

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия»

О. К. Ушаков

ТЕОРИЯ ЮСТИРОВКИ

Учебное пособие по курсу «Теория юстировки»

для студентов

специальности 200203 – «Оптико-электронные приборы и системы»

Новосибирск

СГГА

2009

УДК

Рецензенты:

Ушаков О. К.

Теория юстировки: учеб. пособие для вузов/ О. К. Ушаков – Новосибирск: СГГА, 2009. – с.

Книга является учебным пособием для студентов специальности 200203 – «Оптико-электронные приборы и системы» и рекомендуется для использования в процессе изучения учебной дисциплины «Теория юстировки». Может быть полезна для начинающих инженеров и научных работников, специализирующихся в области приборостроения оптотехники.

В настоящем пособии изложены вопросы

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

УДК

©ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА), 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.....	5
1.1 Особенности оптических приборов	5
1.2 Классификация оптических приборов	6
2. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	13
3. ОСНОВНЫЕ БАЗЫ ОПТИЧЕСКИХ УЗЛОВ И СИСТЕМ.....	16
4. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЮСТИРОВКИ.....	23
5. ОСНОВНЫЕ КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ ПРИБОРЫ	40
6. ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	84
7. ПАРАЛЛАКС В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ.....	94
8. ЮСТИРОВКА МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	106
9. ЦЕНТРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И СИСТЕМ	112
10. ЦЕНТРИРОВКА ОДИНОЧНЫХ ЛИНЗ.....	120
11. ЦЕНТРИРОВКА ЛИНЗ И БЛОКОВ ЛИНЗ В ОПРАВАХ.....	125
12. ЦЕНТРИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ТРУБ И КОЛЛИМАТОРА	128
13. ЮСТИРОВКА ОКУЛЯРОВ БИНОКУЛЯРНЫХ ПРИБОРОВ	130
14. ЮСТИРОВКА БИНОКУЛЯРНОГО ПЕРИСКОПА.....	141
15. ЮСТИРОВКА ОБЪЕКТИВОВ ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ И МИКРООБЪЕКТИВОВ....	159
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	164

ВВЕДЕНИЕ

Современные оптические приборы играют важную роль в народном хозяйстве. Расширяются сферы применения оптических приборов. Постепенно повышаются требования к точности, быстродействию, информативности и надёжности работы. Это усложняет конструкции приборов, повышает требования к технологии изготовления, особенно к сборке и юстировке.

Для решения этих задач большое значение имеет изучение основ юстировки отдельных оптических узлов и приборов в целом. Возможность и простота юстировки оптического прибора является одним из важнейших критериев технологичности конструкции прибора.

Материал, представленный в данном учебном пособии, окажет помощь при изучении процесса юстировки оптико-механических приборов (ОМП). Изложение материала основано на курсах «Основы оптики», «Прикладная оптика», «Оптические измерения», «Оптические и оптико-электронные приборы и системы». Только поняв, как работает прибор, для каких целей он служит, можно приступить к разработке методики его сборки и юстировки. Поэтому при изложении материала будут повторяться основные положения геометрической оптики и других дисциплин.

1. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1.1 Особенности оптических приборов

Оптическим прибором называется прибор, основная функция которого выполняется при помощи оптической системы.

Наличие в приборе оптической системы служит необходимым, но недостаточным признаком оптического прибора. Необходимо ещё, чтобы основная функция прибора выполнялась оптическими средствами, т. е. с помощью его оптической системы. Поэтому, например, прибавление к логарифмической линейке лупы, облегчающей отсчёт, не делает эту линейку оптическим прибором, основная функция линейки решается посредством механического перемещения движка линейки.

Многих, даже опытных, специалистов оптического приборостроения иногда смущает то обстоятельство, что удельный вес (в смысле затрат труда на изготовление) оптической системы в современных оптических приборах бывает малым. Соотношение оптических и механических деталей не является определяющим признаком для классификации приборов. Так в современном кинопроекторном приборе такое соотношение не в пользу оптики. На фоне сложной механической и электромеханической частей прибора оптика представлена небольшими узлами: проекционным объективом, переносящим изображение с киноплёнки в плоскость экрана, зеркалами для уменьшения габаритов, микрообъективом для считывания звука со звуковой дорожки, конденсором в осветительной ветке. Однако этот аппарат является чисто оптическим прибором, т. к. основные функции, определяющие работу прибора, выполняются именно этими узлами. Сложные механические и электротехнические устройства выполняют вспомогательные функции перемещения киноплёнки относительно объектива.

Фотоаппарат останется оптическим прибором, какие бы механические (автоматизация работ) или электронные (экспонометр) устройства не были в него введены, так как основная функция – получение изображения на фотоплёнке – производится фотографическим объективом.

Наряду с этими существуют приборы, основные функции которых выполняются не только оптическими, но и другими устройствами. Например, в ряде геодезических приборов основные функции выполняют не только оптические системы (отсчёт по рейкам перекрестия и т.д.), но и механизмы прибора (поворот вокруг осей, отсчёт по лимбам, установка по уровням и т.д.). Такие приборы, т.е. приборы, у которых основная функция выполняется не только оптическими, но и механическими устройствами, называются *оптико-механическими приборами* (ОМП).

Если основная функция выполняется совместно оптическими и электронными устройствами, то такие приборы называются *оптико-электронными приборами* (ОЭП).

Например, телевизионную камеру следует отнести к ОЭП, т.к. её функция – получение электрических колебаний, передающих изображение предмета, – выполняется совместно оптическими и электронными устройствами.

Но все перечисленные приборы принято называть *оптическими приборами* (ОП).

1.2 Классификация оптических приборов

До настоящего времени нет общепринятой классификации ОП. Наиболее просто и естественно разделить ОП на два класса:

- 1) приборы дальнего действия (зрительные трубы, фотоаппараты);
- 2) приборы ближнего действия (лупы, микроскопы).

Применяется также классификация по физическому принципу действия поверхностей системы:

- 1) диоптрические приборы (рефрактометры) – содержат только преломляющие поверхности;
- 2) катоптрические [*katoptrikós* (*греч.*) – зеркальный] приборы (рефлекторы) – содержат только отражающие поверхности;
- 3) катодиоптрические приборы [*katooptron* (*греч.*) – зеркало, *dioptron* (*греч.*) – линза] содержат зеркально-линзовые поверхности.

Такая классификация в основном используется для астрономических приборов.

Приборы по области применения можно разбить на следующие группы:

- 1) астрономические приборы;
- 2) геодезические приборы;
- 3) аэрофотосъёмочные аппараты;
- 4) фотоаппараты;
- 5) проекционные аппараты;
- 6) киносъёмочные аппараты;
- 7) кинопроекторные аппараты;
- 8) военные оптико-механические приборы (дальномеры, прицелы, наблюдательные приборы);
- 9) навигационные оптические приборы;
- 10) оптические приборы космической навигации;
- 11) лупы;
- 12) микроскопы;
- 13) очки;
- 14) офтальмологические приборы;
- 15) медицинские оптические приборы для исследования внутренних полостей человеческого организма;
- 16) приборы для светотехнических измерений;
- 17) колориметрические приборы;
- 18) спектральные приборы;

- 19) поляризационные приборы;
- 20) приборы инфракрасной техники;
- 21) голографические приборы;
- 22) оптические измерительные приборы;
- 23) оптические устройства металлообрабатывающих станков;
- 24) сигнальные приборы;
- 25) приборы с использованием волоконной оптики и ряд других.

Астрономические приборы

Астрономические наблюдения были бы невозможны без использования астрономических оптических приборов. Разнообразны задачи, стоящие перед астрономами, а в связи с этим разнообразны и астрономические приборы, с помощью которых доставляется информация для решения этих задач.

Современные астрономические приборы позволяют измерять точное положение светил на небесной сфере, изучать движение небесных светил, определять скорость движения небесных тел, вычислять геометрические и физические характеристики небесных тел, определять их химический состав и т.д.

К астрономическим приборам относятся:

- телескопы (линзовые, зеркально-линзовые);
- коронограф (для наблюдения за солнечной короной);
- кометоискатель (зрительная труба, специально назначенная для разыскивания на небе комет вообще и особенно слабых, так называемых телескопических комет);
- метеорный патруль (система широкоугольных фотографических камер, охватывающая всё небо и служащая для фотографирования метеоров);
- спутниковая фотокамера (астрономический инструмент для фотографических наблюдений ИСЗ) и т. д.

Геодезические приборы

Существует большая разновидность геодезических приборов, отличающиеся классом точности, оптическими схемами, отсчётными и регистрирующими устройствами, конструкцией:

- нивелиры;
- теодолиты;
- кипрегели;
- кинотеодолиты.

Фотоаппараты

Существует большой класс фотоаппаратуры:

- любительские;
- репортажные;
- корреспондентские камеры;
- научные фотокамеры;
- фоторегистрирующие приборы.

Каждый из видов включает множество моделей, отличающихся габаритами, видом используемого фотопроцесса и фотоматериала, степенью автоматизации процесса съёмки.

Проекционные аппараты

Они делятся на две большие группы:

- диапроекторы;
- эпипроекторы.

Диапроекторы предназначены для проекции прозрачных предметов (фильмов, диапозитивов) в проходящем свете.

Эпипроекторы предназначены для проекции непрозрачных объектов (чертежей, текстов книги) в отражённом ими свете.

Киносъёмочная аппаратура

Разнообразна номенклатура киносъёмочной аппаратуры:

- любительская;
- репортажная;
- студийная;
- аппаратура для научных и технических целей.

Киносъёмкой называется процесс получения серии последовательных фотоизображений какого-либо объекта через определённые равные промежутки времени. Устройства, предназначенные для осуществления киносъёмки, называются *киносъёмочными аппаратами*.

Кинопроекционные аппараты

Устройства, предназначенные для осуществления кинопроекции, называются *кинопроекторами*

Кинопроекцией называется процесс проецирования на экран увеличенных изображений последовательных кадров кинофильма, полученного при киносъёмке.

Военные ОМП

Это различные приборы, предназначенные и для артиллерии, и для летательных аппаратов, и для морского флота, т.е. для всех родов войск. Сюда можно отнести:

- приборы наблюдения (бинокли, артиллерийские трубы, панорамы);
- приборы для прицеливания;
- перископы (зенитные, атаки и т. д.);
- дальномёры и т. д.

Микроскопы

Конструкция микроскопа, его оснащение и характеристики определяются либо областью применения, либо методом наблюдения. Существуют различные типы специализированных микроскопов.

Биологические микроскопы очень распространены. Они применяются для ботанических, гистологических, микробиологических, медицинских исследований, а также для наблюдения прозрачных объектов в химии, физики и т. д. Они в свою очередь делятся на упрощённые, рабочие, исследовательские.

Инвертированные микроскопы предназначены для исследования громоздких объектов, которые трудно или невозможно расположить на предметных столиках обычных микроскопов, для исследования химических реакций, для определения точек плавления материалов и т. д.

Люминесцентные микроскопы (люминесценция – [lumen (лат.) – свет и -escent – суффикс, означающий слабое действие], излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний – холодное свечение) оснащаются специальными фильтрами, пропускающими от объекта свет люминесценции.

Ультрафиолетовые и инфракрасные микроскопы служат для исследований в невидимых для глаза областях спектра.

Поляризационные микроскопы предназначены для фиксации изменений в поляризации света, прошедшего через объект или отражённого от него, что открывает возможности количественного определения различных характеристик оптически активных объектов. Существуют поляризаторы и анализаторы.

Интерференционные микроскопы служат для наблюдения прозрачных объектов методом интерференционного контраста. Многие из них конструктивно аналогичны обычным микроскопам, отличаясь наличием специального конденсора, объектива и измерительного узла.

Стереомикроскопы. Бинокулярные тубусы, используемые в обычных микроскопах, при всём удобстве наблюдения двумя глазами не дают стереоскопического эффекта. Стереомикроскопы, обеспечивающие подлинно объёмное восприятие микрообъекта, представляют собой как бы два микроскопа, в виде единой конструкции так, что правый и левый глаз наблюдают объект под разными углами. Часто используются в хирургических операциях на сосудах, мозге, глазу, биологических исследованиях, сборке устройств и т. д.

Телевизионные микроскопы работают по схеме микропроекции: изображение препарата преобразуется в последовательность электрических сигналов, которые потом воспроизводят эти изображения в увеличенном масштабе на экране электронно-лучевой трубки.

Измерительные микроскопы служат для измерения линейных и угловых размеров объектов.

Электронный микроскоп. Изображение предметов можно получить не только с помощью световых лучей, но и применив пучки заряженных частиц, (электронов и т. п.), например, при изучении вирусов.

Офтальмологические приборы

Офтальмоскоп [ophthalmoscope (греч.)] (ручной ОР-2) используется для исследования глазного дна (при исследовании сосудистого дерева, роговицы, радужной оболочки и хрусталика, для грубого определения аметропии глаза).

Фотоофтальмоскоп поляризационный (ФОСП-1) служит для фотографирования и визуального исследования глазного дна в поляризованном свете.

Аномалоскоп (АН-59) используется для исследования дихроизма и монохроматизма цветового зрения. Позволяет получить количественную оценку цветослабости и количественную оценку аномальных форм цветового зрения.

Адаптометр (АДМ) используется для исследования хода нарастания световой чувствительности глаза во время длительного пребывания в темноте, исследования световой чувствительности в течение 3-х минут, исследования остроты зрения.

Синоптофор используется для диагностики и лечения косоглазия. Позволяет определить углы косоглазия.

Тонометр аппланационный служит для измерения истинного и тонометрического внутриглазного давления при диагностике глаукомы.

Офтальмометр (ОФ-3) служит для измерения радиуса кривизны и преломляющей силы передней поверхности роговицы неастигматического глаза, а также для определения астигматизма глаза. Используется при подборе очков и контактных линз.

Кератометр [keratometer (*греч.*)] – инструмент для измерения радиуса кривизны роговицы глаза (КМ-1) – предназначен для измерения диаметра роговицы и зрачка глаза, для определения расстояния от вершины задней поверхности линзы очков до вершины роговицы глаза.

Диоптриметр (ДО-2) служит для измерения задней вершинной рефракции и призматического действия очковых линз, нанесения положения оптического центра, главных сечений астигматических линз.

Офтальмокоагулятор квантовый (ОК-2) предназначен для лечения с помощью квантового генератора ряда глазных заболеваний (например, отслоения сетчатки).

Медицинские оптические приборы для исследования внутренних полостей человеческого тела

В последнее время наибольшее применение получила *лапароскопия* [laparago (*греч.*) – живот, skopeo (*греч.*) – смотрю]. Волоконная оптика позволяет создавать гибкие и тонкие приборы, вводимые во внутренние полости организма для диагностики заболеваний внутренних органов. В хирургии в качестве вспомогательного и даже основного инструмента (лазерный скальпель).

Приборы для светотехнических измерений

Фотометрические приборы предназначены для измерения различных фотометрических величин: освещённости, яркости, силы света и т. д.

Сенситометрические приборы предназначены для измерения характеристик фотоматериалов и фотографического процесса.

Рефрактометрические приборы служат для определения преломляющих свойств прозрачных сред (показателя преломления, дисперсии).

Спектральные приборы

Существуют эмиссионные и абсорбционные типы спектральных приборов, в каждый из которых входят: стилоскопы, спектрометры, спектрографы, квантометры, монохроматоры, которые в свою очередь включают виды, различающиеся областью спектра, видами диспергирующих элементов, оптическими схемами, конструкциями.

Приборы инфракрасной техники (ИК-приборы)

Тёплым светом называют инфракрасное (ИК) излучение, испускаемое нагретыми жидкими или твёрдыми телами. Невидимый «тёплый» свет несёт много интересной информации о свойствах различных объектов природы. ИК-техника – это приборы, предназначенные для обнаружения их невидимого излучения, его наблюдения, фотографирования, а также приборы, помогающие воздействовать ИК-излучением на тело, получая заданные свойства и превращения веществ.

Многие вещества, прозрачные для видимого света, не пропускают ИК-лучи и наоборот. Например, слой воды толщиной в несколько сантиметров позволяет отчётливо разглядеть находящиеся под ним предметы, но он непрозрачен для ИК-излучения с длинами волн больше 1 мкм.

Вода часто используется как теплозащитный экран. А вот чёрная бумага, наоборот, хорошо пропускает ИК-волны с длиной от 50 до 2 000 мкм. Полиэтилен прозрачен для ИК-лучей любых длин волн (более 100 мкм), а кварц – только от 100 до 1 000 мкм. Из веществ с такой «выборочной» прозрачностью устанавливают фильтры, выделяющие нужную часть диапазона ИК-излучения, например, для фотографии (в металлургии и металлообрабатывающей промышленности для обнаружения невидимых скрытых дефектов в изделиях). Здесь важную роль играет то обстоятельство, что разные по плотности участки изделия неодинаково излучают ИК-лучи. Если в детали есть трещины или внутренние полости, то на ярком фоне всего предмета они будут выглядеть как тёмные пятна.

Чтобы увидеть слабо «светящийся» или удалённый предмет, от которого до нас доходит лишь очень малая часть ИК-излучения, используют специальный прибор – ЭОП, который переводит невидимое излучение в видимое и одновременно усиливает его яркость.

Простейший ЭОП представляет собой устройство в виде стеклянного стакана с двойными стенками и дном, из пространства между стенками которого откачен воздух. На внутренней стороне дна нанесён полупрозрачный фотокатод, а напротив него на другой стороне – люминесцентный экран.

С помощью специальных линз изображение в ИК-лучах проецируется на фотокатод. Под действием ИК-лучей фотокатод начинает испускать электроны, причём с тех участков, где яркость лучей больше. Соответственно больше испускается и электронов. Между экраном и фотокатодом приложено высокое напряжение, благодаря чему электроны разгоняются, бомбардируют экран и

вызывают его свечение, «рисую» картину, уже видимую глазом. Такую картину можно сфотографировать на обычную плёнку.

Другой прибор – ИК-видикон позволяет не только преобразовывать ИК-изображение в видимое, но и передавать его по телевизионным каналам. Экран передающей трубки изготовлен из специальных полупроводниковых элементов – фотополупроводников, чувствительных к ИК-излучению. Ток в таком элементе меняется в зависимости от освещённости его поверхности: чем больше яркость падающих на него ИК-лучей, тем больше сила тока.

Спроецированное на экран передающей трубки ИК-изображение, как и в обычном видиконе, считывается электронным лучом, преобразуется в электромагнитные волны и передаётся в эфир. Дальше всё, как в обычном телевидении.

Нагретые тела, растения, живые организмы постоянно испускают ИК-излучение той или иной яркости независимо от времени суток. Благодаря этому свойству ИК-техника даёт возможность вести наблюдения даже в абсолютной темноте. На ИК-лучах работают приборы ночного видения и ночного фотографирования, а также средства скрытой сигнализации.

Оптические измерительные приборы

Разнообразны виды оптических измерительных приборов: приборы оптической локации, приборы для измерения физических величин и т. д. К ним относятся:

- лабораторные оптические измерительные приборы;
- контрольно-измерительные приборы оптической промышленности;
- контрольно-измерительные оптические приборы для машиностроения.

Приборы с использованием волоконной оптики

Настоящий скачок оптоволоконная технология получила в 50-60 годах прошлого века, когда был изобретён лазер, а технологи научились создавать тонкие, прочные и гибкие стеклянные нити. Системы с использованием оптоволоконна используются для передачи информации. Главным преимуществом таких систем является колоссальная пропускная способность оптоволоконных линий.

Чтобы передавать информацию с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), она должна состоять из:

- 1) передатчика – источника светового сигнала;
- 2) приёмника – светочувствительного элемента;
- 3) среды распространения – оптоволоконна.

Современное оптическое волокно состоит как минимум из двух компонентов: сердцевины и оболочки. Снаружи волокно покрывается защитным слоем. В ВОЛС используются оптоволоконные кабели, состоящие из десятков и сотен волокон (**«n»** стекла оболочки должно быть меньше **«n»** стекла сердцевины). Оптоволоконно обычно изготавливают из кварцевого стекла.

2. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Производственный процесс сборки включает в себя следующие виды процессов: подготовительный, технологический, контрольно-сдаточный.

Подготовительный процесс сборки

Подготовительный процесс сборки осуществляется техническими работниками сборочного цеха, в составе которого имеются бюро подготовки производства (БПП) и планово-диспетчерское бюро (ПДБ).

Бюро подготовки производства состоит из группы технологов и конструкторов.

Технологи на основе анализа запланированного изделия составляют технологические планировки цеха и проекты сборки, заказывают технологическое оснащение, необходимое для выполнения сборочных работ (приспособления для чистки оптических деталей, механизмов, контрольно-юстировочные приборы и т. д.).

Конструкторы БПП проектируют и разрабатывают чертежи необходимого оснащения, предусмотренного технологическим проектом сборки прибора.

Планово-диспетчерское бюро планирует номенклатуру изделий сборочным участкам, комплектует прибор покупными и комплектующими изделиями, комплектует приборы заимствованными и стандартными деталями и узлами.

Технологический процесс сборки

Технологический процесс сборки осуществляется непосредственно на рабочих местах сборщиками в сборочных цехах предприятия.

ОМП состоит из точных механизмов, составляющих механическую часть, и ряда оптических деталей, составляющих оптическую схему прибора. Поэтому техпроцесс сборки обычно выполняется на двух сборочных участках: участке механической (предварительной) сборки и участке оптической (окончательной) сборки.

На участке механической сборки выполняется крепление и соединение механических деталей и узлов, отладка и проверка взаимодействия механизмов и отсчётных **устройств** прибора, собранного без оптических деталей.

Собранные механические узлы прибора передают *на участок оптической сборки*, где осуществляется соединение оптических деталей с механическими, сборка узлов и их регулировка, установка оптических деталей и узлов с оптикой в прибор, а также контроль и приёмка собранных узлов и прибора.

Контрольно-сдаточный процесс сборки

Так как все детали, входящие в прибор, изготовлены с некоторыми допусками, то погрешности изготовления неизбежно накапливаются, и возникают отклонения характеристик оптических систем прибора от расчётных.

Для устранения этих отклонений в процессе сборки осуществляют регулировку оптических деталей и узлов в заданных пределах. Для этого выполняют подрезки, проточки, шабрение механических деталей и узлов, перемещение узлов и деталей по резьбовым соединениям или направляющим и т. д.

Регулировку осуществляют до тех пор, пока не добиваются необходимых характеристик прибора.

Действие всех оптических приборов основано на использовании потока лучистой энергии (света), поэтому некоторое изменение взаимного расположения оптических деталей вызывает изменение в направлении луча.

Например, поворот зеркала на угол α вызывает отклонение отражённого луча на угол, вдвое больший, т. е. на 2α . (рис. 2.1).

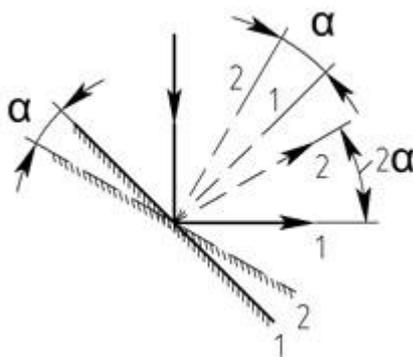


Рис. 2.1. Схема отклонения отражённого луча

Наклон плоскопараллельной пластинки, установленной в сходящемся пучке лучей, вызывает смещение визирной линии прибора (рис. 2.2).

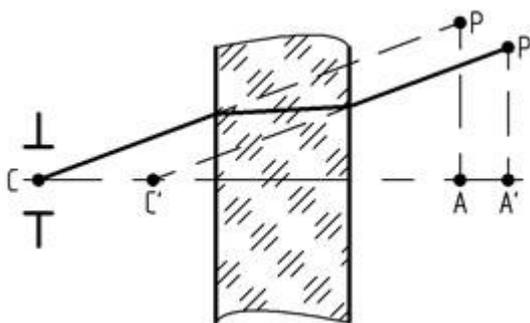


Рис. 2.2. Схема смещения визирной линии прибора в результате наклона пластинки

Кроме того эта пластинка вызовет астигматизм и дисторсию.

Некоторые свойства ОП зависят от точности взаимного расположения их оптических деталей. Например, светочувствительный слой плёнки должен быть установлен в фокальной плоскости объектива фотоаппарата с точностью 0,02 мм.

Изготовление деталей без отклонения от номинальных размеров не всегда возможно и экономически выгодно.

Совокупность операций по контролю и доведению прибора или узла до состояния, при котором он удовлетворяет определённым техническим требованиям, называется юстировкой [justieren (нем.) – точно выверять, пригонять].

Без юстировки не обходится производство ни одного прибора. Она является завершающей стадией технологического процесса сборки, при которой прибор или его составные части и узлы приводятся в рабочее состояние, обеспечивая их должную точность, правильность и надёжность действия.

Процесс юстировки для особо сложных приборов составляет 80 % затрат. Юстировка требует высокой квалификации рабочего, а также грамотно и обоснованно составленной технологии.

Юстировка – это подрезка, проточка, перемещение отдельных деталей или сборочных единиц, разворот, установка прокладок и т.д.

В процессе эксплуатации оптический прибор приводят в рабочее положение. Приёмы для установки изделия в рабочее положение принято называть выверкой.

При этом пользуются различными выверочными приспособлениями и приборами. Эти устройства изготавливают и отлаживают в процессе заводской юстировки прибора так, чтобы ими можно было пользоваться при эксплуатации прибора.

Процесс юстировки узлов и всего прибора связан с процессом контроля и испытания.

Таким образом, укрупнено технологический процесс сборки ОМП идёт в следующей последовательности (рис. 2.3):

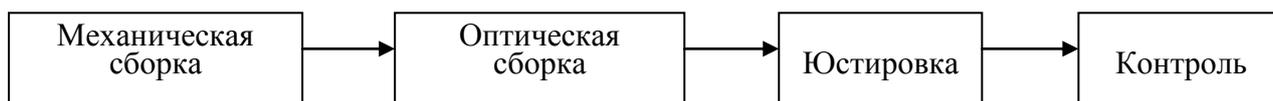


Рис. 2.3. Схема технологического процесса сборки ОМП

3. ОСНОВНЫЕ БАЗЫ ОПТИЧЕСКИХ УЗЛОВ И СИСТЕМ

Точность сборки зависит не только от точности изготовления деталей по геометрическим (линейным и угловым) размерам, но, в первую очередь, от определённости и точности взаимного базирования деталей и узлов. Взаимное положение деталей и узлов в приборе определяется сборочными базами – реальными поверхностями, посредством которых соединяемые детали сопрягаются друг с другом.

При сборке неподвижных деталей положение каждой последующей присоединяемой детали будет вполне определёнno в приборе только в том случае, когда она лишена всех шести возможных степеней свободы, т. е. трёх поворотов вокруг каждой из трёх осей прямоугольной системы координат и трёх сдвигов вдоль тех же осей.

Оптические детали также имеют собственные базовые оси, вращение вокруг или сдвиги вдоль которых недействительны, т. е. не влияют на замыкающее звено размерной цепи. Положение деталей будет определёнno, если лишить их действительных подвижек, т. е. тех поворотов и сдвигов, которые влияют на рассматриваемые свойства и характеристики. Число собственных подвижек у оптических деталей всегда значительно меньше шести.

3.1. Основные юстировочные базы оптических узлов и приборов

Конструкторские и технологические базы в оптическом приборостроении имеют важнейшее значение, так как с их помощью обеспечивается такое взаимоположение схемных деталей и узлов, какое необходимо для правильного функционирования прибора.

Под базированием понимается придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат, а под базой – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и служащая для базирования.

Базы классифицируются:

- а) по назначению:
 - конструкторская (основная);
 - технологическая;
 - измерительная;
- б) по числу лишаемых степеней свободы:
 - установочная;
 - направляющая;
 - опорная;
 - двойная направляющая;
 - двойная опорная;
- в) по характеру проявления:

- скрытая;
- явная.

Оптические детали и системы имеют базы, которые сами по себе обладают ещё и некоторыми особыми свойствами, в частности, инвариантностью поворотов или смещений.

Например, любые сдвиги и вращения плоского зеркала в его плоскости отражения, которая является базой, инвариантны, так как, очевидно, не влияют ни на положение, ни на ориентировку изображения.

3.2. Основные базы оптических систем

Различают следующие основные базы оптических систем:

- 1) центр кривизны рабочей поверхности;
- 2) оптическая ось линзы;
- 3) узловые точки оптической системы и, в частности, эквивалентная узловая точка;
- 4) узловая ось телескопической оптической системы;
- 5) визирная ось оптической системы, в частности, автоколлимационная;
- 6) визирная линия оптической системы с фокусировкой;
- 7) фокальная плоскость оптической системы и её фокусы.

Центр кривизны рабочей поверхности

Центр кривизны рабочей поверхности является важнейшей базой центрированных систем, так как положение каждой такой поверхности полностью определяется положением этого центра. Для визуализации центра кривизны пользуются разными приёмами.

Положение центра кривизны сферического вогнутого зеркала можно быстро (но приближённо) найти, наблюдая отражённое в зеркале изображение собственного глаза. Если глаз поместить за центром кривизны зеркала C в точке 3 , то его уменьшенное изображение будет в точке $3'$ (рис. 3.1).

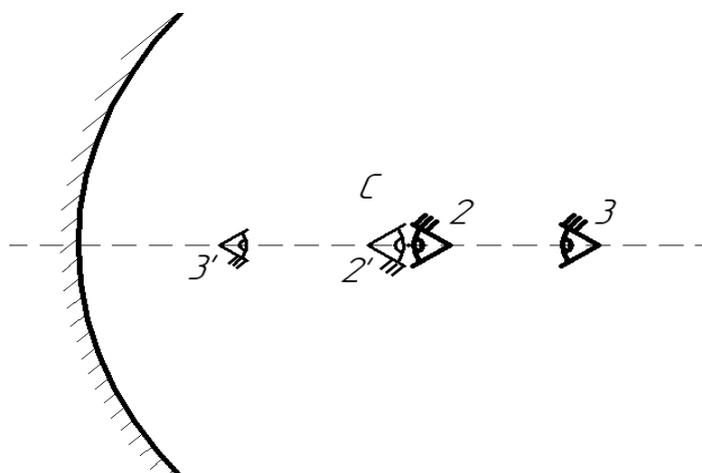


Рис. 3.1. Изображение глаза, расположенного за центром кривизны вогнутого сферического зеркала

Перемещаясь по направлению к зеркалу, видно, что изображение глаза будет приближаться к нему и увеличиваться. В точке совпадения с центром S изображение $2'$ совпадёт с глазом 2 и заполнит всё поле зрения наблюдателя, но будет размытым, так как глаз не может резко видеть близко расположенные объекты.

Точное расположение центра кривизны вогнутой сферической поверхности можно определить автоколлиматором (с помощью совмещения острия иглы определяется параллакс) (рис. 3.2).

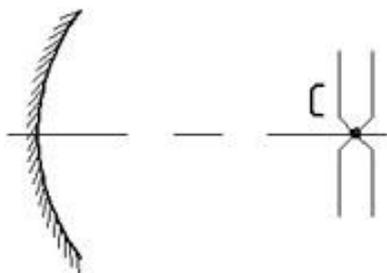


Рис. 3.2. Определение точного положения центра кривизны вогнутого сферического зеркала

При контроле центрировки линз и зеркал в цехах пользуются отражёнными изображениями от полированных рабочих поверхностей неподвижных светящихся объектов.

Оптическая ось линзы

Оптической осью называется прямая, соединяющая центры кривизны всех поверхностей.

Узловые точки оптической системы

Узловые точки оптической системы и, в частности, эквивалентная узловая точка, – это пара сопряжённых точек, в которых угловое увеличение $\gamma = 1^\times$.

Положение этих точек можно найти:

- качанием линзы вокруг поперечной оси (лабораторный способ);
- вращением линзы вокруг продольной оси (цеховой способ);
- наблюдением изображения светящейся точки, отражённой от рабочих поверхностей линзы;
- наблюдением изображения прямых линий через линзу в проходящем свете при увеличении, не равном $+1$.

Узловая ось телескопической оптической системы

Понятием узловой оси пользуются при контроле направления оси телескопической системы или взаимной параллельности осей биноклей.

Двухлинзовая система имеет узловую ось, проходящую через заднюю узловую точку K'_1 компонента 1 и переднюю узловую точку K_2 компонента 2.

Луч, падающий в точку K_1 параллельно $K'_1 K_2$, выйдет из точки K_2 в том же направлении (рис. 3.3).

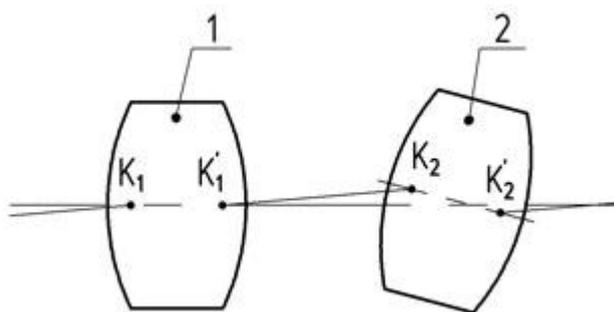


Рис. 3.3. Узловая ось телескопической системы

Визирная ось оптической системы

Визирная ось оптической системы, в частности, автоколлимационная, имеется у всех оптических систем, служащих для наведения на точки **пространства** предметов.

3.3. Центрирование элементов оптических систем

Одной из наиболее распространённых операций при сборке и юстировке оптических систем является центрирование их элементов по отношению к заданным конструкторским базам. Эта операция выполняется с разной точностью в зависимости от преследуемой цели.

Грубая юстировка частей до десятых долей миллиметра требуется в осветительных системах и в тех случаях, когда следят лишь за тем, чтобы пучок световых лучей не срезался диафрагмами *ОС*.

Точная центровка частей *ОС* – до сотых долей миллиметра, необходима при установке визирных и оптических осей по отношению к заданным конструкторским базам – к осям вращения, к осям уровней и т. д.

Ещё более точная центровка линз требуется при сборке объективов микроскопов, зрительных труб, проекционных приборов, фото- и киноаппаратов, так как они должны дать изображение хорошего качества.

Основной базой для центрирования оптических систем с целью обеспечения высокого качества изображения является оптическая ось.

Под оптической осью оптической системы понимают прямую, которая проходит через центры кривизны всех сферических поверхностей, составляющих центрированную оптическую систему.

В таком определении оптическая ось имеется только у системы из двух поверхностей (у отдельной линзы или у пары сферических зеркал).

В реальной оптической системе с числом поверхностей более двух нет оптической оси в упомянутом смысле.

Можно было бы определить понятие «оптическая ось» с абберационной точки зрения. Назвать, например, оптической осью реальной системы объектива прямую, проходящую через его заднюю узловую точку или через ту точ-

ку поверхности измерения, которая имеет минимальную волновую aberrацию. Но пользоваться таким определением оптической оси было бы весьма сложно.

На практике часто встречается необходимость в определении понятия оптической оси не с абберационной, а с чисто геометрической точки зрения (рис. 3.4).

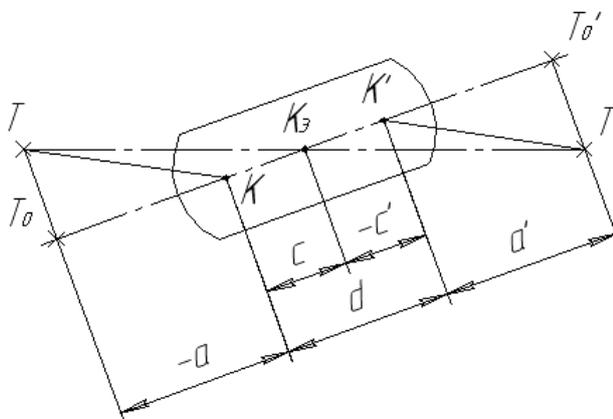


Рис. 3.4. Схема местоположения изображения точки предмета в поле зрения проектирующей системы

Оптической осью тогда можно назвать прямую, проходящую через переднюю K и заднюю K' узловые точки системы.

Местоположение изображения точки предмета в поле зрения проектирующей системы можно определить, например, с помощью, так называемой, эквивалентной узловой точки (точки предмета и изображения, для которых узловое увеличение $\gamma = 1$, называются узловыми).

Место эквивалентной узловой точки K_0 легко найти, если известно положение действительных узловых точек K и K' и её линейное увеличение β :

$$\beta = a'/a = c'/c, \quad (3.1)$$

где a' и a – положение

c' и c – расстояние от тех же точек до эквивалентной узловой точки K_0 .

Изображение точки предмета T находится на фиктивном осевом луче $\overline{TK_0}$, а ход действительного луча представляется ломаной линией $\overline{TK} + \overline{KK'} + \overline{K'T'}$, причём выходящий луч $\overline{K'T'}$ параллелен подающему лучу \overline{TK} . Если точка предмета T_0 лежит на оси $\overline{KK'}$ системы, то её изображение T'_0 находится на той же оси.

Для расстояния c' от эквивалентной узловой точки K_0 до задней узловой точки K' :

$$c' = \beta \cdot c. \quad (3.2)$$

Из рисунка 3.4:

$$c = c' + d. \quad (3.3)$$

После подстановки в формулу 3.2:

$$c' = d \cdot \beta / (1 - \beta). \quad (3.4)$$

Таким образом, при удалении предмета от объектива до бесконечности, когда линейное увеличение β непрерывно уменьшается до нуля, эквивалентная узловая точка K , будет непрерывно приближаться к задней узловой точке K' и совместится с ней при $a = \infty$.

Осью телескопической системы тогда следует назвать прямую, проходящую через заднюю узловую точку K'_1 и переднюю узловую точку окуляра K_2 . Пучки лучей, параллельные этой оси, по выходе из телескопической системы не изменяют своего направления (рис. 9.2).

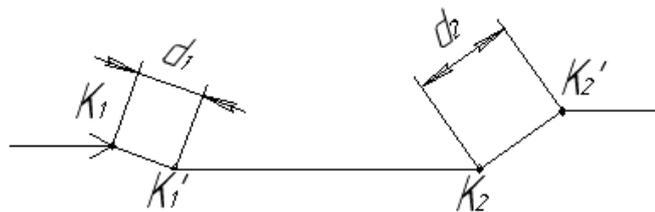


Рис. 9.2. Схема хода пучков лучей

Важнейшее значение при юстировке оптических приборов имеет также понятие визирной оси.

Визирная ось (BO) – прямая, которая проходит через центр перекрестия сетки и заднюю узловую точку объектива. Это понятие справедливо только для центрированного кругового, плоского и равномерно освещённого входного зрачка.

В общем случае зрачок может быть произвольной формы и может занимать любое положение по отношению к оси оптической системы.

В качестве центра такого зрачка принимают точку, совпадающую с центром тяжести сечения светового пучка в плоскости входного зрачка. Если освещённость в плоскости входного зрачка равномерная, то этот центр совпадает с геометрическим центром тяжести действующего сечения зрачка.

Таким образом, в общем случае: визирная ось – ломаная линия, отрезки которой в пространстве изображений и в пространстве предметов являются взаимно сопряжёнными линиями.

4. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЮСТИРОВКИ

4.1. Назначение юстировки

Во всех случаях, когда не обеспечивается полная геометрическая и физическая взаимозаменяемость деталей и узлов при сборке оптических приборов, приходится прибегать к юстировке, с помощью которой достигается правильное взаимное положение, взаимодействие и относительное перемещение частей и систем юстируемых приборов.

