmatrix}. \quad (55)$$

Здесь N_X, N_Y, N_Z – проекции орта \mathbf{N} направления нормали зеркала на оси XYZ произвольной неподвижной системы координат.

Матрицу M'' действия углового зеркала в общем виде – в неподвижной системе осей XYZ – можно получить как произведение матриц двух последовательно отражающих плоских зеркал:

$$M'' = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \quad (56)$$

$$\begin{pmatrix} [\cos 2\sigma + 2p_X^2 \sin^2 \sigma] & [-p_Z \sin 2\sigma + 2p_X p_Y \sin^2 \sigma] & [p_Y \sin 2\sigma + 2p_X p_Z \sin^2 \sigma] \\ [p_Z \sin 2\sigma + 2p_X p_Y \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_Y^2 \sin^2 \sigma] & [-p_X \sin 2\sigma + 2p_Y p_Z \sin^2 \sigma] \\ [-p_Y \sin 2\sigma + 2p_X p_Z \sin^2 \sigma] & [p_X \sin 2\sigma + 2p_Y p_Z \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_Z^2 \sin^2 \sigma] \end{pmatrix}.$$

В двух частных случаях углового зеркала, когда $\sigma = 90^\circ$ и $\sigma = 0$, матрица M'' общего вида упрощается. Для матрицы действия прямоугольного зеркала ($\sigma = 90^\circ$) получим

$$M''_{\sigma=90^\circ} = - \begin{pmatrix} 1-2p_x^2 & -2p_x p_y & -2p_x p_z \\ -2p_x p_y & 1-2p_y^2 & -2p_y p_z \\ -2p_x p_z & -2p_y p_z & 1-2p_z^2 \end{pmatrix}. \quad (57)$$

Из сравнения полученной матрицы с формулой (55) замечаем, что матрица прямоугольного зеркала отличается от матрицы плоского зеркала лишь обратным знаком, если принять орт \mathbf{p} направления ребра углового зеркала за орт N_Σ нормали эквивалентного плоского зеркала, перпендикулярного к указанному ребру. Отсюда следует, что прямоугольное зеркало (например, крыша призмы) отражает падающие лучи так же, как и плоское зеркало, перпендикулярное к ребру, если знаки у всех ортов пространства предметов заменить на обратные. Такая замена крыши эквивалентным по действию зеркалом, перпендикулярным к её ребру, значительно упрощает понимание действия и юстировки призм с крышей, а также и расчёты.

Для зеркального ромба или ромб-призмы ($\sigma = 0$) из формулы (56) найдём

$$M''_{\sigma=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = E, \quad (58)$$

т. е. матрица их действия равна единичной; обе системы не изменяют направления отражённых лучей.

Матрицу M''' системы трёх плоских зеркал 1, 2 и 3 можно найти как произведение матриц действия этих зеркал, или как произведение матрицы углового зеркала 1,2 на матрицу плоского зеркала 3, или как произведение матрицы первого плоского зеркала на матрицу углового зеркала 2, 3, т.е.

$$M'''_{123} = M'_3 M'_2 M'_1 = M'_3 M''_{12} = M''_{23} M'_1. \quad (59)$$

В трёх частных случаях, имеющих большое практическое значение, матрица системы трёх плоских зеркал будет иметь более простой вид.

1. У призмы с двумя отражающими гранями, на одной из которых нанесена прямоугольная крыша (призмы типа БкУ), согласно формуле (57) крышу можно заменить эквивалентным плоским зеркалом, перпендикулярным к её ребру, и призму с крышей привести к

эквивалентному угловому зеркалу с углом $\sigma_{\Sigma} = \sigma - 90^\circ$, ребро которого направлено по ребру исходной призмы (типа БУ без крыши) с углом σ между отражающими гранями. Матрицу M''' действия такой призмы можно получить из матрицы M'' углового зеркала по формуле (56), в которую вместо угла σ исходной призмы следует лишь подставить угол $\sigma_{\Sigma} = \sigma - 90^\circ$, а в качестве орта \mathbf{p} ребра принять направление ребра исходной призмы, заменив знак матрицы на противоположный.

2. У прямоугольного триэдра зеркал или уголкового отражателя (световозвращателя) все три отражающие плоскости взаимно перпендикулярны ($\sigma = 90^\circ$), вследствие чего $\sigma_{\Sigma} = \sigma - 90^\circ = 0$. Подставляя

$\sigma_{\Sigma} = 0$ в матрицу M'' углового зеркала по формуле (56) и изменяя знак матрицы на противоположный, получаем

$$M'''_{\text{триэдр}} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = -E. \quad (60)$$

В отличие от зеркального ромба, световозвращатели имеют единичную матрицу действия, но с отрицательным знаком, т. е. световозвращатель при отражении преобразует направления всех падающих лучей на противоположные.

3. Три плоских зеркала перпендикулярны к общей плоскости, а их нормали компланарны. Таковы, например, призмы с тремя отражениями в одной плоскости – призмы Аббе, Шмидта, ВР-180° и др. В справочнике [2] доказывается, что система трёх плоских зеркал с компланарными нормальными в параллельном ходе лучей эквивалентна одному плоскому зеркалу, нормаль \mathbf{N}_{Σ} которого компланарна нормальям системы и повернута к нормали третьего зеркала на угол $180^\circ + \sigma_{21}$, где σ_{21} – двугранный угол между вторым и первым зеркалами исходной системы. Напомним, что угол σ между зеркалами считается положительным, если от первого по ходу луча зеркала ко второму он откладывается против направления движения часовой стрелки. Кроме того необходимо знать, что математически зеркало представляется в виде двусторонней отражающей плоскости, вследствие чего матричные выражения не будут изменяться при изменении направления оси Z_0 (которую мы всегда ориентировали по нормали к отражающей плоскости) на противоположное.

В связи с последним замечанием при отыскании направления орта \mathbf{N}_{Σ} нормали эквивалентного зеркала (для случая трёх плоских зеркал с компланарными нормальными) иногда следовало бы откладывать от орта \mathbf{N}_3 не угол $180^\circ + \sigma_{21}$, а угол на 180° больший или на столько же меньший, т. е.

угол $360^\circ + \sigma_{21}$ или угол σ_{21} , чтобы получить направление орта \mathbf{N}_3 нормали эквивалентного зеркала.

Систему четырёх плоских зеркал в параллельном ходе лучей, как показано А.И. Тудоровским [6], можно привести к эквивалентному угловому зеркалу с углом σ_3 и ортом \mathbf{p}_3 направления ребра. Причём угол σ_3 можно найти из формулы

$$\cos \sigma_3 = \cos \sigma_{12} \cos \sigma_{34} - \sin \sigma_{12} \sin \sigma_{34} \cos \varphi, \quad (61)$$

а орт \mathbf{p}_3 – из выражения

$$\mathbf{p}_3 \sin \sigma_3 = \mathbf{p}_{12} \sin \sigma_{12} \cos \sigma_{34} + \mathbf{p}_{34} \cos \sigma_{12} \sin \sigma_{34} - [\mathbf{p}_{12} \mathbf{p}_{34}] \sin \sigma_{12} \sin \sigma_{34}, \quad (62)$$

где σ_{12} , σ_{34} - углы между зеркалами 1 и 2, 3 и 4; \mathbf{p}_{12} , \mathbf{p}_{34} - орты направлений рёбер первой и второй пары зеркал; φ – угол между рёбрами первой и второй пары зеркал.

Пользуясь формулами (61) и (62) можно, например, легко найти эквивалент призмной оборачивающей системы Малафеева – Порро 1 рода. Две прямоугольные призмы типа БР-180°, обращённые друг к другу гипотенузными гранями и развёрнутые главными сечениями под углом 90° друг по отношению к другу, образуют эту оборачивающую систему. Выберем систему координатных осей XYZ таким образом, что $\mathbf{p}_{12} = \mathbf{i}$, $\mathbf{p}_{34} = \mathbf{j}$, $\mathbf{A} = \mathbf{k}$, то есть орт направления падающего луча параллелен оси Z. Тогда для такого расположения призм системы Малафеева – Порро 1 рода можно написать $\sigma_{12} = \sigma_{34} = -90^\circ$, а $\varphi = 90^\circ$. Подставляя эти величины в формулы (61) и (62), сразу же найдём $\cos \sigma_3 = 0$, откуда $\sigma_3 = 90^\circ$, и

$$\mathbf{p}_3 = -[\mathbf{p}_{12} \mathbf{p}_{34}] = - \begin{vmatrix} i & j & k \\ p_{12x} & p_{12y} & p_{12z} \\ p_{34x} & p_{34y} & p_{34z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} i & j & k \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -k.$$

Таким образом, призмная оборачивающая система Малафеева-Порро 1-го рода приводится к прямоугольному зеркалу, ребро которого направлено по оси Z. В справочнике [2] доказывается, что и призмная система Малафеева-Порро 2-го рода, как и вообще любая оборачивающая призмная система в параллельном ходе лучей эквивалентна по своему действию прямоугольному зеркалу.

Представляет интерес система пяти плоских зеркал с компланарными нормальными. К такой системе относится хорошо известная призма Пехана,

состоящая из полупентапризмы и призмы Шмидта. Как показано в упомянутом выше справочнике такая система в параллельном ходе лучей эквивалентна одному плоскому зеркалу, перпендикулярному главному сечению призм, а также входной и выходной граням.

Матрицу $M''_{\text{кл}}$ преломляющего клина можно получить из матрицы M'' углового зеркала, если вместо угла σ между зеркалами последнего подставить половину угла поворота $\psi/2$ преломленного (выходящего) луча вокруг ребра клина по отношению к падающему (входящему) лучу. Этот угол ψ для клина с малым преломляющим углом θ равен

$$\begin{aligned} \psi &\approx \theta \left(1 - \sqrt{n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varepsilon} \right) \approx \theta (1 - n) \left(1 + \frac{n+1}{2n} \operatorname{tg}^2 \varepsilon \right) \approx \\ &\approx \theta (n - 1) + \theta \frac{n^2 - 1}{2n} \operatorname{tg}^2 \varepsilon = \delta_0 + \Delta \delta \varepsilon. \end{aligned} \quad (63)$$

Значение угла ψ в первом приближении (при малых углах θ и углах падения ε не более 45°) зависит лишь от значения угла падения ε луча на клин и не зависит от ориентировки плоскости падения относительно главного сечения клина.

5.2 Расчётные формулы для сходящегося хода лучей

Рассмотрим вначале влияние поступательных смещений плоского и углового зеркал, отметив, что в параллельном ходе лучей такие подвижки зеркал и призм с плоскими рабочими гранями недействительны: они могут привести лишь к срезанию пучков лучей, но не влияют ни на ход лучей, ни на положение и ориентировку изображения.

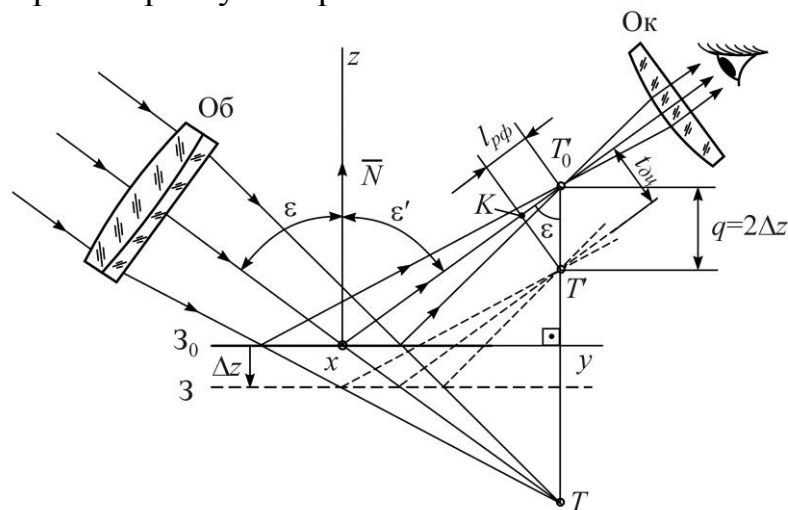


Рис. 15 Влияние смещения плоского зеркала на расфокусировку и поперечный сдвиг изображения

одного из них возникает наибольшая возможная расфокусировка изображения без децентрировки – Δl_{\max} , $t = 0$, а при смещении вдоль другого направления возникает наибольшая децентрировка – сдвиг изображения, но без расфокусировки – $\Delta l = 0$, t_{\max} . Для этого следует в первом случае, положив $t = 0$, найти особое направление I – I, характеризуемое углом $\mathcal{G}_I = 90^\circ - \sigma$, а во втором случае, положив $\Delta l = 0$, найти особое направление II – II, характеризуемое углом $\mathcal{G}_{II} = -\sigma$. Для указанных направлений смещений углового зеркала легко определить, что

$$\Delta l_{\max} = -2\Delta q \sin \sigma,$$

$$t_{\max} = 2 \Delta q \sin \sigma.$$

Особое направление II – II совпадает с направлением биссектрисы угла, образованного падающим (орт \mathbf{A}) и выходящим (орт \mathbf{A}'') лучами, а направление I – I перпендикулярно к этой биссектрисе. Следует отметить, что положение указанных особых направлений зависит только от направления падающих лучей, а не от положения углового зеркала. Можно показать [1], что особые направления I–I (наибольшей расфокусировки Δl_{\max}) и II–II (наибольшего сдвига t_{\max}) сохраняются и в призмах с крышей типа БКУ при смещениях в плоскости главного сечения исходной призмы типа БУ и с теми же коэффициентами влияния.

Напишем теперь формулы, позволяющие определить положение луча и изображения, отражённых от системы плоских зеркал, которая не только смещается, но и поворачивается в сходящемся ходе лучей вокруг оси, произвольно расположенной в пространстве. Обозначая символом ρ^k радиус-вектор изображения T^k точки предмета T , отражённой k раз в системе плоских зеркал относительно неподвижного полюса O , совпадающего с точкой предмета T , для радиус-вектора r^k текущей точки отражённого луча \mathbf{A}^k , напишем следующее векторное уравнение [2]:

$$r^k = \rho^k + \lambda \mathbf{A}^k = \rho^k + \lambda M^k \mathbf{A}, \quad (67)$$

где \mathbf{A}^k – орт направления выходящего луча, отражённого k раз в системе зеркал; \mathbf{A} – орт направления падающего луча; M^k – матрица действия системы плоских зеркал с k отражениями; λ – переменный скалярный множитель.

Если падающий луч (орт \mathbf{A}) проходит через точку предмета T , то выходящий луч (орт \mathbf{A}^k) пройдёт через её изображение T^k . Коэффициент λ можно найти из конкретных условий задачи.

Выражения для радиус-вектора изображения точки в системе осей xyz имеют вид [2]:

для плоского зеркала

$$\rho' = (1 - M')\mathbf{r} + 2q\mathbf{N}; \quad (68)$$

для углового зеркала

$$\mathbf{\rho}'' = (1 - M'')(\mathbf{r} + \mathbf{q}_p); \quad (69)$$

для системы трёх зеркал с центром \mathcal{C} в точке их пересечения

$$\mathbf{\rho}''' = (1 - M''')(\mathbf{r} + \mathbf{q}_c); \quad (70)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор неподвижной точки C , вокруг которой вращается каждая из зеркальных систем, относительно точки предмета T ; q – расстояние от точки C до отражающей плоскости зеркала; \mathbf{N} – орт направления нормали плоского зеркала; \mathbf{q}_p – радиус-вектор точки ребра углового зеркала, лежащей на перпендикуляре, опущенном из неподвижной точки C , относительно самой точки C ; \mathbf{q}_c – радиус-вектор центра \mathcal{C} трёхзеркальной системы относительно неподвижной точки C ; M' , M'' , M''' – матрицы действия плоского, углового и тройного зеркала, которые даются формулами (55), (56) и (59) соответственно.

5.3 Влияние поворота плоского зеркала на направление отражённого луча и наклон (поворот) изображения

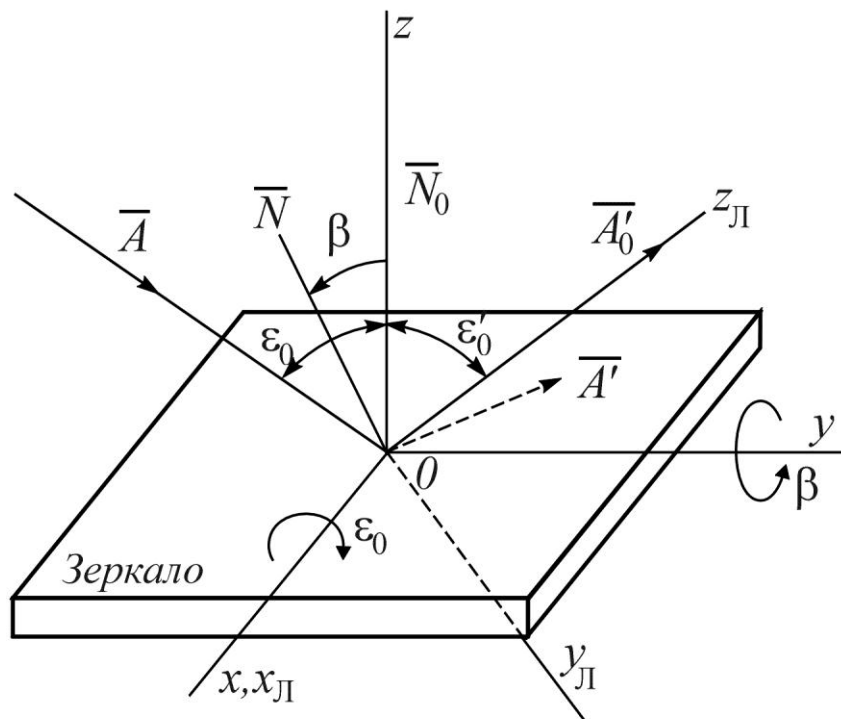


Рис.17. Влияние поворота плоского зеркала на отклонение отражённого луча

На рис. 17 в системе неподвижных осей xuz показаны плоское зеркало и падающий луч \mathbf{A} неизменного направления под углом падения ϵ_0 в плоскости xz . В исходном положении зеркало совпадает с плоскостью xy , а его нормаль \mathbf{N}_0 – осью z , поэтому $\mathbf{N}_0 = \mathbf{k}$. Тогда выходящий луч – орт \mathbf{A}'_0 –

составит равный угол ε_0 с нормалью \mathbf{N}_0 и будет лежать в той же плоскости yz , что и падающий по орту \mathbf{A} луч. Направим по орту \mathbf{A}'_0 ось z_l лучевой системы осей $x_ly_lz_l$, которая по отношению к неподвижной системе осей xyz повернута на угол ε_0 по часовой стрелке.