Юстировка необходима в следующих случаях:

- 1) заданы жёсткие допуски на замыкающее звено размерной цепи;
- 2) имеются длинные размерные цепи, число звеньев в которых достигает иногда нескольких десятков;
- 3) сборочные базы не вполне определённы или недостаточно точны;
- 4) в процессе эксплуатации нарушается рабочее состояние прибора.

Конечной задачей юстировки является обеспечение требований технических условий на прибор, т.е. обеспечение оптических характеристик и точности отсчёта прибора, если таковой имеется.

Юстировка сборочных единиц или прибора в целом производится в три этапа:

- 1) контроль, т.е. выявление в результате измерений или наблюдений тех ошибок или дефектов, которые подлежат устранению при юстировке;
- 2) юстировка, т.е. устранение в наиболее целесообразной последовательности выявленных ошибок и дефектов соответствующими подвижками деталей или изменением их физических свойств;
- 3) закрепление деталей и фиксация их правильного взаимоположения, достигнутого в результате юстировки.

Юстировку чисто условно можно разделить на геометрическую и специальную.

Геометрическая юстировка предназначена для того, чтобы правильно взаимно расположить основные оптические сборочные единицы и детали. Она включает решение трёх основных задач:

- 1) фокусировку изображения, устранение параллакса шкал и сеток, регулировку масштаба изображения или увеличения оптической системы;
- 2) центрирование сборочных единиц оптической системы относительно заданных направлений или осей;
- 3) ориентирование изображения или траектории его перемещения в поле зрения системы относительно заданного направления или заданной линии.

Задачи первой группы решаются за счёт изменения расстояний между силовыми элементами оптической системы путём их продольных подвижек.

Задачи второй группы решаются с помощью поперечных сдвигов силовых элементов или с помощью сдвигов и наклонов отражающих поверхностей вокруг поперечных осей.

Задачи третьей группы решаются, главным образом, путём поворота зеркально-призмных систем вокруг продольных осей.

Специальная юстировка предназначена для приведения прибора в рабочее состояние с тем, чтобы он удовлетворял всем требованиям технических условий.

4.2. Способы юстировки при сборке оптических приборов

Сборка сложного оптического прибора расчленяется на сборку узлов, которые далее соединяются в более сложные группы, и завершается общей сборкой прибора.

Любая юстировка сборочной единицы или прибора выполняется в три этапа.

1. Контроль, т. е. выявление в результате измерения или наблюдения тех ошибок или дефектов, которые необходимо устранить.

2. Собственно юстировка, т. е. устранение ошибок в наиболее целесообразной последовательности подвижками деталей или изменением их физических свойств.

3. Закрепление деталей в целях фиксации правильного их взаимоположения, достигнутого в результате юстировки.

Эти три тесно взаимосвязанных этапа в совокупности и есть юстировка.

В результате суммирования погрешностей изготовления и сборки деталей в собранном приборе возникают расфокусировка, дефекты качества изображения, децентрировки, нарушения положения или ориентирования изображения и т. п. При контроле в процессе юстировки применяются следующие основные методы выявления ошибок:

1) сравнение наблюдаемых результатов с эталоном, образцом, теоретическим расчётом;

2) изменение положения сборочной единицы или оптического прибора, приводящее к перемене знака ошибки (мёртвый ход);

3) совокупный контроль нескольких одноимённых приборов в разных сочетаниях, в результате чего получается система уравнений, из которой можно найти ошибки каждого из испытываемых приборов.

Для контроля используются естественные и искусственные эталоны. Естественным эталоном, например, является горизонтальная поверхность неподвижной жидкости, видимый морской горизонт, расстояние до Луны, Солнца, звёзд, известные углы между звёздами, длины волн отдельных спектральных линий и т. д.

К искусственным эталонам относятся: отвес, уровни жидкостные, аттестованные пробные стёкла, шкалы, лимбы, призмы, угольники, образцовые узлы.

4.3. Основные юстировочные операции

На рисунке 4.1 приведена схема центрированной оптической системы.

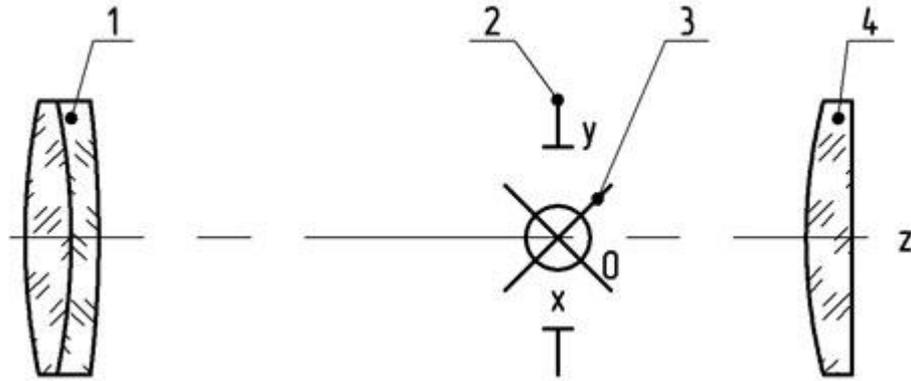


Рис. 4.1. Схема центрированной оптической системы:
1 – объектив; 2 – полевая диафрагмы; 3 – сетка; 4 – окуляр

Оптическая система состоит из объектива 1, полевой диафрагмы 2, сетки 3 и окуляра 4 в координационной системе XYZ с началом O в центре поля зрения. Оси центрированной оптической системы – горизонтальная X и вертикальная Y совпадают с плоскостью полевой диафрагмы, а ось Z перпендикулярна ей, т. е. совпадает с оптической осью системы.

Возможные поперечные сдвиги, продольные перемещения и наклоны объектива, а также повороты плоскости изображения и перекрестия, вызванные погрешностями сборки, приведут к следующим дефектам в поле зрения прибора.

1. Сдвиг объектива на величину Δx вдоль горизонтальной оси X вызовет того же размера и направления децентрировку 2-го рода частей системы – взаимный сдвиг их оптических осей, а также соответствующие отклонения узловой и визирной осей.

Если оптическая система представляет собой, например, телескопическую систему, то угол отклонения узловой оси β_y будет равен:

$$\beta_y = \Delta x (f'_{об} + f'_{ок}), \quad (4.1)$$

а угол отклонения визирной оси β_δ будет равен:

$$\beta_\delta = \Delta x / f'_{об}. \quad (4.2)$$

2. Сдвиг объектива на величину Δy вдоль вертикальной оси Y вызовет те же дефекты, что и сдвиг Δx , но по вертикали.

3. Смещение объектива (или сетки) на величину Δz вдоль оси Z вызовет того же размера расфокусировку и параллакс, а также рен-погрешность масштаба.

4. Наклон объектива, а вместе с ним плоскости изображения на угол α вокруг горизонтальной оси X вызовет того же размера и направления децентрировку 1-го рода частей системы – взаимный наклон их оптических осей, что приведёт к снижению качества изображения и к появлению дисторсии, а также линейно возрастающих по вертикали расфокусировки и параллакса.

5. Наклон объектива и плоскости изображения на угол β вокруг вертикальной оси Y вызовет те же дефекты, что и наклон на угол α , но в горизонтальном направлении.

6. Поворот изображения на угол γ вокруг оси Z (за счёт, например, погрешностей установки зеркально-призменной системы, расположенной до сетки) или же разворот самой сетки является дефектом, который регламентируется допусками.

Процесс устранения в определённой последовательности перечисленных дефектов при сборке оптических приборов состоит из ряда типовых юстировочных операций.

1. Продольными смещениями объектива или сетки устраняют расфокусировку Δz , так как, только получив резкое изображение, можно выявить и все остальные его дефекты.

2. Устраняют поперечные взаимные сдвиги Δx и Δy объектива и окуляра.

3. Устраняют поворот изображения и разворот сетки соответствующими наклонами элементов, вызывающих эти дефекты (чаще всего зеркально-призменные элементы).

4. Юстируют качество изображения системы.

Качество изображения зависит не только от точного взаимного центрирования частей системы, но и от правильных размеров воздушных промежутков между их элементами, а также от погрешностей изготовления и сборочных деформаций рабочих оптических поверхностей, натяжений и дефектов оптических материалов.

4.4. Типы юстировки

При юстировке пользуются в основном двумя приёмами устранения выявленных ошибок.

Первый приём состоит в том, что каждую схемную деталь и узел последовательно с заданной точностью устанавливают в указанное в сборочном чертеже положение. При большом числе схемных элементов и высоких требованиях к точности их взаимной установки, приём последовательной юстировки весьма трудоёмок, требует высокой квалификации сборщика.

Второй приём юстировки более прогрессивен. Он состоит в том, что почти все схемные детали и узлы устанавливаются в заданные чертежом положения лишь приблизительно (почти без юстировки), а накопленная (за счёт по-

грешностей изготовления и сборки) суммарная ошибка затем компенсируется заранее предусмотренными подвижками одного или двух схемных элементов.

Различают независимую и зависимую юстировку.

Независимой юстировкой называется такая юстировка, при которой имеющуюся ошибку удаётся устранить отдельно от остальных ошибок и без возникновения новых дефектов.

Всегда желательна независимая юстировка, при которой юстировочные операции легко нормируются во времени, могут быть разделены на независимые переходы, проще обеспечены контрольными средствами.

Зависимой юстировкой называется такая юстировка, при которой в процессе устранения имеющейся ошибки или нарушается сделанная ранее юстировка, или появляются новые ошибки. Зависимая юстировка выполняется трудоёмким методом последовательных приближений. Примеры независимой и зависимой юстировок приведены на рис. 4.2.

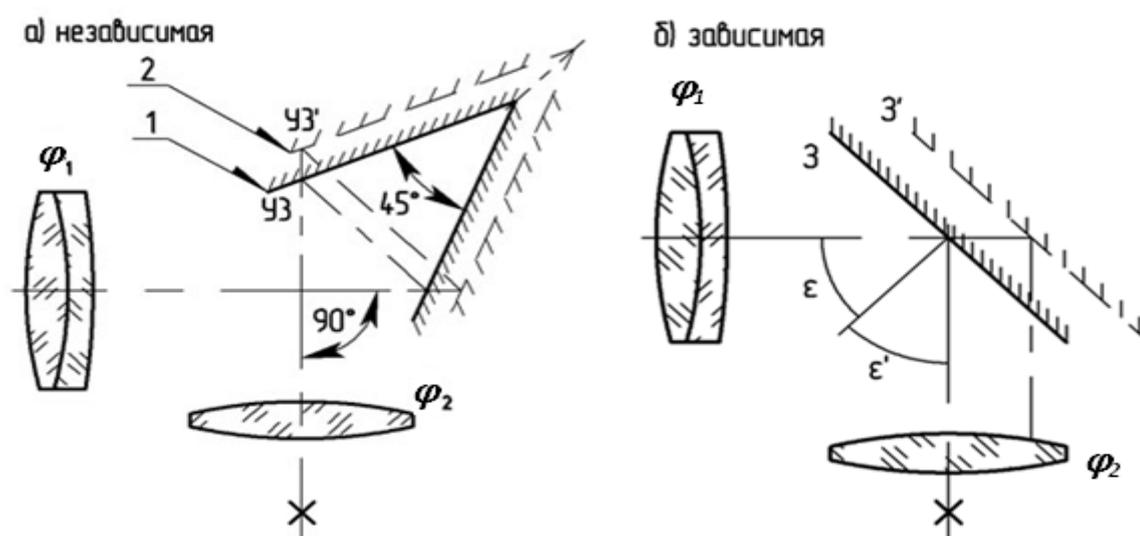


Рис. 4.2. Схема юстировок:

а) независимая юстировка; б) зависимая юстировка

Между компонентами φ_1 и φ_2 объектива при зависимой юстировке помещено плоское зеркало $З$, при независимой – угловое зеркало $УЗ$.

Для получения высокого качества изображения линзовая система должна быть хорошо центрирована – оптические оси обоих компонентов должны быть с большой точностью совмещены друг с другом, а расстояние между ними должно равняться расчётному.

Штриховыми линиями показаны зеркала в сдвинутом положении. Смещение плоского зеркала из правильного положения нарушает одновременно оба требования – появляется взаимная децентрировка линз и изменяется расстояние между ними.

При смещении углового зеркала $УЗ'$ вдоль биссектрисы угла между зеркалами 1 и 2 меняется только расстояние между линзами, а децентрировки линзовой системы не возникает.

Если угловое зеркало сдвинуть в направлении, перпендикулярном биссектрисе, то появится только децентрировка системы, а расстояние между линзами не изменится.

Следовательно, схему объектива по рис.4.2, *а* можно юстировать независимыми смещениями углового зеркала УЗ. Смещения же плоского зеркала по схеме рис.4.2, *б* является зависимым.

4.5. Оптические схемы с неизменной юстировкой

В современных высокоточных приборах часто используются нерасстраиваемые оптические схемы, которые обладают как бы неизменной (стабильной) юстировкой и имеют большую перспективность.

Неизменяемость юстировки схем обеспечивается тем, что все возможные подвижки их основных элементов стремятся сделать недейственными, т. е. не влияющими на заданные свойства прибора.

В оптических дальномерах одной из основных частей является *биаксиальный коллиматор*, который служит для того, чтобы обеспечить строгую параллельность визирных осей двух ветвей, имеющих самостоятельные объективы.

Первый вариант

Принципиальная схема внутренней трубы (или так называемого телескопа монокулярных дальномеров), которая состоит из двух объективов Φ_1 и Φ_2 , расстояние между которыми равно сумме их фокусных расстояний, и общей сетки C , совмещённой с их фокусами F'_1 и F'_2 (рис. 4.3).

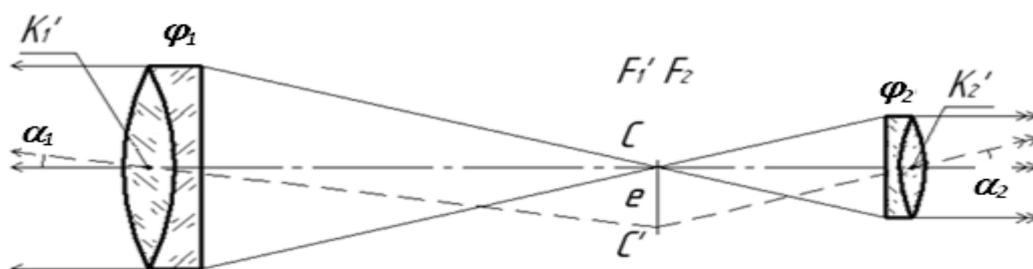


Рис. 4.3. Принципиальная схема телескопа монокулярных дальномеров

Визирные оси телескопа параллельны лишь тогда, когда перекрестие сетки C расположено на прямой, соединяющей задние узловые точки K'_1 и K'_2 – объективов. Сдвиг сетки на величину e , например, за счёт прогиба трубы, вызовет наклон визирных осей на углы α_1 и α_2 , почти равные по значению, но противоположные по знаку. Взаимная непараллельность осей будет равна разности углов, т. е.:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = e (1/a'_1 + 1/a'_2), \quad (4.3)$$

где a'_1 и a'_2 – расстояние до сетки C от задних узловых точек объектива.

Второй вариант

Биаксиальный коллиматор (рис. 4.4) состоит из двух объективов φ_1 и φ_2 и двух сеток C_1 и C_2 , которые совмещены с их задними узловыми точками K'_2 и K'_1 и скреплены с объективами φ_1 и φ_2 соответственно.

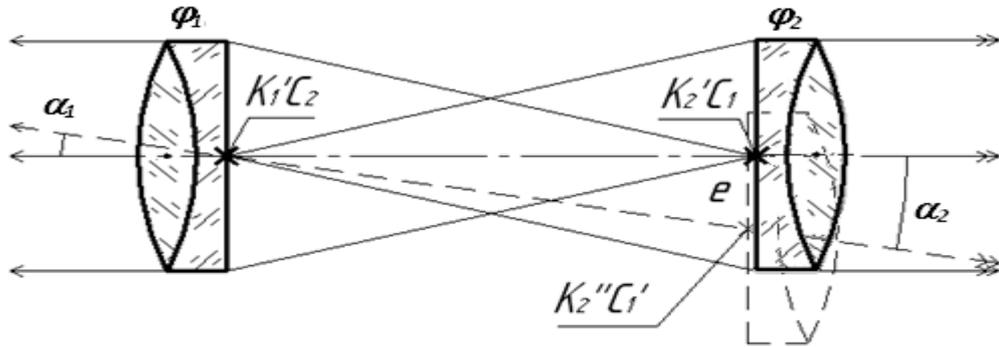


Рис. 4.4. Принципиальная схема биаксиального коллиматора

При сдвиге объектива φ_2 совместно с сеткой C'_1 на величину e в положение, показанное штриховыми линиями и точкой K''_2 , направление визирных осей изменится, но их взаимная параллельность почти не нарушится. Это связано с тем, что углы α_1 и α_2 имеют одинаковые знаки и лишь немного разнятся по размеру из-за малого различия Δa расстояний между сетками и соответствующими задними узловыми точками объективов, причём:

$$\Delta a = C_1 K'_1 - C_2 K'_2.$$

В результате взаимная непараллельность осей будет величиной второго порядка малости, так как

$$\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \cong e \Delta \alpha / f'^2, \tag{4.4}$$

где f' – фокусное расстояние объективов.

Последний недостаток можно устранить, если между объективами φ_1 и φ_2 установить двухстороннее плоское зеркало Z , удалённое от каждого объектива на половину его фокусного расстояния (рис. 4.5).

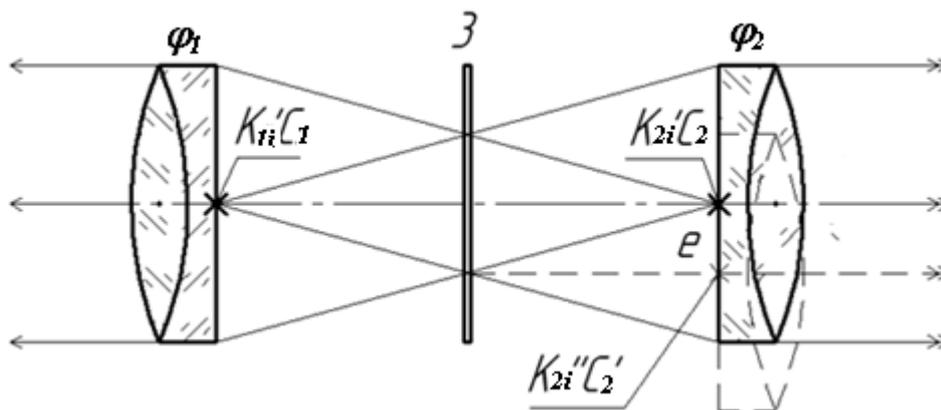


Рис. 4.5. **Схема устранения ошибки взаимной непараллельности осей**

Поперечный сдвиг любого объектива не изменяет направление выходящих лучей (рис. 4.6), а наклон зеркала $З$ в положение $З'$ вызовет наклон обеих визирных осей на одинаковый угол α , благодаря чему выходящие пучки лучей остаются параллельными, даже если фокусные расстояния объективов φ_1 и φ_2 не одинаковы.

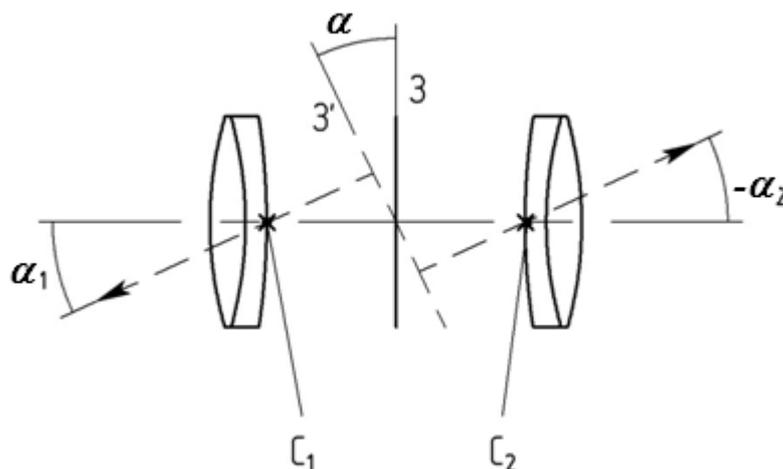


Рис. 4.6. **Схема устранения ошибки при поперечном сдвиге объектива**

Итак, на рис. 4.4 схема совершенно не защищена от внешних влияний – она легко расстраивается, так как возникает удвоенная взаимная непараллельность визирных осей при малых сдвигах любого элемента – сетки или одного из объективов. На рис. 4.5 схема мало расстраивается, на рис. 4.6 – полностью не расстраивается, так как в ней все возможные подвижки каждого элемента – любого объектива совместно с сеткой в его задней узловой точке, а также двустороннего зеркала – недействительны.

В оптических приборах применяют также и автоматические компенсаторы для исключения ошибок, возникающих в процессе эксплуатации, например, за счёт изменения температуры окружающей среды, давления и т. д.

На рис. 4.7 показана схема температурного компенсатора призмного монохроматора.

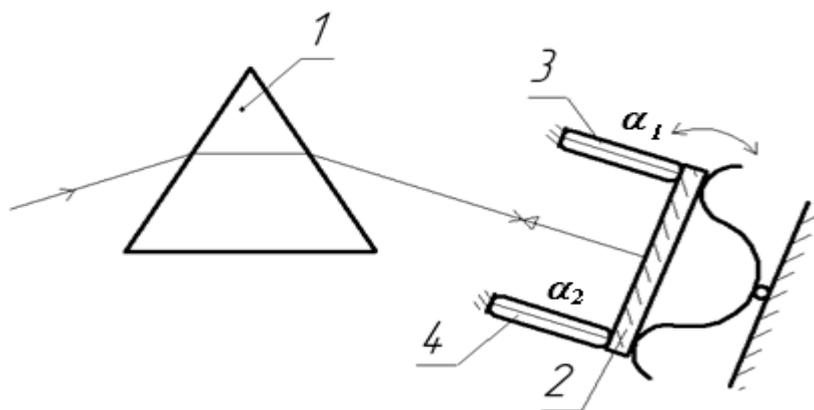


Рис. 4.7. Схема температурного компенсатора призмного монохроматора

Диспергирующая призма 1 работает в автоколлимационной схеме с зеркалом 2. При изменении температуры среды, как известно, меняется и показатель преломления призмы, в результате чего смещается и ноль градуировочной кривой. Для компенсации этой ошибки применены два стержня 3 и 4, изготовленные из материалов с различными коэффициентами линейного расширения α_1 и α_2 , причём $\alpha_2 > \alpha_1$. Длина стержня и расстояние между ними подобраны так, чтобы они упирались концами в зеркало 2 и поворачивали его на нужный угол компенсации.

4.6. Основные юстировочные задачи и методы их аналитического решения

При разработке и выборе принципиальной схемы прибора необходимо глубоко продумать его юстировку и контроль, чтобы обоснованно предусмотреть соответствующие регулировочные устройства или компенсаторы, а также и выверочные устройства.

Если нет аналогичного образца прибора, то такие юстировочные задачи можно решить лишь аналитически. При изготовлении, особенно при сборке и юстировке опытного образца прибора, часто возникают непредвиденные задачи, которые решаются аналитически. При эксплуатации прибора должны точно регламентироваться приёмы и точность проверок, а также последовательность устранения погрешностей.

Трудность этих задач возрастает с увеличением сложности конструкторских схем приборов. До сих пор не имеется общей методики решения юстировочных задач. Лучше других развиты аналитические методы решения типовых задач первой стадии юстировки приборов, которую можно назвать геометрической юстировкой.

Геометрическая юстировка предназначена установить основные оптические детали и узлы в правильное взаимное положение в соответствии со схемой оптики.

Основными деталями и узлами называются те, которые влияют на заданные свойства или характеристики узла или прибора.

Следующий этап юстировки, который можно назвать *специальной юстировкой*, имеет целью приведение прибора в рабочее состояние с тем, чтобы он удовлетворял всем требованиям технических условий.

Геометрическая юстировка включает решение 3-х основных задач.

1. Фокусировку изображения, устранение параллакса шкал и сеток, регулировку масштаба изображения или увеличения **ОС?**

2. Центрирование сборочных единиц относительно заданных направлений или осей.

3. Ориентирование изображения или траектории его перемещения в поле зрения прибора относительно заданного направления или заданной линии.

Задачи первой группы решаются, в основном, изменением расстояний между силовыми элементами оптической системы путём их продольных подвижек.

Задачи второй группы решаются в основном с помощью поперечных сдвигов силовых элементов или с помощью сдвигов и наклонов отражающих поверхностей вокруг поперечных осей.

Задачи третьей группы решаются в основном путём поворота зеркальных призмённых систем вокруг продольных осей.

Важнейшей задачей при сборке является и задача обеспечения высокого качества изображения ОС. Эта задача является не чисто геометрической, так как качество изображения зависит также и от свойств оптических материалов деталей.

Для полного решения оптической юстировочной задачи необходимо выполнить следующее.

1. На основании изучения устройства прибора, его назначения, условий работы, технических условий на него необходимо чётко сформулировать юстировочную задачу, т. е. выделить характеристики прибора, на которые могут влиять ошибки деталей и узлов, выявить основные конструкторские и юстировочные базы деталей, узлов и всего прибора, установить требования к точности их взаимоориентирования.

2. Рассмотрев все взаимные подвижки основных оптических элементов (смещения, поворота), выявить из них действенные и найти величины передаточных коэффициентов, выбрать тип сборки (желательно по принципу взаимозаменяемости). При необходимости определить компенсаторы, т. е. рассмотреть возможность и степень взаимной компенсации влияния действенных подвижек основных деталей и узлов на данные свойства прибора, чтобы найти минимальное, но достаточное число юстировочных подвижек, желательно независимого действия.

3. Предложить способы контроля и обосновать требования к КЮП – найти простейший способ, который позволит прямо или косвенно выявить, желательно в чистом виде, погрешности, подлежащие устранению в процессе юстировки.

4. Разработать методику юстировки, т. е. наметить последовательность выявления и способы устранения погрешностей с заданной точностью и в ожидаемых пределах.

5. Предусмотреть надёжную фиксацию юстируемых деталей и узлов после установки их в правильное положение, исключив возможность появления при этом нежелательных подвижек деталей и деформаций их рабочих поверхностей.

6. Рассмотреть вопрос о сохранении или, при невозможности этого, непрерывном поддержании или периодическом восстановлении рабочего состояния прибора.

Таким образом, полное решение юстировочной задачи представляет трудоёмкий процесс, особенно при проектировании нового прибора, когда приходится рассматривать несколько возможных вариантов его принципиальной схемы для выбора оптимального.

Пример

Юстировка простого коллиматора, состоящего из трёх узлов: объектива *O*, плоского зеркала *З* шкалы *Ш*. Все узлы закреплены в кронштейнах и установлены на общей монтажной плоской плите *П* (рис. 4.8).

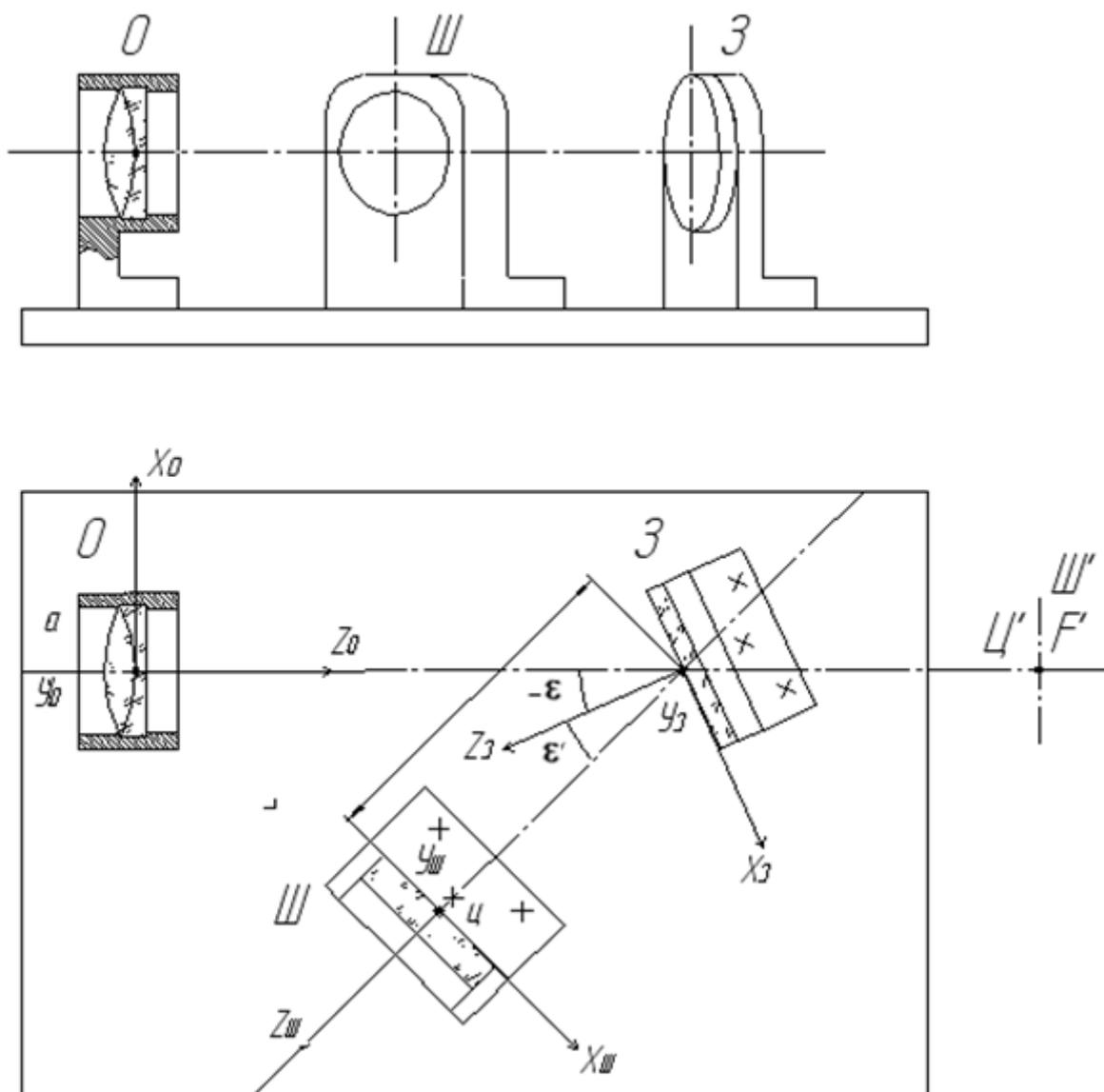


Рис. 4.8. Юстировка простого коллиматора:
 \mathcal{C}' – изображение центра шкалы; $\mathcal{I}\mathcal{I}'$ – изображение шкалы

Нижние опорные плоскости кронштейнов и плоскость плиты являются сборочными базами узлов. Эти базы не полностью определяют взаимоположение объектива, зеркала, шкалы, так как кронштейны имеют избыточные степени свободы – их можно смещать и поворачивать на плите.

Цель юстировки – найти правильное взаимоположение узлов и после закрепления их кронштейнов на плите получить коллиматор, который создавал бы высокого качества изображение шкалы $\mathcal{I}\mathcal{I}'$ за объективом в бесконечности.

Для этого плоскость шкалы должна быть строго совмещена с фокальной плоскостью объектива O , а центр \mathcal{C} шкалы – с фокусом F' . Для числовых расчётов принимается:

фокусное расстояние объектива – $f'_{об} = 250$ мм;

относительное отверстие – 1:5;

диаметр шкалы – $D_{ш} = 60$ мм.

1 этап. *Формулирование задачи, выявление основных баз*

На рис. 4.8 показано номинальное положение, когда плоскость шкалы совпадает с фокальной плоскостью объектива, а центр шкалы – с фокусом F'_1 , где объектив имеет наилучшую коррекцию

Рассмотрев все 6 подвижек изображения шкалы $Ш'$ в зеркале $З$ в системе координатных осей $x_0 y_0 z_0$, связанных с объективом, можно определить, что 5 подвижек шкалы являются действенными, т. е. влияющими на основные требования к коллиматор.

Сдвиги шкалы поперёк оптической оси объектива – вдоль оси x_0 на величину Δx_0 и вдоль оси y_0 на величину Δy_0 , непосредственно равны децентрировкам шкалы $Ш'$ относительно оптической оси объектива, а смещение шкалы вдоль оси z_0 на величину Δz_0 – её расфокусировке.

Наклоны шкалы вокруг осей x_0 и y_0 на малые углы α_0 и β_0 соответственно вызывают непараллельность плоскости шкалы по отношению к фокальной плоскости объектива. Только поворот шкалы вокруг оси z_0 на угол γ_0 не будет действенным, если предположить, что шкала имеет круговую симметрию, например, представляет собой семейство концентрических окружностей.

Тогда юстировочную задачу можно сформулировать следующим образом.

1. Центр $Ц$ шкалы должен быть совмещён с фокальной плоскостью объектива F' с точностью не ниже $\Delta z_0 = \pm 0,02$ мм.
2. Центр $Ц$ шкалы должен быть совмещён с оптической осью объектива F' с точностью до нескольких десятых долей миллиметра.
3. Плоскость делений шкалы $Ш$ должна быть параллельна фокальной плоскости объектива F' с точностью не ниже $\alpha_0 = \beta_0 = \pm 2,5'$.

Допуски Δz_0 , α_0 и β_0 получены из условия, что нерезкость изображения центра и краевых точек шкалы при наблюдении из бесконечности не превосходит в волновой мере 0,1 мкм (из условия точности продольных наводок):

$$\Delta z_0 = 0,2 / (\sigma')^2. \quad (4.5)$$

Допуская и на краю шкалы такую же расфокусировку $\Delta z_0 = \pm 0,02$ мм, для угла наклона плоскости изображения можно найти допуск:

$$\alpha_0 = \beta_0 = 2\Delta z_0 / D_{шк} \times 3\,438' \cong \pm 2,3'. \quad (4.6)$$

Допуск на сдвиг центра \mathcal{C} шкалы задан из расчёта, что качество изображения вблизи оси на расстоянии до нескольких долей миллиметра мало чем отличается от качества изображения на самой оси объектива.

2 этап. Анализ влияния действенных подвижек схемных деталей, возможности их взаимной компенсации, выбор вида сборки, определение числа и типа необходимых юстировочных компенсаторов

Возможные подвижки каждого из трёх узлов коллиматора в неподвижных системах координатных осей определённым образом ориентированы к узлам при их номинальном положении:

Подвижки объектива O – в системе $x_0 y_0 z_0$, ось z_0 которой совмещена с его оптической осью, подвижки зеркала \mathcal{Z} – в системе $x_3 y_3 z_3$, ось z_3 которой совмещена с нормалью отражающей плоскости в точке её пересечения с оптической осью объектива.

Подвижки шкалы $\mathcal{Ш}$ – в системе $x_{ш} y_{ш} z_{ш}$, ось $z_{ш}$ которой проходит через центр \mathcal{C} шкалы перпендикулярно плоскости делений.

Третьи оси всех координатных систем ($z_0, z_3, z_{ш}$) направлены так, что вращение каждого из узлов вокруг этих осей не влияет на взаимное ориентирование объектива и шкалы, т. е. являются недейственными.

Первые оси всех трёх систем ($x_0, x_3, x_{ш}$) параллельны плоскости опорной плиты, а их вторые оси ($y_0, y_3, y_{ш}$) перпендикулярны этой плоскости. При такой ориентации осей (они называются основными) число действенных подвижек наименьшее.

Влияние подвижек узлов отражено в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Влияние подвижек узлов

Наименование сборочной единицы	Возможная подвижка деталей и узлов					
	смещение вдоль оси			поворот вокруг оси		
	x	y	z	x	y	z
Объектив	$\partial u_2 \cdot x = \Delta x_0$	$\partial u_2 \cdot y = \Delta y_0$	$p\phi = -\Delta z_0$	$\partial u_1 \cdot y = \alpha_0$ $\partial u_2 \cdot y = f'_{об} \alpha_0$	$\partial u_1 \cdot x = \beta_0$ $\partial u_2 \cdot x = f'_{об} \beta_0$	-
Зеркало	-	-	$p\phi = 2\Delta z_3 \cos \varepsilon$ $\partial u_2 x = 2\Delta z_3 \sin \varepsilon$	$\partial u_1 \cdot y = 2\alpha_3$ $\partial u_2 \cdot y = 2l\alpha_3$	$\partial u_1 \cdot x = 2\beta_3 \cos \varepsilon$ $\partial u_2 \cdot x = 2l\beta_3 \sin \varepsilon$	-
Шкала	$\partial u_2 \cdot x = \Delta x_{ш}$	$\partial u_2 \cdot y = \Delta y_{ш}$	$p\phi = \Delta z_{ш}$	$\partial u_1 \cdot y = \alpha_{ш}$	$\partial u_1 \cdot x = \beta_{ш}$	-

Возникающие дефекты:

$d\zeta_1$ – децентрировка 1 рода, т. е. взаимный наклон объектива O и шкалы III , приводящий к наклону изображений;

$d\zeta_2$ – децентрировка 2 рода;

$r\phi$ – расфокусировка;

$\alpha_{\text{ш}}$ и $\beta_{\text{ш}}$ – децентрировка 1 рода частей системы, т. е. взаимный наклон объектива O и шкалы III , приводящий к наклону плоскости изображений;

$\Delta x_{\text{ш}}$ и $\Delta y_{\text{ш}}$ – децентрировка 2 рода частей системы, т. е. поперечный сдвиг центра C шкалы относительно оптической оси объектива;

$\Delta z_{\text{ш}}$ – расфокусировка изображения, т. е. смещение шкалы относительно фокуса $F'_{\text{об}}$. Недействительные подвижки – прочерк, ошибками второго порядка пренебрегаем.

Децентрировки 1-го и 2-го рода отмечены индексами x или y в зависимости от того, вокруг которой из осей произошёл взаимный наклон частей системы или их сдвиг.

Таким образом, объектив O и шкала III имеют по 5 действенных подвижек, а плоское зеркало Z – только 3. Повороты вокруг третьей оси у всех узлов недействительны, что объясняется принятой ориентировкой осей $z_0, z_3, z_{\text{ш}}$.

Из таблицы 4.1 видно, что имеется избыточное число действенных подвижек, так как для правильного взаимного ориентирования объектива O и шкалы III достаточно 5-ти подвижек или даже 4-ёх, если центрировка шкалы по высоте относительно оптической оси объектива обеспечивается технологически при расточке в кронштейнах посадочных отверстий для объектива и шкалы.

Избыточное число подвижек говорит о том, что они могут быть взаимно компенсированы.

Для сборки коллиматора любые два угла можно закрепить на плите, а юстировку выполнить подвижками третьего узла.

Возможны три варианта.

1. Закреплены объектив O и зеркало Z .
2. Закреплены зеркало Z и шкала III .
3. Закреплены объектив O и шкала III .

Первые два почти не отличаются, т. е. являются взаимнообратными.

Третий вариант не позволяет решить задачу полностью подвижками только зеркала. Можно лишь отцентрировать систему, но для фокусировки необходимы смещения объектива или шкалы вдоль их осей. Эти смещения являются независимыми в отличие от смещения зеркала вдоль оси z_3 .

Для юстировки коллиматора по третьему варианту объектив O и шкалу III перед закреплением на плите необходимо установить так, чтобы их оси пересекались в общей точке.

В данной задаче юстировочные подвижки целесообразно распределять между тремя узлами следующим образом:

- 1) фокусировку коллиматора на бесконечность выполнить смещением объектива O вдоль оси z_0 ;

2) центрировку шкалы III и установку её перпендикулярно оси объектива – сдвигом шкалы вдоль оси $x_{ш}$ и поворотом её вокруг оси $y_{ш}$ или же поворотами зеркала вокруг оси y_3 и сдвигами её вдоль оси $x_{ш}$.

3 этап. *Взаимное ориентирование баз*

Юстировка представляет собой процесс взаимного ориентирования баз – юстируемой базы по отношению к заданной конструкторской.

В данном случае основными базами являются:

- у объектива O – оптическая ось и фокальная плоскость;
- у зеркала Z – отражающая плоскость;
- у шкалы III – плоскость её делений и центр C .

Задача контроля и его трудность состоит в том, чтобы сравнить положение плоскости материальной шкалы III с нематериальной фокальной плоскостью объектива O и положение центра C шкалы – с нематериальным фокусом объектива F' .

Так как фокальная плоскость – место изображения бесконечно далёких точек **пространства предметов**, то можно было бы, пользуясь этим определением, её визуализировать, наблюдая астрономические объекты (звёзды, Луну и т. д.).

Лучше воспользоваться аттестованным коллиматором, установленным на бесконечность, или применить автоколлимационный метод фокусировки.

Для данного случая удобен следующий способ контроля.

В процессе расточки отверстия объектива подрезают за одну установку и торец a оправы. Если в расточке оправы объектив хорошо центрируется, то торец a с большой точностью будет перпендикулярен его оптической оси.

С помощью автоколлиматора и двух плоскопараллельных пластинок, одна из которых прикладывается к плоскости III , а другая к торцу a (при вынутом объективе), легко проверить их параллельность.

Этим обеспечивается правильное взаимное положение оправы объектива и шкалы, т. е. перпендикулярность шкалы к оптической оси объектива.

Центрирование шкалы, т. е. совмещение её центра C с фокусом F' , а заодно и фокусировку тоже можно проверить автоколлимационным способом.

Для этого вспомогательная отражающая плоскость прикладывается к торцу a , освещается центр шкалы и с помощью лупы наблюдается его автоколлимационное изображение C' . Фокус F' объектива находится посередине между точками C и C' .

4 этап. *Разработка методики юстировки*

Методика юстировки – это рациональная последовательность выявления и устранения ошибок.

В данном случае она ясна из предыдущего.

5 этап. Выбор способа надёжной фиксации деталей и узлов

Выбор способа надёжной фиксации деталей и узлов при их правильном взаимном положении не составляет труда (допуски сравнительно широки). Например, кронштейны на плите надёжно могут быть зафиксированы штифтами и закреплены цилиндрическими винтами.

6 этап. Способ защиты от возможности расстройств в условиях эксплуатации.

В данном случае специальные меры не нужны, так как прибор предназначен для лабораторных условий работы.

5. ОСНОВНЫЕ КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ ПРИБОРЫ

Процесс юстировки сопровождается контролем изделий и определением конструктивных элементов оптических систем.

Процессы юстировок всех оптических приборов обеспечивает относительно небольшое количество контрольно-юстировочных приборов (КЮП) общего назначения наряду со специальными юстировочными приборами.

К КЮП общего назначения относятся:

- 1) коллиматоры [от *collimo* (лат.), искажение правильного *collinco* – направляю по прямой линии] – оптические устройства для получения пучков параллельных лучей;
- 2) автоколлимационные системы;
- 3) диоптрийные трубки;
- 4) динаметры (приборы для определения степени увеличения предметов в зрительных трубах);
- 5) оптические скамьи;
- 6) зрительные трубки;
- 7) микроскопы;
- 8) гониометры [*gonía* (греч.) – угол + метр] – в физике прибор для измерения углов углов различных призм;
- 9) толщеры;
- 10) сферометры;
- 11) уровни;
- 12) компараторы и т. д.

5.1. Коллиматор

Коллиматором называется оптическая система, имитирующая бесконечно удалённый предмет, т. е. это объектив, в фокальной плоскости которого помещена мира (сетка, щель, точка и т. д.).

Обычно коллиматор состоит из объектива 3, сетки 2, помещённой в фокальной плоскости объектива, и осветителя 1 (рис. 5.1).

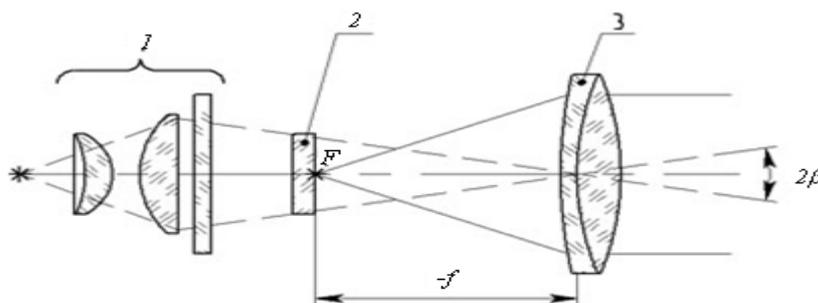


Рис.5.1. Принципиальная оптическая схема коллиматора:
1 – осветительное устройство; 2 – сетка; 3 – объектив

Осветительное устройство состоит из источника света, конденсора и матового стекла. Конденсор проектирует источник света во входной зрачок объектива. Марка может смещаться вдоль оптической оси для установки в фокальную плоскость объектива.

Конструкция и оптические характеристики объектива, осветителя и сетки зависят от назначения коллиматора.

Длиннофокусный коллиматор

Длиннофокусным коллиматором называется коллиматор, относительное отверстие объектива которого $O = D_p : f'$ менее 1:8.

Длиннофокусный коллиматор применяется при юстировке и контроле качества изображения оптических систем и их компонентов, работающих в параллельном ходе лучей, а также для юстировки и контроля параллакса между изображением бесконечно удалённого предмета и сеткой телескопических систем. Объектив должен иметь высокое качество изображения и поле зрения 2β не меньше 1° .

Поэтому основное требование при выборе объектива коллиматора предъявляется к aberrациям точки на оси, т.е. к сферической и сферохроматической aberrациям.

Качество изображения точки на оси должно быть идеальным или, переходя к понятиям волновых aberrаций, искажение плоского фронта волны, вышедшей из объектива коллиматора, не должно превышать величины $\Delta b \leq 1/4\lambda$ для всех длин волн видимого диапазона (рис. 5.2).

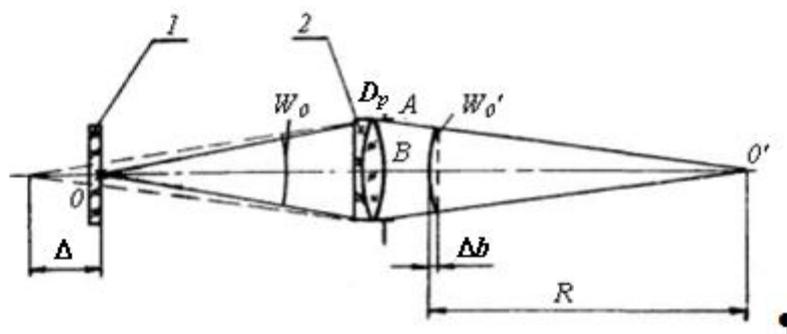


Рис. 5.2. Искажение объективом волнового фронта:

1 – сетка, 2 – объектив

На рис. 5.2 сферическая волна W_0 , выходящая из осевой точки предмета (сетки), расположенной в передней фокальной плоскости объектива, преобразуется им вследствие aberrаций объектива не в плоскую волну, а в некоторую сферическую волну W'_0 , имеющую в пределах зрачка выхода или апертуры объектива отступление от плоскости Δb , что соответствует продольной aberrации Δ .

Величина допустимой продольной aberrации точки на оси определяется по формуле, легко выводимой из рис. 5.2:

$$\Delta = \frac{f_{об}^2}{R}, \quad (5.1)$$

где R – радиус кривизны искажённой волны.

Из треугольника ABO' (рис. 5.2) следует:

$$R^2 = \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 + (R - \Delta_b)^2.$$

После преобразований и пренебрегая Δ_b^2 – величиной второго порядка малости, можно найти:

$$R = \frac{D_p^2}{8\Delta_b}.$$

После подстановки в 5.1:

$$\Delta = \frac{f_{об}^2}{D_p^2} 8\Delta_b, \quad (5.2)$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива коллиматора;

Δ_b – допустимая величина волновой аберрации.

Учитывая, что допустимое значение $\Delta_b \leq \frac{\lambda}{4}$ можно найти:

$$\Delta \leq \frac{2\lambda}{O^2}, \quad (5.3)$$

где $O = D_p : f_{об}$ – относительное отверстие объектива коллиматора.

До таких величин продольных аберраций точки на оси (сферическая и хроматизм положения) могут быть исправлены объективы, состоящие из 2-х линз при относительном отверстии $O \leq 1:8$ или одиночные линзы с относительным отверстием $O \leq 1:30$.

Применение склеенного или расклеенного двухлинзового объектива обуславливается не коррекционными возможностями наличия дополнительного радиуса у несклеенного объектива (1), а свойством клеящего слоя, который при полимеризации вызывает натяжение клеящегося шва. При диаметрах линз свыше 70 мм это натяжение может вызвать деформации склеиваемых поверхностей, влияющих на качество изображения, даваемого объективом. При больших диаметрах объектива линзы не склеиваются, а собираются в общей оправе с тремя прокладками из станиоли между линзами, расположенными по краю линз через 120° по окружности.

Наибольшее применение в промышленности получили объективы длиннофокусных коллиматоров с фокусным расстоянием 500 мм, 1 000 мм, 1 200 мм, 1 600 мм и 3 000 мм.

Освещение сеток коллиматоров, как правило, осуществляется с помощью низковольтных источников света, включаемых в бытовую сеть электропитания через понижающий трансформатор.

С целью равномерного освещения сетки и заполнения светом всего зрачка входа объектива коллиматора применяется конденсор, состоящий из одной-двух линз.

Фокусное расстояние конденсора определяется по формуле, выведенной из условия, что конденсор проектирует нить лампы во входной зрачок объектива с увеличением:

$$V_k = \frac{D_p}{a}$$

где a – минимальный размер нити лампы.

Схема хода лучей через конденсор показана на рис. 5.3.

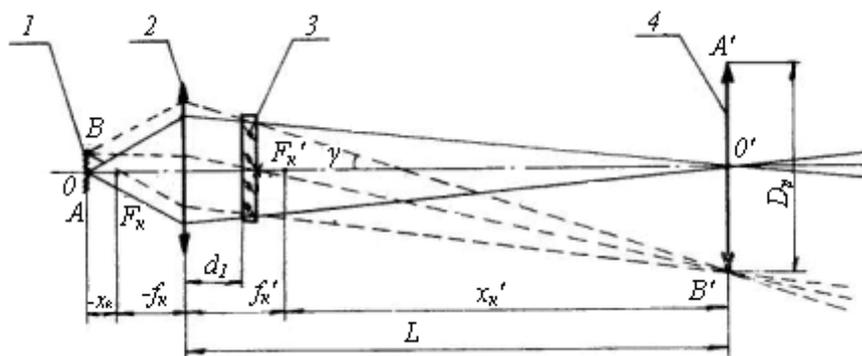


Рис. 5.3. Ход лучей через конденсор:
1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – сетка; 4 – объектив

Из рис. 5.3:

$$L = f'_k + x'_k = f'_k(1 + V_k),$$

но

$$L \cong d_l + f'_{об},$$

после подстановки

$$f'_k = \frac{d_l + f'_{об}}{1 + V_k} \quad (5.4)$$

где d_l – расстояние от конденсора до сетки.

Полагая, что

$$d_l \cong f'_k,$$

можно написать приближённую формулу для определения фокусного расстояния конденсора, которая даёт достаточно точные для практики значения:

$$f'_k \cong \frac{f'_{об}}{V_k}. \quad (5.5)$$

Свободный диаметр конденсора определяется верхним лучом пучка лучей, идущих из точки B , и нижним лучом (не показано на рис. 5.3) пучка лучей, идущих из точки A источника света, и может быть определён во формуле:

$$D_k = D_c + \left(d_l + \frac{d_c}{n} \right) \cdot 2 \operatorname{tg} \gamma; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{D_p + D_c}{2 f'_{об}},$$

где D_k – свободный диаметр конденсора;

D_c – свободный диаметр сетки, равный диаметру полевой диафрагмы;

d_c/n – приведённая к воздуху толщина сетки.

Выбор источника света производится из условия получения необходимой освещённости изображения сетки (миры) в фокальной плоскости проверяемой системы, которая определяется из соотношения

$$E = \pi \cdot p \cdot B \cdot \sin^2 U', \quad (5.6)$$

где U' – апертурный угол проверяемой системы;

p – коэффициент светопропускания оптической системы (коллиматор + проверяемая система);

B – габаритная яркость тела накала источника света в канделах,

$$B = \frac{\Phi}{S^2} K,$$

где Φ – световой поток;

S – площадь источника света в см^2 ;

K – коэффициент заполнения светящегося тела.

Так как источник света – лампа накаливания – имеет не сплошное светящееся тело, а светящуюся спираль, коэффициент заполнения которой меньше единицы, то в коллиматорах для особо ответственных измерений, с целью более равномерного освещения сетки и заполнения входного зрачка, ставится матовое или молочное стекло между конденсорными линзами и сеткой. Это приводит к уменьшению светопропускания системы и к соответствующему увеличению требуемой мощности источника света.

Короткофокусный коллиматор

Короткофокусные коллиматоры применяются для проверки положения линии визирования в пространстве относительно данного направления, измерения отклонения линии визирования при малых подвижках деталей, юстировки взаимного положения отражающих зеркальных и призмённых элементов и т. д.

Характеристика короткофокусного коллиматора:

$$\begin{aligned} f' &\text{ не более } 500 \text{ мм;} \\ D_{вх}/f' &= 1:5; 1:7; \\ 2\beta &= 5 - 10^\circ. \end{aligned}$$

В качестве объективов используются объективы телескопических систем с удовлетворительной коррекцией аберраций точки на оси и комы. Допустимая величина аберраций в угловой мере объектива коллиматора выбирается из условия допустимого искажения изображения за окуляром проверяемой системы. Это искажение, например, у наблюдательных приборов, для сферической аберрации и комы допускается до 2 – 3 минут. Аберрации коллиматора не должны вносить ошибку более 0,1 – 0,2 от допустимого отклонения измеряемой величины от номинального значения. Следовательно, аберрации коллиматора в угловой мере не должны превышать величины

$$\gamma \leq \frac{\gamma' \cdot K}{\Gamma}, \quad (5.7)$$

где Γ – увеличение проверяемой системы,

$$K = 0,1 - 0,2;$$

$\gamma' = 2' - 3'$ – допустимая угловая величина сходимости лучей за окуляром проверяемой системы, вызванная наличием аберраций.

Величину продольной аберрации точки на оси объектива коллиматора Δ можно найти из рис. 5.4:

$$\Delta = \Delta' \frac{f_{\kappa}^2}{f_{об}^2}, \quad (5.8)$$

где f_{κ} – фокусное расстояние объектива коллиматора;

$f_{об}$ – фокусное расстояние объектива зрительной трубы.

$$\Delta' = \frac{f_{ок}^2}{\Delta''}, \quad \Delta'' = \frac{d_{п.ок}}{\gamma'},$$

тогда

$$\Delta = \frac{f_{ок}^2}{d_{п.ок}} \cdot \gamma' \cdot \frac{f_{\kappa}^2}{f_{об}^2},$$

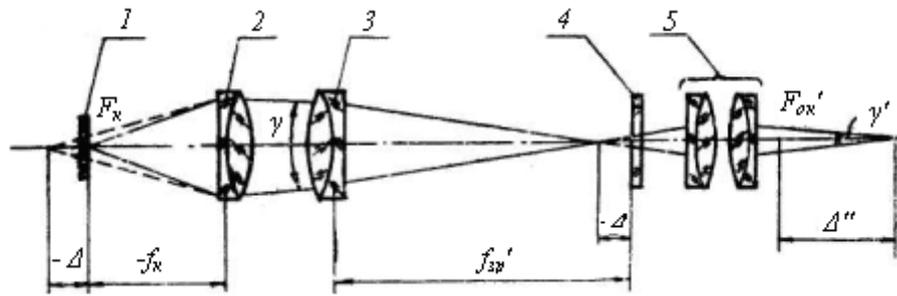


Рис. 5.4. К определению величины остаточных aberrаций короткофокусного коллиматора:

1 – сетка коллиматора; 2 – объектив коллиматора;
3,4,5 – проверяемая телескопическая система

после преобразования

$$\Delta = \frac{\gamma' \cdot f_k}{d'_{p.ок} \cdot \Gamma^2} = \frac{\gamma'}{O \cdot \Gamma^2}, \quad (5.9)$$

где O – относительное отверстие проверяемой системы;

Γ – увеличение проверяемой телескопической системы;

d'_p – диаметр зрачка выхода проверяемой системы;

Δ'' – расстояние от задней фокальной плоскости до изображения сетки коллиматора за окуляром системы.

Подсветка сеток осуществляется через матовое или молочное стекло. Применить линзовый конденсор для подсветки сеток затруднительно из-за необходимости применять светосильные, а, следовательно, сложные конденсоры, что экономически не целесообразно (рис. 5.5).

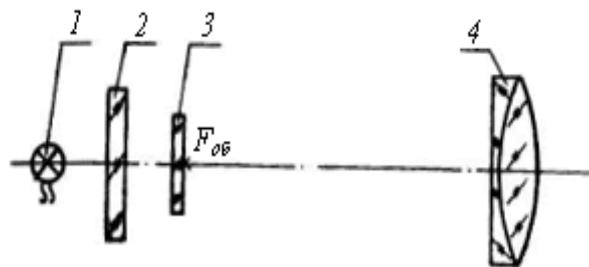


Рис. 5.5. Короткофокусный коллиматор:

1 – источник света; 2 – матовое или молочное стекло;
3 – сетка; 4 – объектив

Широкоугольный коллиматор

Широкоугольный коллиматор (рис. 5.6, рис. 5.7) используется для проверки поля зрения, диапазона изменения направления линии визирования, угловых величин шкал, сеток и других параметров телескопических систем.

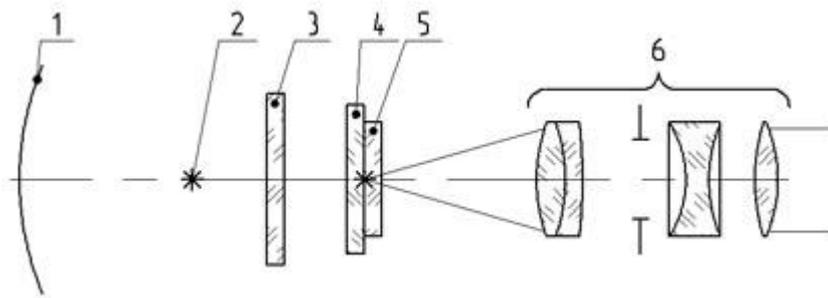


Рис. 5.6. Оптическая схема широкоугольного коллиматора:
 1 –отражатель матовый; 2 – источник света; 3 –стекло матовое;
 4 –стекло защитное; 5 – сетка; 6 – объектив

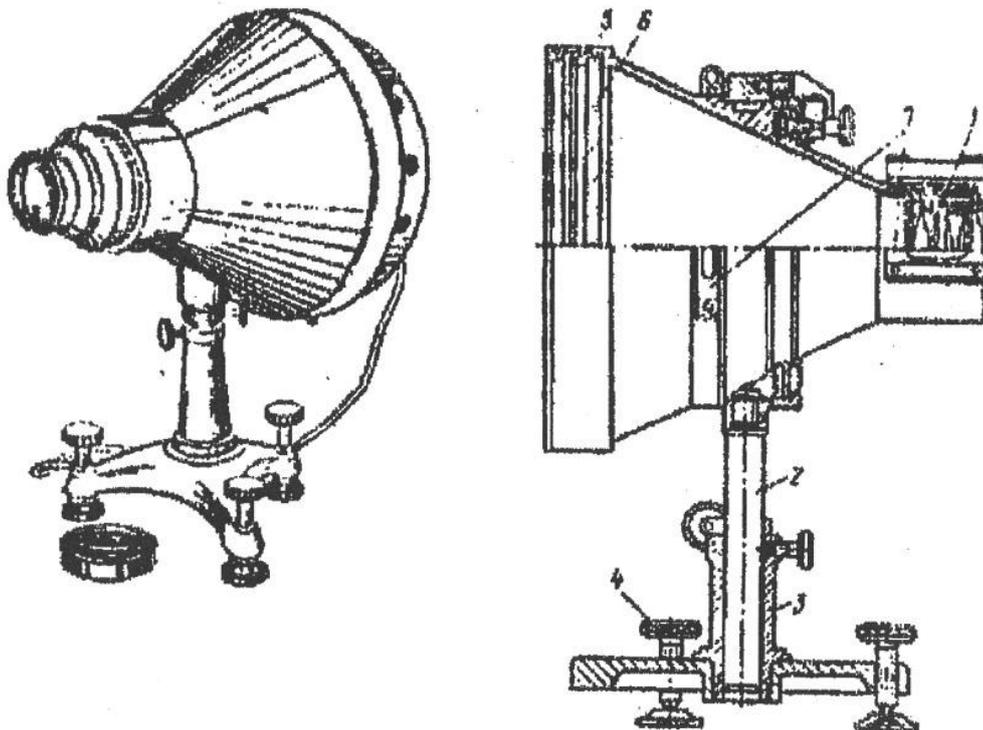


Рис. 5.7. Широкоугольный коллиматор

В качестве тест-объекта коллиматора могут быть:

- точечные диафрагмы, диаметр которых выбирают, исходя из фокусного расстояния объектива коллиматора: чем меньше фокусное расстояние объектива коллиматора, тем меньше диаметр точечной диафрагмы;
- регулируемые (или сменные щелевые) диафрагмы, используемые в коллиматоре при угловых и спектральных измерениях;
- сетки, применяемые в коллиматоре при измерении фокусных расстояний, увеличения угла поля зрения, наклона изображения и др.

В качестве объектива широкоугольного коллиматора используется чаще всего фотообъектив типа "Индустар" из-за его относительной простоты (3 компонента, при этом только один из них – 2-х линзовая склейка) и хорошего исправления aberrаций, как для точки на оси, так и для внеосевых точек.

Величина дисторсии у объектива типа "Индустар" для угла поля зрения до 30° мала, не превышает $0,2 - 0,3 \%$ и не влияет на угловые размеры сетки, что позволяет при расчёте сеток не учитывать дисторсию.

Сетка широкоугольного коллиматора имеет минутную шкалу, иногда рядом носится шкала в тысячных дистанциях.

На рис. 5.8 показана шкала широкоугольного коллиматора, цена деления которой $5'$ и $00 - 01$, фокусное расстояние объектива $f' = 210$ мм, относительное отверстие $1:4$ (Индустар типа И-51).

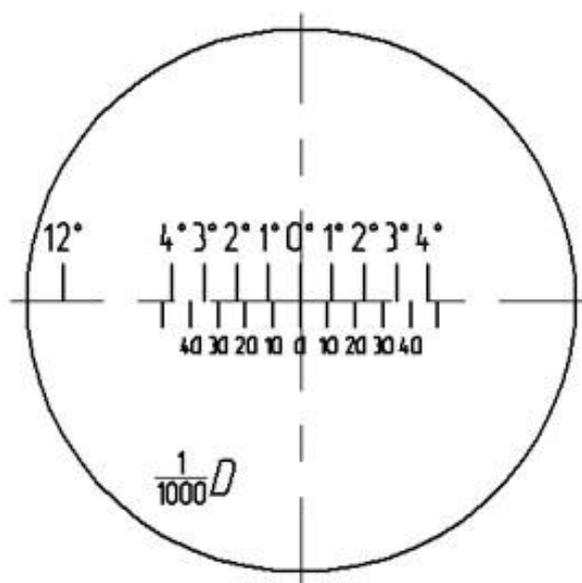


Рис. 5.8. Сетка широкоугольного коллиматора

В объективах типа И-51 в небольших ($\pm 0,4$ мм) пределах можно изменять фокусное расстояние за счёт изменения одного из воздушных промежутков, что используется для юстировки масштаба изображения сетки.

Так как допуск на фокусное расстояние объектива И-51 больше значения $\pm 0,4$ мм, то для юстировки масштаба изображения объективы комплектуются по группам:

1-я группа – $f' = 208,6 \pm 0,45$;

2-я группа – $f' = 209,5 \pm 0,45$;

3-я группа – $f' = 210,7 \pm 0,45$.

Сетки изготавливаются с номинальными значениями размеров, рассчитанными для каждой из групп объективов.

При проверке телескопических систем с изменением направления линии визирования до 20° и с положением зрачка входа внутри оптической системы применяются объективы с фокусными расстояниями 300 мм и 500 мм (И-26; И-36).

Объективы И-26 и И-36 используются для проверки телескопических систем с изменением направления линии визирования до 20° и с положением входного зрачка внутри оптической системы.

Юстировка коллиматора

В задачу юстировки коллиматора входит: совмещение плоскости сетки с фокальной плоскостью объектива; совмещение визирной оси коллиматора с оптической осью объектива (для длиннофокусных коллиматоров, применяемых для проверки качества изображения).

В практике оптического приборостроения наиболее часто применяются два метода установки сетки в фокальную плоскость объектива:

- с помощью зрительной трубы;
- по автоколлимации.

При юстировке коллиматора с помощью зрительной трубы (рис. 5.9) зрительная труба должна быть установлена на бесконечность с достижимой точностью.

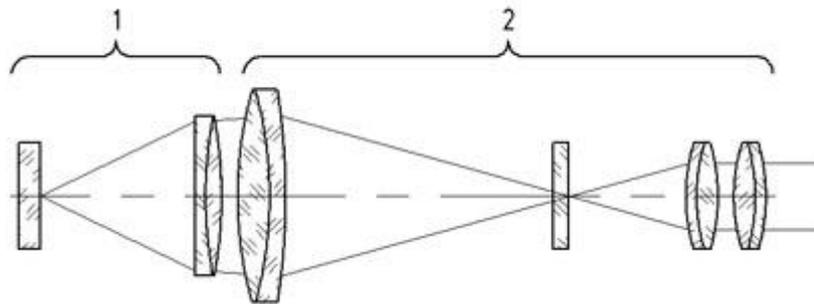


Рис. 5.9. Оптическая схема юстировки коллиматора с помощью зрительной трубы:
1 – юстируемый коллиматор; 2 – зрительная труба

Погрешность установки зрительной трубы на бесконечность вызовет ошибку совмещения сетки коллиматора с фокальной плоскостью его объектива:

$$\Delta Z_{\kappa} = \Delta Z_{mp} \left(\frac{f'_{об.к}}{f'_{об.тр}} \right)^2, \quad (5.10)$$

где ΔZ_{κ} – ;
 ΔZ_{mp} – ;
 $f'_{об.к}$ – ;
 $f'_{об.тр}$ – .

Отсюда следует, что для того, чтобы уменьшить влияние погрешности установки зрительной трубы на бесконечность хотя бы на один порядок, $f'_{об.тр}$ должно быть больше $f'_{об.к}$ как минимум в 3 раза.

Зрительная труба устанавливается на бесконечность по звезде, Луне или автоколлимационным способом от эталонного плоского зеркала.

Юстировка коллиматора проводится следующим образом:

- 1) окуляр зрительной трубы устанавливается на резкое видение её сетки;
- 2) подсветив сетку коллиматора подвижкой объектива или сетки коллиматора, добиваются резкого видения сетки коллиматора.

Точность совмещения изображения сетки коллиматора с плоскостью сетки зрительной трубы ΔZ определяется точностью продольных совмещений:

$$\Delta Z = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{\sigma'_{раб}{}^2}, \quad (5.11)$$

где $\sigma'_{раб}$ – рабочая апертура объектива зрительной трубы.

Суммарная погрешность Δ_k совмещения сетки с фокальной плоскостью объектива коллиматора равна:

$$\Delta_k = (\Delta Z + \Delta Z_{mp}) \left(\frac{f'_{об.к}}{f'_{об.тр}} \right)^2. \quad (5.12)$$

Для повышения точности совмещения изображения сетки коллиматора с сеткой зрительной трубы применяют следующие способы.

1. Способ наблюдения параллакса

При покачивании глаза в направлении, перпендикулярном оси, в пределах рабочего выходного зрачка зрительной трубы при имеющемся параллаксе между изображением сетки коллиматора и сетки зрительной трубы более, чем 0,2 диоптрии, изображение сетки коллиматора будет смещаться в направлении перемещения глаза относительно сетки зрительной трубы.

При этом если смещение изображения сетки коллиматора совпадает с направлением движения глаза, объектив необходимо смещать к сетке, если смещение изображения происходит в направлении противоположном перемещению глаза, объектив передвигают дальше от сетки.

2. Способ качающейся пластинки

Для повышения точности установки можно использовать качающуюся плоскопараллельную пластинку достаточно большой толщины (30 – 40 мм), помещённую между коллиматором и зрительной трубой (рис. 5.10).

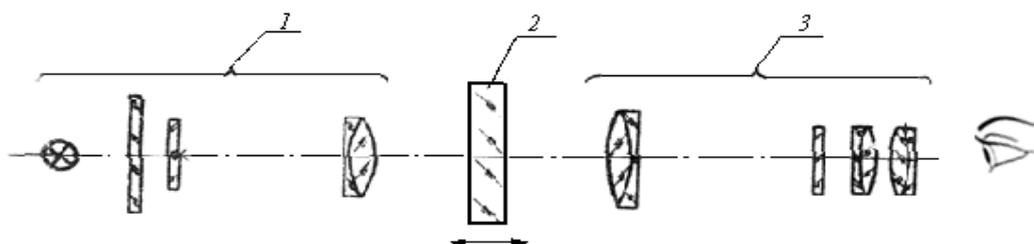


Рис. 5.10. Схема установки для юстировки коллиматора с помощью качающейся пластинки:

1 – коллиматор; 2 – плоскопараллельная пластинка; 3 – зрительная труба

Если из коллиматора выходит сходящийся пучок лучей (сетка не совмещена с фокальной плоскостью), то при покачивании пластинки вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, изображение сетки коллиматора будет смещаться относительно неподвижной сетки зрительной трубы.

Автоколлимационный метод используется при юстировке длиннофокусных коллиматоров ($f'_{об} > 1$ м), когда зрительную трубу с необходимым фокусным расстоянием объектива подобрать не удаётся, так как её фокусное расстояние должно быть большим (более 3 м).

За сеткой при снятом осветителе коллиматора устанавливается автоколлимационный окуляр с кубиком и источником света (рис. 5.11).

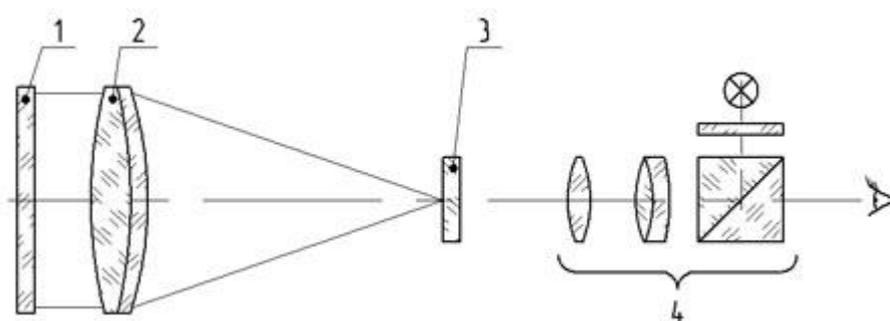


Рис. 5.11. Оптическая схема юстировки автоколлимационным методом:
1 – эталонное зеркало; 2 – объектив коллиматора; 3 – сетка коллиматора;
4 – автоколлимационный окуляр

Фокусность эталонного зеркала f' не должна вносить погрешности более 0,2 от погрешности продольных установок ΔZ :

$$f'_3 \geq \frac{f'^2_{об}}{0,2 \cdot \Delta Z} \geq \frac{D_p^2}{8} \cdot 10^5. \quad (5.13)$$

Суммарная погрешность установки сетки в фокальную плоскость объектива коллиматора, отъюстированная по автоколлимации, определяется из соотношения:

$$\Delta = \frac{\Delta Z}{2} + \Delta_3, \quad (5.14)$$

где Δ_3 –

5.2. Автоколлимационные системы

Автоколлимационной системой называется оптическая система, посылающая лучи на отражающую поверхность таким образом, что они после от-

ражения дают действительное изображение светящейся марки или сетки в плоскости сетки системы.

Автоколлиматор [autos (*греч.*) – сам + коллиматор] – сочетание зрительной трубы и коллиматора. Он состоит из объектива и автоколлимационного окуляра.

Автоколлиматор применяется для измерения угловых и линейных величин при контроле плоскопараллельности, клиновидности, центрировании линз, при измерении углов призм, клиньев и др. В сочетании с плоским зеркалом или многогранной призмой, входящих в комплект автоколлиматора, его используют соответственно для контроля плоскостности, прямолинейности направляющих и разметочных плит или для контроля углоизмерительных приборов (гониометров, делительных головок) и угловых мер.

Измерение сводится к измерению угла поворота зеркала. При этом величина a смещения автоколлимационного изображения в плоскости сетки определяется как:

$$a = f'_{об} \cdot \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (5.15)$$

где α – угол разворота зеркала;

$f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива.

При измерении линейных величин угол разворота зеркала определяется как:

$$\alpha = l/L, \quad (5.16)$$

где l – измеряемая величина;

L – длина плеча рычага кинематической схемы перехода от линейных смещений измеряемой величины к углу поворота зеркала.

Чувствительность автоколлиматора в два раза выше, чем у коллиматора с тем же f' , так как наклон зеркала на угол φ вызывает отклонение луча (или смещение изображения) на 2φ .

Отечественная промышленность выпускает целый ряд автоколлиматоров для измерения углов наклона зеркальных поверхностей, установки их параллельно и перпендикулярно друг другу.

Далее приведены некоторые типы автоколлимационных окуляров.

Окуляр Аббе

Окуляр Аббе широко применяется в автоколлимационных устройствах контрольно-юстировочных приборов и приспособлений.

Оптическая схема окуляра Аббе представлена на рис. 5.12.

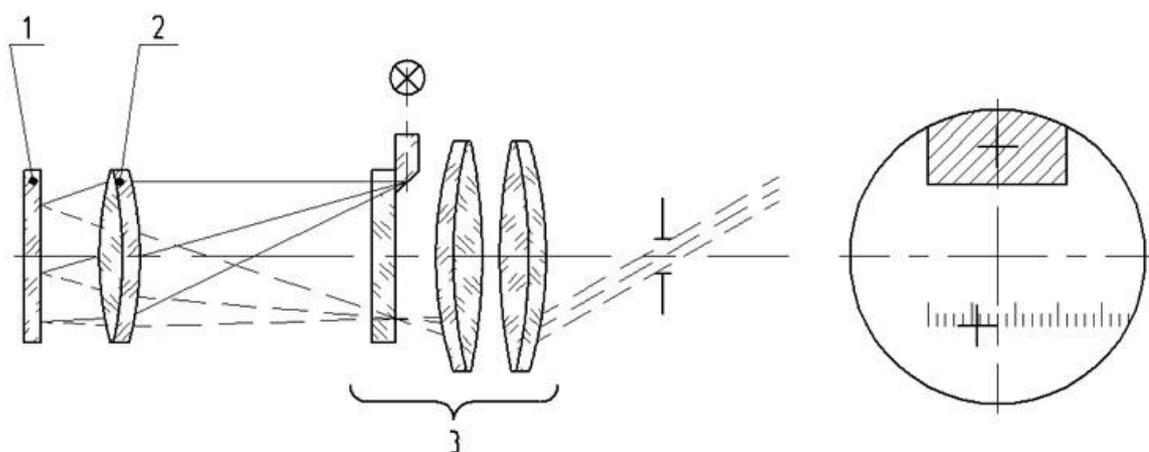


Рис. 5.12. Оптическая схема окуляра Аббе:
1 –зеркало; 2 – объектив; 3 – автоколлимационный окуляр

Справа показан вид поля зрения автоколлимационного окуляра Аббе. В качестве окуляра применяется окуляр симметричного типа, хотя может быть использован любой окуляр (Кельнера, Гаусса и т.п.) с передним фокальным отрезком не менее 5 – 10 мм.

Достоинство: высокий контраст изображения и малые потери света.

Недостаток: экранирование части поля зрения (часть поля зрения закрывает призма).

Автоколлимационный окуляр с полупрозрачным кубиком

Широкое применение получили автоколлимационные окуляры с полупрозрачным кубиком и двумя сетками (рис. 5.13).

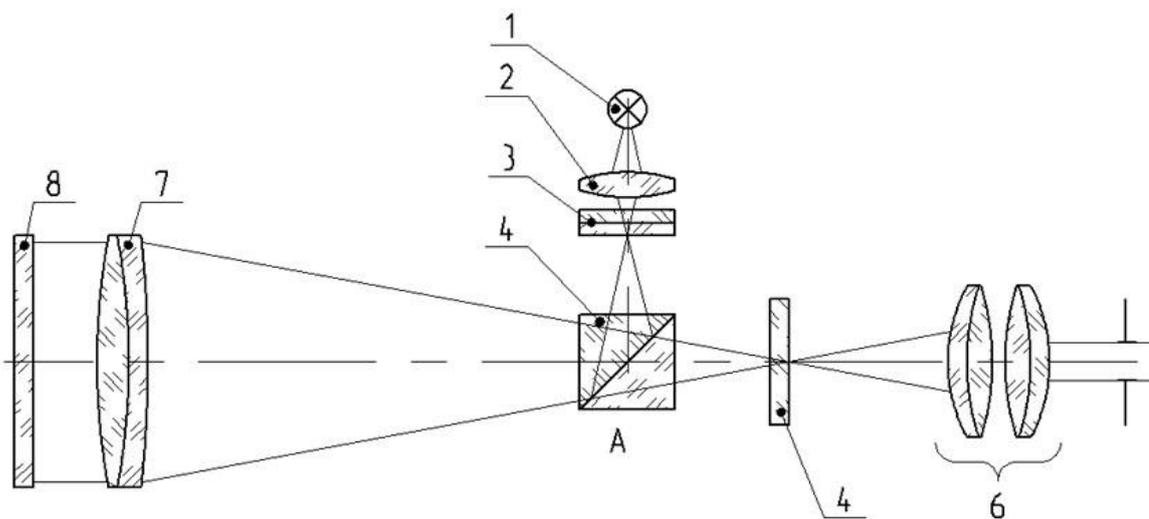


Рис. 5.13. Оптическая схема автоколлимационного окуляра с полупрозрачным кубиком:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – автоколлимационная марка;
4 – полупрозрачный кубик; 5 – сетка; 6 – окуляр; 7 – объектив; 8 –зеркало

Достоинство: отсутствует диафрагмирование поля зрения.

Недостаток: низкий контраст изображения марки из-за большого рассеяния света от нижней поверхности *A* кубика, попадающего в поле зрения, а также низкий (12 – 15 %) коэффициент светопропускания.

С целью увеличения контраста изображение автоколлимационной марки делают в виде прозрачных штрихов на тёмном фоне. Штрихи нарезают на слое серебра, который покрывают защитным стеклом для защиты от влияния атмосферы.

Автоколлимационный окуляр Гаусса

Оптическая схема автоколлимационного окуляра Гаусса представлена на рис. 5.14.