Повернув зеркало из исходного положения вокруг оси y на угол β , вследствие чего станет $\mathbf{N} = \sin \beta \mathbf{i} + \cos \beta \mathbf{k}$, найдём направление орта \mathbf{A}'_l отражённого луча в лучевой системе координатных осей $\mathbf{A}'_l = S_l M' \mathbf{A}$. Подставив из рис.24 для орта падающего луча $\mathbf{A} = \sin \varepsilon_0 \mathbf{j} - \cos \varepsilon_0 \mathbf{k}$ и матрицу S_l перехода от системы осей xyz к лучевой системе $x_ly_lz_l$ путём поворота вокруг оси x на угол ε_0 , напомним

$$\mathbf{A}'_l = S_l M' \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \varepsilon_0 \\ -\cos \varepsilon_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ 0 & -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{12} \sin \varepsilon_0 - m_{13} \cos \varepsilon_0 \\ m_{22} \sin \varepsilon_0 - m_{23} \cos \varepsilon_0 \\ m_{32} \sin \varepsilon_0 - m_{33} \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix}.$$

Перемножив матрицы и раскрыв их элементы по формуле (55), после преобразования получим

$$\mathbf{A}'_l = \begin{pmatrix} \sin 2\beta \cos \varepsilon_0 \\ \sin^2 \beta \sin 2\varepsilon_0 \\ 1 - 2 \sin^2 \beta \cos^2 \varepsilon_0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2\beta \cos \varepsilon_0 \\ \beta^2 \sin 2\varepsilon_0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (71)$$

Последнее приближённое выражение для орта \mathbf{A}'_l направления отражённого осевого луча справедливо для малого угла поворота β зеркала. Из него видно, что отражённый луч при повороте плоского зеркала на малый угол β вокруг оси y , совпадающей с заданной плоскостью падения луча (проходит через орты \mathbf{A} и \mathbf{N}) и с отражающей плоскостью зеркала, отклоняется в боковом направлении (если смотреть навстречу лучу \mathbf{A}'_0 , наклонив голову лишь в плоскости yo_z) в сторону поворота зеркала на угол $\gamma' \approx 2\beta \cos \varepsilon_0$ и вниз на весьма малый угол $\alpha'_l \approx \beta^2 \sin 2\varepsilon_0$.

Для нахождения угла наклона изображения (или точнее – угла поворота плоскости изображения вокруг осевого луча), возникающего при повороте плоского зеркала, необходимо отразить в нём любой из векторов направления в плоскости предмета, ортогональной падающему осевому лучу \mathbf{A} . Обычно для этого пользуются или направлением вертикали (орт \mathbf{B} в плоскости предметов), или направлением горизонта (орт \mathbf{C} , совпадающий с направлением оси x); из-за простоты расчёта последнее предпочтительнее.

Для изображения направления горизонта в лучевой системе координатных осей $x_ly_lz_l$ запишем

$$\mathbf{C}'_{\text{л}} = S_{\text{л}} M' \mathbf{C} = S_{\text{л}} M' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ 0 & -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{pmatrix}.$$

Подставив в элементы матрицы проекции орта повернутой на угол β нормали зеркала $\mathbf{N} = \sin \beta \mathbf{i} + \cos \beta \mathbf{k}$, после перемножения и преобразования получим

$$\mathbf{C}'_{\text{л}} = \begin{pmatrix} \cos 2\beta \\ \sin 2\beta \sin \varepsilon_0 \\ -\sin 2\beta \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 \\ 2\beta \sin \varepsilon_0 \\ -2\beta \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix}. \quad (72)$$

Это выражение справедливо для малого угла β поворота зеркала. Угол наклона изображения будет равен $\alpha'_{\text{н.и.}} \approx 2\beta \sin \varepsilon_0$.

В самом же общем случае, при произвольном положении оси поворота зеркала, который рассмотрен в [2], поворот зеркала на малый угол вызовет три дефекта: боковое отклонение выходящего луча, наклон изображения и отклонение выходящего луча по высоте.

5.4 Влияние поворота углового зеркала на направление отражённого луча и наклон изображения

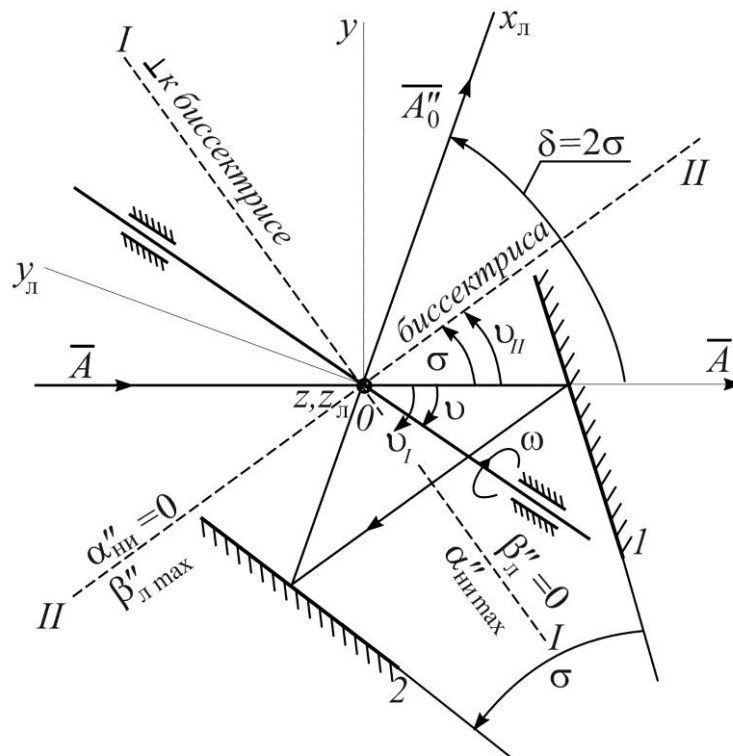


Рис.18. Влияние поворота углового зеркала на отклонение отражённого луча и наклон изображения

При повороте углового зеркала вокруг произвольной оси, перпендикулярной к его ребру, в общем случае возникают отклонение выходящего луча и наклон изображения. На рис. 18 плоские зеркала 1 и 2 образуют угловое зеркало с ортом ребра $\rho_0 = \mathbf{k}$ (на рис. не показано) и с двугранным углом σ в системе неподвижных осей xuz в исходном положении, когда его ребро перпендикулярно к плоскости xu – плоскости рисунка. Осевой луч, падающий на угловое зеркало, задан ортом \mathbf{A} , совпадающим с осью x , так что $\mathbf{A} = \mathbf{i}$. Вертикаль плоскости предметов задана ортом \mathbf{B} и направлена вдоль ребра параллельно оси z , поэтому $\mathbf{B} = \mathbf{k}$.

При исходном положении углового зеркала осевой луч в нём отражается в направлении орта \mathbf{A}_0'' , который лежит тоже в плоскости рисунка (в плоскости xu) под углом 2σ к падающему лучу; орт \mathbf{B} при отражении не отклоняется от своего направления, поэтому $\mathbf{B}_0'' = \mathbf{B} = \mathbf{k}$.

Опрокинем угловое зеркало из указанного исходного положения на угол ω вокруг оси, перпендикулярной к его ребру и направленной под произвольным углом ϑ к оси x . Найдём направление выходящего осевого луча (орт \mathbf{A}_l'') и направление изображения вертикали (орт \mathbf{B}_l'') в лучевой системе осей $x_l y_l z_l$, которая по отношению к системе xuz повернута на угол 2σ вокруг оси z так, что ось x_l совпадает с ортом \mathbf{A}_0'' выходящего осевого луча при исходном положении углового зеркала. Для искомым ортов \mathbf{A}_l'' и \mathbf{B}_l'' напомним:

$$\mathbf{A}_l'' = M_l'' \mathbf{A}_l = M_l'' \begin{pmatrix} \cos 2\sigma \\ -\sin 2\sigma \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} \cos 2\sigma - m_{12} \sin 2\sigma \\ m_{21} \cos 2\sigma - m_{22} \sin 2\sigma \\ m_{31} \cos 2\sigma - m_{32} \sin 2\sigma \end{pmatrix} \quad (73)$$

и соответственно

$$\mathbf{B}_l'' = M_l'' \mathbf{B}_l = M_l'' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix}. \quad (74)$$

Для орта ребра ρ_l углового зеркала, опрокинутого на угол ω , в той же системе осей $x_l y_l z_l$ найдём

$$\rho_l = \sin \omega \sin(2\sigma + \vartheta) \mathbf{i}_l + \sin \omega \cos(2\sigma + \vartheta) \mathbf{j}_l + \cos \omega \mathbf{k}_l$$

Подстановкой элементов матрицы M_l'' из формулы (56), после преобразований, для малого угла опрокидывания ω получим приближённое выражение орта направления выходящего луча

$$\mathbf{A}_л'' \approx \begin{pmatrix} 1 \\ -\omega^2 [0,25 \sin 4\sigma - 2 \sin^2 \sigma \cos(2\sigma + \vartheta) \sin \vartheta] \\ -2\omega \sin \sigma \cos(\sigma + \vartheta) \end{pmatrix}. \quad (75)$$

Для орта $\mathbf{B}_л''$ направления вертикали по формуле (74) аналогично найдём приближённое выражение, справедливое для малого угла наклона ω углового зеркала

$$\mathbf{B}_л'' \approx \begin{pmatrix} 2\omega \sin \sigma \cos(\sigma - \vartheta) \\ -2\omega \sin \sigma \sin(\sigma - \vartheta) \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (76)$$

Из формул (75) и (76) получим общие выражения для углов отклонения выходящего осевого луча по вертикали $\beta_л''$ и по горизонту $\gamma_л''$, а также для угла наклона изображения $\alpha_{н.и.}''$

$$\begin{aligned} \beta_л'' &= \frac{A''_{зл}}{A''_{хл}} \approx -2\omega \sin \sigma \cos(\sigma + \vartheta); \\ \gamma_л'' &= \frac{A''_{ул}}{A''_{хл}} \approx -\omega^2 [0,25 \sin 4\sigma - 2 \sin^2 \sigma \cos(2\sigma + \vartheta) \sin \vartheta]; \\ \alpha_{н.и.}'' &= \frac{B''_{ул}}{B''_{зл}} \approx -2\omega \sin \sigma \sin(\sigma - \vartheta). \end{aligned} \quad (77)$$

Из найденных выражений сделаем следующие выводы.

1. Угловое отклонение $\beta_л''$ выходящего луча по высоте, т.е. перпендикулярно к плоскости главного сечения углового зеркала, пропорционально первой степени угла наклона ω углового зеркала. Однако при опрокидывании вокруг оси, расположенной к направлению падающего луча под углом $\vartheta = 90^\circ - \sigma$, когда $\cos(\sigma + \vartheta) = 0$, этот угол отклонения равен нулю; при этом угловое зеркало опрокидывается вокруг первого особого направления, при смещении вдоль которого отсутствует децентрировка ($t = 0$); при опрокидывании углового зеркала вокруг второго особого направления ($\vartheta = -\sigma$) угол $\beta_л''$ достигает максимального значения $\beta_л''_{\max} = -2\omega \sin \sigma$.

2. Угловое отклонение $\gamma_л''$ выходящего луча по горизонту, т.е. в плоскости главного сечения углового зеркала, при любой ориентировке плоскости опрокидывания всегда является величиной второго порядка малости. Таким образом, угол отклонения выходящего осевого луча (орт $\mathbf{A}_л''$) по отношению к направлению падающего луча (орт \mathbf{A}) практически не

изменяется при любом опрокидывании углового зеркала на небольшой угол ω , т. е. почти всегда можно принимать, что этот угол равен постоянной величине до величин второго порядка малости $\delta = 2\sigma = const$.

3. Наклон изображения $\alpha_{н.и.}''$ в ортогональном выходящему осевому лучу плоскости также пропорционален первой степени угла наклона ω углового зеркала. Однако при опрокидывании вокруг оси, расположенной к направлению падающего луча под углом $\vartheta = \sigma$, когда $\sin(\sigma - \vartheta) = 0$, наклон изображения практически не появляется; это соответствует опрокидыванию вокруг второго особого направления углового зеркала; при опрокидывании же вокруг первого особого направления когда $\vartheta = 90^\circ - \sigma$, наклон изображения достигает наибольшего значения $(\alpha_{н.и.}'')_{\max} = -2\omega \sin\sigma$.

Можно показать, что при опрокидывании призм с крышей типа БКУ особые направления I – I и II – II меняются ролями. Так при опрокидывании такой призмы вокруг направления I – I возникает наибольший угол отклонения выходящего луча по высоте $(\beta_{л}''')_{\max} = -2\omega \sin\sigma_{\vartheta}$, а наклон изображения при этом отсутствует, т. е. $\alpha_{н.и.}''' = 0$. При опрокидывании вокруг направления II – II возникает наибольший наклон изображения $(\alpha_{н.и.}''')_{\max} = -2\omega \cos\sigma_{\vartheta}$ без отклонения выходящего луча по высоте, так как $\beta_{л}''' = 0$. Здесь σ_{ϑ} – угол эквивалентного углового зеркала призмы БКУ, полученного путём замены «крыши» плоским зеркалом, перпендикулярным её ребру.

5.5 Классификация зеркально-призменных систем

Для ясного понимания свойств, действия и вопросов юстировки зеркально-призменных систем (ЗПС) необходима их строгая научная классификация. Впервые такую классификацию предложил И.В. Лебедев [5]. В соответствии с ней системы, составленные из плоских зеркал, можно разделить на следующие семь классов:

- 1) класс А – плоское зеркало;
- 2) класс Б – угловое зеркало (в частном случае прямоугольное зеркало с углом $\sigma = 90^\circ$);
- 3) класс Б-0 – зеркальный ромб – частный случай углового зеркала при $\sigma = 0$;
- 4) класс В – тройное зеркало с центром в точке взаимного пересечения зеркал;
- 5) класс В - 180° – триэдр прямоугольный – частный случай тройного зеркала, отражающие грани которого взаимно перпендикулярны;
- 6) класс А + Б-0 – плоское зеркало (А) в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным ромбом (Б-0) – частный

случай тройного зеркала, у которого нормали всех трёх зеркал компланарны;

- 7) класс Б + Б-0 – угловое зеркало (Б) в сочетании с перпендикулярным к его ребру зеркальным ромбом (Б-0) – система четырёх зеркал общего вида.

Любую систему плоских зеркал можно привести к одному из перечисленных семи классов. В таблице 8.2 [6] на стр. 372-375 указаны действенные подвижки зеркально-призменных систем всех классов, приведены канонические матрицы их действия. В последних столбцах таблицы приведены примеры ЗПС, относящихся к соответствующим классам, и указаны призмы, принадлежащие к каждому из семи классов. Действенные подвижки всех ЗПС рассмотрены в системе координатных осей $x_0y_0z_0$, которая совпадает с основной системой осей при исходном положении ЗПС. Из шести возможных подвижек, имеющих у любого твёрдого тела, только часть их является действенной. В параллельном ходе лучей малые (юстировочные) поступательные перемещения любой ЗПС недействительны, а из трёх оставшихся поворотов, по крайней мере, один поворот у любой ЗПС является недействительным, а именно поворот вокруг оси z_0 , которая совпадает с основным неизменным направлением, имеющимся, согласно И.В. Лебедеву, у каждой системы плоских зеркал.

5.6 Задачи

115. Можно ли фокусировать трубы, т.е. изменять расстояние между задним фокусом $F'_{об}$ объектива и передним фокусом $F_{ок}$ окуляра, подвижками призмы Шмидта ВР-45° и полупентапризмы БУ-45°, размещёнными между ними с целью создания требуемой компоновки? Найдите направления этих подвижек.

116. На какую величину и в каком направлении необходимо сдвинуть призму АР-90° (рис. 19,а) и пентапризму БП-90° (рис. 19,б), чтобы совместить задний фокус объектива $F'_{об}$ визира с плоскостью сетки С? Можно ли при этом избежать децентрировки системы визира?

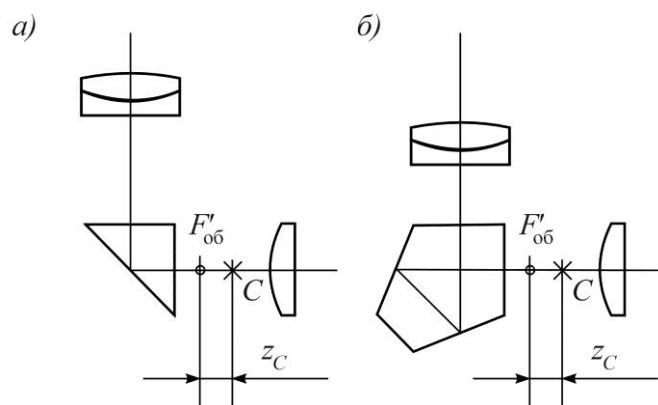


Рис.19. К анализу возможности устранения расфокусировки за счёт сдвига: а) призмы АР-90°; б) пентапризмы БП-90°

117. На визирную трубу катетометра КМ-8 для параллельного сдвига ее визирной оси с целью выполнения принципа Аббе надевается насадка, представляющая собой зеркальный ромб. Как проверить взаимную параллельность установки, зеркал ромба в насадке?

118. Плоские зеркала 1 и 2, разделенные большим расстоянием (1– 6 м) должны быть установлены параллельно друг другу с высокой точностью (рис. 20). Как это осуществить и каким способом проконтролировать?