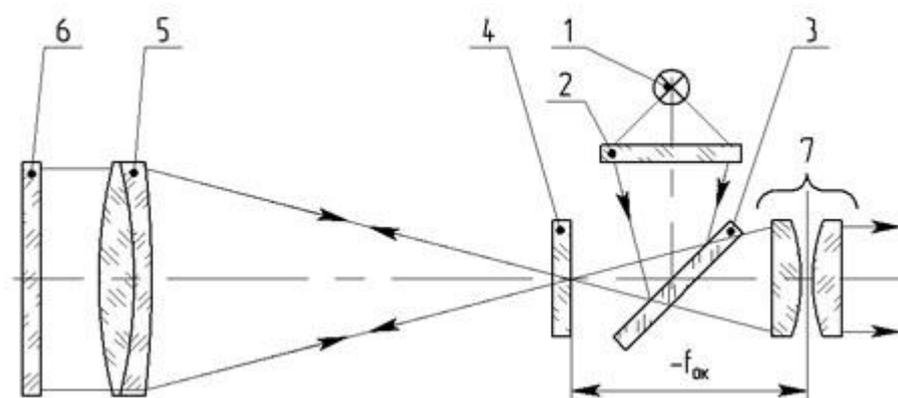


Рис. 5.14. Оптическая схема автоколлимационного окуляра Гаусса:

1 – источник света; 2 – матовая пластинка; 3 – полупрозрачная пластинка;
4 – сетка; 5 – объектив; 6 – зеркало; 7 – окуляр

Роль автоколлимационной марки в автоколлимационном окуляре Гаусса выполняет перекрестие сетки 4, подсвечиваемое источником света 1. Сетка находится в фокальной плоскости объектива 5.

Полупрозрачная пластинка 3 расположена в сходящемся пучке лучей под углом 45° к оптической оси. Чтобы уменьшить астигматизм, её толщина должна быть минимальной при достаточно высокой плоскостности поверхностей, что трудно выполнить технологически.

Недостатки:

– низкий коэффициент пропускания света, малое поле зрения при достаточно большом фокусном расстоянии окуляра $f'_{об}$ (большое фокусное расстояние вызывается необходимостью размещения полупрозрачной пластинки между окуляром и его передней фокальной плоскостью);

– низкий контраст изображения сетки, вызываемый засветкой поля зрения светом, отражённым от оправы окуляра.

Автоколлимационный окуляр В.П. Линника

Схема автоколлимационного окуляра В.П. Линника показана на рис. 5.15.

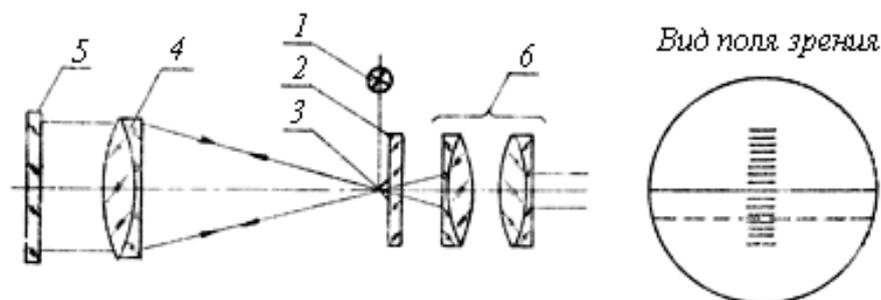


Рис. 5.15. Автоколлиматор с окуляром Линника:

1 – источник света; 2 – плоскопараллельная пластинка с наклеенной трёхгранной нитевидной призмой 3, толщина которой 0,1 – 0,2 мм. Нить выполняет одновременно две функции: нити сетки и автоколлимационной осветительной призмы; 4 – объектив; 5 – зеркало; 6 – окуляр

Поле зрения окуляра Линника – тёмное поле и яркая светящаяся нить автоколлимационного изображения. Штрихи сетки наносятся травлением, и в поле зрения видны светящимися.

Автоколлимационный окуляр В.А. Захарьевского

Окуляр свободен от недостатков, присущих другим окулярам (рис. 5.16).

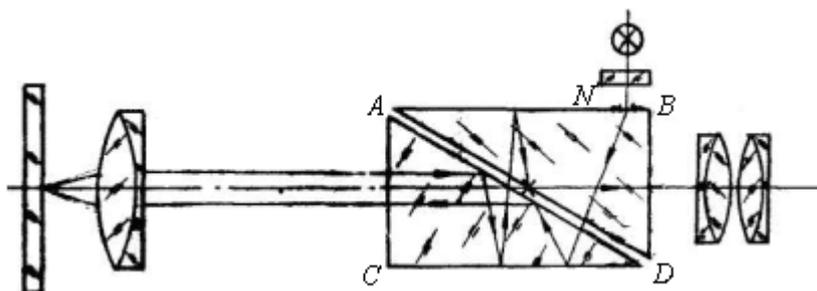


Рис. 5.16. Автоколлиматор с окуляром А.Н. Захарьевского

На посеребрённой грани AB прорезана автоколлимационная марка N , лежащая в совмещённой фокальной плоскости объектива и окуляра, подсвечиваемая источником света через конденсор или матовую пластинку.

Лучи света, пройдя гипотенузные грани призм, отражаются от посеребрённой грани CD и, попадая на гипотенузную грань под углом больше критического, отражаются и падают на объектив. Ход отражённых лучей показан на рис. 5.16.

Потери света в окуляре А.Н. Захарьевского около 40 %.

Автоколлимационный окуляр И.А. Тельтевского

Для отсчитывания отклонения автоколлимационного изображения в пределах всего поля зрения, а также для получения светлых штрихов сетки и ав-

токоллимационной марки на тёмном поле предложен окуляр, изображённый на рис. 5.17.

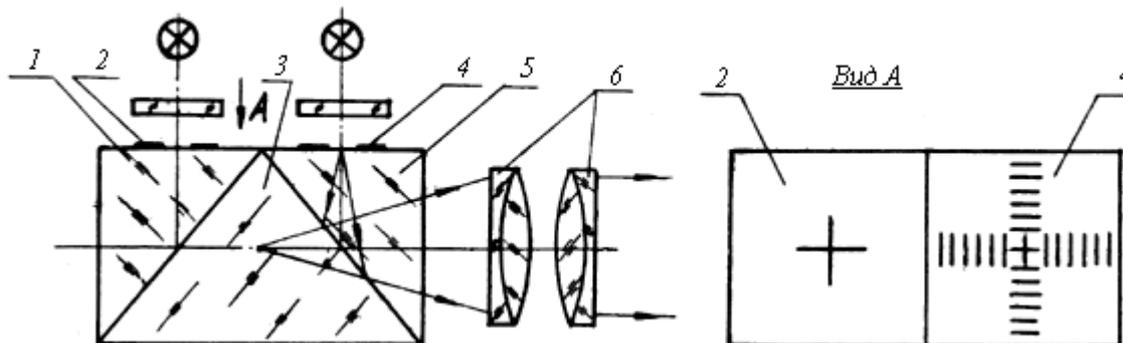


Рис. 5.17. Автоколлимационный окуляр Тельтевского
1, 3, 5 – автоколлимационные призмы; 6 – окуляр

Автоколлимационная призма состоит из 3-х прямоугольных призм 1, 3, 5, оклеенные поверхности которых имеют полупрозрачное покрытие.

Поверхности 2, 4 призм 1, 5 имеют зеркальное покрытие с нарезанными в них автоколлимационной маркой 2 и сетки 4 (см. вид А), которые подсвечиваются источниками света через матовые стёкла.

К недостаткам этого автоколлимационного окуляра следует отнести:

- низкий (порядка 5 – 10 %) коэффициент светопропускания света, идущего от марки 2;
- разность яркостей свечения изображения марки и сетки (для выравнивания яркостей требуется дополнительное устройство);
- засветка поля зрения лучами, отражающимися от гипотенузной грани призмы 3.

Двухкоординатный автоколлимационный окуляр Ю.П. Контиевского

На рисунке 5.18 приведена схема автоколлимационного окуляра Контиевского: источник света 1 через конденсор 2 освещает автоколлимационную марку 3, расположенную в фокальной плоскости объектива автоколлиматора; на склеиваемых поверхностях призмы 5 нанесены светоделительные покрытия; лучи от марки, пройдя призмный блок 4, 5, отражаются от светоделителя 6 и идут на объектив, где, отразившись от зеркала и пройдя через объектив, строят два автоколлимационных изображения марки на поверхности А кубика 8.

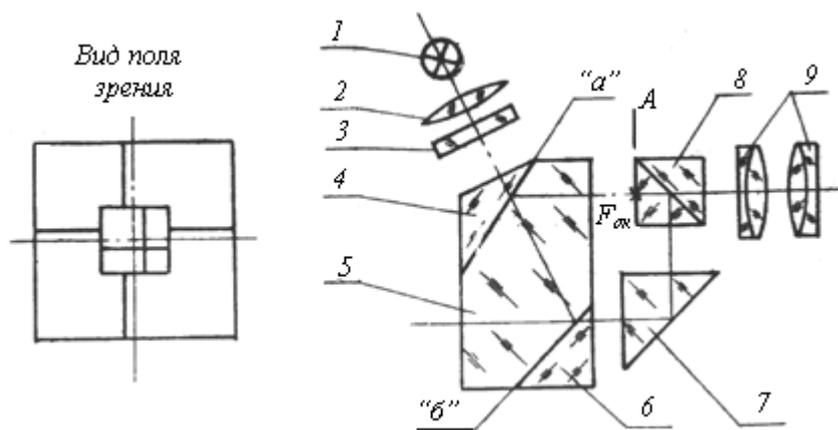


Рис. 5.18. Двухкоординатный автоколлимационный окуляр Контиевского:
 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – автоколлимационная марка;
 4, 5, 6 – автоколлимационные призмы; 7 – прямоугольная призма с крышей;
 8 – светоделительный кубик; 9 – окуляр

Первое, отразившись от светоделителей b и a , а второе, пройдя через светоделитель b , крышеобразную призму 7 и отразившись от светоделителя кубика 8. Поверхность A кубика 8 зеркальная с вырезанным квадратным или прямоугольным участком. При повороте зеркала изображения марки, за счёт разного оборачивания изображения в ветвях, смещаются в противоположные стороны, что повышает чувствительность измерений.

Конструкция окуляра позволяет использовать окуляр-микрометр (например, линзовый).

К недостаткам окуляра следует отнести большие (до 95 %) потери света.

Автоколлимационный окуляр Спивака

Окуляр состоит из источника света 1, конденсора 2, марки 3, разделительного призмного блока 4, 5, 6, 7 и окуляра 8, (рис. 5.19).

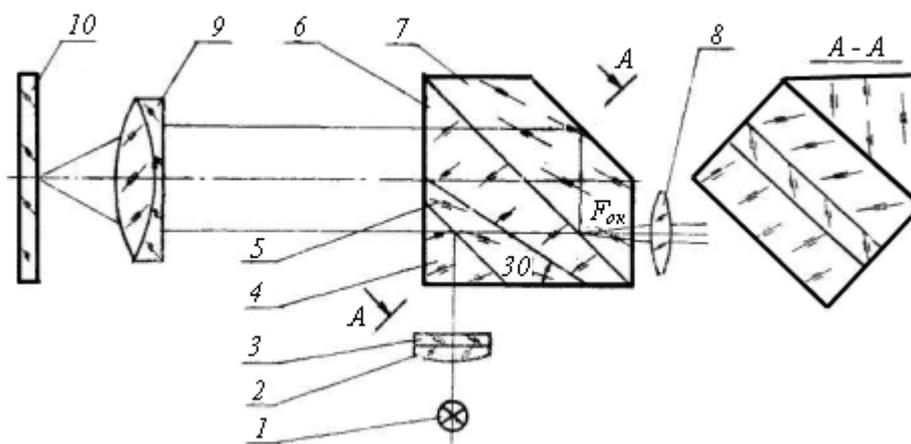


Рис. 5.19. Автоколлимационный окуляр Спивака:

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – марка;
 4, 5, 6, 7 – блок призм; 8 – окуляр; 9 – объектив; 10 – зеркало

Призмный блок напоминает призму – куб, у которой одна, верхняя, призма АР-90 заменена крышеобразной призмой 7, оборачивающей одну из

разделительных частей изображения на 180° , а другая, нижняя, призма АР-90 составлена из трёх частей: отражательного клина 6, юстировочного клина 5 и автоколлимационной призмы 4. Средняя часть большой грани призмы 6 посеребрена (как указано пунктиром на чертеже) для обеспечения разделения изображения на две части и отражения их в окуляр. Клин 5 предназначен для юстировки разделительного блока при склейке путём продольных перемещений клина с целью исключения влияния неточности нанесения участка серебра и погрешностей изготовления призм на качество совмещения частей изображения на разделительной границе серебряного участка гипотенузной грани призмного блока (исключения мертвой зоны между разделительной гранью частями изображения).

Автоколлимационная зрительная труба Спивака

Рассматриваемая схема автоколлимационной трубы, с целью повышения точности визирования, обеспечивает возможность нониального совмещения автоколлимационных изображений в двух плоскостях с одновременной фокусировкой трубы при визировании разноудалённых предметов.

Оптическая схема трубы (рис. 5.20) состоит из объектива 1, окуляра 2, сетки 3, источника света 4, четырёхгранной призмы усечённой правильной пирамиды 5 (рис. 5.20, а), с углом при вершине, равным 45° , зеркального отражателя 6, выполненного в виде трипель-призмы (рис. 5.20, б), наклеенной на пластинку 7.

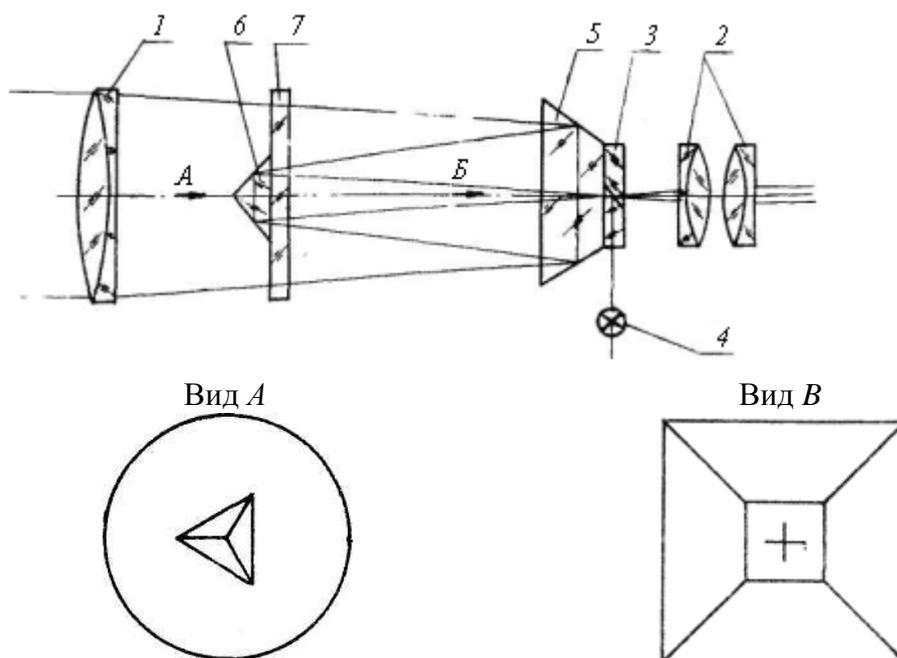


Рис. 5.20. Автоколлимационная труба Спивака:

1 – объектив; 2 – окуляр; 3 – сетка; 4 – источник света; 5 – четырёхгранная призма;
6 – зеркальный отражатель; 7 – пластинка.

а) отражатель трипель-призма; б) призма-пирамида с сеткой

Сетка выполнена в виде пластинки, составленной из двух одинаковых пластинок, склеенных полированными поверхностями, изготовленными под

углом 45° относительно входной поверхности. В середине одной из склеиваемых поверхностей нанесено зеркальное перекрестие.

Четыре отражающих грани призмы-пирамиды 5 составляют между собой углы 90° , а сама призма установлена между сеткой 3 и объективом 1. Благодаря этому, при использовании прибора в качестве зрительной трубы, например, при визировании на вешку, и при наличии между направлением на вешку и визирной линией углов α – горизонтального и β – вертикального в поле зрения (рис. 5.21, а) будет наблюдаться раздвоение изображения визируемого предмета, линейная величина которого пропорциональна двойному углу рассогласования между визирной линией и направлением на визируемый предмет.

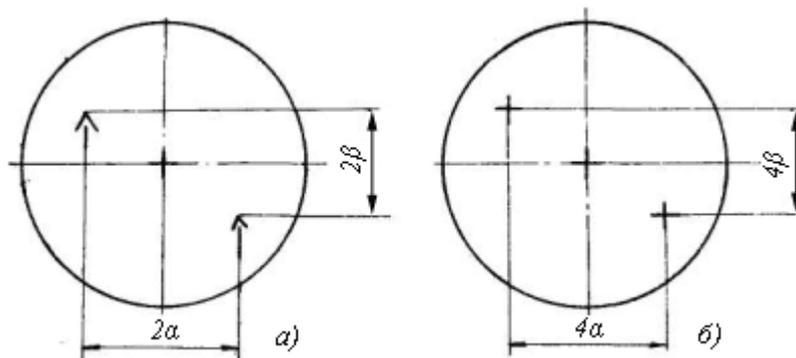


Рис. 5.21. Вид поля зрения

В автоколлимационном режиме работы трубы величина раздвоения автоколлимационного изображения в поле зрения (рис. 5.21, б) пропорциональна учетверённому углу поворота трубы (зеркала). Наводка на резкость ведения предметов, находящихся на конечном расстоянии, может осуществляться подвижкой пластины с отражателем вдоль оптической оси на величину, равную 0,5 от величины расфокусировки.

Расчёт оптических параметров автоколлиматоров, а также принцип работы компенсаторов изложен в [5].

С целью увеличения чувствительности автоколлимационного метода измерения вместо одного зеркала могут применяться зеркальные умножители (рис. 5.22).

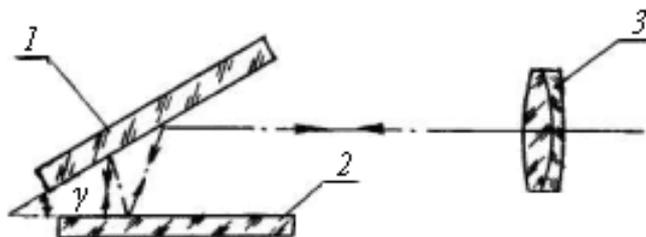


Рис. 5.22. Зеркальный умножитель:

1 – подвижное зеркало; 2 – неподвижное зеркало;
3 – объектив автоколлиматора

Угол между входящим и выходящим лучом при изменении угла γ на величину $\Delta\gamma$ равен

$$\Delta\gamma = 2n \cdot \Delta\gamma,$$

где n – количество отражений луча от подвижного зеркала 1;

γ – угол между зеркалами, который для получения автоколлимации должен быть кратным: $\gamma = 90^\circ/k$, где k – целое число, т.е. 45° , 30° , $22,5^\circ$, 18° , 15° и т.д.

В этом случае расстояние между штрихами сетки автоколлиматора определяется выражением:

$$a = \operatorname{tg} 2n\alpha \cdot f'_{об}, \quad (5.17)$$

где α – цена деления сетки;

$f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

5.3. Диоптрийная трубка

Диоптрийная трубка применяется:

- для установки окуляра в нулевое положение, т. е. для совмещения плоскости сетки с передней фокальной плоскостью окуляра;
- для проверки диоптриевой шкалы окуляра;
- для установки зрительной трубы на бесконечность (при отсутствии в зрительной трубе сетки);
- как вспомогательная зрительная труба при проверке качества изображения телескопических систем, диаметр выходного зрачка которых более 2 мм.

Оптическая схема диоптрийной трубки представлена на рис. 5.23.

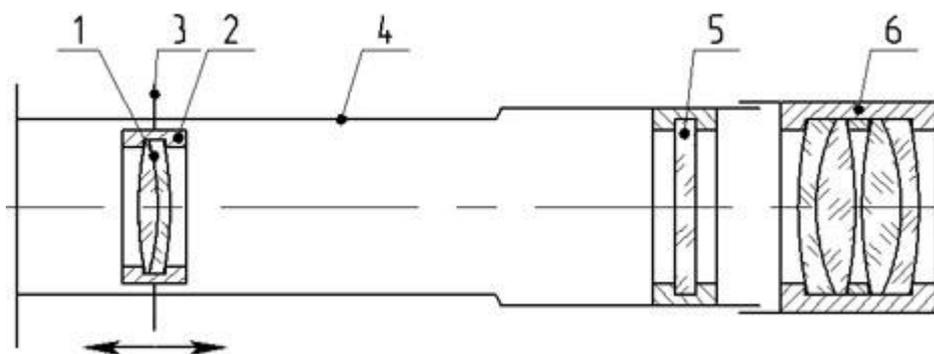


Рис. 5.23. Оптическая схема диоптрийной трубки:

- 1 – объектив; 2 – оправа объектива; 3 – винт;
4 – основной тубус; 5 – сетка в оправе; 6 – окуляр

Объектив диоптрийной трубки 1 заключён в специальную оправу 2 и с помощью винтов 3, завёрнутых в оправу объектива через продольный паз тубуса 4, может перемещаться вдоль оптической оси.

Перемещение объектива в диоптриях фиксируется по шкале, нанесённой на наружном цилиндре тубуса 4. Сетка в оправе 5 неподвижно закреплена в тубусе 4.

Окуляр 6 для установки резкого видения сетки наблюдателем имеет диоптрийную подвижку в пределах $\pm\Delta$, которая определяется как:

$$\Delta = D \frac{f'_{ок}{}^2}{1000}, \quad (5.17)$$

где D – величина сходимости пучков лучей за окуляром в диоптрийной мере;

$$f'_{ок} - .$$

Расчёт диоптрийной шкалы трубки ведётся с учётом положения объектива диоптрийной трубки относительно окуляра проверяемой системы. Перемещение объектива проградуировано в диоптриях с ценой деления шкалы в 0,25 дптр. и оцифровкой через 1 дптр. (рис. 5.24).

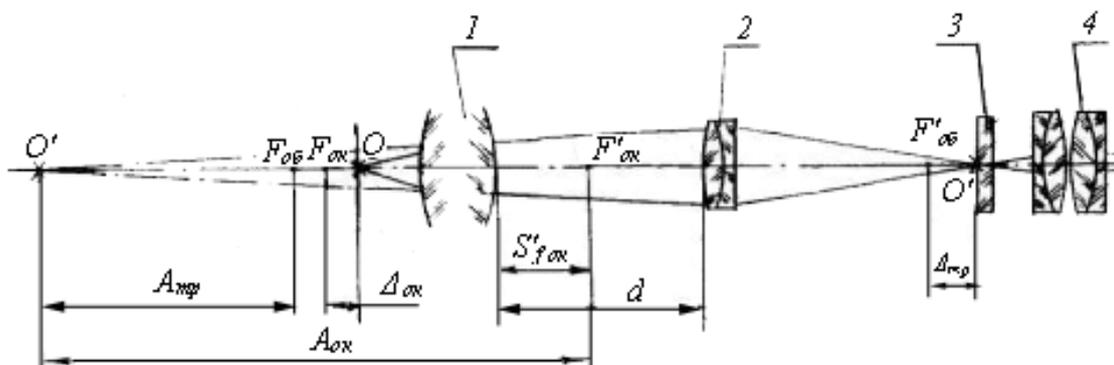


Рис. 5.24. К расчёту шкалы диоптрийной трубки:

1 – проверяемый окуляр; 2 – объектив; 3 – сетка; 4 – окуляр диоптрийной трубки

Диоптрийная трубка устанавливается от окуляра на некотором расстоянии d , значительно меньшем фокусного расстояния объектива, и формула расчёта диоптрийной шкалы определяется из рис. 5.24:

$$\Delta_n = \frac{f'_{об}{}^2}{\frac{1000}{D_n} - S_{f_{об}} + d - S'_{f_{ок}} - \Delta_{n-1}}, \quad (5.18)$$

где Δ_n – величина смещения объектива диоптрийной трубки, соответствующая её установке на D_n диоптрий;

- $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива диоптрийной трубки;
- d – расстояние от последней поверхности окуляра проверяемой системы до первой поверхности объектива диоптрийной трубки;
- $S_{f_{об}}$ – передний фокусный отрезок объектива диоптрийной трубки;
- $S'_{f_{ок}}$ – задний фокусный отрезок окуляра проверяемой системы;
- Δ_{n-1} – величина смещения объектива диоптрийной трубки на D_{n-1} диоптрий.

Для фиксации положения диоптрийной трубки на расчётном расстоянии от окуляра на переднюю часть тубуса диоптрийной трубки надевается специальный наконечник с опорной плоскостью, которая при измерениях опирается на оправу окуляра.

Диоптрийные трубки изготавливаются со шкалами $\pm 1,5$ диоптрии и ± 5 диоптрий с ценой деления 0,25 диоптрии.

Для измерения диоптрийной шкалы окуляра в пределах ± 5 диоптрий по трубке с длиной шкалы $\pm 1,5$ диоптрии пользуются дополнительными насадочными линзами силой в +1, +2, +3, +4, +5 и -1, -2, -3, -4, -5 диоптрий, помещаемых за проверяемым окуляром. Правильнее было бы совмещать переднюю главную плоскость насадочной линзы с задней фокальной плоскостью окуляра, рис. 5.25.

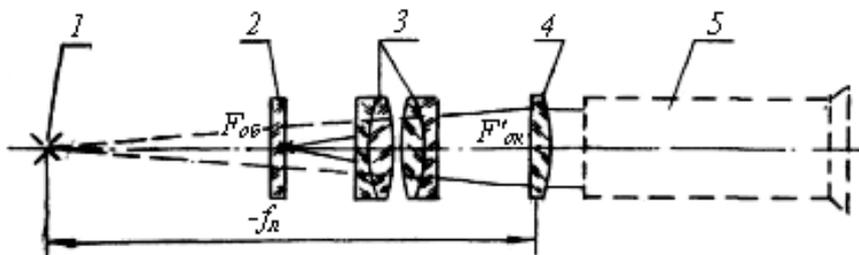


Рис. 5.25. Установка дополнительной линзы при проверке диоптрийной шкалы окуляра:

- 1 – изображение сетки окуляра, соответствующее диоптрии;
- 2 – сетка окуляра; 3 – окуляр; 4 – насадочная линза; 5 – диоптрийная трубка

Диоптрийную установку окуляра проверяют в следующем порядке:

1. Окуляр диоптрийной трубки устанавливают так, чтобы перекрестие трубки было резко видимым.
2. Перемещением объектива трубку фокусируют на удалённые объекты, расстояние до которых составляет не менее 50 – 100 м. При этом отсчёт по шкале трубки должен быть равен нулю диоптрий (знак бесконечности шкалы), что указывает на правильность юстировки трубы.
3. Диоптрийную трубку размещают передним концом вплотную к проверяемому объекту и, перемещая объектив трубки, добиваются одновременной резкости изображения сетки окуляра и перекрестия диоптрийной

трубки. Отсчёт по шкале диоптрийной трубки укажет при этом диоптрийную установку окуляра в данном положении.

Если показания шкалы диоптрийной трубки и шкалы испытуемого окуляра не совпадают, то необходимо исправить показание шкалы окуляра, отпустив стопорные винты и установив шкалу по показанию диоптрийной трубки.

Изменение диоптрийной установки окуляра зависит от расположения окуляра относительно сетки (рис. 5.26).

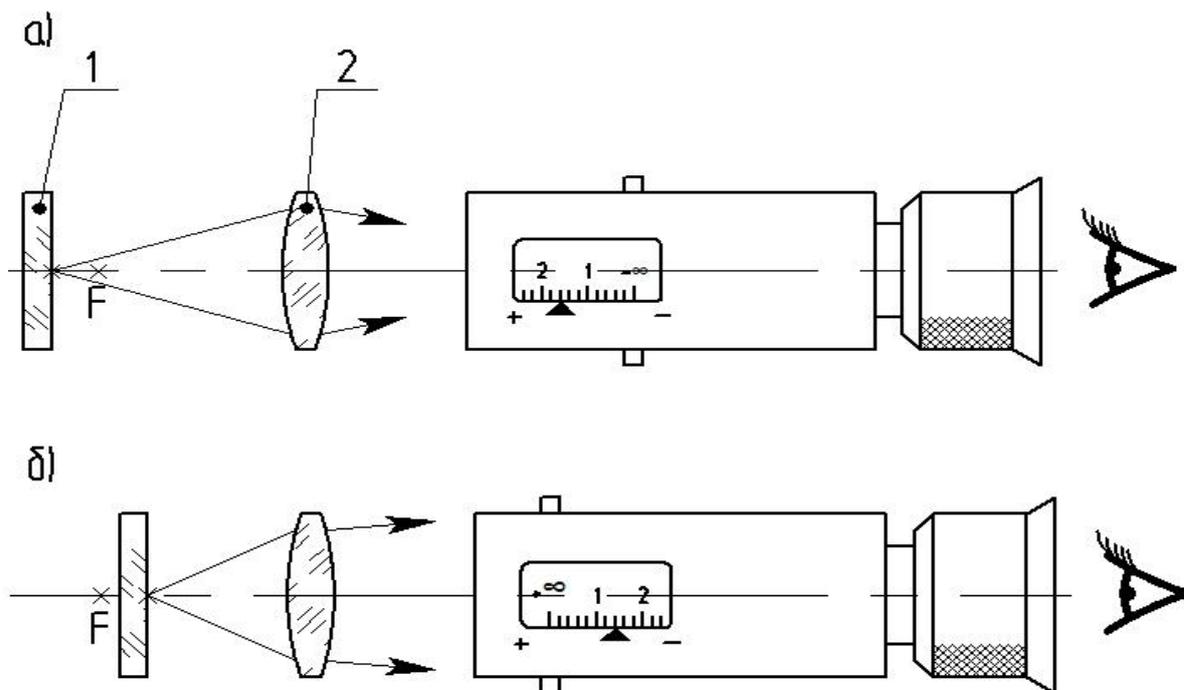


Рис. 5.26. Схема диоптрийной установки окуляра:
 а) знак “+” означает, что окуляр 2 следует приблизить к сетке;
 б) знак “-” означает, что окуляр 2 следует отодвинуть от сетки.

Увеличение диоптрийной трубки (телескопической системы):

$$\Gamma = 3,9^x; \Gamma_{ок} = 12,5^x; \quad (5.18)$$

5.4. Динаметры

Динаметр применяют для измерения размеров и формы выходных зрачков оптических приборов, для измерения увеличения телескопических систем так называемым "цеховым" методом, а также удаления выходного зрачка от последней поверхности окуляра и для контроля размеров фасок на оптических деталях.

Динаметры конструктивно выполняются двух видов: динаметр Рамсдена и динаметр-микроскоп

Динаметр Рамсдена состоит из окуляра с фокусным расстоянием 20 – 25 мм и сетки с ценой деления 0,1 мм, помещённой в фокальной плоскости (рис. 5.27).

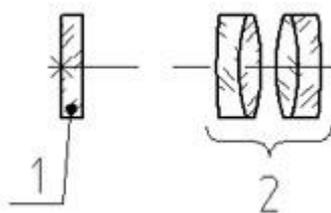


Рис. 5.27. Оптическая схема динаметра Рамсдена:
1 – сетка; 2 – окуляр

Окуляр имеет диоптрийную подвижку относительно сетки. Сетка нанесена на наружной поверхности и может быть совмещена с проверяемой фаской и т. п. Динаметр Рамсдена чаще применяется в оптических цехах для измерения размеров фасок и в практике сборочных цехов применяется редко.

Динаметр-микроскоп

Оптическая схема динаметра-микроскопа представлена на рис. 5.28.

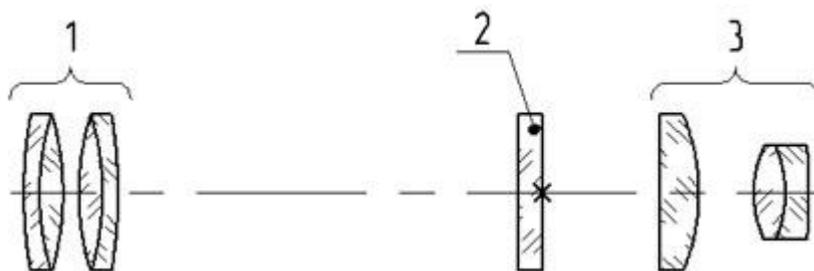


Рис. 5.28. Оптическая схема динаметра-микроскопа:
1 – объектив; 2 – сетка; 3 – окуляр

Однократный объектив 1 состоит из двух одинаковых склеенных линз с параллельным ходом лучей между ними (предмет находится в фокальной плоскости 1-й склейки, а изображение – в фокальной плоскости второй).

Как известно, в этом случае увеличение объектива равно отношению фокусных расстояний его компонентов и, в случае их равенства, равно минус единице:

$$V_{об} = \frac{f_2'}{f_1'} = -1 \quad (\text{при } f_2' = -f_1').$$

На сетке нанесена шкала с делениями через 0,1 мм, и так как $V_{об} = -1^x$, то и цена деления сетки $C = 0,1$ мм.

Для удобства отсчёта видимая величина расстояний между штрихами сетки должна быть не менее 1 мм, т.е. $C \cdot \Gamma_{ок} \geq 1 \text{ мм}$, тогда

$$\Gamma_{ок} \geq \frac{1}{C} \geq 10^x.$$

5.5. Оптические скамьи

Оптические скамьи – это универсальные системы, предназначенные для исследования оптических систем и их элементов по качеству изображения для измерения их оптических характеристик

Оптические скамьи используются:

- для исследования оптических систем и их элементов по качеству изображения;
- для измерения их оптических характеристик;
- для сборки и макетирования различных схем приборов (телескопических, микроскопических, проекционных, спектральных, фотометрических и т.д.);
- для проведения различных работ в области физической и технической оптики;
- для демонстрационно-учебных и научно-исследовательских работ.

Большой перечень приборов и приспособлений, входящих в комплект оптической скамьи, делает её незаменимым изделием при оснащении физических лабораторий самого различного назначения.

В комплект оптической скамьи входят:

1. Коллиматор
2. Автоколлимационная зрительная труба
3. Горизонтальный микроскоп
4. Универсальная диоптрийная трубка
5. Накладной уровень
6. Универсальная оправа
7. Струбцины
8. Универсальный суппорт с вращающейся оправой
9. Рейтеры
10. Держатели для установки исследуемых зрительных труб и коллиматоров
11. Плоский столик
12. Столик с крестообразным ходом с точностью отсчёта 1 мм
13. Столик с крестообразным ходом с точностью отсчёта 0,01 мм
14. Столик с одним микрометрическим движением с точностью отсчёта 0,01 мм
15. Поворотный столик
16. Качающийся столик
17. Осветитель с конденсором
18. Осветитель с ртутно-кварцевой лампой ПРК-4
19. Плоскопараллельная пластинка
20. Спектральная щель
21. Комплект мир
22. Комплект сеток
23. Комплект окуляров

24 Комплект автоколлимационных приспособлений

25. Понижающий трансформатор

26. Две двухметровых станины

Оптико-механической промышленностью выпускается две оптические скамьи ОСК-2 и ОСК-3, отличающиеся только фокусным расстоянием объектива коллиматора: $f'_{об} = 1\ 600$ мм (ОСК-2) и $f'_{об} = 1\ 000$ мм (ОСК-3).

Коллиматор ОСК-2

Оптическая схема коллиматора (рис. 5.29), состоит из двухлинзового расклеенного объектива, световой диаметр которого (равный диаметру входного зрачка) 150 мм.

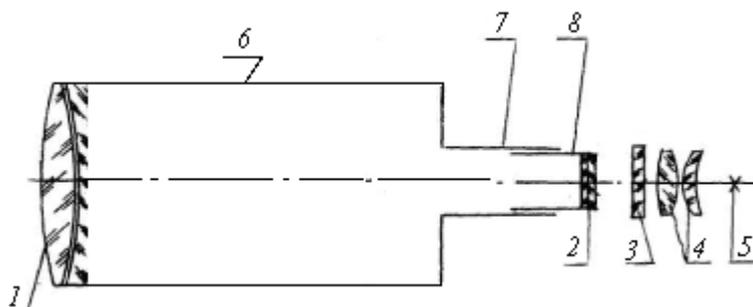


Рис. 5.29. Оптическая схема коллиматора ОСК-2:

1 – объектив; 2 – мира; 3 – стекло молочное; 4 – конденсор двухлинзовый;
5 – источник света; 6 – труба коллиматора; 7 – кронштейн; 8 – трубка сеток

Объектив коллиматора – высококорректированная оптическая система с пределом разрешения $\alpha = 0'',96$.

Теоретическая разрешающая способность коллиматора ОСК-2 равна:

$$\alpha_{теор} = 120'' / D_p = 0'',8.$$

Конструкция крепления объектива коллиматора позволяет с достаточной точностью выставить оптическую ось объектива параллельно оси трубы коллиматора, что имеет существенное значение для совмещения оптической и визирной осей коллиматора.

Труба 6 коллиматора с помощью двух колец с цапфами, закреплённых на трубе, покоится на основании, которое крепится к станине. Конструкция цапф даёт возможность при установке коллиматора на станину наклонять трубу коллиматора в горизонтальной и вертикальной плоскости для установки визирной оси коллиматора параллельно направляющим станины. Фокусировка коллиматора (изменение положения сетки (миры) относительно фокальной плоскости объектива) осуществляется перемещением с помощью трибки и рейки трубки 8 относительно кронштейна 7, укреплённого на трубе 6 (рис. 5.29).

С целью быстрой смены мир или сеток, закреплённых в револьверной головке, к трубке 8 крепится втулка с посадочным отверстием диаметром 34,4.

К коллиматору прикладывается:

- набор мир;
- набор светофильтров;
- набор сеток;
- набор окуляров;
- автоколлимационные приспособления;
- спектральная щель.

Миры

В комплект ОСК-2 входит набор штриховых мир № 1, 2, 3, 4 и 5, выполненных по нормам министерства, **ГОСТ 15114-78** НО 1671-56 «Миры штриховые для определения предела разрешения оптических систем. Размеры и технические условия».

Угловое расстояние между серединами соседних полос – элементов мир от 0",64 до 41",3. (Разумеется, элементы мир, угловое расстояние между серединами полос которых менее 0",96 – предела разрешения объектива коллиматора, не разрешаются коллиматором и использованы в коллиматоре быть не могут. Это 17-25 элементы миры №1).

Штриховыми мирами называются пластинки с нанесённым на них рисунком (таблицей), состоящим из расположенных по определённой системе светлых, различающихся по ширине полос на тёмном фоне, или таких же полос на светлом фоне.

Набор мир состоит из шести пластинок (в ОСК-2 используются только 5), различающихся между собой размерами и масштабами нанесённого на них рисунка.

Миры набора нумеруются в порядке увеличения масштаба рисунка.

Каждая мира состоит из 25 отдельных занумерованных, как показано на рис. 5.30, элементов и двух пар параллельно равноотстоящих друг от друга отметок, расстояние между серединами которых называется базой миры и определяет её масштаб.

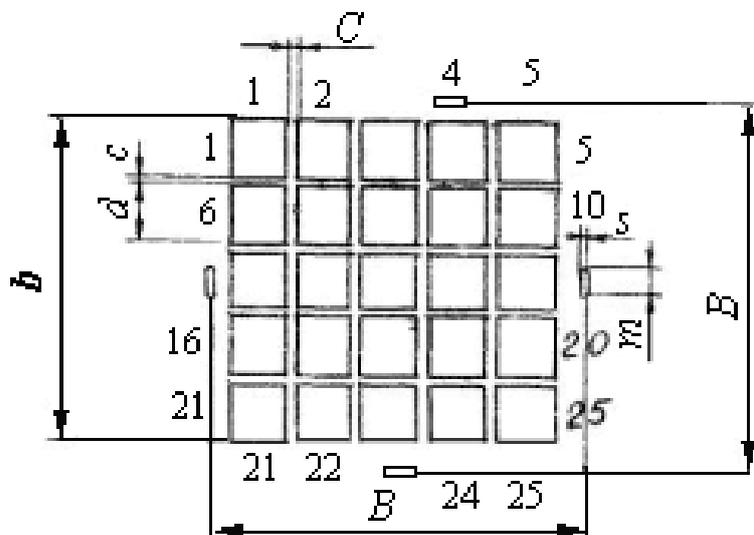


Рис. 5.30. Мира

Длина базы и другие размеры мир всех шести номеров устанавливаются таблицей 5.1.

Таблица 5.1

Размеры мир

Номер мира	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Длина базы B , мм	1,2	2,4	4,8	9,6	19,2	38,4
d , мм	0,219	0,438	0,877	1,750	3,510	7,020
C , мм	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32
b , мм	1,14	2,27	4,55	9,07	18,20	36,40
m , мм	0,05	0,10	0,20	0,40	0,80	1,60
S , мм	0,005	0,010	0,020	0,040	0,080	0,160

Каждый элемент мира состоит из четырёх групп, равных по ширине и длине параллельных полос, расположенных, как показано на рис. 5.31.

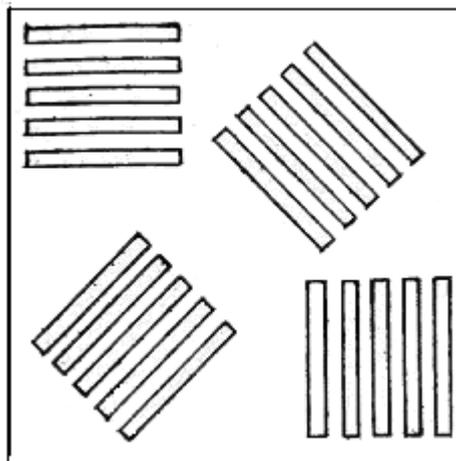


Рис. 5.31. Элемент мира

Ширина промежутков между полосами равняется ширине полос, которая убывает от элемента № 1 к элементу № 25 по закону геометрической прогрессии со знаменателем $\frac{1}{\sqrt[12]{2}} \cong 0,94$.

Число полос в каждой группе элемента мира, а так же ширина и длина полос для всех элементов каждой из шести мир устанавливается таблицей.5.2.

Параметры элементов миры

Номер миры		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
Длина полос в мм		0,09	0,18	0,36	0,72	1,44	2,88
Номер элемента миры	Число полос в группе элемента	Ширина полос в мкм					
		10,0	20,0	40,0	80,0	160,0	320,0
1	4	10,0	20,0	40,0	80,0	160,0	320,0
2	4	9,4	18,9	37,8	75,5	151,0	301,0
3	4	8,9	17,8	35,6	71,3	142,6	285,0
4	5	8,4	16,8	33,6	67,3	134,6	269,0
5	5	7,9	15,9	31,7	63,5	127,0	253,0
6	5	7,5	15,0	30,0	59,9	119,8	240,0
7	6	7,1	14,1	28,3	56,6	113,2	227,0
8	6	6,7	13,3	26,7	53,4	106,8	214,0
9	6	6,3	12,6	25,2	50,4	100,8	202,0
10	7	5,9	11,9	23,8	47,6	96,2	189,0
11	7	5,6	11,2	22,5	44,9	89,8	180,0
12	8	5,3	10,6	21,2	42,4	84,8	170,0
13	8	5,0	10,0	20,0	40,0	80,0	160,0
14	9	4,7	9,4	18,9	37,8	75,6	151,0
15	9	4,5	8,9	17,8	35,6	71,3	142,6
16	10	4,2	8,4	16,8	33,6	67,3	134,6
17	11	4,0	7,9	15,9	31,7	63,5	127,0
18	11	3,7	7,5	15,0	30,0	59,9	119,8
19	12	3,5	7,1	14,1	28,3	56,6	113,2
20	13	3,3	6,7	13,3	26,7	53,4	106,8
21	14	3,1	6,3	12,6	25,2	50,4	100,8
22	14	3,0	5,9	11,9	23,8	47,6	95,2
23	15	2,8	5,6	11,2	22,5	44,9	89,8
24	16	2,6	5,3	10,6	21,2	42,4	84,8
25	17	2,5	5,0	10,0	20,0	40,0	80,0

В зависимости от назначения миры должны изготавливаться на подложке из следующих материалов:

Для работы в видимой области спектра из зеркального стекла ГОСТ 7132-64 или из оптического стекла марки К8 ГОСТ 3514-67.

Для работы в ультрафиолетовой области спектра для длины волны свыше 0,20 мкм – из кварцевого стекла.

Для работы в инфракрасной области спектра или в ультрафиолетовой области спектра для длины волны короче 0,20 мкм миры представляют собой закреплённую в оправе металлическую плёнку со сквозными штрихами.

Размеры стеклянных (кварцевых) пластинок для мир устанавливаются таблицей 5.3.

Таблица 5.3

Размеры стеклянных (кварцевых) пластинок для мир

Номер миры	Диаметр, мм	Толщина, мм
№ 1 – № 4	30 Л ₄	2 ± 0,2
№ 5	32 Л ₄	2.5 ± 0,2
№ 6	60 Л ₄	5 ± 0,2

Клиновидность пластин не более 1", отступление поверхности от плоскости не более 4 полос. Миры должны выполняться фотографическим путём.

Прозрачность полос мир абсолютного контраста должна быть больше прозрачности фона не менее чем в 100 раз.

Ширина полос не должна отличаться от номинального значения более чем на ±2,5 %, а от ширины промежутков между ними более чем на ±5 %. (для элементов миры № 1 эти допуски удваиваются).

Угловое расстояние между серединами соседних полос каждого элемента миры вычисляется по формуле:

$$\alpha'' = \frac{2a}{f'} 206\,265, \quad (5.19)$$

где α – угловое расстояние в сек;

a – ширина полосы в мм;

f – фокусное расстояние коллиматора в мм.

Число полос на 1 мм (R_N) для любого номера элемента данной миры вычисляется по формуле:

$$R_N = \frac{60}{B} K_N, \quad (5.20)$$

где B – длина базы миры в мм;

K_N – коэффициент, зависящий от номера элемента миры,

$$K_N \cong 1,06^{N-1};$$

N – номер элемента миры.

Значения K_N для любого элемента приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Значения K_N для любого элемента мира

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
K_N	1,00	1,06	1,12	1,19	1,26	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	
N	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
K_N	2,00	2,10	2,20	2,40	2,50	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60	3,80	4,00

Значения α и R_N для коллиматоров ОСК ($f' - 1600$ мм и $f' - 1000$ мм) приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Значения α и R_N для коллиматоров ОСК

№ мира и номер элемента			Число полос на 1 мм	Угловое расстояние между серединами соседних полос в мм при $f'_{об}$		№ мира и номер элемента			Число полос на 1 мм	Угловое расстояние между серединами соседних полос в мм при $f'_{об}$	
				1000	1600					1000	1600
1			2	3	4	5			6	7	8
25			200,0	1",72	0",64	10	22		21,0	9",80	6",08
24			190,0	1,09	0,68	9	21		20,0	10,40	6,48
23			180,0	1,16	0,72	8	20		19,0	11,04	6,88
22			170,0	1,23	0,76	7	19		18,0	11,68	7,28
21			160,0	1,30	0,81	6	18		17,0	12,32	7,68
20			150,0	1,38	0,86	5	17		16,0	13,04	8,16
19			140,0	1,46	0,91	4	16		15,0	13,84	8,64
18			130,0	1,54	0,96	3	15		14,0	14,64	9,20
17			125,0	1,63	1,02	2	14	№ 5	13,0	15,52	9,76
16			120,0	1,73	1,08	1	13	25	12,5	16,48	10,32
15			110,0	1,83	1,15	№ 3	12	24	12,0	17,44	10,88
14	№ 2		105,0	1,94	1,22		11	23	11,0	18,48	11,52
13	25		100,0	2,06	1,29		10	22	10,5	19,60	12,16
12	24		95,0	2,18	1,36		9	21	10,0	20,80	12,96
11	23		90,0	2,31	1,44		8	20	9,4	21,90	13,70
10	22		85,0	2,45	1,52		7	19	9,0	23,30	14,50
9	21		80,0	2,60	1,62		6	18	8,4	24,60	15,40
8	20		75,0	2,76	1,72		5	17	8,0	26,18	16,30
7	19		70,0	2,92	1,82		4	16	7,4	27,70	17,20
6	18		65,0	3,08	1,92		3	15	7,0	29,40	18,30
5	17		63,0	3,26	2,04		2	14	6,6	31,10	19,40
4	16		60,0	3,46	2,16		1	13	6,3	32,90	20,50
3	15		56,0	3,65	2,30		№ 4	12	6,0		
2	14	№ 3	53,0	3,88	2,44			11	5,5		
1	13	25	50,0	4,12	2,58			10	5,2		
№ 1	12	24	47,0	4,35	2,72			9	5,0		
	11	23	45,0	4,65	2,88			8	4,7		
	10	22	42,0	4,90	3,04			7	4,5		

1			2	3	4	5			6	7	8
		21	40,0	5,20	3,24			6	4,2		
		20	38,0	5,52	3,44			5	4,0		
		19	35,0	5,84	3,64			4	3,7		
		18	33,0	6,16	3,84			3	3,5		
		17	32,0	6,52	4,08			2	3,3		
		16	30,0	6,92	4,32			1	3,1		
		15	28,0	7,32	4,60			№ 5			
		14	№ 4	26,0	7,76	4,88					
		13	25	25,0	8,24	5,16					
	№ 2	12	24	24,0	8,72	5,44					
		11	23	22,0	9,24	5,76					

Светофильтры

Для работы в монохроматическом свете в комплект ОСК прилагается набор светофильтров в оправках:

- зеленый из стекла марки ЗС-10;
- красный из стекла марки КС-3;
- оранжевый из стекла марки ОС-2;
- синий из стекла марки СС-1.

Светофильтры надеваются на переднюю часть осветителя.

Окуляры

Для того, чтобы коллиматор можно было использовать как зрительную трубу, в его комплект входит набор окуляров, оптические характеристики которых приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Оптические характеристики окуляров

Фокусное расстояние окуляра, мм	Увеличение	Рабочее расстояние, мм	Поле зрения, мм	Тип окуляра
12,41	20,0 ^x	-3,18	10,0	Кельнера
14,94	16,7 ^x	-4,92	13,0	Кельнера
19,74	12,5 ^x	-13,94	17,0	Симметричный
25,00	8,3 ^x	-28,36	17,0	Симметричный
41,63	6,0 ^x	-36,08	9,5	Гаусса

Кроме указанных окуляров в комплект прибора включён окуляр-микрометр обычного типа с точностью отсчёта в 0,01 мм. Через переходные

втулки окуляр-микрометр может быть закреплён как на коллиматоре, так и на зрительной трубе. В комплект прибора входит так же набор автоколлимационных окуляров.

Автоколлимационная зрительная труба

Зрительная труба предназначена для исследования к контролю телескопических систем и для решения многих вопросов лабораторной практики в области юстировки и измерения параметров оптических приборов.

Предусмотренная конструкцией возможность превращения зрительной трубы в автоколлимационную значительно расширяет область её применения, особенно как измерительного прибора.

Конструкция трубы в варианте автоколлиматора представлена на рис. 5.32.

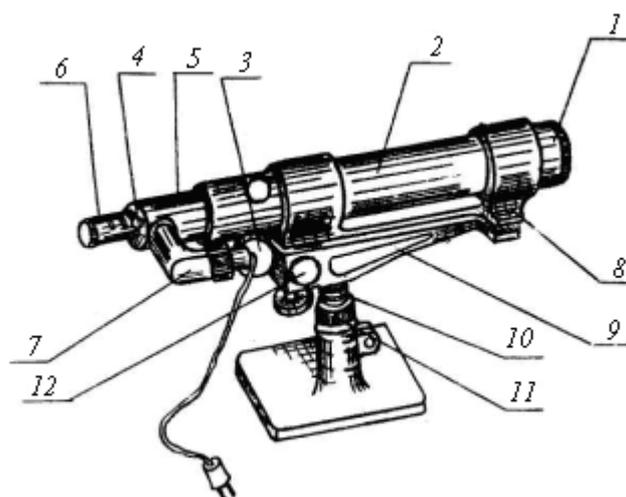


Рис. 5.32. Автоколлимационная зрительная труба:

- 1 – оправа объектива; 2 – труба; 3 – кремальерный механизм;
- 4 – винт фиксации положения окуляра; 5 – переходная втулка; 6 – окулярная втулка;
- 7 – корпус осветителя; 8 – кронштейн; 9 – седло; 10 – колонка; 11 – гайка;
- 12 – винт горизонтальной наводки

Объектив заключён в оправу 1, которая на резьбе крепится в трубе 2.

Между оправой и трубой крепится промежуточное кольцо, служащее для юстировки устранения параллакса.

Окулярная часть с помощью кремальерного механизма 3 имеет возможность менять фокусировку в пределах 50 мм.

Наличие механизма перефокусировки даёт возможность визировать трубу на предметы, близко расположенные. В трубе имеется механизм 4, зажимающий окулярную часть после её установки (фокусировки).

На трубе имеются два пояска (выступа), за которые труба крепится в кронштейне. В окулярную часть ввёрнута переходная втулка 5 для крепления окуляра, а в случае необходимости и окуляр-микрометра.

Крепление окуляра в трубе осуществляется с помощью втулки 6, имеющейся на окуляре, и зажимного винта на ней.

Окуляр имеет диоптрийную наводку для фокусировки по глазу наблюдателя. В переходной втулке на специальном мостике закреплена призма-куб. Сбоку к переходной втулке привёрнут корпус 7, несущий лампочку с патроном освещения, конденсор, автоколлимационную сетку.

Автоколлимационная сетка имеет перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи винтов во втулке 7.

Держатель состоит из двух чугунных отливок: кронштейна 8 и седла 9, скреплённых между собой пружинящей пластинкой. Седло крепится к колонке 10 при помощи резьбы. Колонка имеет на своей внешней цилиндрической поверхности ленточную резьбу с крупным шагом и с помощью гайки 11 может плавно подниматься вверх относительно рейтера. Это обеспечивает необходимое удобство и точность при установке автоколлимационной трубы. Также предусмотрен зажим, закрепляющий подвижную колонку в необходимом положении по высоте и обеспечивающий достаточную стабильность прибора.

Для предохранения подвижной колонки от поворота в горизонтальной плоскости во время её подъёма в конструкции имеется шпонка внутри рейтера и шпоночный паз на всю длину подъёма.

Точная горизонтальная наводка производится поворотом трубы вокруг пружинной пластинки вращением винтов 12, толкающих рычаг кронштейна и вместе с ним и трубу. Поворот в горизонтальной плоскости трубы от среднего положения ограничен в пределах $\pm 15'$.

Точная вертикальная наводка осуществляется поворотом кронштейна с трубой вокруг той же пластинки, вращением винта 13. При вращении винт толкает рычаг кронштейна, осуществляя покачивание трубы в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30'$ от среднего положения.

Для исключения мёртвого хода в резьбовом соединении винты вращаются в разрезных конических втулках. Степень плотности резьбового соединения может регулироваться затяжной гайкой.

Пружина, закреплённая между кронштейном и седлом, обеспечивает контакт винта вертикальной наводки и рычага.

Зрительная труба с рейтером устанавливается на станине и закрепляется зажимом.

Источником освещения автоколлимационной сетки служит маленькая лампа накаливания с напряжением питания 8 В. Для возможности использования питания от обычной сети 127 или 220 В. К скамье прикладывается понижающий трансформатор.

Микроскоп

Микроскоп служит для рассматривания на скамье изображения, даваемого исследуемым объективом для оценки его качества и используется также при измерении фокусного расстояния объектива.

Конструкция штатива, наличие механизмов перемещения по всем трём координатным осям позволяют использовать микроскопа и для других работ, в частности, для визуального наблюдения объектов, расположенных на вертикальных поверхностях, и для их линейных измерений.

Конструкция микроскопа показана на рис. 5.33.

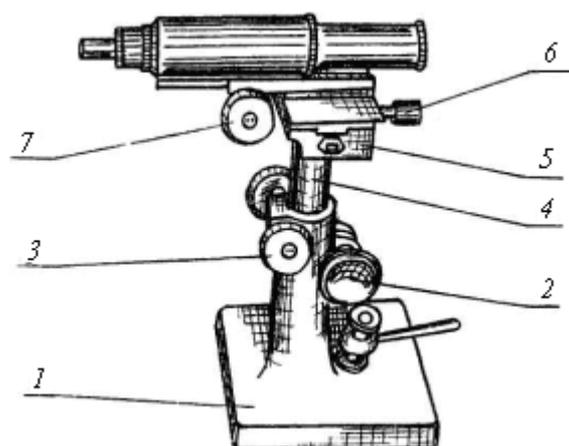


Рис. 5.33. Микроскоп:
1 – рейтер; 2 – зажимной механизм; 3 – маховик; 4 – стойка;
5 – корпус; 6,7 – маховики подвижки микроскопа

Штативом микроскопа служит асимметричный рейтер 1, устанавливаемый на скамье. Вертикальная колонка рейтера оканчивается двумя приливами, в которых размещены реечный механизм для вертикального перемещения микроскопа и зажимной механизм 2 для зажима микроскопа на установленной высоте.

Вращением маховиков 3, жёстко закреплённых на оси трубки, перемещаются по высоте по цилиндрической направляющей рейке и жёстко связанная с нею вертикальная стойка 4. Шпонка внутри рейтера предохраняет микроскоп от поворота в горизонтальной плоскости.

Перемещающаяся вертикальная стойка 4 заканчивается сверху жёстко закреплённым с нею корпусом 5, в котором помещается реечный механизм для поперечного перемещения микроскопа. Перемещение происходит по направляющим типа «ласточкин хвост».

Механизм фокусировки микроскопа представляет собой обычный реечный механизм, применяемый в биологических микроскопах. Вращением маховиков 6, сидящих на оси трубки, сцепленной с рейкой, жёстко закреплённой на тубусе микроскопа, производят фокусировку микроскопа.

Вращением маховика 7 производят поперечную подвижку микроскопа.

Микроскоп снабжён набором апохроматических объективов с характеристиками $3,7\times 0,1$; $8\times 0,2$; $20\times 0,4$; $40\times 0,6$ и окуляров типа Гюйгенса с увеличением $4\times$, $10\times$ и $15\times$.

Суппорт с вращающейся оправой

Суппорт с вращающейся оправой предназначен для крепления исследуемых линз объективов при контроле их качества изображения и измерении оптических характеристик. Суппорт с вращающейся оправой изображён на рис. 5.34.

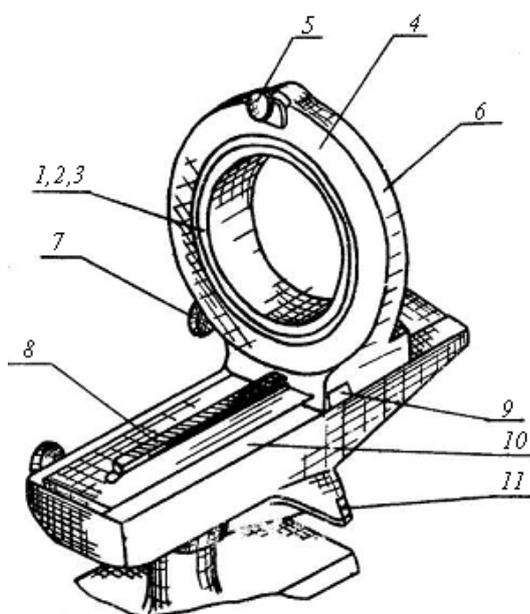


Рис. 5.34. Суппорт:

1, 2, 3 – съёмные оправы; 4 – оправка; 5 – зажимной винт; 6 – оправка суппорта; 7 – маховик; 8 – рейка; 9 – индекс; 10 – салазки; 11 – угловая шкала; 12 – зажимной винт; 13 – рейтер

Способ крепления оправы допускает её снятие и замену специальной оправой требуемого диаметра (поз. 1, 2, 3).

Вся оправка 4 вращается в шариковом подшипнике вокруг горизонтальной оси, и её положение может быть зафиксировано зажимным винтом 5.

Оправка суппорта 6 перемещается с помощью реечного механизма по направляющим типа «ласточкин хвост».

При вращении маховика 7 одновременно вращается трибка, закреплённая в оправке, и происходит перемещение оправы вдоль рейки 8. Трибка вращается в эксцентриковом подшипнике. Диапазон перемещения оправы 240 мм, кроме того, можно оправку снять с направляющих и надеть её другой стороной на направляющие.

Для производства отсчёта по миллиметровой шкале на оправке крепятся два индекса 9 с обеих сторон.

Направляющая и рейка крепятся к салазкам 10, которые могут разворачиваться относительно рейтера 13 на $\pm 40^\circ$.

Угол разворота может быть отсчитан по угловой шкале 11 и индексу. Суппорт можно закрепить в любом положении зажимным винтом 12.

Рейтер 13, неразъёмно связанный с салазками 10, устанавливается на скамье и крепится двумя зажимными винтами.

Универсальная оправка

Вид оправки показан на рис. 5.35.

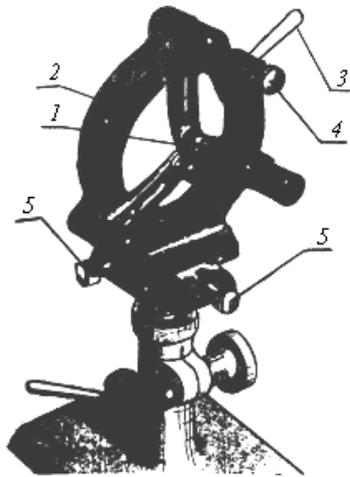


Рис. 5.35. Универсальная оправа:

1 – ролики; 2 – кольцо; 3 – рукоятка; 4 – зажимной винт; 5 – маховик

Универсальная оправа служит для крепления круглой оптики в оправах и без оправ диаметром от 10 мм до 85 мм. Крепление может производиться как по наружному диаметру оправы оптики, так и по внутреннему. Универсальная оправа имеет плавное юстировочное движение по высоте в осевом и поперечном направлениях.

Диаметр стойки под универсальную оправа равен 24 мм. Диапазон перемещения оправы по высоте равен 50 мм, осевое (продольное) и поперечное движения оправы равны ± 5 мм.

Движение оправы происходит по направляющим типа «ласточкин хвост» и осуществляется винтовой парой.

Зажим круглой оптики производится тремя роликами 1, раздвигающимися с помощью механизма, напоминающего привод лепестков и рисовой диафрагмы, отличаясь от последнего своей массивностью и жёсткостью.

Раздвижение роликов осуществляется вращением внутреннего кольца 2 за рукоятку 3. Установленное положение роликов по диаметру зажимаемой детали фиксируется винтовым зажимом 4. Для улучшения крепления деталей на ролики надета резиновая трубка.

Механизм продольного перемещения аналогичен механизму поперечного перемещения и осуществляется поворотом маховика 5.

Держатели для установки исследуемых коллиматоров и зрительных труб

Конструкция и внешний вид держателя представлены на рис. 5.36.

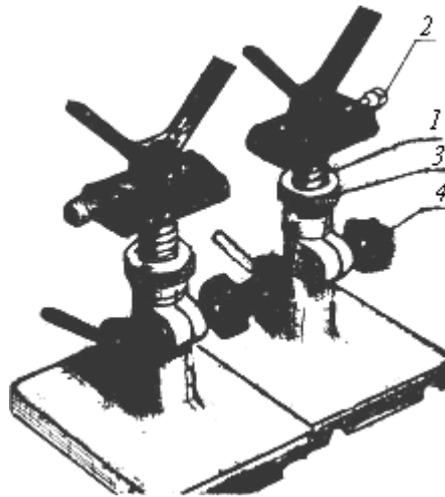


Рис. 5.36. Держатели:

1 – стойка, 2 – маховик, 3 – гайка, 4 – зажимной винт

Конструкция держателя позволяет установить зрительную трубу или коллиматор диаметром от 60 до 90 мм. Держатель состоит из двух одинаковых стоек 1, закрепляемых в двух рейтерах.

V-образные стойки имеют поперечное юстировочное движение в салазках в пределах ± 5 мм. Поперечное перемещение осуществляется вращением маховика 2. Стойки имеют плавное движение по высоте с помощью гайки 3 с ленточной резьбой. Фиксация по высоте осуществляется зажимом винта 4. Наличие этих движений позволяет произвести выверку трубы в вертикальной и горизонтальной плоскостях и параллельное смещение трубы в обоих указанных направлениях.

Плоский столик

Вид столика показан на рис. 5.37.

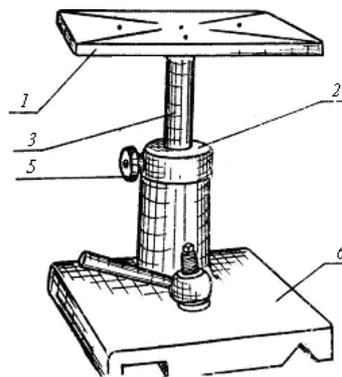


Рис. 5.37. Плоский столик:

1 – столик; 2 – струбцинка; 3 – колонка; 4 - хомутик; 5 - зажим; 6 – рейтер

Он представляет собой простой плоский столик 1 без всяких подвижек, за исключением подвижки по высоте. Размер столика 130×130 мм. Столик имеет 5 резьбовых отверстий размером М6×1 для крепления исследуемых деталей

или элементов схем и 4 радиальных Т-образных паза для установки специального прижима 2 (струбцинки), позволяющего зажимать на столе детали разных конфигураций и размеров. Столик навёрнут на колонку 3, вместе с которой он может перемещаться по высоте от руки. На колонке имеется упорный хомутик 4, который может быть закреплён в любом положении и служит для предохранения столика от опускания в случае ослабления зажима 5 в колонке рейтера 6.

В случае необходимости стойку можно удлинить путём ввёртывания дополнительной стойки. Для этого нижний конец колонки имеет резьбовое отверстие. Наружный диаметр колонки равен 15 мм.

Столик с крестообразным ходом с ценой деления отсчётной шкалы 1 мм

Конструкция и внешний вид столика показаны на рис. 5.38.

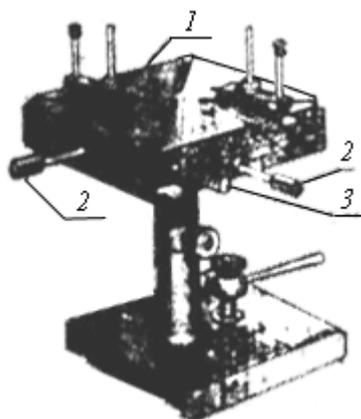


Рис. 5.38. Столик:

1 – плоскость столика; 2 – маховичок; 3 – зажимной винт

Верхняя плоскость столика 1 перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью реечных механизмов вращением маховиков 2. Перемещение производится по направляющим типа «ласточкин хвост». Диапазон перемещения в каждом направлении ± 30 мм. Зажим стола в любом положении осуществляется тормозной колодкой с помощью зажимных винтов 3. Отсчёт перемещения производится по линейным шкалам, цена деления шкал 1 мм. Размер стола 130×130 мм.

Для закрепления исследуемых деталей или элементов схем, аналогично простому плоскому столику, стол имеет 5 резьбовых отверстий М6×1 и четыре радиальных Т-образных паза, в которые может устанавливаться специальный прижим (струбцинка).

Столик с крестообразным ходом с ценой деления отсчётной шкалы 0,01 мм

Столик изображён на рис. 5.39.

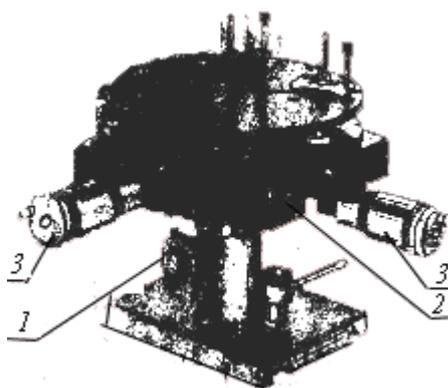


Рис. 5.39. Столик:

1 – зажимной винт; 2 – плита; 3 – микровинт

Измерительный столик с крестообразным ходом применяется при оптических исследованиях для всевозможных линейных измерений, требующих точности порядка 0,01 мм. По своей конструкции столик может быть отнесён к прецизионным приборам и может найти широкое применение в лабораторной практике. Цена деления микрометрического винта 0,01 мм.

С помощью вертикальной колонки стол крепится в рейтере обычного типа. Колонка имеет внешнюю ленточную резьбу и вращением резьбовой гайки она может подниматься. Шпонка и продольный паз в колонке предохраняют при этом стол от поворота в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси.

Зажимной винт 1 позволяет зажать колонку, следовательно, и стол в установленном положении по высоте. Плавное опускание стола может быть также произведено вращением резьбовой гайки, если освободить зажимной винт.

Вертикальная колонка заканчивается плитой 2, имеющей неподвижные продольные направляющие. По этим направляющим на шариках перемещается каретка, несущая, в свою очередь, неподвижные направляющие для поперечного перемещения стола. Шарик заключен в сепараторы, обеспечивающие их постоянное взаимное расположение.

Профильные направляющие обеспечивают прямолинейность движения с высокой степенью точности. Микрометрическое движение по обеим направляющим осуществляется двумя винтовыми парами (микровинтами) 3.

Мёртвый ход микрометрической пары выбирается за счёт разрезной гайки, стягиваемой коническим кольцом, а постоянный контакт между винтом и кареткой обеспечивается двумя парами пружин, преодолевающих силу трения в шариковых направляющих.

Для обеспечения правильной работы микропары контакт между винтом и кареткой осуществлён через закалённый шарик, запрессованный в микровинте, и закалённый подпятник из высоколегированной стали, запрессованный в каретке.

В каретке поперечного перемещения закреплён круглый стол, который может вращаться от руки.

Круглый стол имеет резьбовое отверстие М6×1 для крепления исследуемых деталей и элементов, а также 4 радиальных Т-образных паза для той же цели.

Для обеспечения правильной работы микропары контакт между винтом и кареткой осуществлён через каленый шарик, запрессованный в микровинте, и каленый подпятник из высоколегированной стали, запрессованный в каретке.

В каретке поперечного перемещения закреплён круглый стол, который может вращаться от руки.

Круглый стол имеет резьбовое отверстие М6×1 для крепления исследуемых деталей и элементов, а также 4 радиальных Т-образных паза для той же цели.

Столик с одним микрометрическим движением с ценой деления отсчётной шкалы 0,01 мм

Столик изображен на рис.5.40.

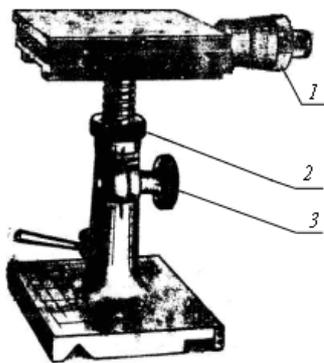


Рис.5.40. Столик

1 - микровинт; 2 - резьбовая гайка; 3 – зажимной винт

Столик служит для тех же работ, что и описанный ранее универсальный столик с двумя координатными перемещениями, но в отличие от последнего он даёт возможность устанавливать любое направление микрометрического перемещения и измерения в горизонтальной плоскости,

Кроме того, по своей конструкции он значительно упрощен: здесь имеется только одно микрометрическое перемещение с помощью микровинта 1 и отсутствует круглый стол. Цена деления шкалы перемещений 0,01 мм.

Подъём и опускание стола производятся с помощью резьбовой гайки 2 при ослабленном зажимном винте 3. При этом отсутствие шпонки даёт возможность устанавливать стол в любом положении в горизонтальной плоскости, т.е. позволяет установить любое направление микрометрического перемещения стола в горизонтальной плоскости.

Механизм перемещения аналогичен описанным выше механизмам в универсальном столе.

Верхняя плоскость стола имеет резьбовые отверстия М6×1 для крепления исследуемых деталей.

Поворотный столик

Конструкция и внешний вид столика показаны на рис.5.41.

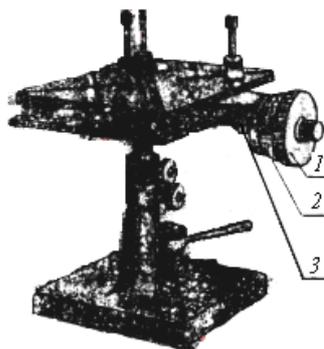


Рис. 5.41. Столик поворотный
1 - гайка; 2 - маховичок; 3 - барабан

Поворотный столик даёт возможность поворачивать закреплённые на нём элементы в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вокруг вертикальной оси по горизонту в пределах $\pm 15^\circ$ с точностью отсчёта в 1' и вокруг горизонтальной оси по высоте в пределах $\pm 3^\circ$. Поворот вокруг вертикальной оси осуществляется при помощи особого механизма, суммирующего работу червячной и винтовой пар.

Механизм состоит из червячного сектора и червяка, у которого один из подшипников является резьбовой гайкой 1. Вращая маховичок 2, червяк получает одновременно вращательное движение вокруг своей оси и поступательное вдоль своей оси. Один оборот червяка вызывает поворот столика на 3° .

На цилиндрической поверхности резьбовой гайки 1 имеется линейная шкала, указывающая число градусов поворота стола. Индексом для этой шкалы служит срез барабана 3. Минутные деления отсчитываются по шкале, нанесённой на барабане. Поворот, вокруг горизонтальной оси осуществляется с помощью винта, имеющегося на нижней плоскости стола. При вращении винта верхняя плоскость стола наклоняется вокруг горизонтальной оси. Пружина обеспечивает контакт верхнего стола и подъёмного винта.

Габарит верхней плиты столика 130×170 .

Верхняя плоскость стола имеет 4 радиальных Т-образных паза и резьбовые отверстия $M6 \times 1$ для крепления исследуемых деталей.

Осветитель

Осветитель состоит из лампы СЦ-61 с яркостью нити порядка 450 стильб и из двухлинзового конденсора с фокусным расстоянием 28 мм и свободным диаметром 26 мм (рис. 5.42).

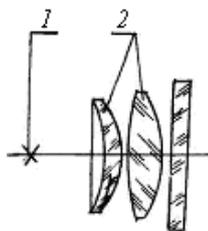


Рис.5.42. Схема осветителя:
1 – лампа СЦ-61; 2 – конденсор

В оправу конденсора могут быть вставлены светофильтры, матовое или молочное стекло. Питание лампы 12В×20Вт осуществляется через понижающий трансформатор, входящий в комплект скамьи.

Плоскопараллельная пластинка

Плоскопараллельная пластинка изображена на рис. 5.43.

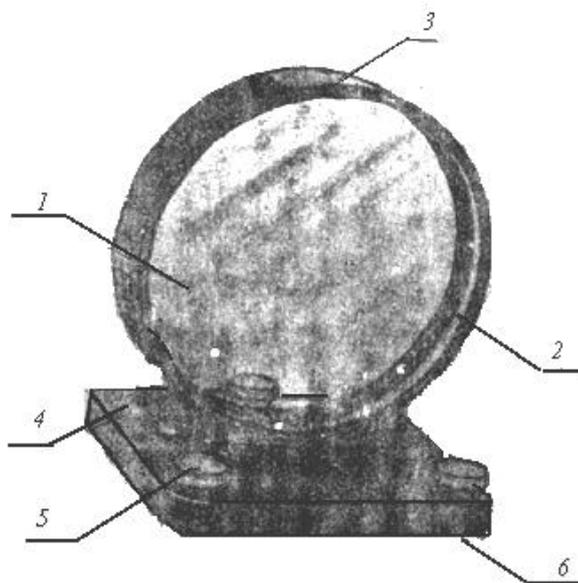


Рис. 5.43. Плоскопараллельная пластинка

1 - пластинка; 2 - пружинное кольцо; 3 - оправка; 4 - мостик; 5 - установочный винт; 6 – винт

Пластинка может быть применена для выявления параллакса зрительных труб и коллиматоров при помощи автоколлимации, а также – для других всевозможных работ.

Пластинка 1 имеет световой диаметр 146 мм в скамье ОСК-2 и 100 мм в скамье ОСК-3. Клиновидность пластинки не превышает 1", плоскостность – 0,5 полосы. Пластинка пружинным кольцом 2 закрепляется в оправе 3, которая устанавливается на мостике 4. Для регулировки положения пластинки имеется три установочных винта 5, которые вращаются в разрезных втулках, служащих для устранения люфта и качки установочных винтов. Винт 6 служит для закрепления мостика с плоскопараллельной пластинкой на столике.

6. ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

6.1. Типовые задачи, решаемые при фокусировке оптических систем

Линзовые системы и системы неплоских зеркал выполняют в оптических приборах ряд важнейших функций. С их помощью можно получить требуемое качество изображения, заданное его увеличение, обеспечить оборачивание изображения.

Добавлением сеток, шкал и других устройств для наведения и отсчётов получают визирные, отсчётные или измерительные системы, т. е. системы для задания направлений в пространстве, а также для измерений углов, поперечных и продольных отрезков и т. д.

Примеры типовых линзовых узлов и систем, требования к юстировке которых определяются из условий их работы

а) *Телескопическая насадка стереотрубы АСТ 10×45 надевается на правую трубу (рис. 6.1).*

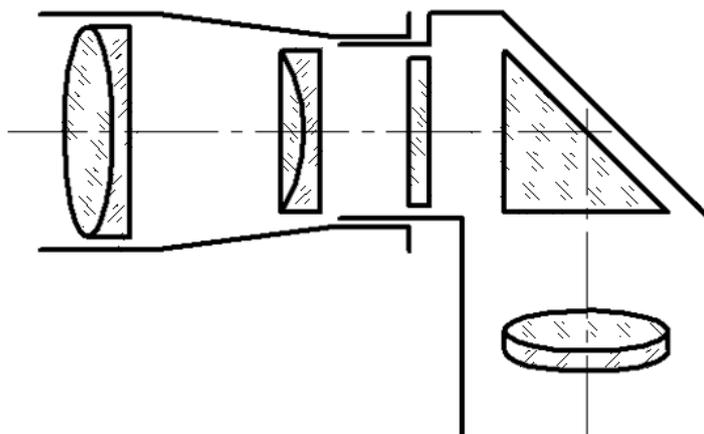


Рис. 6.1. Схема телескопической насадки стереотрубы

Это галилеевская система 2×60, поэтому при надевании её на трубу увеличение всей системы удваивается и разрешающая способность возрастает, что необходимо для подробного рассмотрения объекта.

Для обеспечения высокого качества изображения насадка должна соответствовать следующим требованиям:

1) насадка должна быть строго телескопической, для чего задний фокус объектива должен быть точно совмещён с $F_{ок.}$;

2) при надевании насадки не должно сбиваться направление визирной оси. Для этого оптическая ось насадки в рабочем положении должна быть параллельна визирной оси трубы.