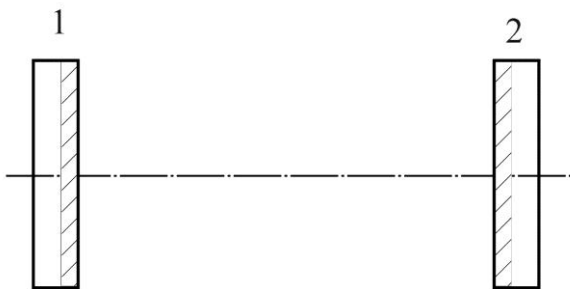


Рис.20. К разработке метода контроля взаимной параллельности зеркал, разделённых большим расстоянием

119. Аналитически и графически найдите такие направления, при смещении вдоль которых призмы Шмидта и полупентапризмы не появится расфокусировка или сдвиг изображения.

120. При повороте на малый угол вокруг какой оси не произойдет никаких изменений в положении и ориентировке изображения бесконечно далекого предмета, наблюдаемого через следующие призмы:

- 1) прямоугольную АР– 90° ;
- 2) прямоугольную с крышей АкР– 90° ;
- 3) ромб БС– 0° ;
- 4) пентапризму БП– 90° ;
- 5) двойного отражения БР– 180° ;
- 6) трипельпризму БкР– 90° ;
- 7) тройного отражения ВР– 180° ;
- 8) оборачивающую систему Малафеева-Порро первого рода;
- 9) оборачивающую систему Малафеева-Порро второго рода?

121. Пентапризма применяется для контроля параллельности визирных осей труб коллиматоров, разделенных большим расстоянием. Для этого пентапризму сначала устанавливают на столике перед первым коллиматором, наводят визирную трубу на сетку коллиматора и закрепляют, затем переставляют призму на второй столик, стоящий перед вторым коллиматором. Оба столика отгоризонтированы. Необходимо подсчитать допуск на ошибки углов пентапризмы при условии, что при перестановке призмы она устанавливается на столике на глаз, приблизительно. Следует также найти, с какой точностью необходимо горизонтировать столики.

122. На мостике М, расположенном за объективом Об в сходящемся ходе лучей, закреплены два взаимно параллельных плоских зеркала $З_1$ и $З_2$, составляющих зеркальный ромб, который в исходном положении сдвигает осевой луч на величину t при угле падения $\varepsilon_1 = 45^\circ$ (рис. 21).

Какой величины расфокусировка и сдвиг изображения по полю зрения вызовут наклоны мостика М с зеркалами на малые углы α и β вокруг осей x и y неподвижной системы координат, а также поворот мостика вокруг оси z на малый угол γ ? Какие дополнительные дефекты могут еще при этом появиться?

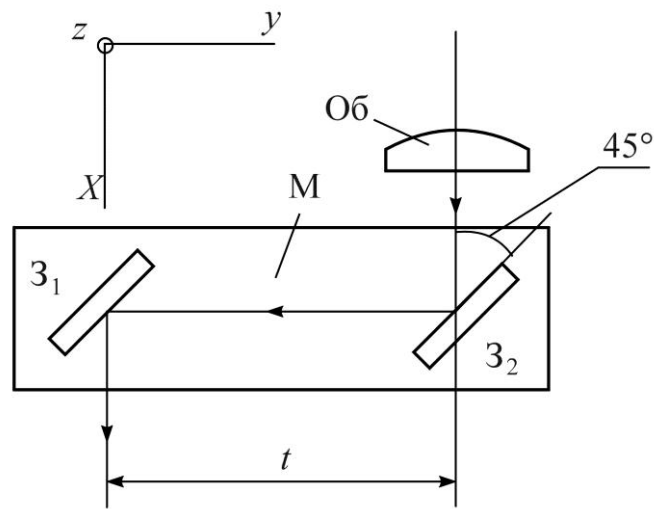


Рис.21. К анализу влияния угловых подвижек зеркального мостика на дефекты изображения

123. Легко понять, что при малых поворотах зеркального ромба (рис. 22, а) в сходящемся ходе лучей вокруг оси, перпендикулярной зеркалам 1 и 2, не возникает ни сдвига, ни расфокусировки, ни поворота изображения в поле зрения прибора. Имеется ли такая ось поворота в призме – ромб (рис. 22, б)?

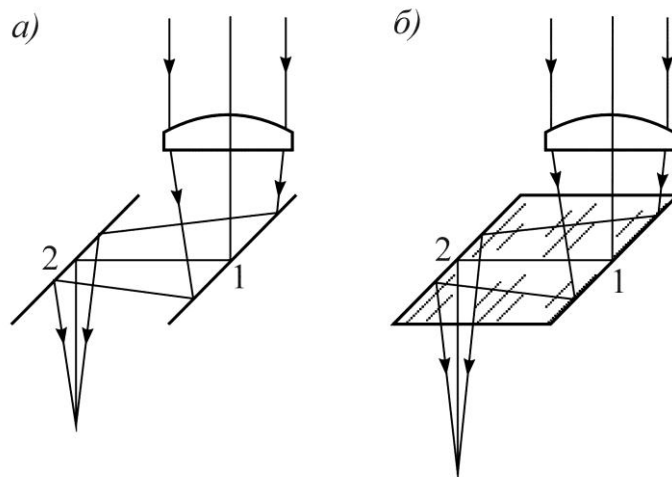


Рис.22. К отысканию оси поворота призмы-ромб, инвариантной к дефектам изображения

124. Визирную ось коллиматора можно установить в горизонтальное положение с помощью жидкостного горизонта и эталонной пентапризмы с углом отклонения луча при ходе 90° . Определите, не сказываются ли при этом ошибки установки самой пентапризмы?

125. Плоское зеркало 1 (рис. 23) качается на угол $\pm\beta$ вокруг горизонтальной оси, параллельной оси y неподвижной координатной системы xuz . Второе плоское зеркало 2 закреплено неподвижно так, что его нормаль N_2 параллельна плоскости uz и составляет угол 45° с осью u . Луч на зеркало 1 падает по орту \bar{A} , идя навстречу оси x . Найдите траекторию, описываемую выходящим из системы зеркал лучом (ортом \bar{A}''), когда зеркало 1 из исходного положения, при котором нормаль \bar{N}_1 направлена по биссектрисе угла между осями x и z , повернётся на угол $\pm\beta$.

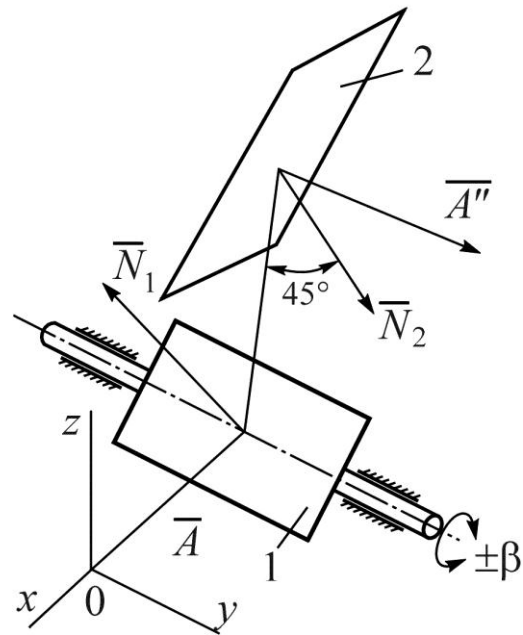


Рис. 23 Двухзеркальная сканирующая система

126. При какой величине показателя преломления призмная система, показанная на рис. 24, а, в сходящемся ходе лучей эквивалента, одному лишь плоскому зеркалу? Найдите положение этого зеркала.

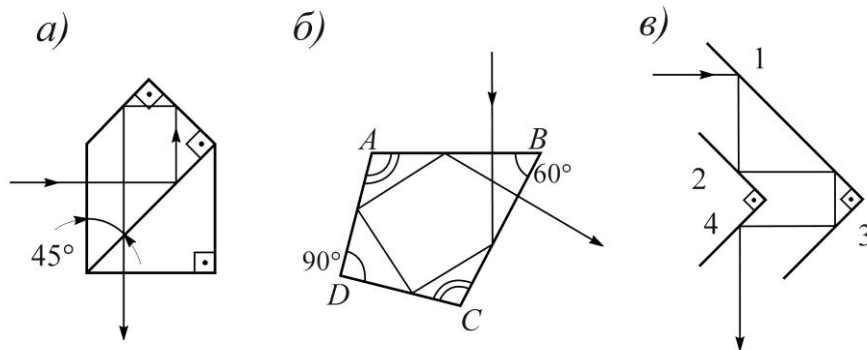


Рис.24. К нахождению простейших эквивалентов сложных зеркально призмных систем

127. Найдите зеркальный эквивалент призмы, в которой углы A и C равны (рис. 24, б).

128. Система состоит из двух прямоугольных зеркал $1,3$ и $2,4$, зеркала которых $1,2$ и $3,4$ попарно параллельны друг другу (рис. 24, в). Найдите эквивалентную зеркальную систему и укажите ее действенные подвижки в сходящемся ходе лучей.

129. Призма Шмидта $BP - 45^\circ$ обычно имеет угол 45° и два равных угла при основании по $67,5^\circ$. При каких условиях в сходящемся ходе лучей эта призма будет эквивалентна одному лишь плоскому зеркалу.

130. Какие подвижки призмы Шмидта $BP - 45^\circ$ и призмы Шмидта с крышей $BKP - 45^\circ$ не влияют на ход лучей и ориентировку изображения, если призмы расположены в сходящихся пучках лучей?

131. Вычислите длину развертки призмы Аббе и докажите, что при показателе преломления $n = 1,5$ эта призма не вносит расфокусировки при включении её в сходящийся ход лучей, т.е. она эквивалентна одному плоскому зеркалу.

132. Изменяются ли свойства призмы Аббе при взаимном развороте ее частей на плоскости склейки? Можно ли скомпенсировать возникшие при этом дефекты юстировкой призмы?

133. Можно ли из стекла с показателем преломления $n = 1,6$ изготовить призму типа Аббе, также эквивалентную плоскому зеркалу?

134. Можно ли непосредственно из рисунков, на которых показан взаимный сдвиг призм, составляющих призмные системы Пехана (рис. 25, а) и Аббе (рис. 25, б, в), сделать заключение о возникновении при этом расфокусировки изображения? Докажите Ваш вывод аналитически.

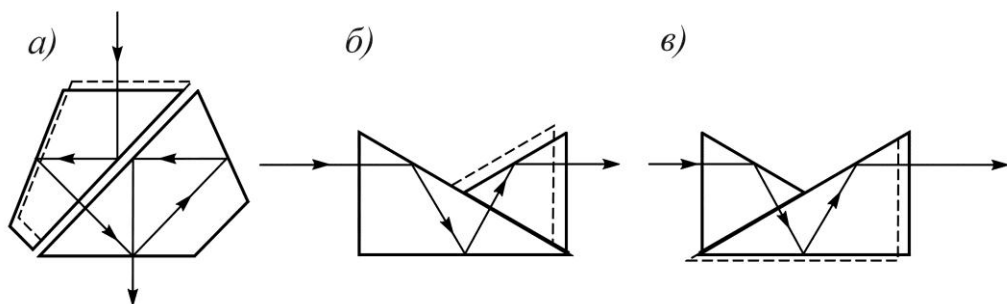


Рис.25. К анализу влияния сдвигов частей составных призм на расфокусировку

135. При каких подвижках оборачивающей призмной системы Малафеева - Порро 2-го рода может возникнуть расфокусировка изображения?

Указание. Найдите эквивалентную зеркальную систему оборачивающей призмной системы.

136. Найдите зеркальные системы, эквивалентные призмным системам, которые даны на рис. 26, а-е, и рассмотрите их основные свойства и назначения. Каковы особенности их юстировки? Что изменится, если одну из отражающих граней каждой системы заменить "крышей"? Какие юстировочные подвижки должны иметь призмные системы в сходящемся ходе лучей?

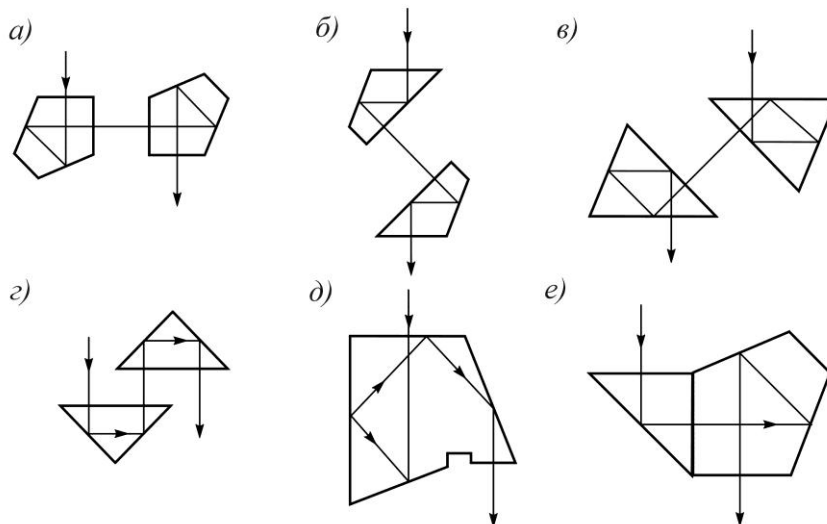


Рис.26. К анализу назначений и свойств призмённых систем

137. Сравните свойства прямоугольных призм типа БР – 180° :

- 1) обычной,
- 2) с крышей на одном из катетов,
- 3) с крышами на обоих катетах.

Каким зеркальным системам эквивалентна каждая призма?

138. Как изменятся свойства, обычной пентапризмы, если нарезать "крышу":

- 1) на одной из ее отражающих граней,
- 2) на обеих отражающих гранях?

139. Найдите аналитически или графически положение оси, поворот вокруг которой на малый угол каждой из перечисленных ниже призм не вызывает ни расфокусировки, ни сдвига изображения: 1) БР – 180° , 2) БУ – 45° , 3) БУ – 60° , 4) БП – 90° , 5) БС – 0° (ромб). Проверьте опытом правильность найденного положения указанной оси в некоторых из призм.

140. Найдите положение ребра эквивалентного углового зеркала для следующих зеркальных систем:

- 1) пентапризмы,
- 2) концевое отражателя, составленного из двух плоских зеркал с задним отражением.

141. Найдите зеркальные эквиваленты призмы с прямым углом В при различном ходе лучей (рис. 27, а, б), если призма находится в сходящихся пучках лучей. При каких соотношениях углов призмы ее развертки будут плоско-параллельными пластинками?

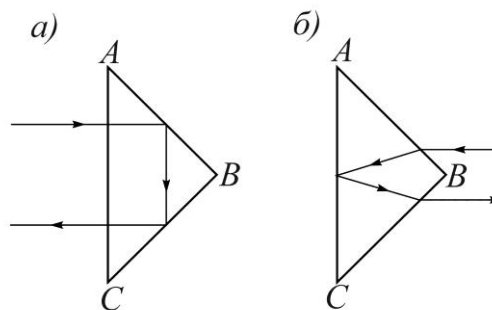


Рис. 27 Два варианта применения прямоугольной призмы

142. В визирной трубе для фокусировки на различные расстояния, вместо использования подвижного компонента объектива или перемещения сетки с окуляром, можно (сломав с помощью призмы оптическую ось) использовать передвижную призму одного из типов: 1) $БР - 180^\circ$, 2) $БкР - 180^\circ$, 3) $ВР - 180^\circ$. Какие требования следует предъявить к точности изготовления направляющих для передвижения каждой из указанных призм, если визирная линия трубы должна быть прямолинейной?

143. Векторным методом выведите формулу для величины угла между гранью крыши и прилежащей рабочей преломляющей гранью и вычислите этот угол с точностью до одной угловой секунды в следующих призмах [9, стр.170, табл.4.6]:

1) $АкР - 45^\circ$; 2) $АкР - 60^\circ$; 3) $АкР - 90^\circ$; 4) $БкР - 180^\circ$; 5) $БкУ - 45^\circ$; 6) $БкУ - 60^\circ$; 7) $БкП - 90^\circ$; 8) $ВкР - 45^\circ$; 9) $ВкР - 180^\circ$; 10) $Ак - 0^\circ$ (Аббе), 11) $Бк - 90^\circ$ (башмачная); 12) Дове с крышей.

144. Укажите, где должна располагаться ось качания призмы - компенсатора $БУ - 60^\circ$ в нивелире с самоустанавливающейся линией визирования (рис. 28), чтобы при продольном наклоне прибора изображение объекта не сдвигалось по сетке и не возникало других дефектов.

Примечание: подобный компенсатор с маятниковой подвеской призмы на скрещивающихся нитях применён в нивелире Ni-1 фирмы «Оптон», Германия. Причём, требуемое параллельное смещение вдоль одного из особых направлений осуществлено в конструкции путём поворота призмы вокруг оси качания (подробности в литературе [16]).

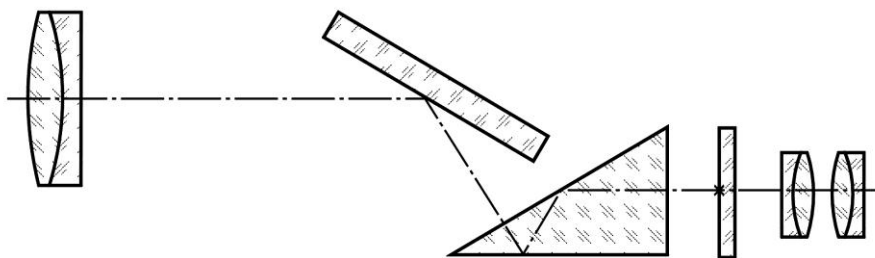


Рис.28. Оптическая схема нивелира с компенсатором

145. Векторным, матричным или другим способом покажите, как будет вращаться изображение плоскости предмета, перпендикулярной падающему осевому лучу, после отражения в неподвижном угловом зеркале, если перед угловым зеркалом указанная плоскость предмета вращается по часовой стрелке.

146. Покажите, что угол между двумя лучами A_1 и A_2 не изменяется после отражения их в плоском зеркале и в любой системе плоских зеркал.

147. Найдите уравнение траектории автоколлимационного изображения центра перекрестья, расположенного в поле зрения окуляра

Гаусса, если перед объективом автоколлимационной трубы расположено вращающееся плоское зеркало, нормаль которого отклонена на малый угол α , от своей неподвижной оси вращения. Будет ли при этом наблюдаться наклон (поворот) изображения?

148. Плоское зеркало в сходящемся ходе лучей, как известно, имеет три действительные подвижки. Сколько действительных подвижек имеет прямоугольная призма $AP - 90^\circ$ в сходящемся ходе лучей? Как можно выявить действительные повороты призм? Как отклоняются нормали \overline{N}_1 и \overline{N}_2 входной и выходной граней от своего исходного положения, если призму повернуть на небольшой угол β вокруг оси y_0 , совпадающей с гипотенузной гранью и плоскостью ее главного сечения?

149. В визирной трубе перископического типа применяются две одинаковые неподвижные прямоугольные призмы типа $AP - 90^\circ$. Одна из них расположена перед объективом в параллельном ходе лучей, а вторая – за объективом в сходящемся ходе лучей. Каковы особенности юстировки каждой из призм?

150. Какая из схем устройства для контроля параллельности визирных осей двух коллиматоров (рис. 29) не чувствительна к любым поворотам мостика с призмами?

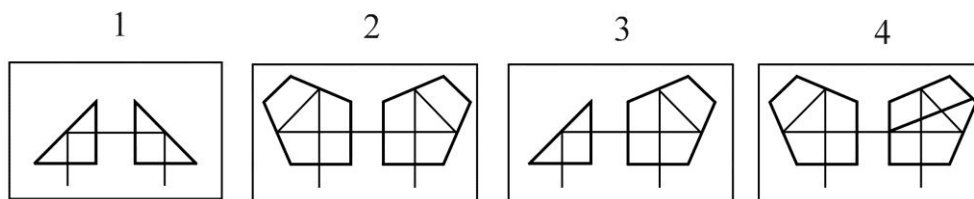


Рис.29. Четыре варианта устройства для контроля параллельности осей

151. Какие юстировочные подвижки являются инвариантными для головной призмы $AP-90^\circ$ угломерного прибора типа перископа?

152. Какие юстировочные подвижки являются инвариантными для головной призмы $AP-90^\circ$ угломерного прибора типа перископа?

153. Какая подвижка призмы Аббе вносит расфокусировку изображения?

6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ КОНТРОЛЯ, ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЮСТИРОВКИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ, ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В этот раздел «Сборника задач» включены задачи контроля и юстировки, часто встречающиеся на производстве, но не включённые нами

в какую-либо из групп типовых задач юстировки, таких как фокусировка, юстировка увеличения, центрирование элементов оптической системы и юстировка ЗПС.

6.1 Задачи

154. Параллельность оптических осей трубок призмного бинокля можно проверить по далекому предмету, изображение которого при наблюдении в бинокль не должно двоиться. На каком ближайшем расстоянии может находиться предмет, по которому можно было бы с достаточной точностью проконтролировать взаимную параллельность осей трубок бинокля? Задачу решите для трех биноклей: 1) галилеевского БГ 4x50; 2) призмного Б 6x30; 3) призмного Б 8x30. У последних двух биноклей удельная пластика $P_o = 2$. При расчёте принять допустимое двоение не более $1/5$ величины наименьшего из допусков на отклонение от параллельности осей пучков, выходящих из обоих окуляров от одной и той же точки предмета, в соответствии с ГОСТ 7048 – 81. Бинокли. Типы и основные параметры.

155. В соответствии с рекомендацией, изложенной в литературе [10, стр.25], предложите способ исключения накопленной погрешности шкалы длиной $l = 100$ мм, составляющей $+ 0,01$ мм, с тем, чтобы остаточная погрешность шкалы была менее $\pm 0,5$ мкм. Подсчитайте необходимую точность регулировки (поворота) шкалы.

156. В фотодальномерах "Смена" и "Блик" [10, рис.48] с базисом $\delta = 50$ мм на барабане дистанции имеются деления 1;1,3;2;3;5;10; ∞ , оцифрованные в метрах:

1) На каком наименьшем расстоянии L можно выбрать предмет для контроля деления " ∞ "?

2) С какой точностью следует совместить с фокальной плоскостью шкалу коллиматора для контроля дистанционной шкалы дальномера, если объектив коллиматора имеет фокусное расстояние $f'_{об} = 250$ мм?

3) От чего зависит величина базиса δ , не изменяется ли она вместе с изменением измеряемой дистанции?

157. Подсчитайте допуск на зазоры и неравенство эксцентриситетов в эксцентриковых оправках объективов и на зазоры в окулярной резьбе бинокля Б 8x30, если фокусное расстояние объективов $f' = 126$ мм.

158. В бинокле Б 8x30 поперечный сдвиг окуляра на $0,07$ мм, (например, за счет зазоров в резьбе механизма диоптрийной установки) в вертикальном направлении вызывает предельно допустимую непараллельность осей выходящих пучков лучей величиной в $15'$. Непараллельность какой величины осей пучков вызовет сдвиг объективов бинокля на те же $0,07$ мм, если его фокусное расстояние $f'_{об} = 126$ мм? Какой

величины зазор в оси шарнира бинокля вызовет непараллельность осей выходящих пучков на те же $15'$, если длина шарнира $l_{ш} = 40$ мм?

159. Подсчитайте допуск на неточность центрирования объективов стереомикроскопа системы Грену, если увеличения сменных пар объективов равны: $\beta_1 = -1,13^x, \beta_2 = -1,75^x, \beta_3 = -2,65^x$. Увеличение окуляров $\overline{\Gamma_{ок}} = 12,5^x$.

160. На гониометре с большой точностью можно измерить величину пирамидальности прямоугольной равнобедренной призмы $AP - 90^\circ$. Величина пирамидальности у этой призмы равна, как известно, углу между гипотенузной гранью и ребром противолежащего прямого угла. При измерении призму на столике гониометра можно установить тремя способами, а именно так, чтобы по отношению к оси вращения столика были параллельны:

- 1) ребро прямого угла,
- 2) ребро одного из острых углов,
- 3) гипотенузная грань призмы.

Измеренные углы наклона граней при различных установках призмы на столике отметим соответствующими индексами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и β_3 (при установке призмы по третьему способу наклонены обе катетные грани). Как по указанным углам вычислить величину пирамидальности π призмы? Как эти углы связаны между собой?

161. В однообъективном (упрощённом) микроинтерферометре Линника интерференционные полосы равной толщины можно получить как регулировкой разделительной призмы-куб, так и наклоном эталонного зеркала или наклоном испытуемого образца. На какой угол следует наклонить эталонное зеркало, чтобы получить за окуляром интерференционные полосы видимой ширины 3 мм? Если же такие полосы получают наклоном испытуемой концевой меры, то на какую величину следует приподнять один из её концов (длина меры равна 30 мм)? В обоих случаях примите, что в исходном положении эталонного зеркала и концевой меры полосы были бесконечно широкими. В микроинтерферометре применен объектив $8x0,20$ и окуляр с увеличением $\overline{\Gamma_{ок}} = 10^x$.

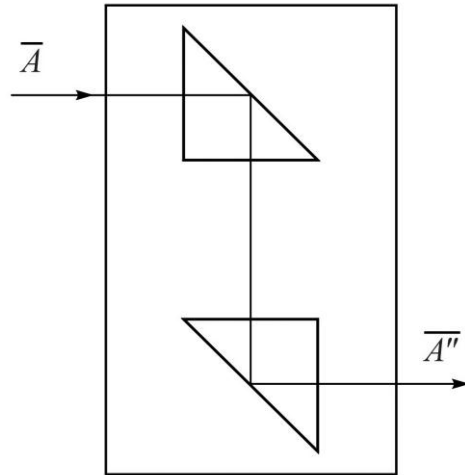
162. В книге М.М.Русинова [10, стр.313] говорится, что "следствием непараллельности визирной оси трубы панорамы и вертикальной оси вращения явится вращение перекрестия по окружности вокруг неподвижной точки поля, определяемой следом пересечения направления оси вращения с плоскостью изображения".

Далее на стр.314 сказано: "Обнаружить эту ошибку можно при снятой головной призме с помощью коллиматора, установленного вместо головной призмы (или перед головной призмой), что позволяет выполнять эту юстировку независимо от головной призмы и призмы Дове".

Составьте методику контроля и устранения этой ошибки при юстировке.

163. Предложите способ (еще лучше различные способы) контроля взаимопараллельности выходящих лучей (по орту направления \bar{A}'') по отношению к падающим (по орту \bar{A}) с точностью до $\pm 10''$. (рис. 30).

Рис.30. К разработке метода контроля взаимопараллельности выходящих и падающих лучей



164. Предложите методику юстировки и контроля длиннофокусной трубы, состоящей из объектива $Об$, трех плоских зеркал $З_1, З_2, З_3$, сетки $С$ и окуляра $Ок$ (рис. 31). От трубы требуется высокое качество изображения по всему полю зрения и строгая параллельность визирной оси по отношению к опорной плоскости "а" корпуса.

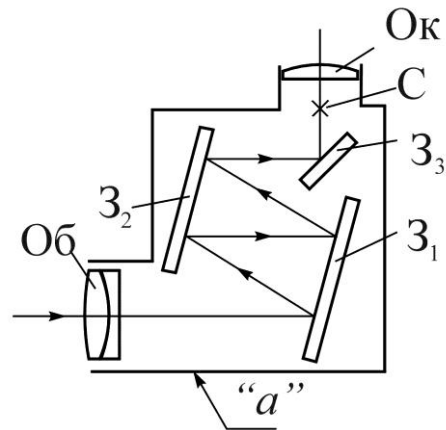


Рис. 31 Схема длиннофокусной визирной трубы

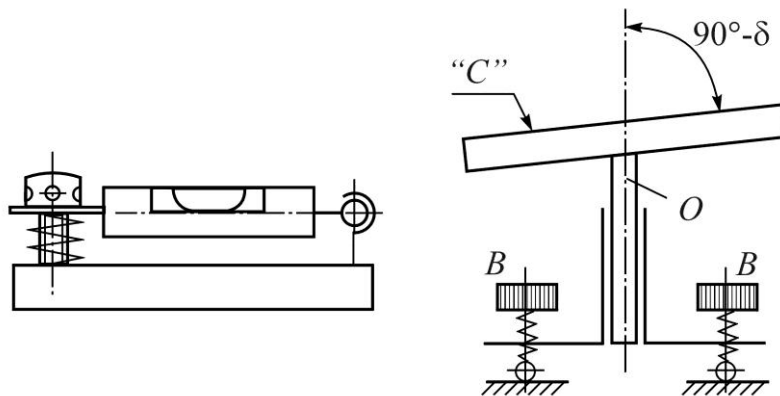


Рис.32. К проверке поворотного столика

165. Плоскость "С" столика неперпендикулярна на угол δ к собственной оси вращения 0 (рис. 32).

1) Как с помощью накладного цилиндрического уровня и винтов В треножника можно установить ось вращения O строго отвесно?

2) Как определить с помощью делений уровня величину неперпендикулярности столика к своей оси вращения?

3) Предложите другие способы контроля величины δ .

166. Шарнир какого бинокля: галилеевского или кеплеровского - должен быть изготовлен точнее при прочих равных их характеристиках?

167. Объектив бинокля Б 6x30 имеет относительное отверстие 1:4. Какой величины зазоры допустимы в окулярной резьбе механизма диоптрийной установки?

168. Дайте определение понятия "визирная ось коллиматора с перекрестием, объективом которого служит наклонное вогнутое сферическое зеркало".

169. В книге [11] на рис.39 показана схема контроля точности отсчета углов и мертвого хода червячного механизма на гониометре. Как и на что влияет взаимная непараллельность осей вращения буссоли и гониометра? Как можно выявить и устранить эту погрешность установки? Какой допуск можно на нее задать?

170. В книге [11] на рис. 178 дана схема устранения коллимационной ошибки теодолита. Покажите, нельзя ли обойтись при этом одним коллиматором?

171. Как можно выявить коллимационную ошибку (k) и наклон горизонтальной оси (l) буссоли ПАБ-2 и стереотрубы АСТ? Рассчитайте допуски на коллимационную ошибку этих приборов, а также допуски, на наклон горизонтальной оси, если пределы визирования по высоте у обоих приборов равны $\pm 18^\circ$, а точность измерения горизонтальных углов $\Delta\varphi = \pm 0,001$ рад.

172. Теодолитом измеряют горизонтальные углы в пределах 360° с точностью $\Delta\varphi = \pm 10''$ и вертикальные углы в пределах $i \pm 45^\circ$ с точностью $\Delta i \pm 30''$.

Определите допуск на нестабильность вертикальной оси вращения теодолита, а также укажите, какова должна быть чувствительность уровней горизонтального и вертикального лимбов? Пояснение: под порогом чувствительности уровня понимают минимальный угол, при котором перемещение пузырька становится заметным невооружённым глазом, и который не должен превышать 15% цены деления.

173. Для обнаружения и измерения величины коллимационной ошибки поворотной визирной трубы можно использовать ее поворот вокруг оси на 180° или переключивание, оси в опорах [10, стр.12-13]. Рассмотрите особенности и недостатки обоих способов выявления коллимационной ошибки.

174. Если лазерный луч направить на пентапризму (с углом $\sigma = 45^\circ$) снизу вверх, параллельно строго отвесно расположенной оси вращения, и поворачивать на этой оси пентапризму, то выходящий луч (орт \bar{A}'') опишет строго горизонтальную плоскость, которую можно использовать для нивелировки (рис. 33).

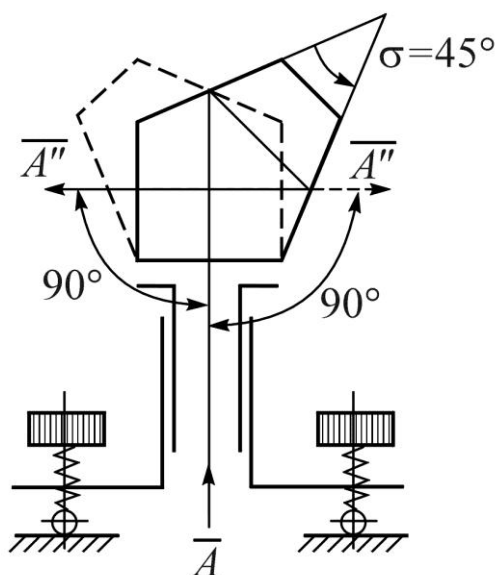


Рис. 33 Узел поворотной пентапризмы лазерного нивелира

На какой угол отклонится от горизонта выходящий луч, если ось вращения призмы нестабильна, по направлению (вследствие зазоров в направляющих и люфта) или если падающий луч (орт \bar{A}) непараллелен оси вращения?

175. Предложите лабораторный и полевой способы выявления коллимационной ошибки визирной трубы с цапфами. Рассчитайте допуск для этой ошибки, если труба, с цапфами используется в теодолите с точностью измерения: вертикальных углов до $\Delta i = \pm 5''$ в пределах $i \pm 30^\circ$ и горизонтальных углов до $\Delta \varphi \pm 30''$, в пределах полного оборота.

176. В книге [11] на рис.47 показан в разрезе окуляр с внутренней фокусировкой. Для каких телескопических приборов он предназначен - для моно- или бинокулярных? Сформулируйте технические условия на этот окуляр, разработайте методику юстировки и оцените конструкцию с точки зрения сборочной технологичности.

177. В книге [11] на рис.111 показана схема контроля фокусировки крупногабаритного коллиматора при помощи подвижной пентапризмы и неподвижной визирной трубы, а в тексте на стр.183 сказано, что используют "пентапризму с хорошим качеством изображения и фокусностью не менее 15...20 км" и добавлено, что "пентапризма выставляется по уровню".

Обоснуйте столь высокие требования к пентапризме и необходимость ее установки по уровню. Для определения величины перемещения сетки при использовании данного способа контроля фокусировки на стр.184 приведена формула. Проверьте её путём самостоятельного выведения.

178. В книге [11] на рис.113 показано устранение параллакса, сетки автоколлиматора при помощи абсолютного выверителя. Каковы требования к плоскостности зеркала 1, к точности углового зеркала 2 и к точности направляющих для перемещения последнего?

179. В книге [11] на рис.117 показана, установка для контроля поворота изображения, а на стр.195 внизу сказано, что для обеспечения резкого изображения нити отвеса, расположенной на расстоянии L от испытуемого прибора, перед выходным его отверстием устанавливают насадку 2 с линзой или узкой вертикальной щелью. Какой величины должно быть фокусное расстояние линзы насадки 2, какой ширины может быть щель и почему она должна располагаться вертикально?

180. В книге [11] на рис.157,а, снизу, показана установка матового стекла фотокамеры с использованием зеркальной приставки 6, про которую на стр.247 сказано, что она, якобы, позволяет совместить зрачки коллиматорного объектива и объектива фотокамеры.

Поясните, как же на самом, деле работает приставка 6 и каковы требования к точности изготовления и установки ее зеркал?

181. В книге [11] на рис.191 показана схема зеркального коллиматора, предназначенного для определения предела разрешения и устранения параллакса в приборах ночного видения.

1) Почему пластинка 2 используется как полупрозрачное зеркало с внешним, а не с внутренним отражением?

2) Укажите основные базы, которые должны быть использованы при юстировке коллиматора.

3) Разработайте методику юстировки и контроля коллиматора.

182. Главное зеркало системы Мерсена диаметром 360 мм имеет форму параболоида вращения и отверстие в центре. Приведите схему контроля поверхности зеркала в процессе его изготовления.

183. Известно, как трудно бывает привести автоколлимационное изображение в поле зрения окуляра автоколлиматора, особенно, если последний имеет большое увеличение, а значит, малое угловое поле зрения.

Предложите способ (лучше несколько способов), позволяющий быстро найти автоколлимационное изображение от плоского зеркала.

184. В артиллерийской стереотрубе АСТ 10×45 параллельность осей труб юстируют подвижками головных призм. С какой точностью необходимо при этом регулировать призмы, если известно, что трубы эксплуатируют как в сдвинутом, так и в раздвинутом положениях.