б) Поворотная трубка искателя визира (схема представлена на рис. 6.2).

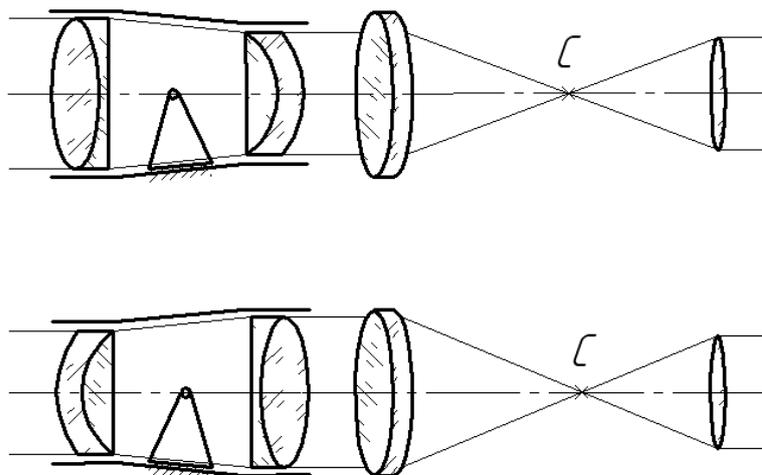


Рис. 6.2. Схема поворотной трубки искателя визира

В качестве поворотной трубки искателя используется галилеевская система с увеличением Γ_u , расположенная перед основной системой визира с сеткой C . Трубка работает в двух положениях.

В первом положении трубка имеет наибольшее увеличение: $\Gamma_{max} = \Gamma_u$.

Во втором положении после поворота на 180° она имеет наименьшее увеличение: $\Gamma_{min} = \Gamma_u^{-1}$, которое в Γ_u^2 раз меньше наибольшего увеличения Γ_{max} . Во столько же раз возрастает поле зрения при включении искателя, т. е. после поворота трубки.

К этой трубке предъявляются следующие требования:

1. Телескопичность системы, следовательно, при повороте трубки не должен возникать параллакс сетки C основной системы и не должна появляться заметная нерезкость изображения, а также не должно сбиваться направление визирной оси.

2. Несбиваемость визирной оси при повороте трубки должна выполняться в двух плоскостях: в плоскости, перпендикулярной оси поворота – за счёт правильного расположения фиксаторов или упоров, которые закрепляют трубку в двух рабочих положениях, и в плоскости, содержащей ось поворота, за счёт определённой установки оптической оси трубки в визирной оси оптической системы.

Подобные требования предъявляют и к поворотному барабану, применяемому для смены увеличений в стереомикроскопах типа МБС (рис. 6.3).

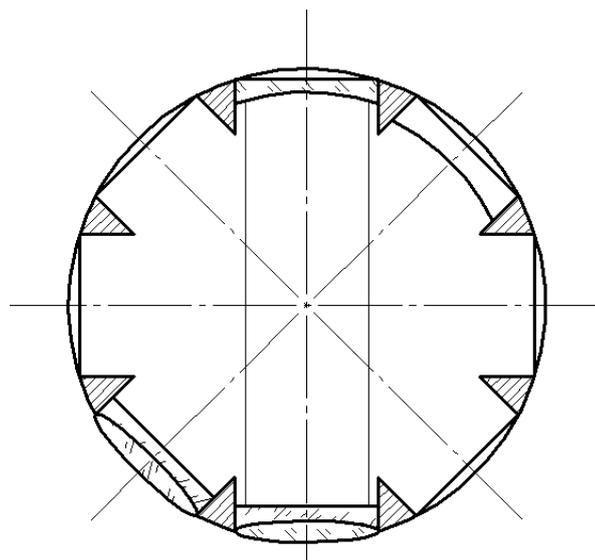


Рис. 6.3. Поворотный барабан

Барабан имеет две пары галилеевских систем и пару сквозных отверстий и позволяет получить 5 разных увеличений. Так как это устройство используется в стереоприборе, предъявляются ещё дополнительное требование: каждая пара галилеевских систем не должна иметь непараллельности оптических осей и разности увеличений.

в) *Панкратическая система*

Схема юстировки панкратической системы представлена на рис. 6.4.

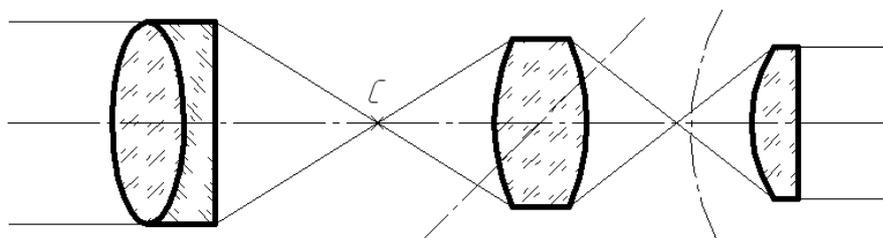


Рис. 6.4. Схема юстировки панкратической системы

Панкратическая система состоит из оборачивающей линзы и окуляра, которые при изменении увеличения одновременно перемещаются с помощью соответствующих пазов.

Основное требование к юстировке системы состоит в том, что при любом увеличении изображение плоскости предметов должно совпадать с плоскостью полевой диафрагмы окуляра. Для этого необходимо, чтобы при любом увеличении оборачивающая линза и окуляр имели правильное взаимное положение, а также и правильное положение по отношению к плоскости изображения впереди стоящего объектива (нет рисунка). Кроме того, f' оборачивающей линзы должно равняться номинальной величине, принятой при расчёте формы пазов для передвижения панкратической линзы и окуляра.

Если расстояние между объективом и сеткой при работе не меняется, то при заводской сборке необходимо установить сетку так, чтобы она была резко видна одновременно с изображением предметов, и чтобы остаточный параллакс сетки не превосходил допуска, полученного из требований точности работы прибора.

На рис. 6.5. изображены схемы устранения параллакса.

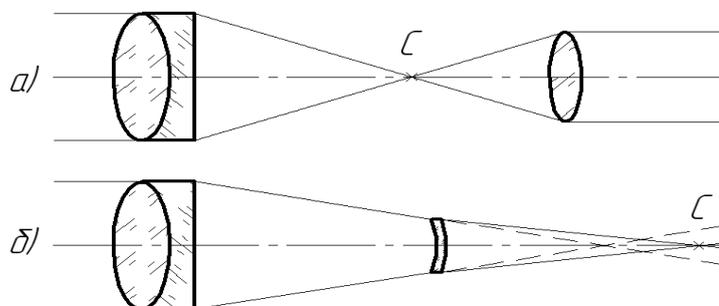


Рис. 6.5. Схемы устранения параллакса:

- а) взаимное смещение объектива и сетки
- б) смещение одной из линз

В визирных трубах в фокальной плоскости объектива закреплена сетка, в плоскости которой должно получаться резкое изображение плоскости предмета. В качестве объективов используются системы разных типов, в том числе и телеобъективы.

Параллакс можно устранить взаимным смещением объектива и сетки (рис. 6.5, а) или смещением одной из линз (рис. 6.5, б).

г) Отсчётный микроскоп

Схема юстировки отсчётного микроскопа представлена на рис. 6.6.

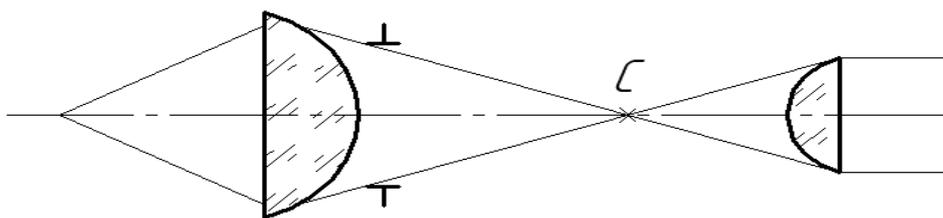


Рис. 6.6. Схема юстировки отсчётного микроскопа

В отсчётных микроскопах к двум предыдущим требованиям (о резкости изображения предмета в плоскости сетки C и об отсутствии между ними недопустимого по величине параллакса) добавляется третье – отсутствие так называемого *рена* – *ошибки масштаба изображения*.

Для выполнения этого требования при юстировке микроскопа необходимо изменять $\beta_{об}$ с тем, чтобы получить номинальное его значение, принятое при расчёте и изготовлении шкалы окулярного микрометра.

д) *Монокулярный дальномер*

В системах с положенными или совмещёнными изображениями требуется с большой точностью обеспечить равенство масштабов изображения.

В схеме монокулярного дальномера с совмещёнными полями зрения левой и правой половин они разделены узкой линией раздела (рис. 6.7).

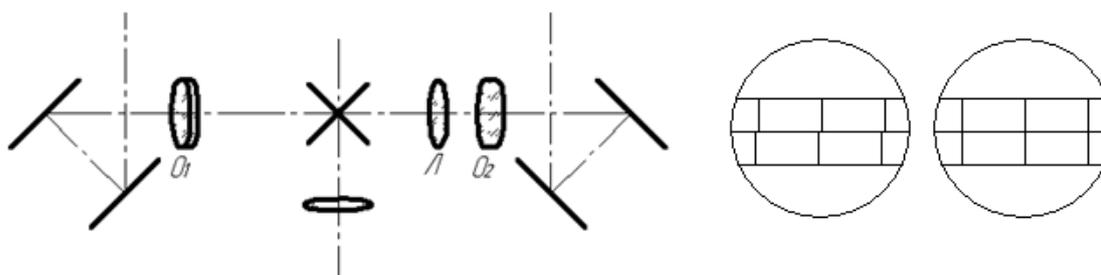


Рис. 6.7. Схема юстировки монокулярного дальномера

В случае, если фокальные расстояния объективов телескопа O_1 и O_2 неодинаковы, масштаб изображений будет различным (например, в верхней – меньше, чем в нижней). Это приведёт к тому, что при совмещении изображений в центре поля будет наблюдаться их расхождение по краям.

Таким образом, при измерении дистанции до одной и той же точки предмета, но в разных боковых участках поля зрения будут получаться разные результаты.

Для исключения этого недостатка необходимо уравнивать f'_1 и f'_2 с помощью специальной положительной юстировочной линзы, предусмотренной в правой системе объектива. Изменяя воздушный промежуток между основным объективом O_2 и линзой L , можно изменять и f' всей этой системы.

При этом наблюдается совмещение картины в пределах всего поля зрения.

В *бинокулярных наблюдательных системах* требуется ещё выдержать равенство увеличений в обеих ветвях.

Таковы основные юстировочные задачи, которые решаются при фокусировке оптических систем продольными смещениями фокусных элементов. Все эти задачи сводятся к нескольким типовым юстировочным операциям:

- 1) к фокусировке изображения;
- 2) к устранению параллакса;

3) к регулировке масштаба изображения в соответствии с заданным его значением, или к выравниванию масштабов двух изображений, или к выдерживанию заданной разности масштабов изображений.

6.2. Фокусировка изображения

Продольные сдвиги линз и зеркал при юстировке обычно относительно мало по величине. Для расчётов удобнее в этом случае использовать дифференциальные формулы, непосредственно связывающие величину малой подвижки системы от исходного положения с соответствующей величиной расфокусировки изображения.

Схема юстировки при продольных сдвигах линз и зеркал приведена на рис. 6.8.

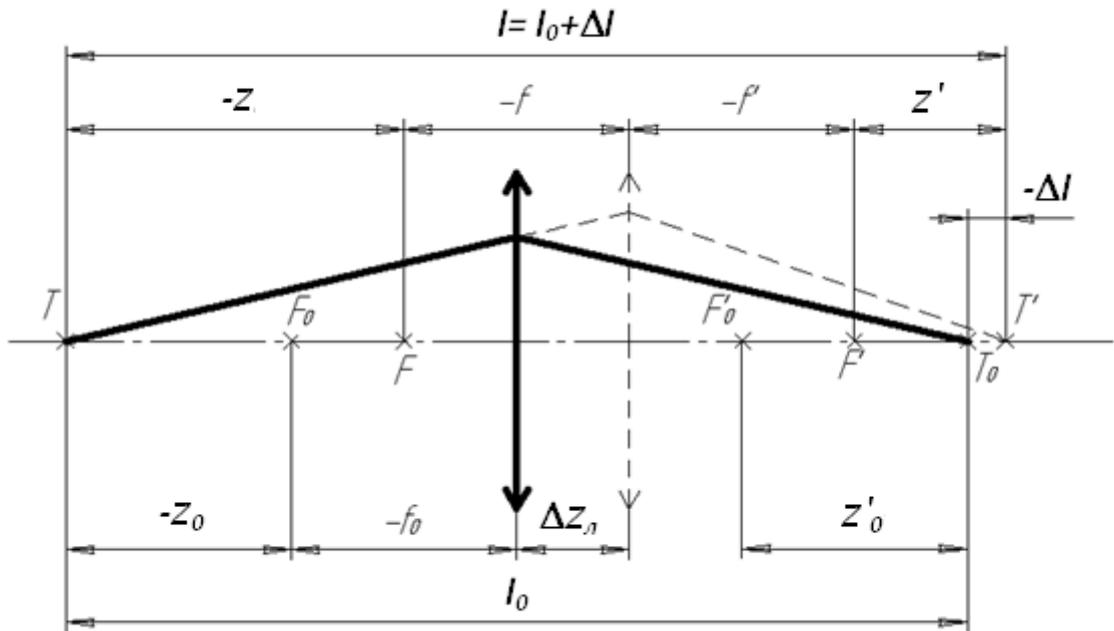


Рис. 6.8. Схема юстировки при продольных сдвигах линз и зеркал

Линза смещается на величину Δz_L , в результате чего изображение точки T' смещается на величину Δl .

Принято считать смещение вправо по ходу луча положительным.

Расстояние между сопряжёнными точками l равно:

$$l = -z - f + f' + z'. \quad (6.1)$$

Для линзы в воздухе $-f = f'$ и $z \cdot z' = -f^2$:

$$l = -z + 2f' - f^2/z.$$

$$\beta = f'/z = z'/f = -z'/f'. \quad (6.2)$$

$$l = (-f'/\beta + 2f' - \beta \cdot f) = f'(2 - \beta - \beta^{-1}). \quad (6.3)$$

Для исходного положения:

$$l_0 = -z_0 - f + f' + z'_0,$$

$$l_0 = -z_0 + 2f' - f'^2/z_0,$$

$$\begin{aligned} \Delta l &= (l - l_0) = -z + 2f' - f'^2/z + z_0 - 2f' + f'^2/z_0 = \\ &= (z_0 - z) - (f'^2/z - f'^2/z_0) = (z_0 - z) - f'^2 \cdot (1/z - 1/z_0) = \\ &= (z_0 - z) - f'^2/z - f'^2 \cdot (z_0 - z)/z \cdot z_0 = (z_0 - z) \cdot (1 - f'^2/z \cdot z_0). \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\Delta l = (z_0 - z) \cdot (1 - f'^2/z \cdot z_0).$$

Но $(z_0 - z) = \Delta z_{Л}$ смещение линзы и, кроме того, $f'^2/z \cdot z_0 = \beta_0 \cdot \beta$.
В результате:

$$\Delta l = \Delta z_{Л} \cdot (1 - \beta_0 \cdot \beta). \quad (6.5)$$

Это простое точное выражение неудобно для практических расчётов, так как увеличение β для смещённой линзы обычно неизвестно.

Влияние продольных сдвигов линзы на смещение изображения зависит от расстояния до точки предмета T .

Почти всегда, за исключением случая, когда точка предмета находится в пределах узкой области вблизи переднего фокуса F линейное увеличение β линзы, смещённой на малую величину $\Delta z_{Л}$ мало отличается от её увеличения β_0 в исходном положении, так что

$$\beta = \beta_0 - \Delta\beta, \quad (6.6)$$

где $\Delta\beta$ – малая величина.

Тогда (рис. 6.9):

$$\Delta l = [1 - \beta_0 \cdot (\beta_0 - \Delta\beta)] \cdot \Delta z_{Л} = (1 - \beta_0^2 + \beta_0 \cdot \Delta\beta) \cdot \Delta z_{Л}. \quad (6.7)$$

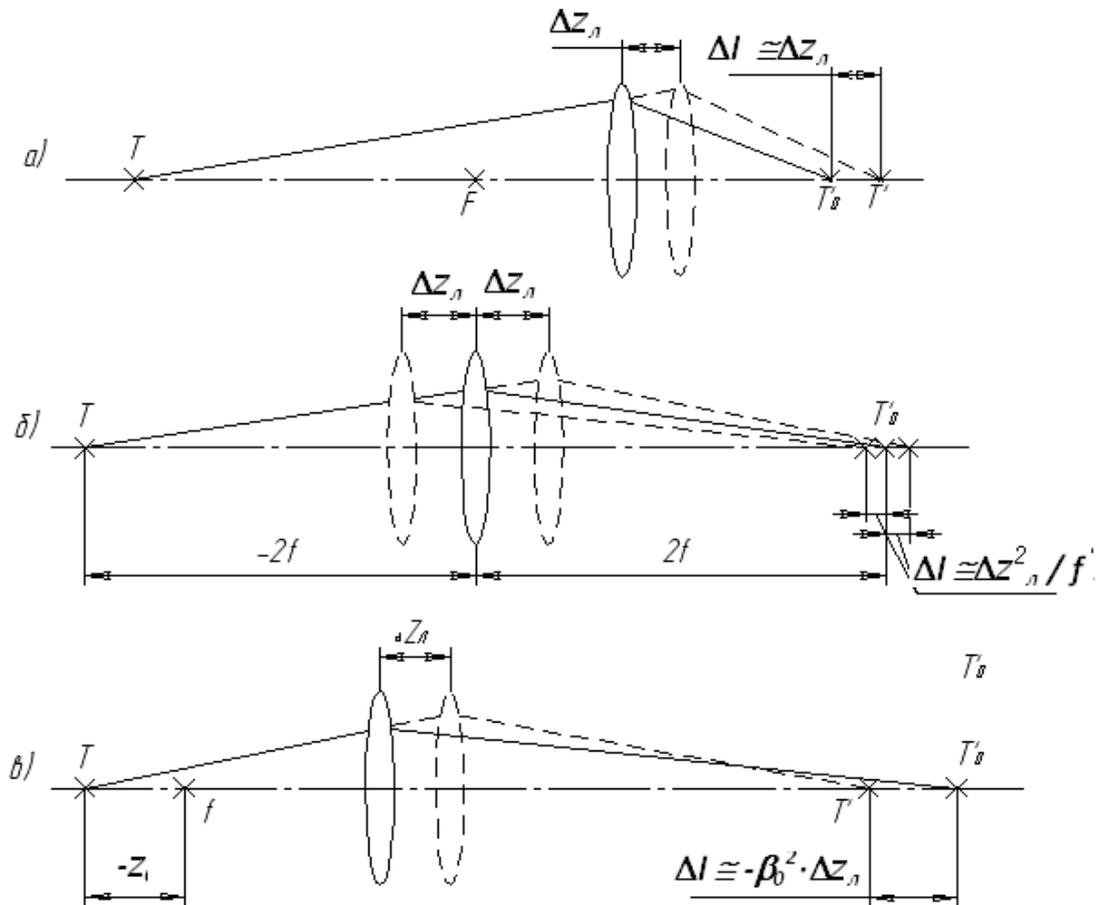


Рис. 6.9. Схема расчёта смещения Δl :
 а) $|\beta_0|$ намного меньше 1, б) $|\beta_0| = 1$, в) $|\beta_0|$ намного больше 1

Следует различать 3 случая.

1. $|\beta_0|$ намного меньше 1 (рис. 6.9, а).

Тогда точка T удалена влево от переднего фокуса линзы на расстояние, измеряемое большим числом её фокусных расстояний f' , тогда

$$\Delta l = \Delta z (1 - \beta_0^2 + \beta \Delta \beta) = \Delta z - \beta_0^2 \cdot \Delta z + \beta \cdot \Delta \beta \cdot \Delta z.$$

β_0^2 и β – бесконечно малые величины, поэтому:

$$\Delta l \cong \Delta z_{л},$$

т. е. изображение точки T' смещается, будучи как бы неизменно связанным с линзой.

2. $|\beta_0| = 1$ (рис. 6.9, б).

Точка T удалена влево от переднего фокуса линзы на фокусное расстояние f' , или когда она совпадает с передней главной точкой линзы.

В обоих случаях расстояние между сопряжёнными точками T и T' наименьшее: в первом случае $l_{m1} = 4f'$, а во втором $l_{m2} \cong 0$.

Смещение изображения:

$$\Delta l = \Delta z (1 - \beta_0^2 + \beta \Delta \beta) = \beta \cdot \Delta \beta \cdot \Delta z,$$

так как $\beta_0^2 = 1$. Тогда:

$$\Delta l = \beta_0 \cdot \Delta \beta \cdot \Delta z_L.$$

В результате дифференцирования формулы (6.2): $\beta = f'/z = -z'/f'$:

$$\Delta \beta = -f'/z_0^2 \cdot \Delta z_L.$$

$$\Delta l = -\beta_0 \cdot f'/z_0^2 \cdot \Delta z_L^2 = -\beta_0^2 \cdot \Delta z_L^2 / z_0 = -\Delta z_L^2 / z_0. \quad (6.8)$$

При $\beta_0 = -1^\times$, $z_0 = -f'$, $\Delta l \cong \Delta z_L^2 / f'$.

При $\beta_0 = 1^\times$, $z_0 = f'$, $\Delta l \cong -\Delta z_L^2 / f'$.

Следовательно, при малом смещении линзы в любом направлении из исходного положения, когда её линейное увеличение равно единице, изображение смещается на одну величину и расстояние l между сопряжёнными точками T и T' изменяется на малую величину второго порядка. Направления смещений изображения для $\beta_0 = 1^\times$ и $\beta_0 = -1^\times$ противоположны друг другу.

3. $|\beta_0|$ намного больше 1 (рис. 5.9, в).

Точка предмета T удалена влево от переднего фокуса линзы на расстояние, значительно меньшее её фокусного расстояния f' .

$$\Delta l = \Delta z (1 - \beta_0^2 + \beta_0 \cdot \Delta \beta) = \Delta z - \beta_0^2 \cdot \Delta z + \beta_0 \cdot \Delta \beta \cdot \Delta z.$$

Δz и $\Delta \beta$ – бесконечно малые величины, поэтому смещение изображения:

$$\Delta l \cong -\beta_0^2 \cdot \Delta z_L.$$

Изображение движется в ускоренном масштабе в сторону, противоположную направлению смещения линзы, так что расстояние l между точками T и T' быстро уменьшается.

После преобразования формулы (6.4):

$$\begin{aligned} \Delta l = (l - l_0) &= (z_0 - z) \cdot (1 - f'^2 / z \cdot z_0) = [1 - \beta_0^2 / (1 - \beta_0 \Delta z_L / f')] \cdot \Delta z_L = \\ &= [1 - \beta_0^2 / (1 - \Delta z_L / z_0)] \cdot \Delta z_L. \end{aligned} \quad (6.8)$$

По правилам приближённых вычислений можно получить выражение, точное лишь до вторых степеней величины подвижки линзы Δz_L и справедливое тогда, когда смещение линзы Δz_L по величине значительно меньше отрезка z_0 .

$$\begin{aligned} \Delta l &= [1 - \beta_0^2 / (1 - \Delta z_L / z_0)] \cdot \Delta z_L \cong [1 - \beta_0^2 / (1 + \Delta z_L / z_0)] \cdot \Delta z_L = \\ &= (1 - \beta_0^2) \cdot \Delta z_L - \beta_0^2 \cdot \Delta z_L^2 / z_0 = (1 - \beta_0^2) \cdot \Delta z_L - \beta_0^3 \cdot \Delta z_L^2 / f'. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Из этой формулы и формулы $\Delta l = \Delta z_L \cdot (1 - \beta_0 \cdot \beta)$ видно, что нельзя найти величину расфокусировки, когда точка T расположена близко от точки F или совпадает с ней, так как в этих случаях β_0 стремится к бесконечности.

Но этот случай часто встречается на практике.

Когда β_0 равно бесконечности, вместо величины расфокусировки Δl удобнее найти положение изображения точки за системой после её смещения по Δz_L по формуле Ньютона:

$$z = -\Delta z_L,$$

$$z' = f'^2 / \Delta z_L,$$

где z' – расстояние до изображения точки от заднего фокуса системы в её смещённом положении.

Если по заданному отрезку $z' = a$ определяют величину смещения системы Δz_L , то

$$\Delta z_L = f'^2 / a,$$

в диоптрийной мере $A = 1\,000 / a$:

$$\Delta z_L = f'^2 \cdot A / 1\,000,$$

7. ПАРАЛЛАКС В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

7.1. Вывод расчётных формул

В оптических приборах плоскость шкалы или сетки должна строго совпадать с плоскостью резкого изображения измеряемого или наблюдаемого предмета.

Это требование с заданной точностью выполняется при сборке и юстировке приборов, а при эксплуатации оно нарушается по многим причинам:

- за счёт теплового удлинения или сжатия труб, заключающих объектив и сетку прибора;
- из-за неточной фокусировки прибора на плоскость наводки;
- из-за продольных аберраций оптической системы.

В любом оптическом приборе в первую очередь следует получить резкое изображение наблюдаемого предмета в заданном месте. Однако часто при отсутствии заметной нерезкости изображения наблюдается недопустимой величины остаточный параллакс [parallaxis (греч.) – уклонение], вызывающий в измерительных приборах ошибки первого порядка.

Под параллаксом в широком смысле слова следует понимать взаимный сдвиг неизменно расположенных друг к другу предметов, наблюдаемый во всех случаях, когда угол между главными лучами на эти предметы изменяется.

Параллаксом в оптических приборах называется сдвиг изображения предмета относительно шкалы, сетки или любой фиксированной точки поля зрения, наблюдающийся при поперечных смещениях зрачка глаза в пределах выходного зрачка системы в том случае, когда изображение предмета не совпадает с плоскостью шкалы или сетки (рис. 7.1).

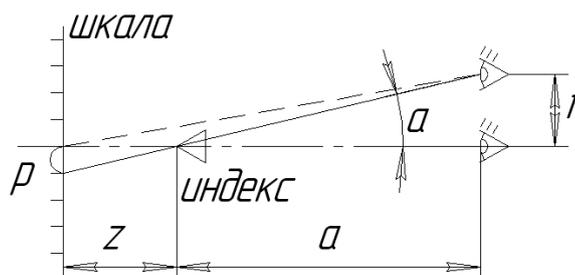


Рис. 7.1. Схема возникновения параллакса

Параллакс используется для многих измерительных целей в стереокомпараторах, светодальномерах, в фотограмметрии, в астрономии.

Если при снятии отсчёта глаз наблюдателя сдвинется в поперечном направлении на расстояние t , то возникнет ошибка отсчёта величины p , причём:

$$p = t \cdot z / a. \quad (7.1)$$

Из рис. 7.1 видно, что при сдвиге глаза вверх индекс как более близкий предмет сдвинется по шкале в обратном направлении вниз. Этим признаком пользуются для определения взаимоположения сетки и плоскости изображения при устранении параллакса в оптических приборах.

Из формулы (7.1) следует, что ошибку отсчёта за счёт параллакса можно уменьшить, сокращая величину между индексом и шкалой или ограничивая величину t -параллельного сдвига глаза, поместив, например, перед глазом диафрагму небольшого размера.

Чувствительность глаза к параллаксу выражается углом θ , заключённым между главными лучами, один из которых направлен на индекс, а другой – на то деление шкалы, с которым сравнивается положение индекса. Величина p поперечного сдвига индекса в плоскости шкалы является мерой линейного параллакса, а угол θ – мерой углового параллакса:

$$\theta = p / (z + a) = t \cdot z / a / (z + a) = t / a (1 + a / z). \quad (7.2)$$

В оптических приборах предмет или сетка за окуляром часто изображаются в бесконечности, тогда:

$$\theta_{x \rightarrow \infty} = t / a (1 + a / z)_{z \rightarrow \infty} = t / a = \alpha. \quad (7.3)$$

Схема возникновения параллакса сетки в отсчётной трубе при её установке на бесконечно далёкий предмет, изображающийся за объективом в плоскости совмещённых фокусов $F'_{об}$ и $F'_{ок}$, а за окуляром – в бесконечности показана на рис. 7.2.

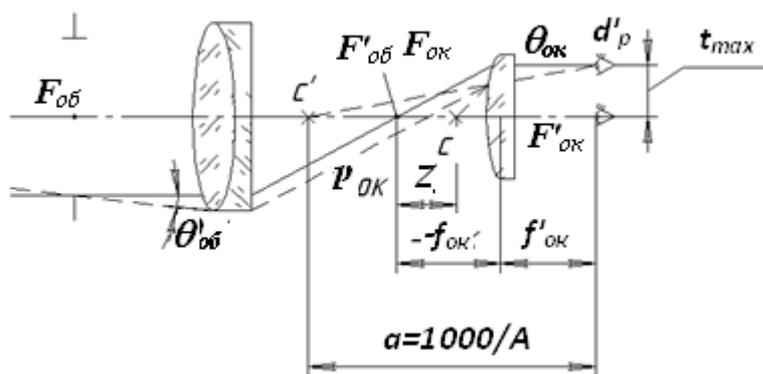


Рис. 7.2. Схема возникновения параллакса сетки в отсчётной трубе

От плоскости изображения сетка удалена на малую величину z и за окуляром она изображается на расстоянии a от его заднего фокуса $F'_{ок}$, с кото-

рым, предположим, совпадает плоскость выходного зрачка. Входным зрачком тогда будет диафрагма, стоящая в переднем фокусе $F_{об}$.

При перемещении глаза в пределах выходного зрачка, диаметр которого d'_p принят больше диаметра $d'_{3,2}$ – зрачка глаза, наблюдается угловой параллакс. За окуляром величина параллакса равна $\theta_{ок}$, а перед объективом в пространстве предметов:

$$\theta_{об} = \theta_{ок} / \Gamma, \tag{7.4}$$

где Γ – видимое увеличение трубы.

Ниже рассмотрена зависимость величины углового параллакса $\theta_{ок}$ от диаметра выходного зрачка d'_p и от диаметра зрачка глаза $d_{3,2}$, который принят нормальным (2 мм) (рис. 7.3).

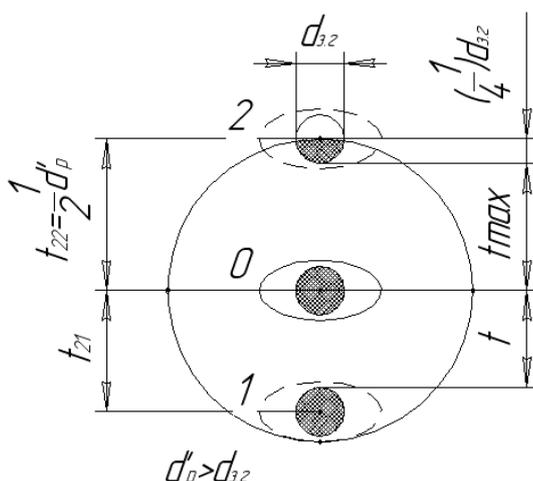


Рис. 7.3. Схема расчёта зависимости величины углового параллакса от диаметра выходного зрачка

Когда выходной зрачок прибора больше зрачка глаза, последний выполняет роль действующего или рабочего выходного зрачка. Рабочим пучком лучей является только та его часть, которая по выходе из прибора целиком попадает в глаз наблюдателя. Сечение такого пучка при разных положениях глаза отмечено чёрным кружком. Главный луч проходит через центр сечения пучка, если оно круглой формы.

Когда выходной зрачок d'_p больше зрачка глаза $d_{3,2}$, главный луч сдвигается вместе с глазом. Если глаз сдвинется из начального положения O на оси прибора в положение I на величину t_{21} , то на столько же сместится и главный луч.

При дальнейшем смещении зрачка глаза за пределы выходного зрачка прибора начнётся срезание рабочего пучка, и главный луч начнёт отставать от движения глаза. В положении 2 пучок лучей будет срезан наполовину, и глаз из начального положения сдвинется на величину $t_{2l} = 0,5 d'_p$, а главный луч только на $t_{max} \cong (0,5 d'_p - 0,25 d_{3,2})$, т. е. приблизительно на 0,5 мм меньше.

Освещённость изображения при этом упадёт вдвое, что будет уже заметно для наблюдателя. Это положение глаза будет считаться крайним при работе с прибором. Это наибольшее возможное смещение главного луча от центра, при котором наблюдается наибольший параллакс:

$$t_{max} = 0,5(d'_p - 1). \quad (7.5)$$

На рис. 7.4 показан случай, когда выходной зрачок прибора меньше зрачка глаза ($d'_p < d_{3,2} = 2$ мм).

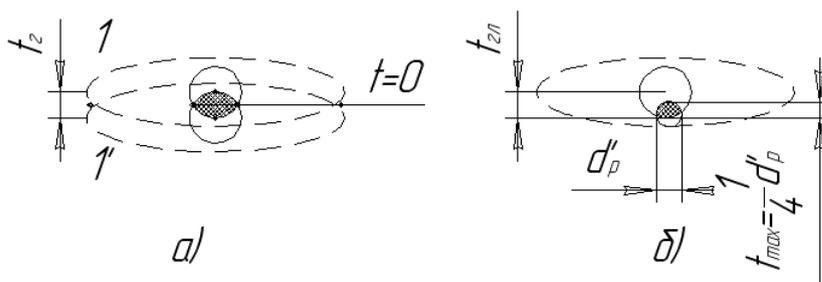


Рис. 7.4. Схема расчёта параллакса при $d'_p < d_{3,2} = 2$ мм:

- а) выходной зрачок прибора меньше зрачка глаза,
- б) поперечное смещение глаза в пределах выходного зрачка большего размера

В этом случае поперечные смещения глаза не вызывают сдвига главного луча до тех пор, пока не наступает срезание выходного зрачка прибора, так как рабочим зрачком здесь является выходной зрачок самого прибора.

При сдвиге глаза на величину $t_{2l} = d_{3,2} - d'_p$ (в положения 1 и 1') главный луч остаётся на месте и всегда проходит через центр выходного зрачка прибора, поэтому будет равно 0.

При большем смещении (б) начнётся срезание выходящего пучка, и главный луч начнёт смещаться в ту же сторону.

Крайним положением глаза опять считается такое, при котором сечение пучка срезается наполовину (положение 2). Наибольший сдвиг главного луча составит:

$$t_{max} = 0,25d'_p. \quad (7.6)$$

Таким образом, при поперечном смещении глаза в пределах выходного зрачка большего размера до самого его края освещённость изображения не меняется, главный луч сдвигается вместе с глазом, и параллакс может возникнуть совершенно незаметно для наблюдателя. При малых выходных зрачках параллакс почти не возникает, а когда он начинает возникать за счёт срезания выходящего пучка лучей, тотчас наступает всё возрастающее падение освещённости изображения.

Следовательно, параллакс наиболее опасен в измерительных приборах с большим выходным зрачком, большим, чем 2 мм.

Величину наибольшего углового параллакса в оптических приборах можно вычислить по формуле:

$$\theta = t/a = \alpha, \quad (7.7)$$

в которую надо подставить наибольшую величину сдвига главного луча t_{max} .

В зависимости от размера выходного зрачка прибора:

$$t_{max} = 0,5(d'_p - 1) \text{ или } t_{max} = 0,25d'_p.$$

В оптических приборах продольные отрезки удобно выражать в диоптрийной мере ($a = 1\,000/A$).

Тогда:

$$\theta_{ок} = t_{max}/a = t_{max} \cdot A/1\,000. \quad (7.8)$$

7.2. Расчёт допусков на продольную установку шкал и сеток

Продольная установка шкал и сеток в приборах должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) сетка (шкала) и изображение предмета, которое на неё проектируется, должны быть видны одновременно резко. Это требование обязательное;
- 2) второе требование вытекает из точности измерения и может быть регламентировано допустимым угловым параллаксом (телескопические системы) или допустимым линейным параллаксом (отсчётные микроскопы, проекторы).

Может оказаться, что вполне достаточно выполнить лишь одно первое требование об одновременной резкости изображений предмета и сетки при наблюдении глазом через окуляр, если остаточный параллакс не превышает величины, допустимой из требований точности измерений (второе требование). В противном случае следует уточнить продольную установку сетки.

В соответствии с этим в первом случае допуск на установку сетки задаётся в диоптрийной мере ($A_{дон}$), во втором случае – величиной допустимого параллакса, например, величиной $(\theta_{об})_{дон}$.

Как известно, все удалённые предметы, начиная с некоторого расстояния z_{∞} и до бесконечности, представляется наблюдателю одинаково резкими. Это расстояние называется практической бесконечностью, и оно равно:

$$z_{\infty} = 1,25 / d_p^2 \text{ м.} \quad (7.9)$$

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

Эта формула получается, если найти расстояние до изображения сетки S , которая от фокуса объектива $F'_{об}$ удалена на величину вероятной погрешности продольной фокусировки $\Delta z = 0,2 / \sigma^2$ мкм.

Если рассмотреть пространство изображений, то $z'_{\infty} = 1,25 / d'_p{}^2$ м.

При выражении допуска на продольную установку сетки (из условия продольной резкости) величиной расстояния в диоптрийной мере до её изображения за окуляром получается:

$$A_{резк} \leq 1 / z'_{\infty} = 0,8 / d'_p{}^2 \text{ дптр.}, \quad (7.10)$$

где d'_p – диаметр рабочего выходного зрачка.

При выходном зрачке прибора большем зрачка глаза:

$$A_{резк} \leq 0,8 / d'_p{}^2 = 0,2 \text{ дптр.} = const. \quad (7.11)$$

Таким образом, допуск на неточность установки сетки из условия одновременной резкости для всех приборов с выходным зрачком, меньшим, чем 2 мм, можно принимать одинаковым и равным 0,2 дптр.

При малых выходных зрачках, меньших, чем 2 мм, следует пользоваться формулой (7.10), которая даст переменный по величине допуск и всегда больше, чем 0,2 дптр.

По величине допуска $A_{резк}$ за окуляром легко получить допустимую величину $z_{дон}$ смещения сетки из плоскости изображения перед окуляром (рис. 7.2), так как

$$z_{дон} \leq f'_{ок}{}^2 / a = f'_{ок}{}^2 A_{резк} / 1000. \quad (7.12)$$

При установке сетки по признаку одновременной резкости с точностью $A_{резк}$ величину остаточного параллакса следует сравнить с допуском, полученным из требований точности измерения. Остаточный параллакс вычисляется по следующим формулам:

- 1) остаточный угловой параллакс в отсчётной трубе в угловых минутах

$$\theta_{ок} = 3\,438\, t_{max} \cdot A / 1\,000. \cong 3,4' t_{max} A_{резк}. \quad (7.13)$$

- 2) остаточный линейный параллакс в отсчётном микроскопе в плоскости сетки перед окуляром

$$p = t z / a; \quad (7.14)$$

$$(p_{ок})_{ост} = t_{max} \cdot z / f'_{ок} = (\theta_{ок})_{ост} f'_{ок} = f'_{ок} t_{max} A_{резк} / 1\,000.$$

Величина остаточного параллакса не должна превосходить следующих допусков:

- в отсчётной трубе

$$(\theta_{ок})'_{ост} \leq \theta'_{дон} \Gamma; \quad (7.15)$$

- в отсчётном микроскопе

$$(p_{ок})_{ост} \leq p_{дон} \beta_{об}. \quad (7.16)$$

С правой стороны обоих неравенств стоят величины допустимого параллакса в пространстве предметов, пересчитанные в пространство изображений.