185. Ромбпризма должна сдвигать изображение в поперечном направлении строго параллельно на величину $a \pm 0,01$ мм. Предложите способ контроля этой величины сдвига с требуемой точностью.

186. Угол призмы $\theta = 90^\circ$ контролируется при помощи стеклянного угольника. На катетной грани видны 5 интерференционных полос.

Каково отступление угла призмы от 90° и погрешность его определения, если расстояние между первой и пятой полосами равно $30 \pm 0,5$ мм, а чувствительность наведения равна 0,1 полосы?

187. В интерферометре Майкельсона при перемещении одного из зеркал на расстояние 0,153 мм интерференционная картина сместилась на 510 полос.

Определите длину волны света.

188. В одно из плеч интерферометра Майкельсона помещена откачанная трубка длиной 12 см. Затем трубку заполнили газом, показатель преломления которого неизвестен. При этом интерференционная картина сместилась на 180 полос. Вычислите показатель преломления газа, полагая $\lambda = 0,60$ мкм.

189. В микроинтерферометре Линника МИИ-4, конструкция которого приведена в книге [14, фиг.153], интерференционные полосы возникают в фокальной плоскости объектива O_3 ($f'_3 = 200$ мм) зрительной трубы при поперечном сдвиге микрообъектива O_2 [14, фиг. 152, Б]. Определите величину сдвига микрообъектива O_2 , если видимая ширина полос за окуляром O_4 зрительной трубы, имеющим увеличение $\Gamma_{ок} = 15^\times$, должно быть 5 мм. Как можно изменить ширину и направление полос в этом микроинтерферометре, конструкция интерферометрического узла которого представлена в той же книге [14, фиг. 154 и 155].

190. Определите максимальную погрешность измерения угла по лимбу из-за его эксцентриситета, обусловленную зазором в посадке, если рабочий радиус лимба $R_{л} = 25$ мм, а максимальный зазор в посадке $\delta_c = 0,02$ мм.

191. Определите дифракционный угол расходимости излучения лазера φ (полный), если диаметр излучающей поверхности равен $D = 1$ см, а длина волны излучения $\lambda = 1$ мкм.

192. Определите величину смещения одного из зеркал в интерферометре Майкельсона при смещении интерференционной картины на 150 полос. В качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер, излучающий на длине волны 632,8 нм.

193. Оптическая сила линзы диаметром 40 мм измеряется с помощью коллиматора с диаметром объектива 140 мм и зрительной трубы диаметром 50 мм. Определите в диоптрийной мере погрешность измерения, вызванную ограниченной чувствительностью наводок.

194. Определите погрешность измерения радиуса кривизны поверхности пробного стекла на сферометре, если измеряемый радиус равен 100 мм, диаметр кольца равен 40 мм, цена деления шкалы спирального окулярного микрометра равна 0,001 мм, а апертура объектива отсчётного микроскопа равна 0,15.

195. Рассчитайте полную угловую расходимость излучения лазера, генерирующего гауссов пучок (мода TEM_{00}), если радиус перетяжки лазерного пучка $w_0 = 1$ см, а длина волны его излучения $\lambda = 1$ мкм.

196. Определите радиус пучка лазерного излучения и радиус его волнового фронта на расстоянии 100 м от выходного зеркала лазера, если лазер работает на моде TEM_{00} , имеет гауссов резонатор, а перетяжка пучка излучения расположена на его выходном зеркале. Длина волны излучения лазера $\lambda = 1$ мкм. Радиус пучка на выходном зеркале $w_0 = 1$ мм.

197. Какую минимальную клиновидность можно обнаружить с помощью автоколлиматора, если диаметр пластины равен 20 мм, показатель преломления стекла пластины равен 1,5, а диаметр объектива коллиматора равен 50 мм?

198. Увеличение зрительной трубы измеряется на гониометре. Какова должна быть погрешность гониометра, если требуемая погрешность измерения равна 0,1%, а характеристики зрительной трубы следующие: увеличение равно $10\times$, диаметр объектива 30 мм, угловое поле 5° . Принять также, что шкала широкоугольного коллиматора, на котором производилось измерение углового поля зрительной трубы, была аттестована на том же гониометре.

199. На каком наибольшем расстоянии от объектива автоколлиматора может находиться плоское зеркало, закреплённое на объекте, угол поворота которого контролируется, если диапазон измерения угла составляет $\pm 30'$ (угл. мин.), а допускаемое виньетирование отражённого пучка лучей не должно превышать 50% ?

200. На интерферометре Майкельсона измеряют показатель преломления газа. После замены в трубке воздуха на исследуемый газ в контрольной ветви интерферометра возникла дополнительная разность хода в 180 интерференционных полос. Определите показатель преломления газа, если длина трубки составляет 120 мм, а длина волны используемого излучения $\lambda = 0,6$ мкм.

201. Определите необходимое относительное отверстие объектива, применяемого для фотосъёмки с линейным увеличением $\beta = - 2\times$, позволяющее получить такую же освещённость в плоскости изображения, какая была при съёмке с увеличением $\beta = - 0,5\times$ при относительном отверстии 1: 20. Увеличение в зрачках $\beta_{зр} = 1\times$, $f' = 50$ мм.

6.2 Пример решения задачи

Одним из способов получения полос в микроинтерферометрах сильного увеличения, к которым относится и микроинтерферометр МИИ-4, является наклон одного из зеркал S_1 или S_2 . Причём, зеркало S_2 вмонтировано в прибор и выступает в роли референтного, а другое – S_1 является поверхностью испытываемой детали [14, фиг.152, А]. Определите угол φ наклона зеркала, если видимая ширина полос e за окуляром O_4 зрительной трубы, имеющим увеличение $\Gamma = 15\times$, должна быть 3 мм. В обеих ветвях микроинтерферометра применены два одинаковых

микрообъектива O_1 и O_2 , имеющих увеличение $\beta = -40\times$ и числовую апертуру $A = 0,65$.

Решение. Так как ширина полос зависит только от длины волны λ и от угла сходимости интерферирующих лучей ω' , определим величину этого угла по формуле (46) из книги [14]:

$$\omega' = \frac{\lambda}{e'} = \frac{\lambda \cdot \Gamma_{\text{ок}}}{e} = \frac{0,00055 \cdot 15}{3} \approx 0,0028 \approx 10'.$$

Полученное значение угла сходимости интерферирующих лучей соответствует плоскости В локализации полос, то есть плоскости изображения объектива O_3 . Для того, чтобы найти угол ω между лучом падающим на референтное зеркало S_2 (вдоль оптической оси) и лучом, отражённым от него, воспользуемся одним из ряда известных выражений для увеличения микрообъектива:

$$\beta = -\frac{z'}{f'} = -\frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = \frac{n \cdot \sin \sigma}{n' \cdot \sin \sigma'}.$$

Поскольку микрообъективы находятся в воздухе, и $n = n' = 1$, а апертурный угол, который составляет интерферирующий луч с оптической осью в референтной ветви невелик, с некоторым приближением можно написать:

$$\omega = \beta \cdot \omega' = 40 \cdot \omega' = 0,11 = 6,4^\circ.$$

Таким образом угол φ наклона зеркала вдвое меньше найденной величины, т.е. $\varphi = \omega/2 = 3,2^\circ$.

Ответ: Для того, чтобы видимая ширина интерференционных полос за окуляром микроинтерферометра составила 3 мм, референтное зеркало или испытываемую деталь следует наклонить на угол $\varphi = 3,2^\circ$.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

7.1 Критерии качества изображения и принципы, положенные в основу методики расчёта допусков на дефекты оптических деталей и систем

Согласно критерию Рэлея, качество изображения, образуемого оптическими системами, считается первоклассным, если волновые aberrации Δ_v в пределах действующего пучка лучей не превосходят значения $\lambda/4$ – четверти длины волны, используемого при работе света. Для видимой области спектра средняя длина волны $\lambda_{\text{cp}} = 0,55$ мкм, поэтому предельно допустимые волновые aberrации визуальных систем для точек в центре поля зрения в пределах действующего выходного зрачка не должны превышать

$$(\Delta_B)_{\text{доп}} \leq 0,14 \text{ мкм.} \quad (78)$$

Из этого общего допуска на аберрации, возникающие вследствие технологических погрешностей изготовления и сборки оптических деталей, обычно выделяют его часть [3], мкм,

$$\Delta_B \leq 0,1. \quad (79)$$

Действующим или рабочим пучком называют пучок лучей наибольшего сечения, который в центре поля зрения оптической системы образует изображение точки предмета и после выхода из системы целиком попадает в зрачок глаза наблюдателя (или другого приёмника света). При достаточной освещённости диаметр зрачка глаза наблюдателя равен $D_{з.г.} = 2$ мм; он является действующим выходным зрачком во всех случаях, когда выходной зрачок прибора больше 2 мм. Соответственно сечение действующего пучка в плоскости выходного зрачка называется действующим или рабочим выходным зрачком, а его сечение поверхностями оптических деталей (удалённых от выходного зрачка) – действующим или рабочим размером поверхности детали, в отличие от большего по величине светового размера.

При прохождении плоского фронта световой волны W , параллельного поверхности склеенной плоскопараллельной пластины (рис. 34), через границу между средами с показателями преломления n_1 и n_2 , которая имеет местную неровность глубины Δ , на выходящем волновом фронте W' возникает местная деформация величины Δ_B . Она равна оптической разности хода между лучами общего параллельного пучка, один из которых проходит через местную неровность Δ , а другой её минует.

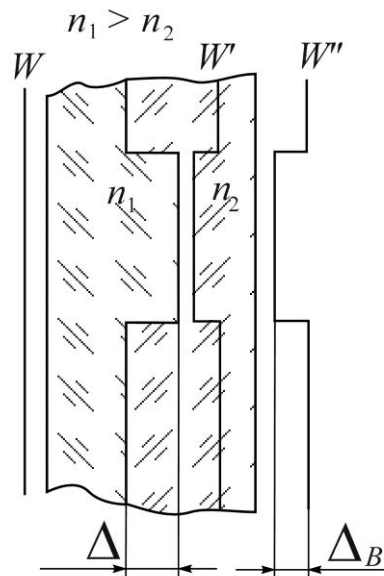


Рис.34. Прохождение фронта световой волны, параллельного поверхности склеенной пластины, через границу между средами с отличающимися показателями преломления

Согласно **принципу таутохронизма** (принцип равенства времён прохождения светом пути между двумя фиксированными положениями волнового фронта по любому лучу пучка), для времени прохождения светом

пути между двумя положениями плоского волнового фронта W и W' по краевому и осевому лучам напишем

$$\tau_{кр} = d_1/v_1 + d_2/v_2 + \Delta_B/v_B = \tau_0 = (d_1 + \Delta)/v_1 + (d_2 - \Delta)/v_2,$$

где v_1 , v_2 и v_B - скорости света соответственно в средах с показателем преломления n_1 , n_2 и в воздухе, равные $v_1 = v_B/n_1$; $v_2 = v_B/n_2$.

После преобразований получим

$$\Delta_B = (n_1 - n_2) \Delta, \quad (80)$$

т.е. деформация выходящего волнового фронта в некотором постоянном масштабе повторяет дефекты плоскости раздела двух сред.

В соответствии с принципом таутохронизма волновые деформации в пределах сечения данного пучка при прохождении через любую последующую систему не изменяются по величине, если эта система находится в однородной среде. Поэтому волновая деформация Δ_B , по формуле (80), сохранит свою величину в пределах данного светового пучка и по выходе из любой оптической системы, расположенной за пластинкой с дефектом Δ .

На деформацию выходящего волнового фронта W' влияют также такие типичные дефекты, как шероховатость поверхностей (рис. 35, а), цилиндричность (рис. 35, б), клиновидность (рис. 35, в) и сферичность (рис. 35, г). Первые два дефекта вызывают нерегулярные микронеровности и несферичность, а последние два – наклон и сферичность выходящего волнового фронта, а также хроматизм поперечный (рис. 35, в) и продольный (рис. 35, г).

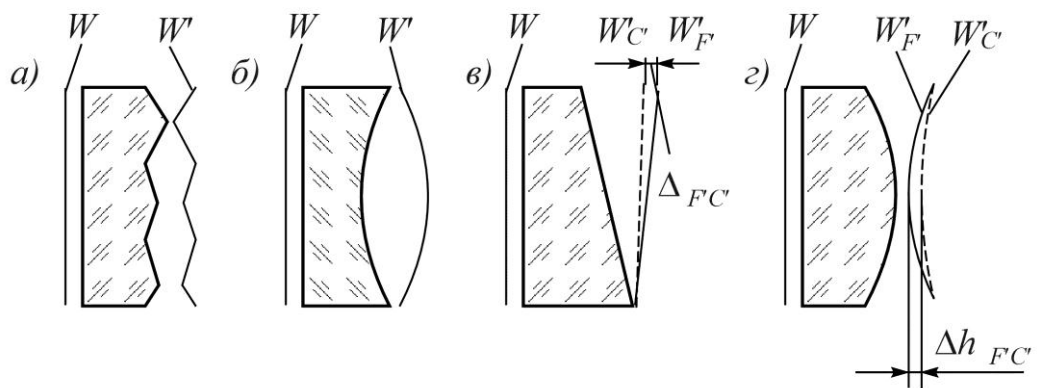


Рис.35. Прохождение плоского волнового фронта через оптические детали, имеющие типичные дефекты

Деформации и несферичность следует ограничить волновым допуском Δ_B ; тем же допуском можно регламентировать и хроматизм, ограничивая в пределах рабочего пучка наибольшее взаимное смещение Δ_{FC} выходящих волновых фронтов W'_F и W'_C (рис. 35, в) для линий F' и C' спектра водорода или наибольшую разность стрелок Δh_{FC} между ними (рис. 35, г).

Однако допуск на клиновидность деталей принято задавать в угловой мере, удобнее и допустимый угловой хроматизм $\Delta\delta_{F'C'}$ выражать в той же мере. Поскольку согласно принципу таутохронизма, при ходе через любую оптическую систему значение хроматизма в волновой мере $\Delta_{F'C'}$ не изменится, то

$$\Delta\delta_{F'C'} = \Delta_{F'C'} / D'_p, \quad (81)$$

где D'_p - диаметр рабочего выходного зрачка системы.

Допуск на угловой хроматизм в угловых секундах при $\Delta_{F'C'} \leq 0,1$ мкм будет равен

$$\Delta\delta''_{F'C'} \leq 20'' / D'_p. \quad (82)$$

При диаметре рабочего выходного зрачка $D'_p = 2$ мм угловой хроматизм допустим не более $10''$. В менее ответственных случаях задают более широкие допуски на угловой хроматизм – до $20''$ для каждой детали, вызывающей хроматизм.

При разделении суммарного допуска Δ_B (на прибор в целом) на допуски для отдельных источников первичных погрешностей учитывают, что некоторые из погрешностей имеют скалярный характер (например, хроматизм положения), а другие – векторный (например, поперечный хроматизм за счёт клиновидности деталей).

Среднее значение волнового допуска $(\Delta_B)_{ск}$ на каждый источник скалярных погрешностей числом $m_{ск}$ можно подсчитать по формуле

$$(\Delta_B)_{ск} = \Delta_B / \sqrt{m}. \quad (83)$$

Среднее значение волнового допуска $(\Delta_B)_{вк}$ на каждый источник векторных погрешностей подсчитывают по той же формуле (83), но с коэффициентом $k > 1$, учитывающим благоприятное влияние дисперсии первичных погрешностей по фазе на значение суммарной погрешности; обычно принимают $k = \sqrt{2}$. Поэтому

$$(\Delta_B)_{вк} = \sqrt{2} (\Delta_B / \sqrt{m}). \quad (84)$$

7.2 Формулы для расчёта допусков на оптические поверхности и детали, перпендикулярные к оси пучка лучей

Пользуясь формулой (80) можно рассчитать допуски на высоту Δ микронеровностей оптических поверхностей

$$\Delta = \Delta_B / (n_1 - n_2) = g \Delta_B. \quad (85)$$

Коэффициент g , обратный передаточному коэффициенту, который равен отношению частичной погрешности к первичной, зависит от разности показателей преломления сред, разделяемых оптической поверхностью: чем больше его (коэффициента g) численное значение, тем шире допуски можно

заданы на эту поверхность. Для границы стекло – воздух (при $n_1 - n_2 = 0,5$) $g_n = 2$; для поверхностей склейки стёкол (при $n_{ст} - n_{кл} = 0,05$) $g_{скл} = 20$; для зеркал с внешним отражением $g_o = 1/2$; для зеркал с внутренним (задним) отражением (при $n = 1,5$) $g_{оп} = 1/3$. Это для поверхностей, нормальных к оси падающего пучка лучей.

Как следует из формулы (85), допуски на микрошероховатости оптических поверхностей визуальных систем всегда, за редким исключением (поверхности склейки, наклонные зеркальные поверхности, поверхности, погружаемые в иммерсию и др.), должны обрабатываться с наименьшей шероховатостью.

Пользуясь тем же коэффициентом g , получим расчётную формулу для допуска на дефекты формы ΔN_p в числе интерференционных колец в пределах рабочего участка оптической поверхности детали:

$$\Delta N_p = \Delta h / (\lambda / 2) = g \Delta h_b / (\lambda / 2) = g \Delta N_b, \quad (86)$$

где ΔN_b - допуск на астигматизм и местные деформации выходящего волнового фронта в пределах рабочего пучка лучей, выраженный числом полудлин волны света, применяемого для освещения при контроле формы поверхностей под пробным стеклом; для белого света $\lambda = 0,55$ мкм.

Предельное значение допуска ΔN_b для визуальных систем в любом случае должно быть менее

$$\Delta N_b = \Delta h_b / (\lambda / 2) \leq 0,1 / 0,28 \leq 0,36 \text{ полосы.} \quad (87)$$

Коэффициент g в формуле (86) берётся соответственно типу поверхности.

Допуск на астигматичность (несферичность) поверхностей в пределах светового диаметра O_ϕ можно увеличить в квадрате отношения его к рабочему диаметру D_p пучка

$$\Delta N = N_p (O_\phi / D_p)^2 = g \Delta N_b (O_\phi / D_p)^2. \quad (88)$$

При задании допуска N на общее отклонение формы поверхностей часто исходят из удобства контроля несферичности ΔN , которая равна наибольшей разности числа полос $\Delta N = N_{max} - N_{min}$ в главных сечениях поверхности; она надёжно определяется, если общее число полос N не более чем в 3 – 5 (редко в 10) раз превышает допускаемую величину ΔN .

Допуск на клиновидность пластинок, развёрток призм, косину линз определяется по формуле

$$\theta = \frac{\Delta \delta_{F'C'} v_e}{n_e - 1} \frac{D'_p}{D} = \frac{\Delta \delta_{F'C'} v_e}{(n_e - 1) \gamma}, \quad (89)$$

где $\Delta \delta_{F'C'}$ – допуск на угловой хроматизм за окуляром прибора по формуле (81); D, D'_p – диаметры рабочего пучка лучей в месте расположения данной детали и рабочего выходного зрачка соответственно; их отношение равно

угловому увеличению γ оптической системы, стоящей за данной деталью; ν_e – коэффициент дисперсии Аббе.

Следует ещё иметь в виду, что в сходящемся ходе лучей клин вызывает также кому. Её значение в угловой мере за системой, расположенной за клином, можно вычислить по формуле [7, стр. 514]

$$\Delta\delta_k = -3\theta \frac{n^2 - 1}{2n} \sigma^2 \gamma, \quad (90)$$

где σ – апертурный угол пучка лучей в месте расположения клина.

Связь между отклонениями отдельных углов призм и клиновидностью θ_c , а также между пирамидальностью призмы π и клиновидностью θ_π легко находится из развёрток призм. Кроме того, при расчёте допусков на углы призм можно рекомендовать книгу [8].

Отклонение угла крыши $\Delta_{крш}$ от строго прямого угла вызывает двоение изображения, когда пучок световых лучей падает одновременно на обе её грани. Допуская двоение изображения за окуляром не более 20", допуск на отклонение угла крыши вычисляют по формуле

$$\Delta_{крш} \leq 20'' / 4n\gamma \cos \varepsilon_p, \quad (91)$$

где n – показатель преломления стекла призмы; ε_p – угол падения осевого луча на ребро крыши; γ – угловое увеличение системы, стоящей за призмой для осевой точки ребра крыши.

Допуск на децентрировку линзы из допустимого поперечного хроматизма равен

$$C \leq \Delta_{F'C'} \frac{\nu_e f'}{D}, \quad (92)$$

где $\Delta_{F'C'} = 0,1$ мкм – волновой допуск на хроматизм в пределах рабочего диаметра D линзы; f' – её фокусное расстояние.

Для линз, составляющих ахроматическую пару и близко расположенных друг к другу, допуски по формуле (92) получатся одинаковыми, так как по условию ахроматизации $\nu_1 f'_1 = -\nu_2 f'_2$. Децентрировка линз вызывает не только хроматизм, но и кому на оси и другие aberrации, что необходимо учитывать в ответственных системах.

Из формул (88) – (92) видно, что допуски на отдельные погрешности оптических поверхностей и деталей зависят от их местоположения в ходе лучей, в первую очередь – от диаметра D сечения рабочего пучка лучей: чем шире сечение рабочего пучка в месте расположения детали, тем строже все указанные допуски. В такой же зависимости от размера сечения рабочего пучка находятся и требования к материалам для деталей в отношении оптической однородности, двойного лучепреломления и т.д. Это заставляет для деталей, расположенных в широком сечении рабочего пучка (дальше от плоскости изображения), назначать материалы более высоких категорий,

чем для деталей, стоящих в узком пучке (ближе к плоскости изображения), для которых допустимо применять материалы пониженных категорий. Требования же к качеству полировки поверхностей и в отношении таких дефектов, как пузыри, камни, царапины, выколки, наоборот, возрастают с уменьшением сечения рабочего пучка. Самые строгие требования предъявляются к деталям и поверхностям, расположенным близко к плоскости изображения, т.е. в узких световых пучках; к таким деталям относятся сетки и коллективы.

7.3 Формулы для расчёта допусков на наклонные оптические поверхности и пластинки

Для наклонённой под углом плоскости, разделяющей среды с показателями преломления n_1 и n_2 и имеющей неровность высотой Δ , коэффициент g_ε , который связывает высоту неровности Δ с вызванной ею деформацией Δ_B проходящего волнового фронта, вычисляется из более сложного выражения (ср. с формулой (85))

$$g_\varepsilon = \frac{\Delta_\varepsilon}{\Delta_B} = - \frac{1}{n_1 \cos \varepsilon - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varepsilon}}. \quad (93)$$

Из общей формулы (93) для поверхностей различного типа можно получить:

для преломляющей поверхности, граничащей с воздухом ($n_1 = 1$; $n_2 = n$),

$$g_{\text{пв}} = - \frac{1}{\cos \varepsilon - \sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon}}; \quad (94)$$

для внутреннего зеркала ($n_1 = -n_2 = n$)

$$g_{\text{овз}} = - \frac{1}{2n \cos \varepsilon}; \quad (95)$$

для внешнего зеркала ($n = 1$)

$$g_{\text{ов}} = - \frac{1}{2 \cos \varepsilon}. \quad (96)$$

В табл.2 и на рис. 33 (в форме графиков) справочника [2 на стр. 90] приведены абсолютные значения коэффициентов g_ε для поверхностей трёх типов при $n = 1,5$, что позволяет упростить расчёт допусков.

Расчётные формулы (85) и (88) для допусков на микронеровности и несферичность сохраняют свой вид и для наклонных поверхностей, но значения коэффициента g_ε в них следует подставлять в соответствии с типом поверхности и углом наклона ε .

Наклонные плоские поверхности имеют два источника астигматизма. Кроме цилиндричности, астигматизм вызывается также и сферичностью наклонной поверхности, так как при наклонном падении пучка лучей кругового сечения на строго сферическую поверхность выходящий волновой фронт деформируется неодинаково: больше в плоскости падения (вдоль длинной оси рабочего участка эллиптической формы) и меньше в перпендикулярном направлении (вдоль короткой оси рабочего участка). Возникает астигматизм волнового фронта, равный наибольшей разности его стрелок.

Допуск на сферичность наклонной плоскости, определяемый числом интерференционных полос (колец) N_p , равен

$$N_p = \frac{g_\varepsilon}{k^2 - 1} \Delta N_B = G_\varepsilon \Delta N_B, \quad (97)$$

где k – отношение длин большой и малой осей рабочего участка эллиптической формы, а ΔN_B – допуск на астигматизм выходящего волнового фронта, выраженный числом полудлин волны света, применяемого для освещения при контроле формы поверхности пробным стеклом; для визуальных систем величина допуска ΔN_B не может превосходить 0,36 полосы.

Согласно ГОСТ 2.412 – 81, допуск N для некруглых деталей следует задавать вдоль наименьшего светового размера $l_{св. \min}$, поэтому

$$N = N_p (l_{св. \min} / D)^2, \quad (98)$$

где D – наибольший световой размер некруглой детали.

В случае призм, развёртка которых перпендикулярна к оси пучка, и зеркал с внешним отражением знаменатель в формуле (97) равен $k^2 - 1 = \text{tg}^2 \varepsilon$, и тогда получаем коэффициент G_ε , равный

$$G_\varepsilon = g_\varepsilon / \text{tg}^2 \varepsilon. \quad (99)$$

Допустимую клиновидность для наклонной пластинки можно рассчитать по формуле (89) и умножить полученный результат на коэффициент Q_ε (см. табл. 4 и рис. 33) [2], меньший единицы, учитывающий возрастание углового хроматизма с наклоном пластинки на угол ε , причём

$$Q_\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{n+1}{2n} \text{tg}^2 \varepsilon}. \quad (100)$$

Из табл. 2 и рис. 33 справочника [2] можно видеть зависимость требований к точности поверхностей и параллельности пластинок от типа поверхностей и угла их наклона. Учитывая, что чем меньше значения

коэффициентов g_ε и G_ε , а также Q_ε , тем строже эти требования, приходим к следующим выводам.

1. Требования к точности обработки (кривые g_ε для допусков на местные погрешности и микронеровности) внешних отражающих поверхностей, нормальных к оси пучка в 4 раза, а внутренних даже в 6 раз выше, чем к обработке преломляющих поверхностей, граничащих с воздухом. Однако по мере возрастания угла наклона ε поверхности коэффициенты g_ε изменяются неодинаково: для преломляющих поверхностей они уменьшаются (более чем вдвое при $\varepsilon = 90^\circ$), а для отражающих возрастают (до бесконечности при $\varepsilon = 90^\circ$). Это подтверждается известным фактом: при скользящем ходе лучей даже шероховатые (шлифованные) поверхности дают оптически правильное изображение.
2. Требования к сферичности плоских поверхностей (кривые G_ε) с увеличением угла наклона ε непрерывно и быстро ужесточаются независимо от типа поверхностей.
3. Требования к параллельности пластинок и развёрток призм с увеличением угла наклона ε ужесточаются (кривая Q_ε).

7.4 Задачи

202. Для испытания качества изображения оптической системы стереотрубы АСТ 10x45 решили воспользоваться штриховой мирой, расположенной перед трубой на расстоянии L . Изображение миры за окуляром можно рассматривать через дополнительную телескопическую трубку ДТ 4x16. Найдите величину астигматизма стереотрубы в волновой мере, если при перефокусировке с резкого видения вертикальных линий разрешаемой миры на резкое видение горизонтальных линий окуляр трубки ДТ пришлось сместить на 4 дптр.

203. Через круглое отверстие какого диаметра близорукий с миопией -5 дптр может резко видеть Луну?

204. Объясните, почему наблюдатель, смотрящий сквозь близко расположенное матированное стекло, ничего не видит, в то время как самого наблюдателя сравнительно хорошо видно, при наблюдении с другой стороны с большого расстояния?

205. Рассчитайте допуск на фокусность и клиновидность защитных стекол стереотрубы АСТ 10x45 из условия, чтобы при замене поврежденных стекол запасными не появлялись бы недопустимые по величине параллакс сетки и непараллельность оптических осей труб. Фокусное расстояние объектива стереотрубы $f'_{\text{АСТ}} = 270$ мм; допуск на параллакс сетки со стороны объектива $(\mathcal{G}_{об})_{\text{доп}} = 1$ угл. мин.

206. В стереотрубе вместо прямоугольной головной призмы иногда применяется плоское зеркало с наружным отражением. В каком случае требования к точности изготовления окажутся выше: для отражающей плоскости зеркала или гипотенузной грани призмы?

207. Рассчитайте допуски на плоское зеркало, применяемое для установки труб на бесконечность автоколлимационным методом. Какой стороной выгоднее поставить зеркало к объективу автоколлимационной трубы, чтобы меньше сказывались ошибки изготовления зеркала?

208. Рассчитайте допуски на внутреннее отражающее зеркало, стоящее неподвижно в параллельном ходе лучей перед зрительной трубой под углом 45° к ее оси.

К какой поверхности зеркала требования строже - к внутренней или к наружной? Увеличение трубы $\bar{\Gamma} = 10^x$, диаметр входного зрачка $d_p = 50$ мм.

209. Рассчитайте допуск на изготовление поворотного зеркала с внутренним отражением, которое стоит перед визирной трубой ($\bar{\Gamma} = 5^x$, $d_p = 30$ мм), если углы визирования по вертикали составляют $i = (-10^\circ) - (+30^\circ)$, а точность визирования должна быть не ниже $\Delta i = 0,001$ рад.

210. Рассчитайте допуски $N, \Delta N$ и θ на изготовление поворотной плоскопараллельной пластинки, используемой для установки коллиматора на бесконечность. Толщина пластинки 20 мм, диаметр объектива коллиматора 30 мм, наибольший угол поворота пластинки $i_{max} = \pm 45^\circ$.

211. Половинки куб - призмы имеют разрешающую способность не ниже $\varepsilon = 5''$. Чему будет равна разрешающая способность куб - призмы, составленной из этих половинок?

212. Защитное стекло стереотрубы АСТ 10×45 с одной стороны плоское, а с другой - цилиндрическое, вследствие чего за окуляром наблюдается астигматизм изображения в $0,2$ дптр. Вычислите величину цилиндричности поверхности ΔN в полосах.

213. Вследствие изгиба призмы Дове орудийной панорамы Герца ПГ4×16 отражающая грань призмы приобрела форму цилиндра, и за окуляром панорамы наблюдается астигматизм величиной $0,25$ дптр. Допустим ли астигматизм такой величины с точки зрения критерия Рэлея? Определите величину стрелки прогиба гипотенузной грани призмы Дове, если угол падения осевого луча на отражающую грань составляет $\varepsilon \approx 73^\circ$.

214. Разделительная пластинка-отражатель коллиматорного визира деформировалась - изогнулась по цилиндру. Как этот изгиб повлияет на качество изображения сетки С визира и на качество изображения предметов, наблюдаемых сквозь пластинку? Каков допустимый изгиб пластинки-отражателя?

215. При каком соотношении ширины b к длине l гипотенузной грани прямоугольная призма $AP - 90^\circ$, работающая как прямозрительная, будет иметь разрешающую способность одинаковую как по высоте, так и по ширине? Показатель преломления стекла призмы $n = 1,5$.

216. Можно ли для контроля ошибки прямого угла призмы с двумя отражениями (типа $BP - 180^\circ$) воспользоваться автоколлиматором (рис. 36) с окуляром Аббе? Как следует развернуть призму, чтобы ее контроль все же стал возможен на автоколлиматоре этого типа?

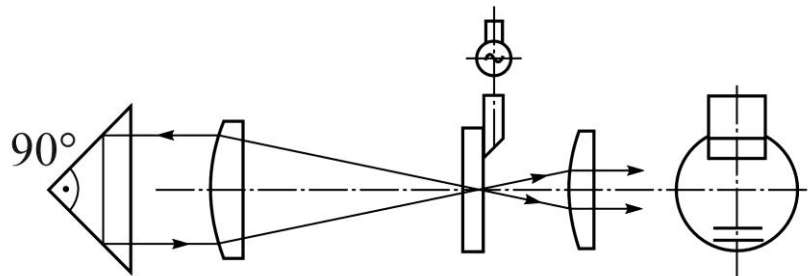


Рис.36. Контроль прямого угла призмы $BP-180^\circ$

217. Головное зеркало перископа вследствие неправильной установки плоской пружины (рис.37) изогнулось в пределах светового размера, на 1 мкм . Какой величины астигматизм при этом возникает за окуляром, если увеличение перископа равно 10^x , при входном зрачке $D_p = 50 \text{ мм}$?

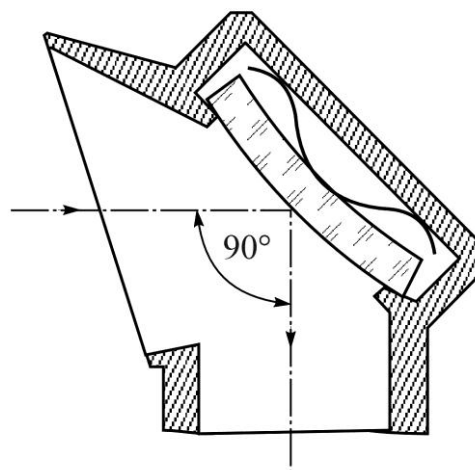


Рис. 37 Изгиб головного зеркала перископа

Допустим ли такой величины астигматизм в приборе, предназначенном для визуального наблюдения?

218. Какой толщины царапины видны на сетке окуляра бинокля $B 6 \times 30$, если фокусное расстояние его объектива $f'_{об} = 126 \text{ мм}$?

219. Подсчитайте диаметр наибольшего допустимого пузыря в объективе, призме, сетке и глазной призме бинокля $B 8 \times 30$.

220. Определите, угловой предел разрешения глаза наблюдателя, если при рассматривании 36-секторной миры с расстояния 10 м центральный круг диаметром 7 см ему будет казаться размытым?

Какого диаметра центральный круг будет казаться размытым наблюдателю с нормальным зрением? Проверьте разрешающую способность своих глаз, наблюдая миру, помещенную на с.135 книги [11].

221. Будет ли видна контрастно при обратном ходе лучей шкала с линейным интервалом $0,01 \text{ мм}$, спроецированная через микрообъектив $8 \times 0,20$ и наблюдаемая через микроскоп, составленный из того же объектива с прямым ходом лучей и окуляра $\overline{\Gamma}_{\text{ок}} = 4^{\times}$?

222. Проверяется качество изображения объектива $D: f' = 1:4,5$ по методу светящейся точки. Каково должно быть увеличение Γ дополнительного микроскопа? Какой объект (светящееся тело) можно назвать точечным?

223. Как проверить предел разрешения насадной линзы L , надеваемой на визирную трубу катетометра 17^{\times} увеличения, если, фокусное расстояние линзы $f'_{\text{л}} = 2000 \text{ мм}$, диаметр ее $\varnothing = 40 \text{ мм}$.

Подсчитайте расстояние между серединами соседних темных (или светлых) штрихов или число штрихов на миллиметр предельно разрешаемого элемента штриховой миры, используемой для определения предела разрешения линзы L . Предложите схему контрольной установки.

224. Прямоугольная призма, изготовленная из стекла с показателем преломления $n = 1,5$ и длиной катета 50 мм , работает как прямозрительная. Чему при этом равен предел разрешения призмы?

225. Теоретический предел разрешения равнобедренной прямоугольной призмы в плоскости главного сечения при наблюдении вдоль гипотенузной грани равен $\varepsilon = 22''$ при высоте призмы 10 мм . Вычислите величину показателя преломления n_g материала призмы.

226. При неточной установке в заданное положение строго плоского зеркала, расположенного в сходящемся ходе лучей, между линзовыми компонентами в оптической системе возникает множество существенных дефектов. Перечислите эти дефекты и приведите соответствующие формулы для вычисления их величин.

227. Объектив с относительным отверстием $D: f$, равным $1:4,5$, имеющий астигматизм, испытывается на оптической скамье. При перефокусировке вспомогательного микроскопа на $0,3 \text{ мм}$ ориентировка дифракционного изображения точки, имеющего форму эллипса, изменяется на 90° . Выразите величину астигматизма объектива в волновой мере.