Если при установке сетки на резкость неравенства по формулам (7.15) и (7.16) не выполняются, то допуск на несовмещение сетки с плоскостью изображения при остаточном параллаксе, равном допустимому, определяется:

- для отсчётной трубы

$$z_{дон} \leq f'^2_{ок} \theta'_{дон} \Gamma / 3\,438\, t_{max}; \quad (7.17)$$

- для отсчётного микроскопа

$$z_{дон} \leq f'_{ок} p_{дон} \beta_{об} / t_{max}. \quad (7.18)$$

7.3. Контроль продольной установки шкал и сеток

Несовпадение сетки с плоскостью изображения предмета контролируется разными способами, но все они основаны или на наблюдении неодновременной резкости изображений сетки и предмета или на выявлении остаточного параллакса.

Нижеприведённые схемы контроля установки сетки в испытуемой трубе могут быть применены для контроля установки сетки в отсчётном микроскопе, не имеющем перефокусировки на предмет (рис. 7.5).

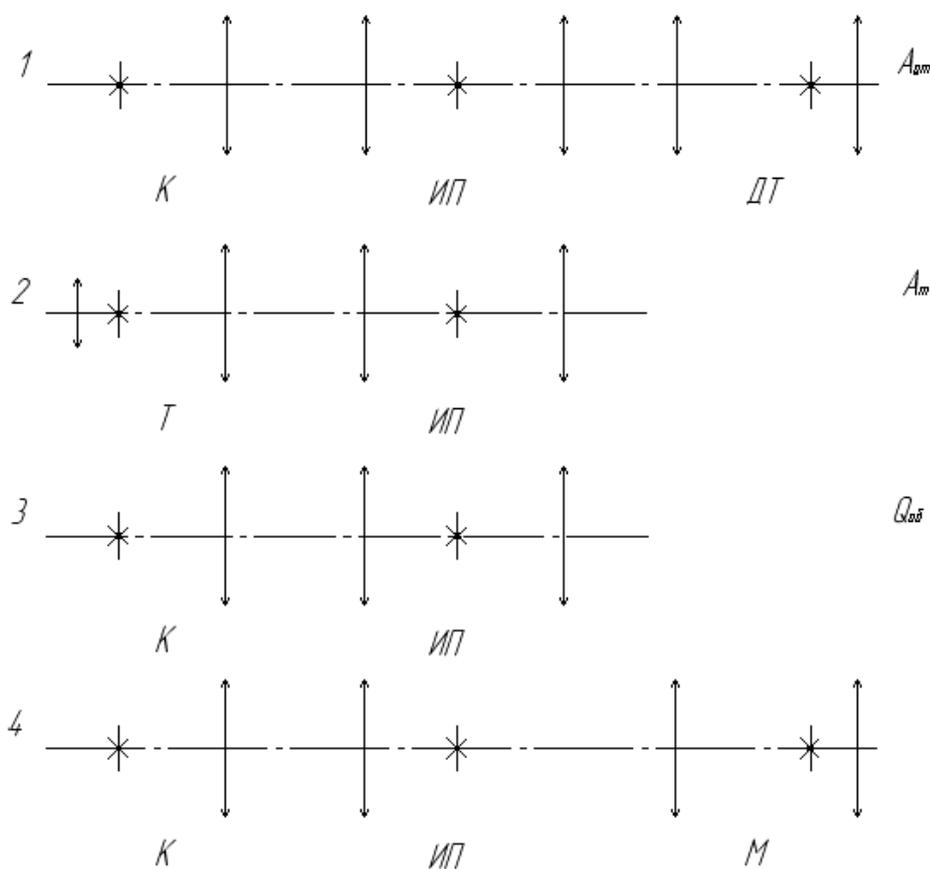


Рис. 7.5. Схемы контроля установки сетки в испытуемой трубе

Схемы 1 и 2 основаны на измерении продольного расстояния между резкими изображениями сетки испытуемого прибора (ИП) и сетки коллиматора (К) или трубы (Т). Для измерения разности расстояний между изображениями сеток служит диоптрийная трубка (ДТ) за окуляром испытуемого прибора (схема 1) или отсчётная труба (Т) с фокусировкой, установленная перед объективом прибора (схема 2). В первом случае измеряется $A_{дт}$, во втором – в Γ^2 раз меньшая величина A_m , где Γ – увеличение прибора.

По схеме 3 контролируется остаточный параллакс. Глаз наблюдателя перемещается в пределах выходного зрачка, и по угломерной шкале сетки кол-

лиматора K измеряется величина углового параллакса сетки испытуемого прибора со стороны объектива $\theta_{об}$.

На схеме 4 показан цеховой способ измерения погрешности продольной установки сетки, при котором требуется частичная разборка прибора (удаляют окуляр). Отсчётный микроскоп M последовательно фиксируется на резкое изображение сетки коллиматора, а затем непосредственно на сетку юстируемого прибора: величина перемещения микроскопа, равная x , отсчитывается по шкале продольной фокусировки.

Чувствительность методов можно сравнить по величине предельно малой разности сходимости между изображениями предмета и сетки за окуляром испытуемого прибора, ещё замечаемой при контроле. При пользовании признаком одновременной резкости чувствительность контроля может быть подсчитана по формуле (7.11):

$$A_{резк} = 0,8/d'_p{}^2 \text{ дптр.},$$

в которую в качестве размера выходного зрачка следует подставить размер входного зрачка диоптрийной трубки.

Обычно $d_p \cong 8$ мм, так как увеличение трубки берётся около 4^\times , чувствительность контроля по схеме 1:

$$A_{\partial m} = 0,8/d'_p{}^2 \text{ дптр.}$$

На первый взгляд может показаться, что схема 2 обеспечивает более высокую чувствительность контроля. Однако, при пересчете чувствительности фокусировки A_m отсчётной трубы T , ограниченной размером входного зрачка d_p испытуемого прибора (предполагается, что входной зрачок отсчётной трубы больше по величине) **на** окуляр прибора получается величина A'_m , равная величине $A_{\partial m}$:

$$A_{\partial m} = A_m \Gamma^2 = 0,8 \Gamma^2 / d_p^2 = 0,8/d'_p{}^2 \tag{7.19}$$

Откуда следует, что обе схемы дают одинаковую чувствительность контроля параллакса (схема 2) может оказаться выгоднее схемы 1, если за сеткой испытуемого прибора стоит плохо скорректированная система, например, панкратическая.

Чувствительность контроля по остаточному параллаксу (схема 3) в диоптрийной мере определится из формулы (7.8) ($\theta_{ок} = t_{max} \cdot A / 1\,000$):

$$A_{нар} = 2\,000 \cdot \theta_{ок} / (d'_p - 1). \tag{7.20}$$

Очевидно, что при некотором размере выходного зрачка прибора чувствительность обоих методов окажется одинаковой. Известно, что чувствительность поперечных установок оптического прибора зависит не только от диаметра выходного зрачка, но в очень большой мере также и от формы штрихов сетки и вида объекта.

Поэтому можно ожидать, что при определённых условиях метод параллакса и метод установки на резкость обеспечат одинаковую чувствительность при диаметре выходного зрачка, равного 2 мм:

$$A_{резк} = A_{пар} = 0,2 \text{ дптр.} = 2\,000 \cdot \theta_{ок}. \quad (7.21)$$

Отсюда, для чувствительности глаза к угловому параллаксу получается:

$$\theta''_{ок} = 20'',$$

что соответствует действительности.

Тогда:

$$A_{пар} = 0,2 / (d'_p - 1) \text{ дптр.} \quad (7.22)$$

Из сравнения этой формулы с $A_{ом} = 0,8 / d'_p{}^2$ дптр. видно, что чувствительность обоих методов возрастает с увеличением d'_p прибора.

Чувствительность контроля углового параллакса можно увеличить вдвое, смещая глаз не от центра к краю зрачка, а от одного края к другому, противоположному. Тогда метод параллакса даст большую точность, чем метод одновременной резкости.

Расчёт допусков на параллакс и сравнение чувствительности методов его контроля приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Расчёт допусков на параллакс и сравнение чувствительности методов его контроля

Данные и вычисленная величина	Прибор				
	панорама ПГ	винтовоч- ный прицел ПУ	колли- матор- ный визир	отсчёт- ная труба	отсчёт- ный микро- скоп
1	2	3	4	5	6
Диаметр выходного зрачка d_p в мм	16	-	40	60	-

1	2	3	4	5	6
Угловое увеличение Γ (для микроскопа – линейное увеличение объектива, $V_{об}$)	$\Gamma = 4^x$	$\Gamma = 3,5^x$	$\Gamma = 1^x$	$\Gamma = 30^x$	$\beta_{об} = 8^x$
Допуск на параллакс, $(\theta_{об})_{дон}$ (для микроскопа – $p_{дон}$)	1'	0,5'	1'	1"	0,001 мм
Диаметр выходного зрачка, d_p в мм	4	6,5	40	2	1
Наибольшая величина смещения главного луча, t_{max} в мм	1,5	2,75	19,5	0,5	0,25
Допуск из условия одновременной резкости, $A_{резк}$ в мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8
Остаточный угловой параллакс, $(\theta_{ок})_{ост}$ (для микроскопа – $(p_{ок})_{ост}$)	1'	1,9'	13'	0,34'	0,004 мм
Допустимый угловой параллакс $(\theta_{об})_{дон} \Gamma$ (для микроскопа – $(p_{ок})_{дон}$)	4'	1,8'	1'	0,5'	0,008 мм
Способ задания и величина допуска на параллакс сетки	$A_{дон} \leq \leq 0,2 \text{ дптр}$	$(\theta_{об})_{дон} \leq \leq 0,5'$ или $A_{дон} \leq \leq 0,2 \text{ дптр}$	$\theta_{дон} \leq 1'$	$A_{дон} \leq \leq 0,2 \text{ дптр}$	$A_{дон} \leq \leq 0,8 \text{ дптр}$
Фокусное расстояние окуляра $f'_{ок}$ в мм	20	20	100	20	20
Допуск на точность продольной установки сетки $z_{дон}$ в мм	0,08	0,08	0,15	0,08	0,32
Чувствительность контроля с помощью диоптрийной трубки $A_{дт}$ в дптр.	0,05	0,019	0,012	0,2	0,8
Чувствительность контроля по остаточному параллаксу $A_{нар}$ в дптр.	0,066	0,036	0,005	0,2	-
Отношение $A_{нар} / A_{дт}$	1,3	1,9	0,4	1	-

Выводы:

1. При несовпадении сетки с плоскостью изображения в приборах с большим выходным зрачком (более 2 мм) параллакс возникает незаметно, так как освещённость изображения при сдвиге глаза в пределах выходного зрачка не изменяются, а в приборах с малым выходным зрачком (менее 2 мм) параллакс почти не возникает.

2. Во всех визуальных приборах сетку следует устанавливать, по крайней мере, так, чтобы она была видна одновременно резко с изображением предмета (минимальное общее требование). Если при этом остаточный параллакс больше допустимого, то следует уточнить продольную установку сетки в соответствии с допуском, полученным из требований точности измерения (специальное требование).

3. Правильность установки сетки в приборах с малым выходным зрачком лучше контролировать по признаку одновременной резкости сетки и изображения предмета; в приборах с большим выходным зрачком положение сетки выгоднее контролировать по остаточному параллаксу. Установку сетки в приборах с выходным зрачком среднего размера можно контролировать обоими методами.

В последней строке таблицы 7.1 сравнивается чувствительность указанных методов контроля. Следует учесть, что точность измерения диоптрийной трубкой значительно ниже приведённой в таблице, вследствие того, что цена деления её шкалы обычно грубее 0,1 дптр.

Параллакс устраняется взаимным смещением сетки или объектива в нужную сторону.

В крупносерийном и массовом производстве применяется результативная обработка – подрезка в размер оправы на специально настроенном станке.

8. ЮСТИРОВКА МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ И УВЕЛИЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Во многих случаях в заданной плоскости требуется обеспечить не только резкость изображения, но и номинальное значение его увеличения. Это относится к отсчётным микроскопам, профильным проекторам, отсчётным трубам. Иногда необходимо с большой точностью обеспечить равенство увеличений в двух совместно работающих системах (например, в трубах телескопов, дальномеров, во всех биноккулярных системах).

Отсчётные микроскопы для точной оценки долей делений основных линейных или круговых шкал отличаются в основном лишь устройством отсчётных окуляр-микрометров (приспособление к окуляру микроскопа, предназначенное для определения размеров наблюдаемых объектов и представляющее собой стеклянную пластинку с микрометрической шкалой).

Различают:

- 1) шкаловые окуляр-микрометры;
- 2) винтовые окуляр-микрометры (МОВ1-15^х);
- 3) оптические окуляр микрометры:
 - а) со спиральной шкалой нониусом;
 - б) с поворотной плоскопараллельной стеклянной пластинкой или с двумя поворотными пластинками (теодолиты);
 - в) с поворотными или передвижными клиньями.

Требования к отсчётным микроскопам и трубам можно сформулировать в общем виде.

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

- 1) получить резкое изображение объекта измерения в поле зрения и не допустить параллакса сетки;
- 2) обеспечить номинальное (расчётное) увеличение или масштаб изображения, т. е. устранить так называемый рен-шкалы.

Установка микроскопа на резкость изображения может быть выполнена 3-мя способами:

- 1) параллельным смещением всего микроскопа по отношению к основной шкале *ОШ*;
- 2) смещением только одного объектива;
- 3) смещением только одной окулярной шкалы.

Для фокусировки на резкость отсчётной трубы (если объект в бесконечности) можно воспользоваться лишь двумя последними подвижками, которые в данном случае равноценны.

Выбор способа фокусировки определяется конструктивной схемой прибора, а пределы юстировочных подвижек ограничиваются также и оптическими характеристиками микрообъективов.

На рис. 8.1 показана схема шкалового отсчётного микроскопа.

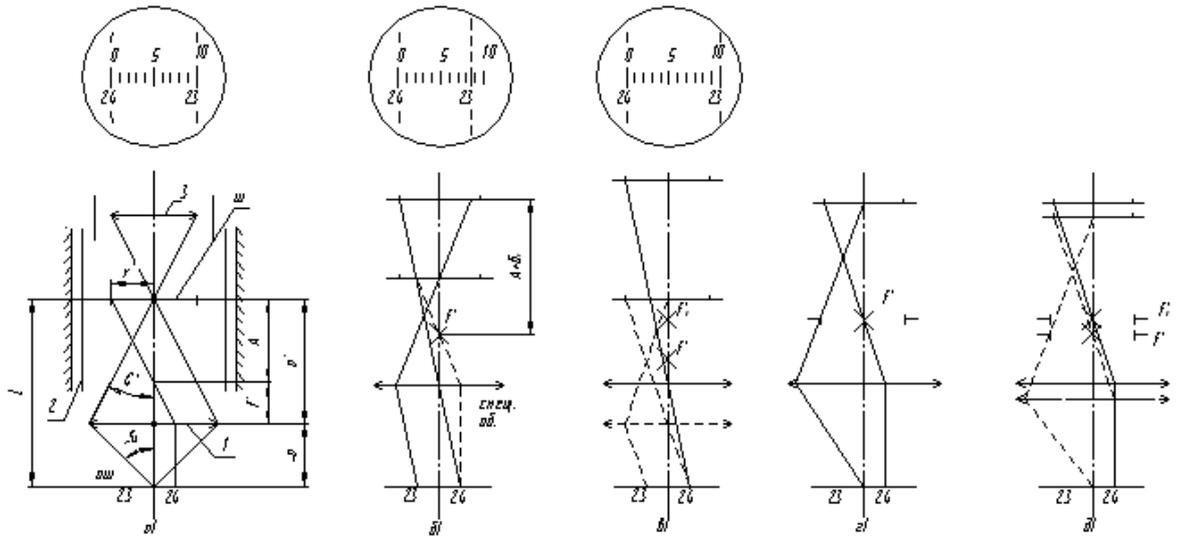


Рис. 8.1. Схема шкалового отсчётного микроскопа:

ОШ – основная шкала; 1 – микрообъектив в корпусе; 2 – тубус микроскопа;

3 – окуляр со шкалой *m* малых делений;

f' – фокусное расстояние микрообъектив;

Δ – оптический интервал, равный расстоянию от заднего фокуса F' микрообъектива до изображения основной шкалы;

l – расчётное расстояние между сопряжёнными плоскостями предмета и изображения **a) ; б) ; в) ; г) ; д)**.

Если закреплена плоскость предмета, весь микроскоп можно смещать вдоль оси (например, в гониометре плоскость лимба неподвижна по отношению к его наружному корпусу, несущему отсчётные микроскопы).

Для фокусировки на резкость можно использовать любую из перечисленных выше подвижек (рис. 8.2, а).

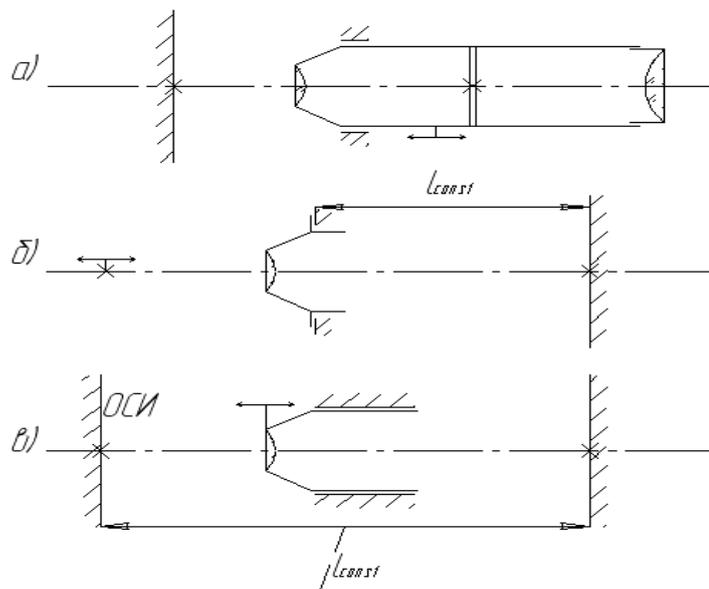


Рис. 8.2. Схема фокусировки на резкость

Например, в измерительном проекторе расстояние между плоскостью экрана и опорной плоскостью объектива конструктивно не может быть изменено, т. е. $l_3 = const$ (рис. 8.2, б).

Для фокусировки изображения предмета на резкость в этом случае предусматривается передвижение предметного столика (например, его вертикальный подъём, подвижка вдоль оси объектива). Таким образом, для фокусировки используется первая из 3-х вышеуказанных подвижек.

Если обе сопряжённые плоскости закреплены (предметная и плоскость изображения или шкалы $ш$), т. е. $l = const$ (рис. 8.2, в), то такой вариант неудобен для юстировки, так как для фокусировки изображения на резкость можно использовать только смещение объектива – вторую из вышеперечисленных подвижек.

Юстировка увеличения и масштаба изображения

В отсчётных микроскопах и в измерительных проекторах обычно используется телецентрический ход главных лучей в пространстве предметов. Это позволяет исключить влияние погрешностей продольной фокусировки на масштаб изображения и сделать юстировку самого масштаба изображений независимой от установки на резкость.

Предположим, что после фокусировки микроскопа на резкость параллакс между штрихами основной шкалы $OШ$ и окулярной шкалы $ш$ отсутствует. При этом масштаб изображения M непосредственно равен линейному увеличению микрообъектива β :

$$M = \beta_{об}. \tag{8.1}$$

$$M = \beta = y'/y = -\Delta/f' = f'/z = a'/a = \sigma/\sigma',$$

где y и y' – размер предмета (шкалы), перпендикулярного оптической оси микроскопа и стоящего на этой оси, и, соответственно, размер изображения того же предмета через микрообъектив;

f' и Δ – фокусное расстояние микрообъектива и оптический интервал микроскопа;

z – расстояние от переднего фокуса объектива до плоскости предмета;

a и a' – положения предмета и изображения от соответствующих узловых точек микрообъектива;

σ и σ' – передний и задний апертурные углы.

Если предположение об отсутствии параллакса в процессе регулировки масштаба изображения (в процессе юстировки увеличения микрообъектива) всегда остаётся в силе, то следует, что масштаб изображения или увеличения можно юстировать только двумя способами:

- 1) изменением оптического интервала;
- 2) изменением f' микрообъектива.

Продифференцируем формулу 8.1 ($M = \beta = -\Delta/f'$):

$$\delta M/M = \delta\beta/\beta = \delta\Delta/\Delta = \delta f'/f', \quad (8.2)$$

откуда для первого способа

$$\delta = \Delta \cdot \delta\beta/\beta, \quad (8.3)$$

а для второго способа

$$\delta f' = -f' \cdot \delta\beta/\beta. \quad (8.4)$$

При наличии параллакса эти формулы недействительны.

На самом деле сопряжённое изображение предмета не совпадает точно с плоскостью шкалы, и поэтому возможен третий способ изменения масштаба – смещение всего микроскопа.

При нетелецентрическом ходе лучей изменение предметного расстояния a вызовет соответствующее изменение масштаба изображения.

Обозначив размер изображения предмета в плоскости окулярной шкалы через y'_{ui} , расстояние до плоскости окулярной шкалы от $F'_{об}$ через Δ_{ui} , а от задней узловой точки микрообъектива a'_{ui} , рассмотрим разные случаи расположения входного зрачка микроскопа:

1) входной зрачок микроскопа совпадает с передней узловой точкой объектива (рис. 8.3, а):

$$M = y'_{ui}/y = a'_{ui}/a; \quad (8.5)$$

1) в пространстве предметов телецентрический ход главных лучей (входной зрачок в бесконечности, а выходной зрачок объектива в точке $F'_{об}$. (рис. 8.3, б):

$$M = y'_{ui}/y = \Delta_{ui}/f'; \quad (8.6)$$

2) в случае произвольного расположения входного зрачка (рис. 8.3, в):

$$M = y'_{ш} / y = a'_p / a_p \times (a'_p - a) / (a'_{ш} - a'_p); \quad (8.7)$$

$$z = (a_p - a) y / a_p \text{ и } z' = y'_{ш} (a'_{ш} - a'_p) / a'_p, \quad (8.8)$$

где a_p и a'_p – положение предмета и плоскости шкалы от входного зрачка и выходного зрачка соответственно.

Видно, что при телецентрическом ходе главных лучей масштаб изображения нельзя регулировать изменением расстояния a . Для этой цели остаются две возможности – изменение расстояния $\Delta_{ш}$ или изменение $f'_{об}$.

Для варианта, когда закреплены предметная плоскость и плоскость изображения (шкалы), остаётся лишь вторая из названных возможностей (изменение $f'_{об}$ за счёт воздушного промежутка между линзами).

Если продифференцировать три последние формулы, то можно найти влияние юстировочных подвижек на изменение масштаба изображения.

Последовательность юстировки отсчётного микроскопа показана на рисунках 8.1, б, в, г, д.

На рис. 8.1, б видно, что смещение объектива из номинального положения вверх на величину δa при отсутствии параллакса приводит к уменьшению масштаба изображения: одно деление основной шкалы $OШ$ не перекрывает всей длины окулярной шкалы.

При нетелецентрическом ходе главных лучей, увеличив расстояние $\Delta_{ш}$ до шкалы на $\delta\Delta$ так, что $\Delta_{ш} = (\Delta + \delta\Delta)$, можно получить номинальный масштаб изображения, но основная шкала будет изображаться нерезко.

Для восстановления резкости необходимо сместить объектив или весь микроскоп вниз (рис. 8.1, в). Но при этом возрастёт увеличение микрообъектива, т. е. нарушится первая юстировка.

Отсюда следует, что юстировочные подвижки окуляра со шкалой или микрообъектива являются взаимозависимыми. В таком случае удовлетворить обоим требованиям к отсчётному микроскопу, т. е. добиться одновременно резкости изображения и заданного увеличения шкалы, можно лишь путём последовательных приближений, а это занимает много времени.

На рис. 8.1, г показано такое же взаимное положение объектива и шкал как и на рис. 8.1, б, но теперь ход главных лучей телецентрический. Масштаб изображения регулируется удлинением тубуса.

Если сравнить рис. 8.1, в и рис. 8.1, д, то видно, что при смещении микроскопа вниз для восстановления резкости в данном случае масштаб изображе-

ния не изменится, т. е. при телецентрическом ходе юстировки увеличения и резкости изображения становится независимой.

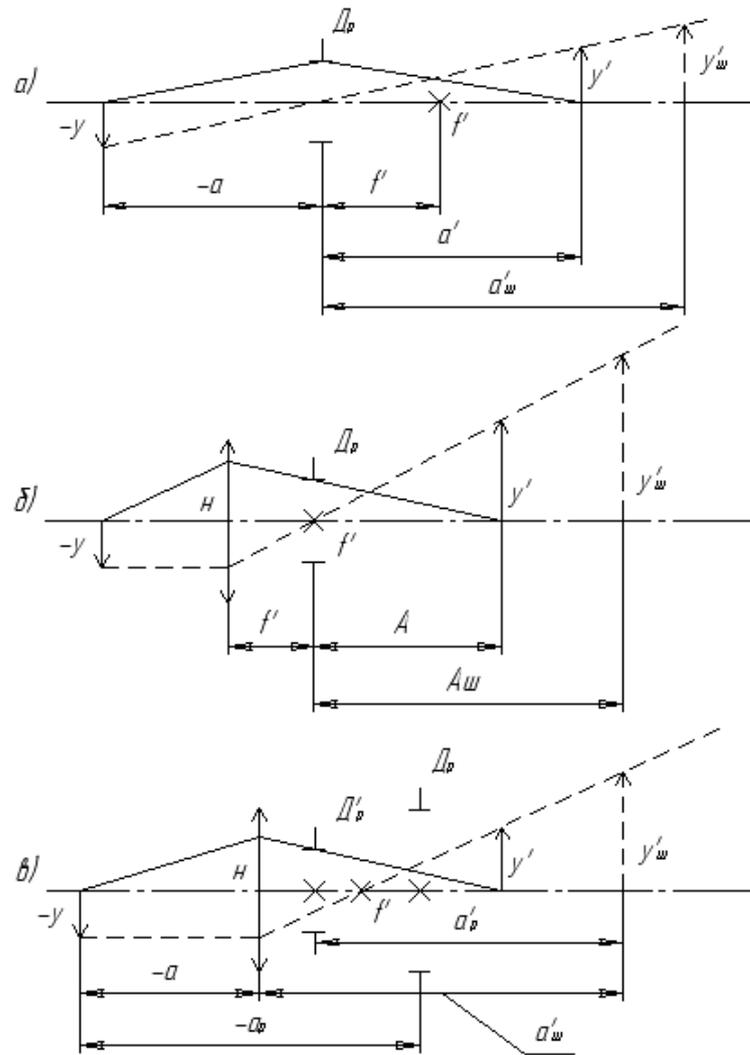


Рис. 8.3. Схемы расположения входного зрачка микроскопа

9. ЦЕНТРИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ И СИСТЕМ

Для правильной работы многих оптических приборов необходимо определённым образом установить визирные, оптические и другие оси по отношению к заданным конструкторским базам – плоскостям, осям вращения, осям уровней или к визирным, оптическим и другим осям или направлениям, внешним по отношению к юстируемому узлу или прибору.

Можно выделить три группы задач:

1. установить параллельность заданной плоскости;
2. установить параллельность заданному направлению;
3. совместить с заданной осью.

9.1. Примеры задач первой группы

1. Теодолитная труба, визирная ось которой, показанная жирной стрелкой, должна быть параллельна коллимационной плоскости, т. е. плоскости перпендикулярной оси цапф или оси вращения трубы (рис. 9.1).

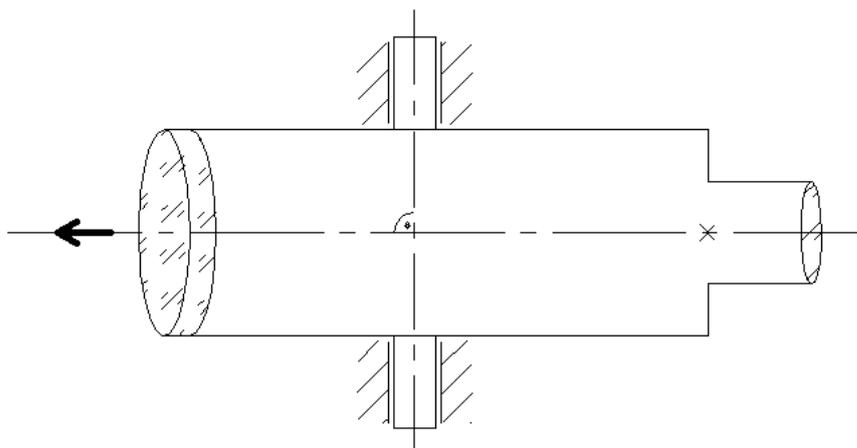


Рис. 9.1. Теодолитная труба

В теодолите удвоенная коллимационная ошибка отсчитывается по горизонтальному лимбу (на рисунке не показан) после перевода трубы через зенит и повторного наведения в точку, близкую к горизонту.

2. Нивелирная труба, визирная ось которой, точнее визирная линия, должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения нивелира (рис. 9.2).

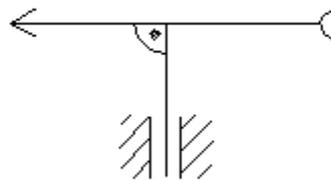


Рис. 9.2. Нивелирная труба

Неперпендикулярность визирной оси обнаруживается нивелированием по способу 2-ух станций, а в лабораторных условиях – с помощью 2-х встречных коллиматоров.

3. Неподвижный коллиматор K и поворотная труба T горизонтального гониометра, визирные оси которых должны быть перпендикулярны оси вращения трубы T (рис. 9.3).

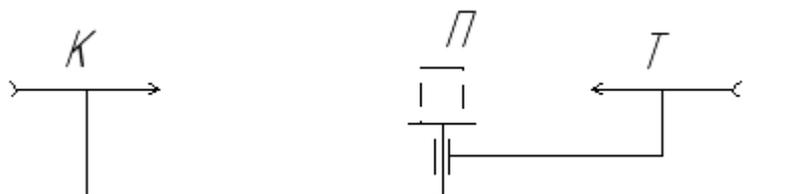


Рис. 9.3. Нивелирование с помощью 2-х встречных коллиматоров

Коллимационная ошибка трубы T выявляется автоколлимационным методом с помощью вспомогательной плоскопараллельной пластинки Π , установленной на регулируемом столике.

4. Труба на подставке, визирная ось которой должна быть параллельна опорной плоскости подставки (рис. 9.4).

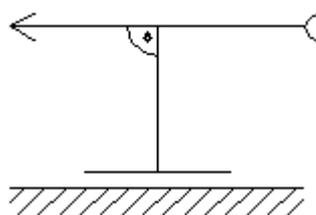


Рис. 9.4. Схема определения коллимационной ошибки трубы

Используется способ с помощью двух встречных коллиматоров.

Контроль при юстировке труб (примеры 1 – 4) осуществляется их поворотом в заданной плоскости на пол-оборота, в результате чего ошибка меняет знак и наблюдается её удвоенная величина.

5. Неподвижная труба T , визирная ось которой должна быть перпендикулярной направляющим в форме ласточкина хвоста (рис. 9.5).

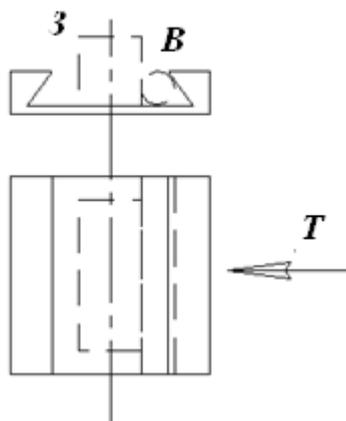


Рис. 9.5. К примеру 5

Направление визирной оси юстируемой трубы **перпендикулярно** заданной плоскости, которую надо «материализовать».

В направляющей паз выполнен в виде ласточкина хвоста. Можно ввести вспомогательный валик B , который должен быть строго прямолинейным и цилиндрическим.

Нормаль плоского зеркала $З$, прижатого к валику B , при этих условиях будет перпендикулярна оси направляющего паза.

6. Неподвижная труба T , визирная ось которой должна быть параллельна плоскости, проходящей через базовый штрих, показанный на рисунке штриховой линией T_1T_2 и через центр объектива T (рис. 9.6).

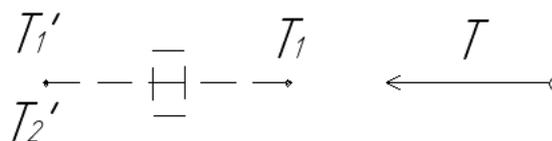


Рис. 9.6. К примеру 6

Направление штриховой линии T_1T_2 «оптифицируют» с помощью пластинки $П$. Перпендикулярность штриховой линии проверяется по совмещению точки T_2 с зеркальным отражением точки T'_1 противоположного конца штрихового отрезка от плоскости пластинки, которая ставится посередине между этими точками. Трубу T перпендикулярно пластинке $П$ можно установить автоколлимационным методом.

9.2. Примеры задач второй группы

Задачи второй группы (юстируемую ось требуется установить параллельно заданному направлению) имеют много общего: юстируемые визирные или

оптические оси, ось уровня, оси вращения или ось направляющих должны быть установлены параллельно заданным направлениям – осям вращения, геометрическим осям, опорным торцам и плоскостям, с относительно высокой точностью (от нескольких секунд до десятков секунд угла).

Для этого необходимо юстируемые оси наклонять в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что можно осуществить двумя парами встречных и взаимно перпендикулярных винтов при сетке или при объективе, или, наконец, наклонами всего юстируемого объекта по отношению к внешней базе вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

Для выявления ошибок необходимо использовать поворот юстируемого объекта на большой угол (желательно 180°) вокруг оси, по отношению к которой необходимо ориентировать юстируемую ось.

1. Поворотная труба с цапфами, визирная ось которой должна быть параллельна геометрической оси, проходящей через центры цапф (рис. 9.7).

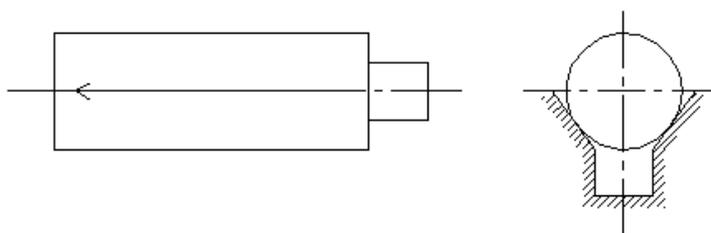


Рис. 9.7. Поворотная труба с цапфами

2. Квадратная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна геометрической оси её корпуса (рис. 9.8).

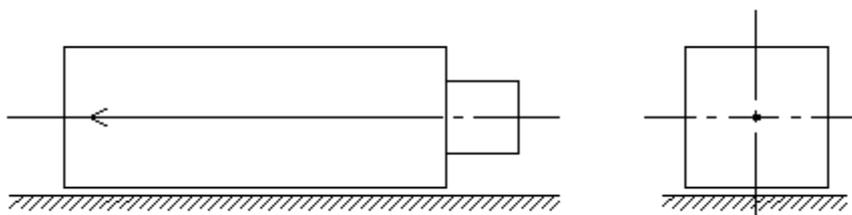


Рис. 9.8. Квадратная трубка

3. Неподвижная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна оси вращения, отделённой от трубки и расположенной соосно (рис. 9.9).

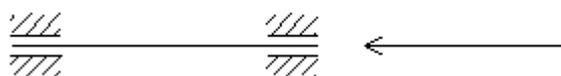


Рис. 9.9. К примеру 3

4. Неподвижная трубка, визирная ось которой должна быть параллельна оси вращения, отделённой от трубки и сдвинутой на расстояние l (рис. 9.10).

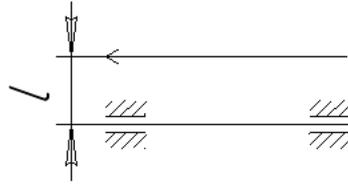


Рис. 9.10. К примеру 4

5. Поворотная трубка, внецентренная, визирная ось которой должна быть параллельна оси вращения (рис. 9.11).

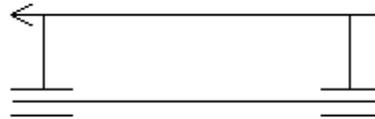


Рис. 9.11. К примеру 5

6. Биноклярные трубки, оптические оси которых должны быть взаимно параллельны (для контроля удобно воспользоваться проекционной установкой, например, установкой Захарьевского для биноклей) (рис. 9.12).

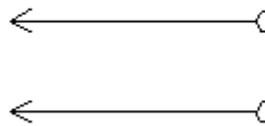


Рис. 9.12. К примеру 6

7. Накладной цилиндрический уровень, ось которого должна быть параллельна оси (ребру) укладочной призмы, скреплённой с уровнем (рис. 9.13).

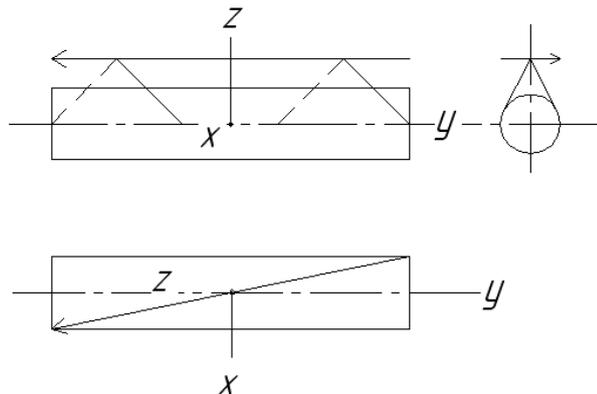


Рис. 9.13. К примеру 7

8. Плоское зеркало на консоли, скреплённой с осью вращения. Нормаль зеркала \bar{N} должна быть параллельна оси вращения (рис. 9.14).

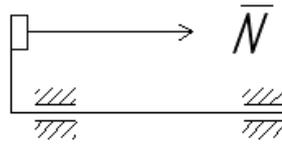


Рис. 9.14. К примеру 8

9. Два плоских зеркала, разделённых расстоянием l , нормали которых \bar{N}_1 и \bar{N}_2 должны быть взаимно параллельны (рис. 9.15).

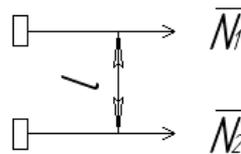


Рис. 9.15. К примеру 9

10. Трубка, скреплённая с направляющей типа ласточкина хвоста. Визирная ось трубки должна быть параллельна оси направляющей (рис. 9.16).

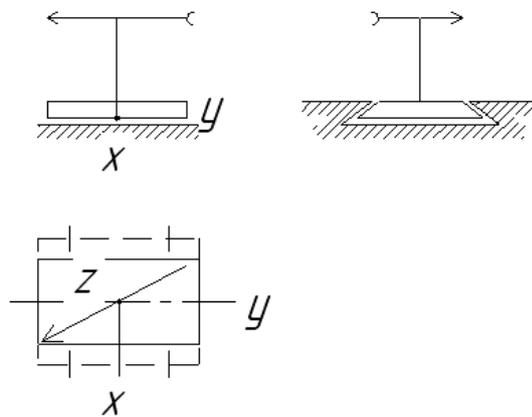


Рис. 9.16. К примеру 10

11. Торцевая трубка (рис. 9.17, а), фланцевый коллиматор (рис. 9.17, б), подставная трубка (рис. 9.17, в), визирные оси которых должны быть перпендикулярны соответственно опорному торцу, опорному фланцу и опорной плоскости трубок.