228. Астигматизм $3,5 \text{ дптр}$, наблюдаемый за окуляром оптического прибора, переведите в волновую меру в пределах выходного зрачка диаметром d'_p . При каком диаметре выходного зрачка этот астигматизм окажется допустимым по критерию Рэлея? Нарисуйте схему установки, с помощью которой можно измерить астигматизм оптического прибора.

229. При каких условиях плоская отражающая поверхность, обработанная шлифованием по 8 классу шероховатости (по ГОСТу 2789 – 59) дает первоклассное по качеству оптическое изображение, если согласно

ГОСТу 2789-73 среднее арифметическое отклонение профиля для указанного класса обработки не превышает величины $Ra\ 0,4\ \mu\text{м}$? Не изменится ли качество изображения, если отражающую поверхность поместить в воду (смочить водой)?

230. Задайте допуски на плоские стекла защитных очков диаметром **40 мм**.

231. Преломляющий клин, который возникает в результате погрешностей изготовления или сборки (склейки) призм и пластинок, вносит множество существенных дефектов как в параллельном, так и в сходящемся ходе лучей. Перечислите эти дефекты и подтвердите их влияние соответствующими формулами.

Какие свойства и действия преломляющего клина находят полезное применение в оптических приборах? Приведите примеры таких устройств.

232. Известно, что величина сдвига, изображения в поле зрения и величина хроматизма, вызываемые клином, зависят от его расстояния l до плоскости изображения (рис. 38). Оба дефекта исчезают, если клин совместить с плоскостью изображения. На что же в последнем случае влияет клин, в чем проявляется его отклоняющее действие?

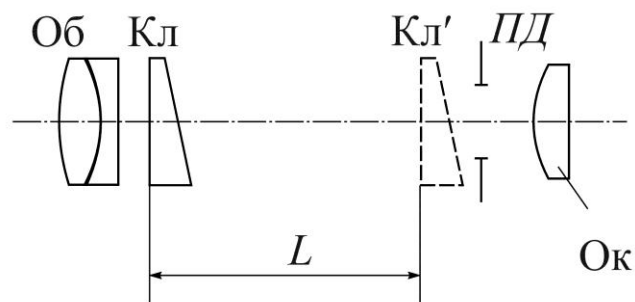


Рис.38. К анализу влияния клина на качество изображения в зависимости от его местоположения

233. В каком случае строже допуск на клиновидность защитного стекла головки угломерного прибора - при горизонтальном визировании или под углом i к горизонту, например, под углом $i = 45^\circ$? Сравните требования к защитному стеклу с требованиями к клиновидности и к пирамидальности головной призмы - какие допуски строже?

234. Рассчитайте допуск на клиновидность сменных светофильтров, находящихся от плоскости сетки визира **10x40** на расстоянии, равном одной пятой величины фокусного расстояния объектива, если точность визирования в пространстве предметов должна быть не ниже $\pm 10''$.

235. Рассмотрите причины возникновения паразитных изображений в призме Пехана и предложите способы борьбы с ними.

236. С помощью автоколлимационного микроскопа, составленного из объектива $8 \times 0,20$ и окуляра $\overline{\Gamma}_{\text{ок}} = 4^x$, рассматривают изображение шкалы Ш' с ценой деления **0,01 мм**, отраженное от плоского зеркала З (рис. 39).

Будет ли видно изображение шкалы Ш' достаточно контрастным? В каком случае это изображение получится более контрастным, когда конденсор проектирует нить лампы в плоскость шкалы Ш', или когда конденсор проектирует нить лампы в плоскость микрообъектива?

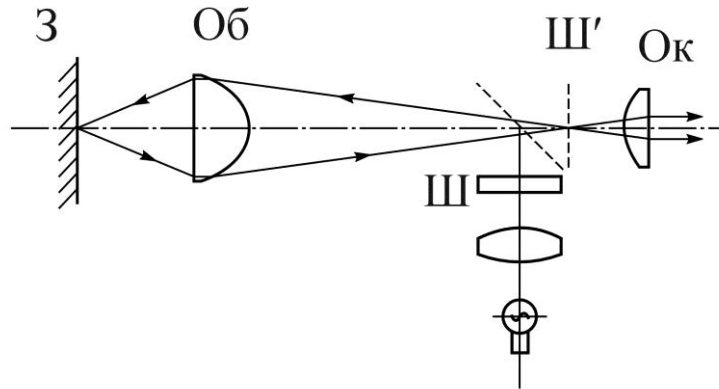


Рис.39. Схема рассматривания автоколлимационного изображения шкалы

237. Какая из схем головной части перископа (рис. 40, а, б), состоящей из объектива Об, коллектива К и плоского зеркала З, технологичнее в сборке и надёжней в эксплуатации? В схеме, изображённой на рис. 40,а, – меньше оптических деталей, поскольку объектив выполняет ещё и функцию защитного стекла ЗС.

Изделие, составной частью которого является перископ, предназначено для точного позиционирования объектов в плоскости горизонта. С этой целью перископ, представляющий собой визирную телескопическую систему, можно поворачивать вокруг вертикальной оси установочного устройства изделия и фиксировать через 60° .

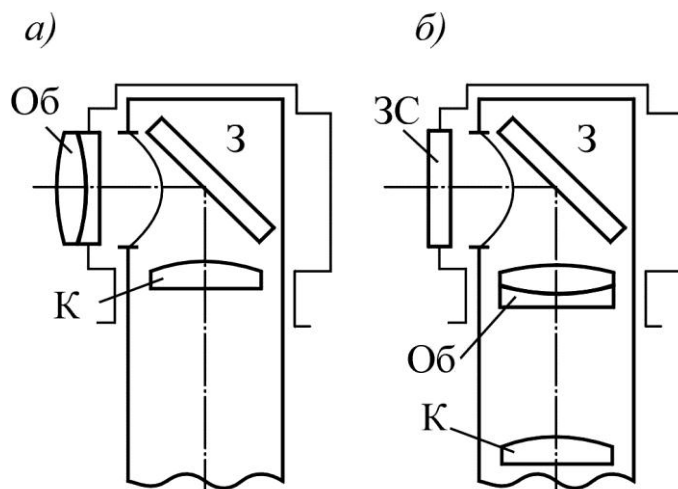


Рис.40. Две схемы головной части перископа

Особенности конструкции и эксплуатации изделия предопределили условия его сборки, при которых перед установкой в изделие перископ должен быть полностью отъюстирован, поскольку в собранном изделии доступ к оптическим элементам системы становится невозможным. Задача юстировки перископа усложняется наличием в его оптической схеме ещё и вспомогательной автоколлимационной системы, плоскость визирования

которой должна быть параллельна плоскости визирования основной системы.

Однако установку перископа в изделие можно осуществить только при снятой головке, поскольку трубу перископа приходится просовывать через сальниковые герметизирующие уплотнители. После этой операции на цилиндрическую поверхность корпуса снова устанавливают головную часть, содержащую объектив (защитное стекло) и сигнальные фонари. Разворотом головки вокруг оси трубы вновь осуществляют согласование плоскостей визирования двух систем по азимуту и фиксируют положение головки перископа стопорением.

238. Какие дефекты автоколлимационной трубки, схема которой дана на рис.63 в книге [2, с.191], могут вызвать следующие погрешности сборки:

- а) взаимный разворот прямоугольных призм на плоскости склейки;
- б) взаимный сдвиг прямоугольных призм в плоскости главного сечения;
- в) разворот призмы - куб вокруг оси трубы;
- г) разворот призмы - куб вокруг оси, перпендикулярной главному сечению;
- д) поступательные смещения призмы - куб?

Какие подвижки призмы - куб действительны и что они вызывают?

239. Что лучше видно - поверхность Луны с Земли, или наоборот, поверхность Земли с Луны?

240. Какие дефекты будут наблюдаться за окуляром визирной трубы при смещении реальной (имеющей погрешности изготовления и дефекты материала) плоскопараллельной пластинки вдоль оси трубы от ее объектива до плоскости сетки?

241. Увеличение телескопической системы можно повысить скачкообразно тремя способами:

- 1) включением телескопической насадки перед системой;
- 2) включением телескопической трубки за системой;
- 3) сменой окуляров - включением более короткофокусного окуляра.

Изменяются ли при этом требования к точности изготовления оптических деталей основной системы?

242. Будет ли изменяться качество изображения и разрешающая способность оптической системы панорамы при панорамировании (обзоре по горизонту) и при визировании по высоте?

243. Какой величины отклонения внешней поверхности роговицы глаза человека от правильной формы вызывают астигматизм в 0,1 диоптрии?

244. Пользуясь принципом таутохронизма, найдите величину деформации, которую приобретает плоский волновой фронт W после отражения от задней плоской зеркальной поверхности, имеющей местную неровность высотой Δ в двух случаях:

- а) при нормальном падении на входную грань зеркала (рис. 41,а);

б) при падении лучей на входную грань под произвольным углом ε (рис. 41,б).

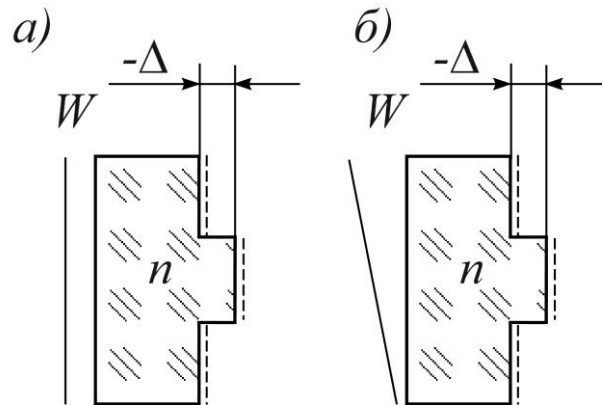


Рис.41. К нахождению величины деформации волнового фронта после отражения от задней зеркальной поверхности

245. Какие примерно допуски следует задать на плоские зеркала автоколлимационных окуляров (рис. 42, а – в)?

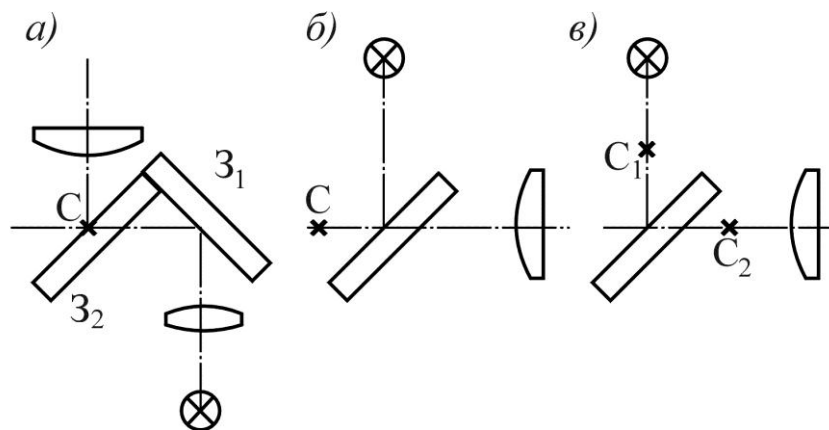


Рис.42. К заданию допусков на зеркала автоколлимационных окуляров

246. Почему преломляющая призма не окрашивает изображений предметов, близко к ней расположенных?

247. Предложите схему наблюдательной трубы большого увеличения и высокого качества изображения, которая позволяла бы наблюдать через закрытое окно с двойными рамами, если расстояние между оконными стеклами **20 см**.

248. К каким деталям оптической системы интерферометра Кестерса (рис. 43) выше требования в отношении точности изготовления и качества изображения?

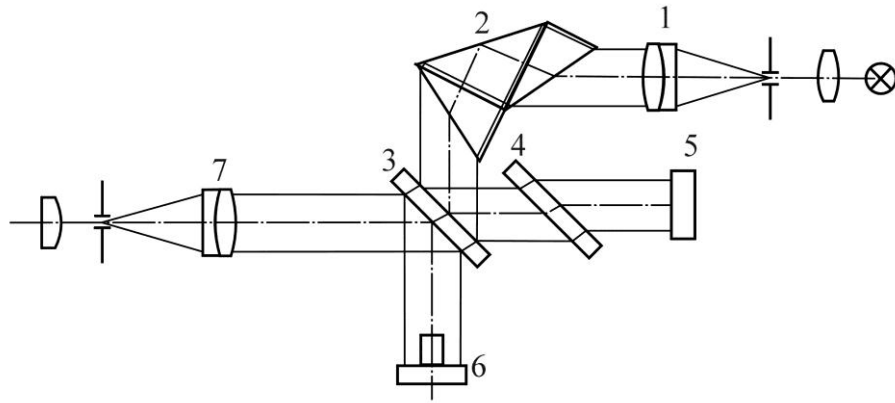


Рис.43. К анализу требований к точности изготовления деталей интерферометра Кестерса

249. Рассчитайте допуск на клиновидность защитного стекла и допуск на клиновидность (разность острых углов) качающейся головной прямоугольной призмы угломерного прибора перископического типа, который предназначен для измерения вертикальных углов в пределах $i = (-15^\circ) \div (+75^\circ)$ с точностью до $30''$. Защитное стекло наклонено к отвесу на угол $\omega = 30^\circ$. Формула для угла отклонения луча клином имеет вид

$$\delta_i = \theta(n_e - 1) \left[1 + \frac{n_e + 1}{2n_e} \cdot \text{tg}^2 i \right].$$

Найдите также допуск на клиновидность защитного стекла при ходе визирной оси вне главного сечения и допуск на пирамидальность головной призмы.

250. Рассчитайте допуски на изготовление пентапризмы, если она должна отклонять выходящие лучи по отношению к падающим строго на 90° с допуском $\pm 10''$ и не иметь хроматизма более $5''$.

251. Рассчитайте допустимую величину воздушного промежутка перед клином в башмачной призме, если увеличение окуляра $\Gamma_{\text{ок}} = 8^\times$, а диаметр выходного зрачка $D'_p = 5$ мм.

252. Определите диаметр и фокусное расстояние объектива, установленного на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) и предназначенного для наблюдения объектов на Земле, если необходимо разрешить на поверхности Земли две точки, расположенные на расстоянии 0,5 м. Изображение, формируемое объективом, регистрируется на ПЗС-матрице с размерами ячейки (шагом) 10 микрон. Высота полёта ИСЗ – 1000 км.

253. Наблюдение с помощью бинокля 8×40 ведётся за предметами, расположенными на расстоянии 3 км от наблюдателя.

Определите линейный предел разрешения на объекте, если угловой предел разрешения глаза $\psi = 3'$ (угловые минуты).

254. Лазер излучает поток $\Phi_e = 62,8$ Вт с углом расходимости $2\omega = 0,02$. Определите энергетическую освещённость, создаваемую лазером

совместно с телескопической системой увеличения $\Gamma = 0,1^\times$, на расстоянии $p = 1$ км, если коэффициент пропускания оптической системы $\tau_{oc} = 0,9$, а атмосферы – $\tau_a = 0,5$.

255. Требуется подобрать микроскоп (объектив и окуляр) для наблюдения минимальной структуры микрообъекта размером 1 мкм.

256. Определите обнаружительную способность телескопа $D_{ост}$ (т.е. величину, обратную минимальной величине облучённости входного зрачка) при фотоэлектрической регистрации звёзд.

Характеристики объектива телескопа:

фокусное расстояние $F_{об}' = 4000$ мм; относительное отверстие – $D/F_{об}' = 1 : 4$; коэффициент пропускания $\tau_{oc} = 0,8$. В задней фокальной плоскости объектива установлен болометр с интегральной чувствительностью $S = 500$ В/Вт, порог чувствительности болометра $U = 1,5$ мкВ.

257. Для установки трубы на бесконечность автоколлимационным методом используется плоское зеркало. Найдите допустимую сферичность зеркала (наименьший радиус кривизны поверхности), если диаметр входного зрачка трубы равен 50 мм. Определите величину общей ошибки поверхности – N . Длина волны излучения $\lambda = 0,5$ мкм.

258. Камера-обскура представляет собой тёмный ящик прямоугольной формы, в одной из стенок которого сделано отверстие. На противоположной стенке образуется изображение предметов, находящихся снаружи. Определите максимальный диаметр отверстия, обеспечивающий наилучшее качество изображения, если расстояние от отверстия до экрана составляет 25 см.

259. Пользуясь принципом таутохронизма, докажите, что строго плоскопараллельная пластинка толщиной **100 мм**, показатель преломления которой линейно меняется по высоте на 10^{-5} на протяжении **1 см**, действует как преломляющий клин, отклоняющий лучи на угол $\varphi = 20''$.

260. Почему деформация волнового фронта в пределах зрачка не меняется при прохождении через оптическую систему?

261. На какой дефект головной призмы AP-90° угломерного прибора панорамического типа ужесточится допуск, если её поворотом осуществляется визирование не только по горизонту, но и по вертикали?

262. На какую поверхность призмы Дове следует назначить наиболее жёсткий допуск на сферичность N ?

263. Какого размера точечную диафрагму надо поставить в коллиматор, имеющий диаметр 100 мм и фокусное расстояние объектива 1000 мм, для получения дифракционного изображения точки?

264. Определите диаметр входного зрачка D и фокусное расстояние f' объектива телескопа, предназначенного для мониторинга поверхности Земли с борта искусственного спутника Земли (ИСЗ), если требуемый

предел разрешения δ объектива на поверхности Земли составляет 50 см, а наибольшая высота H орбиты ИСЗ равна 1000 км. В качестве приёмника излучения в телескопе предполагается применить ПЗС-матрицу с шагом ячеек 10 мкм. Для расчётов принять, что длина волны используемого излучения составляет $\lambda = 0,5$ мкм. Кроме того следует учесть, что приземной слой атмосферы простирается на высоту не более 10 км.

265. В процессе съёмки движущегося объекта произошло увеличение смаза изображения в 4 раза по сравнению с первоначальным значением, что ухудшило разрешение снимка и сделало его неприемлемым. Что нужно предпринять для получения прежней разрешающей способности при сохранении той же экспозиции и скорости движения объекта?

266. Какой наименьшей ширины штрихи можно нанести на измерительную линейку, наблюдаемую невооружённым глазом, если диаметр зрачка равен 2 мм?

267. Какие характеристики должен иметь объектив двухкоординатного измерительного микроскопа для того, чтобы случайная погрешность наведения $\Delta u_{\text{сл.п}}$ не превышала величины 0,5 мкм?

268. Необходимо подобрать отсчётный микроскоп к гониометру, если погрешность одного отсчёта не должна превышать величины 1". Диаметр лимба равен 140 мм.

269. Лазер с мощностью Φ_e с углом расходимости 2ω создаёт облучённость E_e на объекте, расположенном на расстоянии r от лазера. Каким увеличением должна обладать телескопическая система, устанавливаемая после лазера, чтобы увеличить облучённость объекта в 16 раз? Энергетическими потерями пренебречь. Какого типа телескопическую систему необходимо применять с лазерами высокой мощности?

270. Луна облучается импульсным лазером, имеющим мощность в импульсе $\Phi_e = 10^9$ Вт. Сравните отражённый поток излучения от поверхности Луны, имеющей коэффициент отражения $\rho_{\text{л}} = 0,07$, и от уголкового отражателя, доставленного на неё. Диаметр пучка лазера $d_{\text{л}} = 10$ мм, угол расходимости излучения $\alpha_{\text{л}} = 20'$ (угл. мин.). Излучение лазера коллимируется телескопической системой с выходным зрачком $D' = 25$ см и угловым увеличением $\gamma = 250^{-1}$. Рассчитайте отражённый поток, падающий на телескопическую систему, от пятна Луны, освещённого лазером, и от отражателя, если $D_{\text{отр}} = 50$ см, $\alpha_{\text{отр}} = 4''$ (угл. сек.), $\ell_{\text{л-з}} = 400000$ км. Потерями в атмосфере и в телескопической системе пренебречь.

271. Звезда шестой звёздной величины, ещё обнаруживаемая невооружённым глазом, создаёт на его входном зрачке освещённость $E = 10^{-8}$ лк. Каким увеличением должен обладать оптический телескоп, чтобы обеспечить наблюдение звезды двенадцатой звёздной величины,

блеск которой оценивается освещённостью на входном зрачке телескопа величиной $E=10^{-12}$ лк. Потерями в атмосфере и телескопе пренебречь.

272. У монохроматора в качестве диспергирующего элемента используется плоская отражательная дифракционная решётка, у которой нарезанная часть равна 75×75 мм², а число штрихов составляет 1200 штр/мм. Если измерения ведутся в первом порядке, определите разрешающую способность прибора и теоретический предел разрешения на длине волны 400 нм.

273. Основой созданных Антони ван Левенгуком однолинзовых (луповых) микроскопов являлась лупа в форме шара – концентрическая линза, – у которой центры кривизны поверхностей совпадали. Крохотные линзы для своих микроскопов Левенгук изготавливал из стеклянных шариков, расплавляя стекло в огне, а затем доводил их форму до идеальной, обеспечивающей увеличение объекта до 300 крат [12]. Подсчитайте диаметр такой линзы – шара, если её видимое увеличение $\Gamma = 160^\times$, а показатель преломления стекла $n = 1,5$.

274. Определите наименьшее увеличение микроскопа для рассмотрения (с разрешением) минимальной структуры объекта размером 10^{-3} мм.

275. К призме номинальной формы с двумя отражениями типа **БР – 180°** добавили клиновидную пластинку с преломляющим углом θ , ребро которой параллельно ребрам призмы. Какие при этом возникнут дефекты, если клин:

- 1) изготовлен из стекла той же марки, что и призма;
- 2) изготовлен из стекла другой марки;
- 3) развернут на 90° так, что его ребро стало параллельно главному сечению призмы?

Что Вы будете наблюдать, рассматривая собственное изображение в призме и вращая при этом клин, положив его на гипотенузную грань призмы?

276. В ГОСТе 15114-78 «Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения» в пункте 2.5 сказано: «Угловое увеличение вспомогательной зрительной трубы ($\Gamma_{\text{всп}}$), устанавливаемой за испытуемой телескопической системой для обеспечения необходимого увеличения элементов наблюдаемой штриховой миры, следует определять по формуле

$$\Gamma_{\text{всп}} = K \cdot \frac{D}{\Gamma_{\text{исп}}},$$

где K – коэффициент, равный $(1,2 - 2,5)$ мм⁻¹; $\Gamma_{\text{исп}}$ – угловое увеличение испытуемой телескопической системы; D – диаметр входного зрачка испытуемой телескопической системы, мм».

Определите для рекомендуемой величины $\Gamma_{\text{всп}}$:

- 1) диаметр выходного зрачка за окуляром вспомогательной трубки;
- 2) угловое расстояние между серединами соседних штрихов предельно разрешаемого элемента штриховой миры.

277. Что будет происходить с разрешающей способностью светосильного фотографического объектива при диафрагмировании его от максимального значения апертурной диафрагмы до минимального?

278. В микроскопе Биолам-70-Р используется следующий комплект сменных объективов - $8\times 0,20$; $40\times 0,65$ и $90\times 1,25$ и окуляров с увеличениями $7\times$, $10\times$ и $15\times$. При каком сочетании объективов и окуляров требования к точности изготовления полупентапризмы будут наиболее строгими? Какие допуски необходимо задать для изготовления призмы? Рассчитайте все необходимые допуски на полупентапризму в пределах рабочего пучка лучей, если расстояние от выходной грани призмы до плоскости изображения $\ell = 120\text{мм}$.

279. В интерферометре Рэлея, применяемом главным образом для измерения показателей преломления жидкостей и газов методом сравнения, для наблюдения чрезвычайно узких интерференционных полос, ширина которых может составить, например $0,008\text{ мм}$, требуется весьма большое увеличение [15]. Обычно, в таком случае, в качестве окуляра применяют цилиндрическую стеклянную палочку диаметром $2\text{--}3\text{ мм}$, которая создаёт увеличение, требуемое для измерения, в направлении, перпендикулярном к полосам, а вдоль полос (где увеличение не требуется) оно остаётся равным единице. Подсчитайте увеличение, создаваемое такой цилиндрической линзой (окуляром), приняв показатель преломления стекла, равным $n=1,5$.

280. В фокальный узел коллиматора, содержащего объектив с фокусным расстоянием $f' = 1500\text{ мм}$ и относительным отверстием $1:10$, установлен тест-объект в виде точечной диафрагмы, которая подсвечивается лазером с длиной волны излучения $\lambda = 0,632\text{ мкм}$. Выходящий из объектива коллиматора пучок падает на плоскопараллельную стеклянную пластину, установленную под углом $\varepsilon = 30^\circ$ к визирной оси коллиматора на расстоянии $L = 100\text{ мм}$ от объектива. Световой диаметр пластины соответствует диаметру выходного зрачка объектива, её толщина $d = 20\text{ мм}$, а показатель преломления материала $n = 1,5$.

Если волновой фронт, падающий на пластину, имеет кривизну, то при интерференции волновых фронтов, отражённых от поверхности пластины, на экране, удалённом от пластины на расстояние $0,5\text{--}2\text{ м}$, наблюдаются интерференционные полосы. С какой погрешностью такая схема контроля позволит установить тест-объект относительно фокальной плоскости объектива коллиматора?

7.5 Примеры решения задач

1) Докажите, что строго плоскопараллельная пластинка толщиной $h = 100$ мм, показатель преломления которой линейно меняется по высоте на величину 10^{-5} на протяжении 1 см, действует как преломляющий клин, отклоняющий лучи на угол $\psi \approx 14''$ (угл. сек.).

Решение. Если среда, в которой распространяется луч, неоднородна, то луч отклоняется от прямой линии и искривляется. Кривизна луча обычно определяется исходя из принципа Ферма. Отметим также, что если $\varepsilon = 0$, т.е. луч падает нормально к поверхностям равных значений n , то он не претерпевает отклонения.

Рассмотрим три бесконечно тонких слоя толщиной dh с показателями преломления $n - dn$, n , $n + dn$. Пусть \mathbf{N} – орт нормали к поверхностям раздела, и падающий луч образует угол ε с нормалью. При переходе через границу между слоями луч преломляется по закон $(n - dn) \sin \varepsilon = n \sin (\varepsilon - d\varepsilon)$, откуда $d\varepsilon = \frac{dn}{n} \operatorname{tg} \varepsilon$. То есть луч повернулся на угол $d\varepsilon$.

Достигнув следующей границы, луч претерпевает такое же отклонение. Напомним, что радиус кривизны дуги (кривой, по которой отклонится луч, пересекая слои) определяется формулой $R = ds/d\alpha$, где ds – приращение дуги, а $d\alpha$ – приращение угла, образуемого нормалью с постоянным направлением.

Если слой имеет толщину dh , то соответствующая этому слою длина дуги равна $dh / \cos \varepsilon$; поэтому $R = ds / d\alpha = dh / \cos \varepsilon \cdot d\alpha = \left(\frac{dh}{dn} \right) \cdot \frac{n}{\sin \varepsilon}$.

Для кривизны траектории имеем $\frac{1}{R} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dh} \cdot \sin \varepsilon$,

где dn/dh – есть градиент n .

Как видно из полученной формулы максимальная кривизна получается при $\varepsilon = 90^\circ$, т.е. когда луч падает параллельно поверхностям равных значений n . Но и при отклонении от этого направления на $15^\circ - 20^\circ$ $\sin \varepsilon$ остаётся близок к единице. Следовательно, для решения задачи можно воспользоваться формулой

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dh}.$$

Если луч пробегает путь e , то он поворачивается на угол ψ , равный e/R . Поскольку радиус дуги достаточно велик приравняем путь e луча толщине h пластинки. Таким образом, отклонение ψ луча составит

$$\psi = \frac{h}{R} = \frac{h}{n} \cdot \frac{dn}{dh} = \frac{100 \text{ мм} \cdot 10^{-5}}{1,5 \cdot 10 \text{ мм}} 206265'' \approx 14''.$$

Ответ: Плоскопараллельная пластинка из неоднородного стекла действует как клин с углом отклонения $\psi \approx 14''$.

2) Рассчитайте допуск на клиновидность поворотной плоскопараллельной пластины, используемой в качестве микрометра перед объективов визирной трубы ППС-11 с фокусировкой в пределах от торца трубы до 30 м при считывании долей делений миллиметровой шкалы с точностью до $\Delta_0 = \pm 0,01$ мм. Увеличение трубы $\Gamma = 26^\times$ при диаметре входного зрачка $D_p = 25$ мм. Наибольший угол поворота пластины $i_{\max} = \pm 8^\circ$.

Решение: Из допустимого значения хроматической аберрации $\Delta\delta_{F'C'} = 10''$ при наибольшем угле поворота пластины по формулам (89) и (100), принимая $\varepsilon = i_{\max}$, находим

$$\theta_\varepsilon = \theta \cdot Q_\varepsilon = \frac{\Delta\delta_{F'C'} \cdot \nu_e}{(n_e - 1)} \cdot \frac{D'_p}{D_p} Q_e = \frac{10'' \cdot 64}{0,5183} \cdot \frac{1}{25} Q_e = 49'' \cdot 0,985 \approx 48''.$$

Такая клиновидность пластины оптического микрометра вызовет несимметричный (непропорциональный) сдвиг изображения шкалы при повороте пластины, а, следовательно, и ошибку отсчёта, которая в наихудшем случае в соответствии с формулой (63) составит

$$\Delta' = \Delta\delta_\varepsilon \cdot l_{\max} = \theta_\varepsilon \frac{n^2 - 1}{2n} \operatorname{tg}^2 \varepsilon_{\max} \cdot l_{\max} \approx \pm 0,06 \text{ мм}.$$

Поскольку полученная величина в 6 раз превосходит допустимую погрешность отсчёта Δ_0 , допуск на клиновидность пластины не должен превышать $\theta_{\text{доп}} \leq 8''$.

Ответ: Допуск на клиновидность поворотной пластины оптического микрометра не должен превышать $8''$ (угл. сек.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1982. – 237 с.
2. Погарев Г.В., Киселёв Н.Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 260 с.
3. Захарьевский А.Н. Контроль оптических систем и приборов. Вып. 2. ЛИТМО, 1946.
4. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1968. – 292 с.
5. Технология оптических деталей: Учебник для оптических специальностей технических вузов / Под ред. М.Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1978. 415 с.
6. Тудоровский А.И. Теория оптических приборов. – М.; Л.: изд.во АН СССР. – Ч.1 – 1948. – 661 с.
7. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.
8. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение, 1989. – 221 с.
9. Справочник конструктора оптико-механических приборов. В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин и др.; Под общ. ред. В.А. Панова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
10. Русинов М.М. Юстировка оптических приборов. М.: Изд. «Недра», 1969. – 328 с.
11. Ельников Н.Т., Дитев А.Ф., Юрусов И.К. Сборка и юстировка оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1974. – 348 с.
12. Зверев В.А., Латыев С.М., Тимошук И.Н. История и методология науки и производства в оплотехнике. Опорный конспект лекций. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 98 с.
13. Прикладная оптика: Учеб. пособие для приборостроительных специальностей вузов / Л.Г. Бебчук, Ю.В. Богачев, Н.П. Заказнов и др.; Под общ. ред. Н.П.Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
14. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1952. – 296 с.
15. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.
16. Черемисин М.С., Ардасенов В.Д., Кольцов В.П. Нивелиры с компенсаторами (Устройство, исследование, применение). М.: «Недра», 1978. – 142 с.
17. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники излучения / Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 395 с.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ФОТОНИКИ И ВИДЕОИНФОРМАТИКИ

Достижения в оптической науке, технике и технологиях за последние годы способствовали появлению нового направления – фотоники. Этот термин охватывает область науки и техники, связанную с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах.

На рубеже XX – XXI веков электронные информационные технологии достигли фундаментальных и технических пределов производительности при продолжающемся росте потребительского спроса на скорость и объем обрабатываемой и передаваемой информации. Решение данной проблемы потребовало разработки нового поколения информационно-телекоммуникационных систем, основанных на технологиях фотоники. В фотонике появилось новое динамично развивающееся направление, определяющее прогресс мировой науки и техники, – оптоинформатика. Под оптоинформатикой понимают область науки и техники, связанную с исследованием, разработкой, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий, приборов и устройств, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации.

Изучение фотоники основывается на знании принципов формирования, преобразования, анализа изображений, теории построения информационных систем. Интеграция фотоники и компьютерных технологий позволяет создавать методы, которые возможно реализовать исключительно средствами компьютерной фотоники, обеспечивая развитие технологий качественно нового уровня.

По многим направлениям фотоники и оптоинформатики Россия находится на уровне промышленно развитых стран (интегральная оптика, системы приема, обработки и отображения информации и др.), а по

некоторым – даже опережает. Приоритетными направлениями являются: волоконная оптика (работы академика Дианова Е.М. – ИОФ РАН), голография (академик Денисюк Ю.Н. – ГОИ им. С.И. Вавилова), полупроводниковые лазеры (академик Алферов Ж.И – ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе), полифункциональные оптические материалы (академик Петровский Г.Т. – ГОИ им. С.И. Вавилова) и др.

Ввиду большого научного и практического значения направления «Фотоника и оптоинформатика», а также спроса на него на потребительском рынке, в 2002 г. в СПбГУ ИТМО был организован факультет Фотоники и оптоинформатики под руководством доктора физ.-мат. наук, профессора С.А. Козлова. По инициативе профессорско-преподавательского состава, начиная с 2005 года, на факультете стала работать выпускающая кафедра компьютерной фотоники, которую возглавил доктор технических наук, профессор И.П. Гуров.

История кафедры началась в 1946 году. На всех этапах развития результаты научных исследований, проводимых сотрудниками кафедры, неизменно использовались в учебном процессе. Совершенствовались направления подготовки студентов, изменялось название кафедры, но всегда кафедра гордилась своими выпускниками.

Выпускники кафедры занимают видное место в оптической науке: академик РАН Ю.Н. Денисюк, изобретатель трехмерной голографии; член-корр. РАЕН, профессор Н.Г. Бахшиев, известный специалист в области спектроскопии межмолекулярных взаимодействий; Заслуженный деятель науки РФ, профессор Г.Н. Дульнев, крупный ученый в области теплофизики, долгие годы бывший ректором ЛИТМО; профессор И.М. Нагибина, исследования которой в области физической оптики получили широкое признание.

Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка профессионалов в области компьютерной фотоники. Направление работы кафедры определяется развитием информационных технологий и компьютерных систем в области формирования, синтеза, обработки и анализа изображений на основе интеграции эффективных компьютерных систем с системами фотоники. Проводимые исследования в области компьютерной обработки когерентных и некогерентных изображений обеспечивают решение научно-технических задач

оптической томографии, цифровой голографии, синтеза, анализа, распознавания и классификации изображений.

Научным консультантом работ кафедры в области компьютерной обработки изображений – иконики – является член-корреспондент РАН М.М. Мирошников.

Кафедра проводит работы в рамках международных научных проектов в сотрудничестве с ведущими зарубежными университетами, институтами и исследовательскими лабораториями Италии, Финляндии, Франции, Германии, Великобритании, Японии, США и других стран в области оптической когерентной томографии для биомедицинских исследований, цифровой голографии для исследования микро- и наноструктур, трехмерной фотографии микро- и макроскопических объектов, гиперспектральной обработки изображений.

В последнее время на кафедре активно развивается новое направление – видеоинформатика. Ввиду этого в 2010 году кафедра была переименована в кафедру компьютерной фотоники и видеоинформатики.

В 2011 году Университет получил статус Национального исследовательского университета, в этом есть и заслуга преподавательского коллектива кафедры компьютерной фотоники и видеоинформатики. Эти обстоятельства позволяют обеспечивать и в дальнейшем подготовку высококлассных востребованных на рынке специалистов в области компьютерной фотоники и видеоинформатики.

Бурбаев Амир Маруанович

Сборка, юстировка и контроль опико-электронных приборов

Сборник задач

**Учебное пособие для самостоятельной работы студентов по курсу
«Сборка, юстировка и контроль опико-электронных приборов»**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 25 экз.

Отпечатано на ризографе