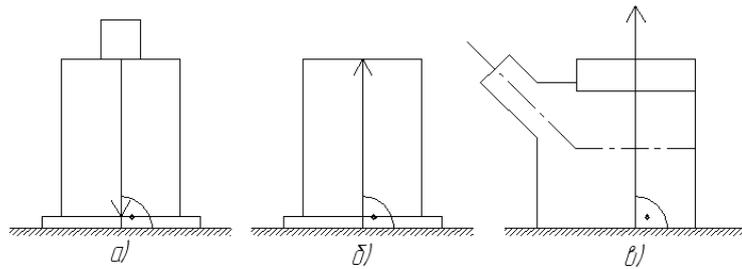


Рис. 9.17. К примеру 11

Для контроля ошибок в примерах 3, 4, 8, 9 целесообразно использовать автоколлимационный метод в разных вариантах исполнения.

9.3. Пример задачи третьей группы

Поворотная труба с глубокой фокусировкой. Юстируемую ось требуется совместить с заданной осью (рис. 9.18).



Рис. 9.18. Поворотная труба с глубокой фокусировкой

Для совмещения визирной линии трубы с её геометрической осью вращения необходимо сдвигать и сетку C , и объектив O в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для контроля следует повернуть трубу на 180° вокруг собственной оси и наблюдать, имеется ли биение изображения одной далёкой (или бесконечно удалённой) и второй близкой точки пространства предметов.

Для контроля прямолинейности визирной линии труб с глубокой фокусировкой используют три способа.

1. Коллиматор с несколькими неподвижными перекрестиями, расположенными на разных расстояниях между объективом и его фокусом

Изображения всех перекрестий должны лежать строго на одной прямой. Эта прямая обычно совпадает с геометрической осью коллиматора, проходящей через центры хорошо обработанных цапф наружной трубы, что позволяет использовать для контроля прямолинейности визирной линии вращение трубы коллиматора на неподвижных опорах.

Вместо коллиматора можно воспользоваться и эталонной визирной трубой с достаточной глубиной перефокусировки и строго прямолинейной визирной линией.

2. Поворот испытуемой визирной трубы на 180° на неподвижных опорах

Испытуемая визирная труба должна иметь хорошо обработанные цапфы. При повороте такой трубы на 180° на неподвижных опорах изменяются отсчёты, снятые трубой до её поворота по ряду неподвижно закреплённых марок, расположенных на разных расстояниях перед трубой.

Обработкой полученных результатов измерений можно найти удвоенную величину кривизны визирной линии в пространстве предметов для каждой установки трубы.

3. Способ оптического поворота

Для этого после выполнения серии отсчётов по маркам, неподвижно закреплённым перед испытуемой трубой на разных расстояниях, непосредственно перед трубой включают обращающую призму, например, призму Дове или призму Аббе с крышей, и снимают вторую серию отсчётов по тем же маркам. Обработкой результатов измерений и здесь можно выявить кривизну визирной линии в её промежуточных точках.

10. ЦЕНТРИРОВКА ОДИНОЧНЫХ ЛИНЗ

Под оптической осью линзы понимается прямая, соединяющая центры сферических поверхностей линзы.

Децентрировка линзы возникает вследствие того, что при обработке сфер радиусов R_1 и R_2 центры кривизны C_1 и C_2 не лежат на геометрической оси O_1O_2 исходной цилиндрической заготовки $ABCD$.

В частном случае оптическая ось может быть расположена параллельно геометрической оси заготовки. В большинстве же случаев оптическая ось наклонена к геометрической (рис. 10.1).

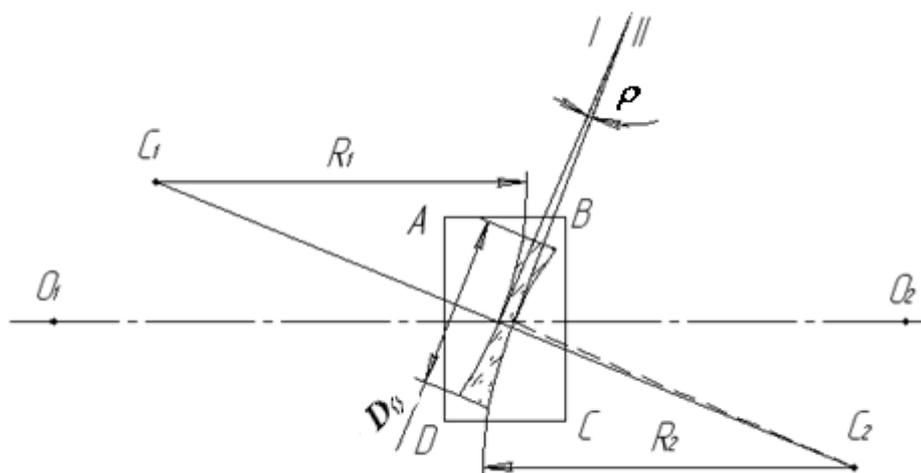


Рис. 10.1. Схема расположения оптической оси линзы

В первом случае, если оптическая ось параллельна геометрической, величина смещения центров кривизны сфер задаётся отрезком Δ .

Во втором случае, при непараллельности оптической и геометрической осей, задаётся угол ρ между касательными I и II к сферическим поверхностям в точках, лежащих на геометрической оси.

Допуски на центрировку линз устанавливают при расчёте оптической системы из условий получения требуемого качества изображения.

Операция центрировки линз состоит из двух основных переходов.

Первый переход – нахождение и фиксирование оптической оси линзы в процессе обработки.

Второй переход – обработка (округливание) линзы вокруг зафиксированной оптической оси.

Нахождение положения и фиксирование оптической оси линзы проводится в центрировочных патронах (рис. 10.2).

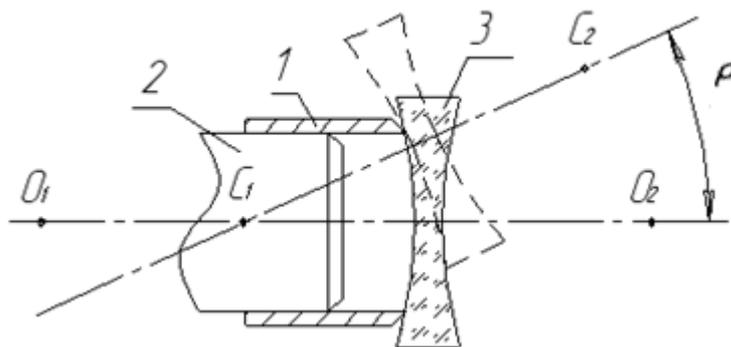


Рис. 10.2. Схема нахождения положения оптической оси линзы

Центрировочный патрон 1 закрепляется на шпинделе 2 станка. Ось патрона 1 должна совпадать с осью шпинделя 2 с допуском, не превышающим несколько микрон. Фиксированное положение оптической оси линзы C_1C_2 производится совмещением оси линзы с геометрической осью патрона O_1O_2 путём перемещения линзы 3 по торцевой поверхности патрона 1.

В произвольном положении нецентрированной линзы оптическая ось линзы C_1C_2 будет наклонена к оси патрона под некоторым углом ρ или смещена параллельно. Если торцовая поверхность патрона MM нормальна к его оси, то центр кривизны C_1 первой поверхности будет находиться на оси O_1O_2 (в пределах допусков).

Следовательно, для совмещения оптической оси линзы C_1C_2 с осью патрона необходимо повернуть линзу на угол ρ так, чтобы центр кривизны C_2 второй поверхности совместился с осью O_1O_2 . В этом положении линзу фиксируют, а затем округливают.

Процесс совмещения оптической оси с геометрической осью патрона осуществляется оптическим и механическим методами.

10.1. Оптический метод центрировки одиночных линз

Оптический метод центрировки одиночных линз имеет следующие виды:

- центрировка по блику;
- центрировка при помощи специального прибора;
- центрировка при помощи автоколлимационной трубы.

Центрировка по блику

Центрировка осуществляется следующим образом (рис. 10.3).

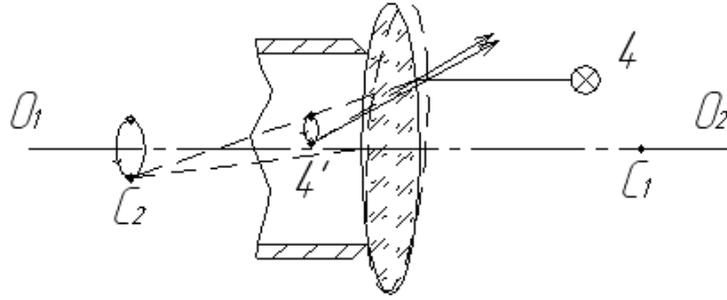


Рис. 10.3. Схема центровки по блику

На шпинделе станка закрепляют патрон 1 и протачивают его края. На торце патрона 1 при помощи смолы 2 наклеивают линзу 3. Несколько сбоку от оси патрона устанавливают лампочку 4. Поворачивая патрон с линзой, наблюдают изображение лампочки, которое даёт вторая (внешняя) поверхность линзы.

Перемещением линзы по патрону добиваются того, чтобы при вращении патрона изображение источника оставалось неподвижным. После такого фиксирования оптической оси производится обработка краёв линзы (округливание линзы).

Достоинство:

способ центровки по блику является наиболее универсальным и позволяет центрировать линзы разных диаметров и радиусов кривизны с большой точностью.

Недостатки:

сложность центрирования этим способом линз малых диаметров и радиусов кривизны. Способ требует высокой квалификации рабочего.

Центрировка при помощи специального прибора

Линза наклеивается на патрон не непосредственно на станке, а на рабочем месте. Центрировку производят на специальном приборе, после чего патрон с линзой устанавливается на станок, где она округливается (рис. 10.4):

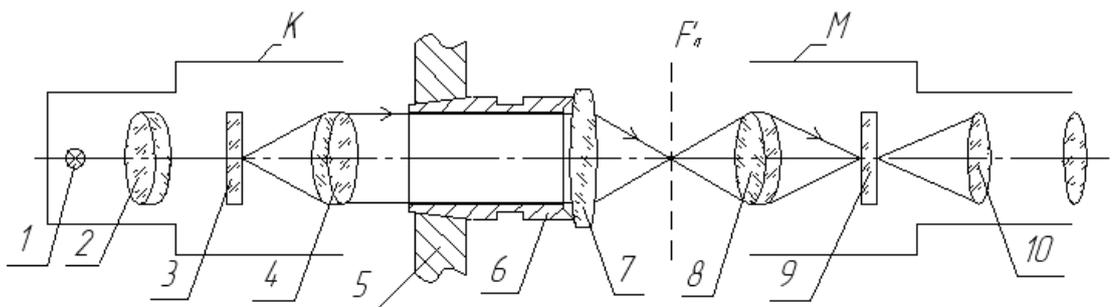


Рис. 10.4. Схема центровки при помощи специального прибора

Основными частями прибора являются: коллиматор K , микроскоп M , оправа 5 и патрон 6.

Коллиматор состоит из источника света 1, конденсора 2, объектива 4 и сетки 3. Лучи света, пройдя линзу 7, дают изображение сетки 3 в фокальной плоскости линзы 7. Это изображение рассматривается при помощи микроскопа, состоящего из объектива 8, сетки 9 и окуляра 10.

Сетка микроскопа обычно имеет нанесённые штрихи – границы допуска, определяющие допустимую величину децентрировки линзы. Центрировка в данном случае также заключается в том, что линзу перемещают по торцу патрона до тех пор, пока изображение сетки 3 не будет находиться внутри поля допуска сетки 9 при вращении патрона 6 в оправе 5 прибора.

Достоинство: при центрировке с помощью специального прибора операция центрировки осуществляется в три перехода:

- наклейка линз на патрон;
- установка патрона с линзой на прибор;
- центрировка, округливание линз на станке.

Это повышает производительность процесса центрировки и позволяет использовать рабочих более низкой квалификации.

Центрировка при помощи автоколлимационной трубы

Автоколлимационная труба устанавливается соосно с центрировочным патроном и перемещается вдоль оси до того положения, при котором изображение перекрестия, нанесённого на отражающем слое призмы, совпадёт с центром кривизны линзы.

Если линза не отцентрирована, то при вращении её с патроном изображение перекрестия от поверхности линзы будет «бить» в фокальной плоскости окуляра трубки. Величину биения изображения можно измерить по шкале сетки автоколлимационной трубы.

10.2. Механический метод центрировки

Механический метод центрировки заключается в фиксировании правильного положения линзы сжатием её между двумя патронами, оси которых совпадают друг с другом с высокой точностью.

Торцовые поверхности патронов имеют вид остро заточенного кольца с толщиной кромки 0,1 мм (рис. 10.5).

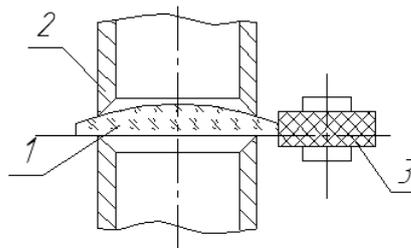


Рис. 10.5. Схема механического метода центрировки

При центрировке линзу закрепляют между торцевыми поверхностями двух патронов 1 и 2, закреплённых на двух шпинделях станка, оси которых совпадают с высокой степенью точности.

При неправильной установке линзы, когда её оптическая ось сдвинута по отношению к оси патрона, кольцевой срез касается поверхности в какой-нибудь одной точке. При сжатии патронов по направлению их осей действующая сила Q разлагается на две силы:

- 1) нормальную к торцевой поверхности патрона;
- 2) направленную перпендикулярно к его оси.

Первая сила уравнивается реакцией силы второго патрона, а вторая будет перемещать линзу по торцевым поверхностям патронов до тех пор, пока линза не расположится симметрично относительно совмещённых осей патронов. Отцентрированную таким образом линзу округливают абразивным кругом 3 или фрезой на том же станке.

Достоинство: этот метод высокопроизводителен и прост.

Недостатки:

- невозможно центрировать линзы с большим радиусом кривизны;
- затруднительность настройки соосности обоих патронов станка;
- необходимость иметь большой комплект патронов разных диаметров.

Механическая центровка применяется в крупносерийном производстве линз средней точности, имеющих значительную кривизну поверхности.

11. ЦЕНТРИРОВКА ЛИНЗ И БЛОКОВ ЛИНЗ В ОПРАВАХ

Центрировку линз и блоков линз в оправках можно осуществлять следующими способами:

- центрировка по блику;
- центрировка автоколлимационным способом;
- центрировка по искусственной звезде;
- интерференционный способ;

Центрировка по блику

Этот способ разделяют на два вида:

- центрировка по оправке;
- центрировка по линзе.

В первом случае сначала протачиваются относительно оси точно выверенного шпинделя посадочные поверхности AE оправы 2 под линзу 1. Затем протачиваются поверхности $ДС$. После этого линза центрируется в оправе до совмещения её оптической оси с осью шпинделя (рис. 11.1):

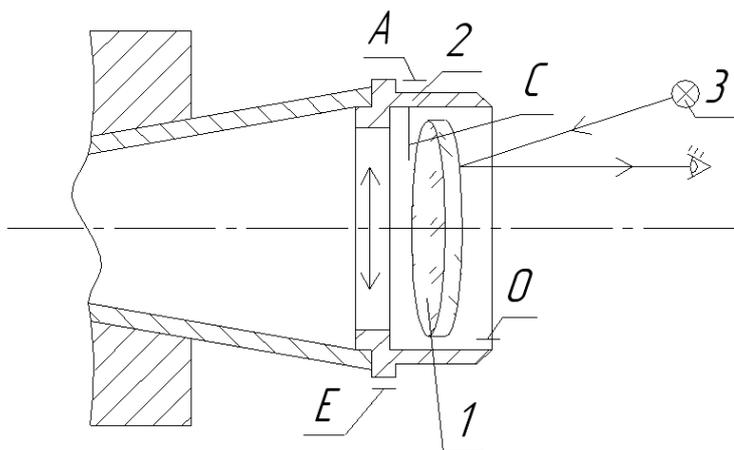


Рис. 11.1. Схема центрировки по оправке

Справа от оправки с линзой помещают источник света – лампочку 3 и наблюдают изображение лампочки, даваемое внешними поверхностями линзы (или блока). Перемещая линзу по оправке, добиваются, чтобы изображение было неподвижно (аналогично центрированию по блику линз) при вращении шпинделя. После этого буртик оправки прижимается к линзе (вальцуется).

Недостатки: при завальцовке линза может быть несколько смещена, что снижает точность центрировки.

При втором способе центрировки сначала закрепляют (завальцовывают) линзу в оправке. Оправка крепится в специальной переходной оправке, закреплённой в специальном патроне, который навинчивается на шпиндель станка.

Потом совмещают ось линзы с осью шпинделя станка передвижением деталей патрона и протачивают посадочную цилиндрическую и торцовые поверхности относительно оси шпинделя.

Центрировка автоколлимационным способом

При данном методе широко применяются автоколлимационные приборы.

Центрировка по искусственной звезде

Схема центрировки по искусственной звезде приведена на рис. 11.2.

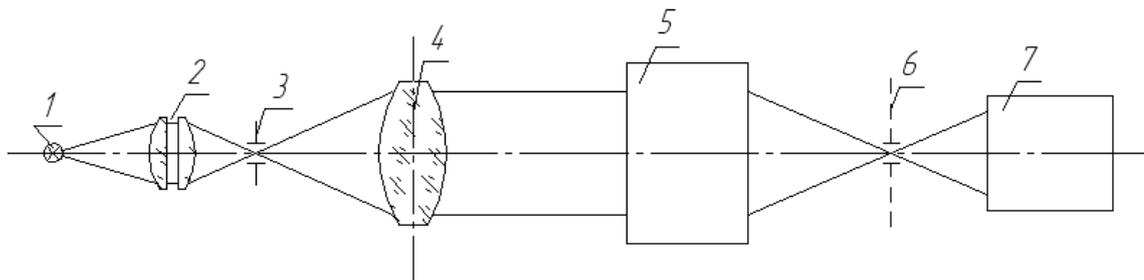


Рис. 11.2. Схема центрировки по искусственной звезде

Источник света 1 освещает через конденсор 2 точечное отверстие 3, устанавливаемое в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора.

В связи с малым размером отверстия и поскольку его изображение находится в бесконечности, оно получило название «искусственной звезды». Испытуемый объектив 5 даёт в своей фокальной плоскости дифракционное изображение отверстия 6, наблюдаемое при помощи микроскопа 7.

Для получения дифракционного изображения необходимо, чтобы угловое значение ρ диаметра отверстия было меньше разрешающей способности объектива коллиматора, т. е. чтобы имело место выражение:

$$\rho \leq 140/D. \quad (11.1)$$

Для удовлетворительной центрировки объектива ядро дифракционного изображения должно быть ярким и равномерно освещённым, дифракционные кольца должны иметь правильную форму и быть концентричными, при повороте объекта на 180° ядро увеличивается незначительно, а дифракционная картина не должна изменяться.

Необходимо выполнить следующие условия:

- 1) объектив коллиматора должен быть хорошо отцентрирован и иметь высокое качество изображения;
- 2) оси испытуемой системы и коллиматора должны быть совмещены или параллельны;
- 3) должна быть обеспечена возможность перемещения микроскопа в горизонтальном и вертикальном положении. Увеличение микроскопа должно

быть достаточно большим, чтобы иметь возможность детально рассматривать дифракционное изображение точки. Отверстие должно освещаться направленным светом;

Интерференционный способ Мансутова

Применяется для сборки линз с малым воздушным промежутком между ними (рис. 11.3):

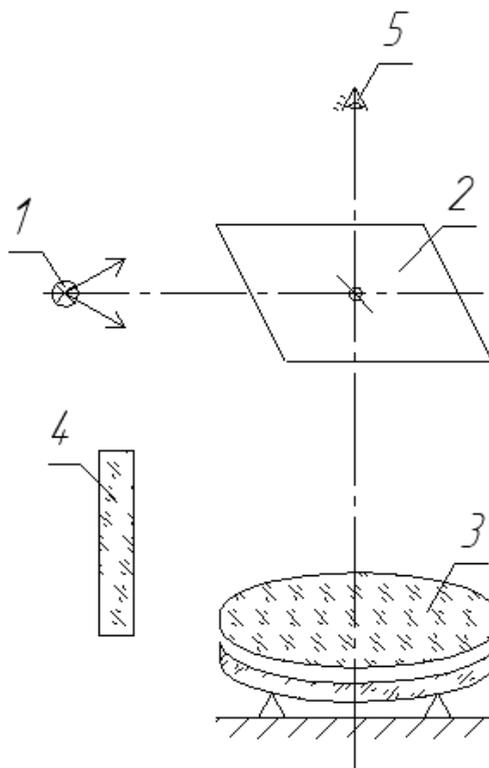


Рис. 11.3. Схема центровки интерференционным способом

Свет от монохроматического источника света 1 освещает экран 2 с отверстиями. На экране 2 нанесено тёмное перекрестие. Пройдя экран 2, лучи направляются на объектив 3 и отразившись от поверхностей линз, граничащих с воздухом, интерферируют с разностью хода, обусловленной воздушным промежутком между линзами.

При наблюдении через отверстие экрана 2 глаз 5 будет видеть интерференционные кольца и несколько изображений креста. Если глаз расположить так, чтобы его ось совпала с осью объектива и центром отверстия экрана 2, то все изображения креста должны совместиться друг с другом. Качество центровки определяется concentричностью колец. Смещения изображений центров колец относительно перекрестия определяют децентрировку.

Чтобы лучи не попадали прямо на объектив, устанавливают специальный экран 4.

12. ЦЕНТРИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ТРУБ И КОЛЛИМАТОРА

По назначению оптические трубы делятся на зрительные и визирные.

Зрительные трубы предназначены для наблюдения предметов, которые не различаются с достаточной подробностью невооружённым взглядом (астрономия).

Визирные трубы служат для фиксирования определённых направлений в производстве. Они снабжены специальными сетками.

Конструктивно зрительные трубы бывают с прямой и ломаной осью.

В трубах с прямолинейной осью центрировка линзовых узлов объективов, оборачивающих линз, окуляров достигается просто, так как механические детали труб представляют собой тела вращения. Для этого необходимо соосно расточить все посадочные места под линзовые узлы, а в последних линзы должны быть отцентрированы относительно посадочных мест оправ.

Центрировка зрительных труб выполняется обычно двумя способами: по сетке коллиматора и по искусственной звезде.

Схема центрировки зрительной трубы по коллиматору приведена на рисунке 12.1.

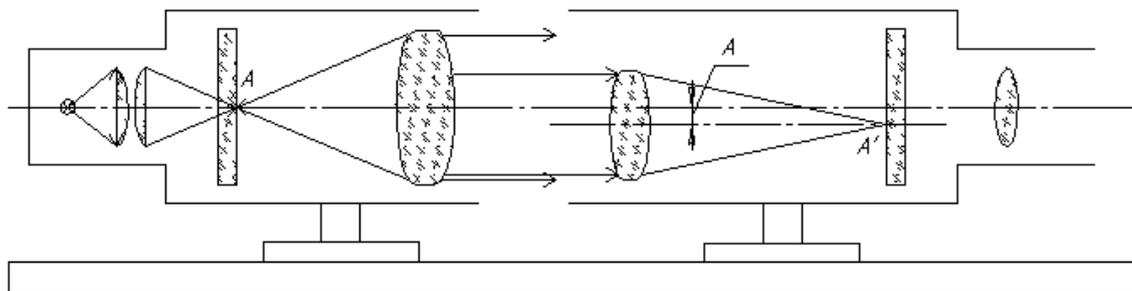


Рис. 12.1. Схема центрировки зрительной трубы по коллиматору

Коллиматор должен быть точно отцентрирован. Оптические оси коллиматора и трубы должны быть параллельны. Для этого оба прибора устанавливаются по уровню.

Если центрировка нарушена (например, есть смещение объектива на величину Δ), то изображение центра перекрестия A коллиматора смещается на такую же величину и попадает в точку A' .

Схема контроля по искусственной звезде приведена на рисунке 12.2.

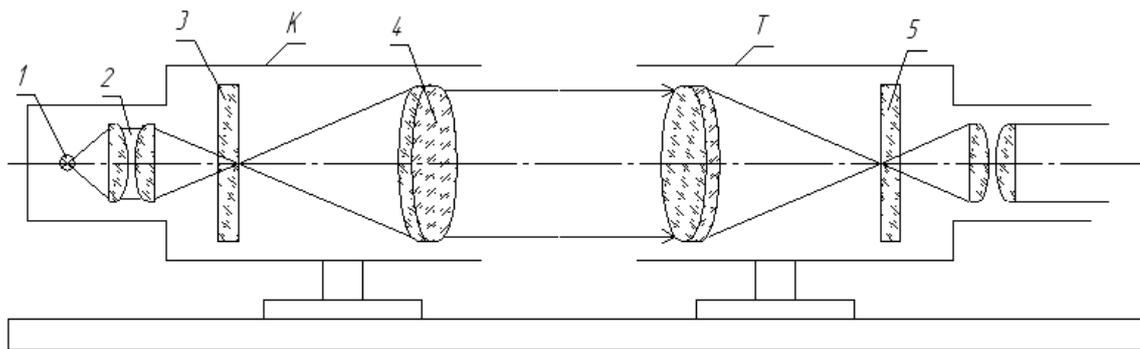


Рис. 12.2. Схема контроля по искусственной звезде

В фокальной плоскости объектива 4 коллиматора *K* помещается диафрагма 3 с точечным отверстием, которое освещается источником света 1 через конденсор 2. Перед коллиматором устанавливают зрительную трубу *T* и выверяют её так, чтобы её ось была параллельна оси коллиматора. Изображение отверстия, даваемое в фокальной плоскости, рассматривается через окуляр.

При удовлетворительной децентрировке ядро дифракционного изображения должно быть ярким и равномерно освещенным, дифракционные кольца должны иметь правильную форму и быть концентричными. При повороте трубы (если это допускает конструкция) ядро увеличивается незначительно и дифракционные кольца не изменяются.

Центрировка коллиматора часто производится при помощи центрировочной трубы. Центрировочная труба – телескопическая зрительная труба *T*, имеющая фланец с тремя регулировочными винтами.

Сущность центрировки коллиматора *K* состоит в следующем.

На объективе 4 коллиматора *K* устанавливают центрировочную трубу. Вращают регулировочные винты, укрепленные на торце трубы. При этом перекрестие коллиматора совмещается с перекрестием сетки 5 трубки. Затем передвигают трубку по объективу 4 коллиматора в диаметрально противоположное положение. При наличии децентрировки изображение сетки коллиматора *K* сместится с перекрестия сетки 5 трубки. Исправление децентрировки выполняется методом половинных поправок.

Половина смещения устраняется при помощи наклона трубки, другая половина – смещением сетки коллиматора. Добившись таким образом, чтобы смещение сетки коллиматора стало равным нулю, снова устанавливают трубку в первое положение и повторяют исправление децентрировки указанным выше способом.

И так повторяют до тех пор, пока в любом положении трубки не будет наблюдаться смещение перекрестий.

13. ЮСТИРОВКА ОКУЛЯРОВ БИНОКУЛЯРНЫХ ПРИБОРОВ

Для обеспечения правильной работы бинокулярного прибора к его окулярам дополнительно предъявляют следующие требования:

- оптическая ось вращающего окуляра должна совпадать с осью вращения окуляра;
- фокусные расстояния окуляров должны быть одинаковыми.

Несовпадение оси вращения и оптической оси окуляра приводит к изменению направления пучков лучей, выходящих из окуляра при его повороте, а, следовательно, к нарушению параллельности визирных осей труб бинокулярного прибора.

На схеме (рис. 13.1) показано, как поперечное смещение окуляра на величину Δl приводит к непараллельности δ визирных осей прибора:

$$\delta = \Delta l / f_o. \quad (13.1)$$

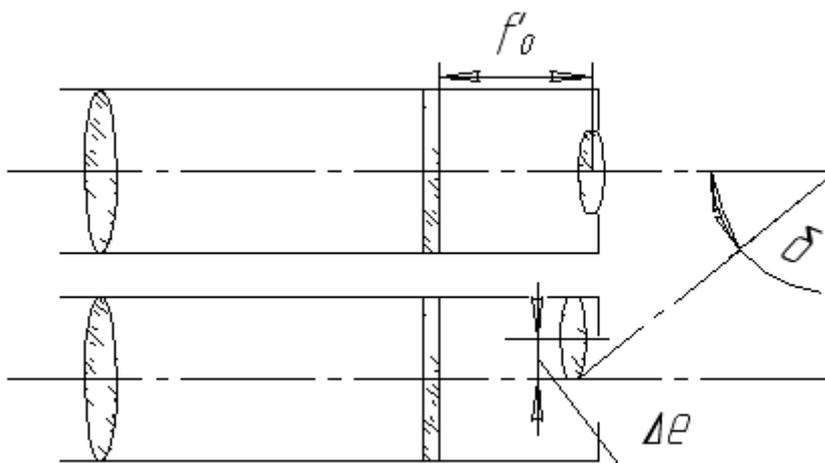


Рис. 13.1. Схема влияния поперечного смещения окуляра на положение визирных осей прибора

Эту непараллельность можно устранить смещением окуляра по его посадочной плоскости перед окончательным креплением.

Сменные окуляры бинокулярного микроскопа вставляют в тубусы по гладкой цилиндрической поверхности. В этом случае для обеспечения параллельности осей необходимо точное центрирование линз окуляра относительно его цилиндрической поверхности.

Особенно точно центрируют гладкую линзу, имеющую малую величину фокусного расстояния.

Например, для окуляра с увеличением $10\times$ ($f'_{\text{гладкой линзы}} = 19,8$ мм) децентрировка гладкой линзы относительно посадочной поверхности окуляра в 0,05 мм вызовет отклонение визирной оси на $\delta = 0,05 / 19,8 = 0,0025 \cong 9'$.

Если учесть, что при повороте окуляров в тубусах отклонения визирной оси правого и левого окуляров могут иметь противоположное направление, то общая непараллельность визирных осей $2\delta = 18'$ превысит допустимую величину для бинокулярных приборов ($15'$).

Разность увеличений окуляров, т. е. разность их фокусных расстояний, приводит к двоению изображения на краю видимого поля в бинокулярном наблюдательном приборе и к ошибке измерения в стереодальномере.

Допустимая разность фокусных расстояний окуляров наблюдательных бинокулярных приборов составляет 1,5 – 2 %.

В простых окулярах (насыпных) её обеспечивают комплектацией линз окуляра по толщине, а в сложных окулярах, кроме того, и изменением межлинзовых воздушных промежутков при сборке.

Подбор окуляров по f' осуществляется после измерения фокусного расстояния, например, с помощью фонометра (рис. 13.2).

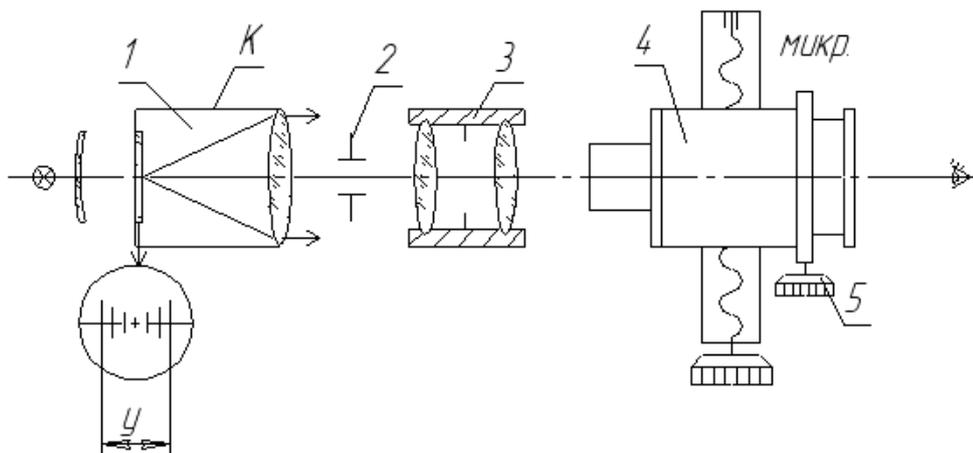


Рис. 13.2. Схема подбора окуляров по f'

Окуляр 3 устанавливают гладкой линзой к коллиматору 1 между диафрагмой 2 и микроскопом 4. Размер и расположение диафрагмы должны соответствовать выходному зрачку окуляра. Шкала 6 коллиматора изображается в плоскости сетки или полевой диафрагмы окуляра, и её изображение измеряют окуляр-микрометром 5 измерительного микроскопа 4. Фокусное расстояние окуляра определяют по формуле:

$$f'_o = f'_k \cdot y' \cdot m / y, \quad (13.2)$$

где f'_k – фокусное расстояние объектива коллиматора (мм);

y – расстояние между штрихами шкалы коллиматора (мм);

y' – размер изображения шкалы в делениях окуляр-микрометра;
 m – цена деления в мм окуляр-микрометра в предметной плоскости микроскопа.

Цену деления m находят при определении увеличения микроскопа, например, с помощью объект-микрометра. Объект-микрометры предназначены для определения увеличения поля зрения микроскопов, проекторов, цены деления окулярных шкал и сеток.

13.1. Особенности юстировки бинокулярных приборов

Бинокулярные приборы уменьшают утомляемость глаза и увеличивают пределы его стереоскопического действия. В них предусмотрена возможность компенсации аметропии и неравенства аметропий. Они отличаются высокой точностью продольных и поперечных установок.

Основным свойством любого бинокулярного телескопического прибора является параллельность оптических осей обеих его частей.

Обычно расстояние между зрачками от $b_{min} = 56$ мм до $b_{max} = 70$ мм. При этом отсчёты по шкале межзрачковых расстояний должны с точностью до ± 1 мм соответствовать расстоянию b между центрами выходных зрачков прибора. Диоптрийная установка окуляров раздельная и равна ± 5 дптр.

Если два пучка лучей, идущих от бесконечно удалённого предмета, входят в правую и левую части бинокулярного прибора, то после выхода из окуляров оси должны оставаться параллельными между собой.

Непараллельность выходящих пучков лучей возникает при децентрировке оптической системы обеих или одной из частей бинокулярного прибора или при перекосе оптической оси относительно оси вращения труб или окуляров прибора.

Предположим, что в объективы трубок 1 и 2 двух бинокулярных приборов входят параллельные пучки лучей, идущие из бесконечности. Оптические оси O_1C_1 и O_2C_2 этих трубок расположены под углами ω (рис. 13.3, *а*) и $(-\omega)$ (рис. 13.3, *б*).

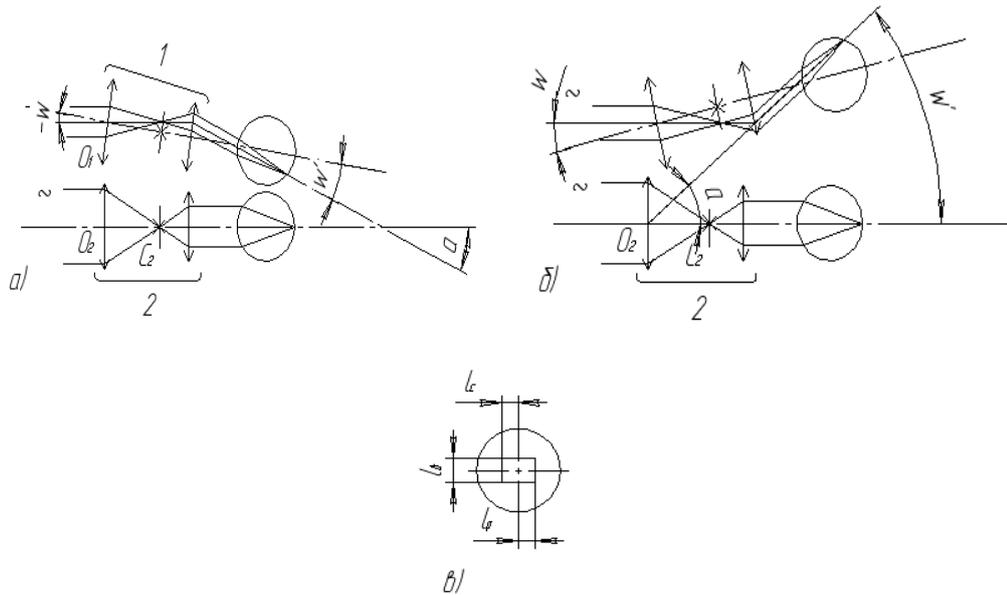


Рис. 13.3. Непараллельность выходящих пучков лучей

Лучи в трубке 1 выйдут из окуляра под углом ω' к своей оси и под углом α к оси трубки 2. При этом ось правого глаза 3 повернётся под углом α к оси трубки 2 (вправо – рис. 13.3, а и влево – рис. 13.3, б).

Если угол α невелик, то оси глаз благодаря свойству конвергенции установятся по направлению пучков лучей, выходящих из окуляров. При этом оба изображения сливаются в одно.

Если угол α велик, то глаза не в состоянии соединить оба изображения в одно, и наблюдатель будет видеть два изображения предмета, смещённых одно относительно другого. В этом случае говорят, что прибор двоит.

Допустимая непараллельность осей перед объективом ω зависит от величины допустимого угла α , при котором глаза способны видеть только одно изображение предмета. Соблюдая правила знаков геометрической оптики, можно определить, что $\alpha = -\omega + \omega'$.

Но, так как $\omega' = \Gamma\omega$, то $\alpha = \omega(\Gamma - 1)$, откуда:

$$\omega = \alpha / (\Gamma - 1). \quad (13.3)$$

Допуск ω на параллельность осей в пространстве предметов уменьшается с ростом углового увеличения Γ бинокулярного прибора. Допуски на параллельность лучей после выхода из окуляров устанавливаются как часть физиологического допуска на параллельность лучей, обеспечивающего длительное наблюдение обоими глазами без напряжения и утомления.

Глаза легче сводят изображения по горизонту, чем по вертикали, поэтому в горизонтальной плоскости допустимый угол больше, чем в вертикальном направлении.

Возможность сведения осей глаз в горизонтальной плоскости значительно больше, чем возможность разведения. Поле допусков на параллельность оптических осей биноклярных приборов будет иметь вид прямоугольника (рис. 13.3, в).

Непараллельность лучей после выхода из двух окуляров может быть допущена в следующих пределах:

- 1) схождение α_c в горизонтальной плоскости не более $20'$;
- 2) расхождение в горизонтальной плоскости α_p не более $60'$;
- 3) расхождение по вертикали α_v не более $15'$.

Непараллельность оптических осей в биноклярных приборах зависит от следующих причин:

- взаимного смещения изображений;
- разности увеличений и параллаксов;
- взаимного перекоса изображений.

Смещение изображения одной части биноклярного прибора относительно изображения другой его части зависит от неправильного расположения объективов, призм, окуляров и линз оборачивающих систем.

Следовательно, устранить непараллельность оптических осей можно перемещением объектива, призм, окуляров и т. д.

Перемещение объектива достигается в большинстве случаев с помощью эксцентриковой оправы.

Но необходимо иметь в виду, что значительное перемещение объектива вызывает децентрирование системы и ухудшение качества изображения прибора. Грубую непараллельность осей устраняют передвижением призм или оптических деталей, вызвавших непараллельность оптических осей, а точную юстировку выполняют поперечным смещением объектива.

Необходимую величину e эксцентриситета для оправ объективов рассчитывают по формуле (13.4), полагая, что наиболее неблагоприятный случай – это смещение изображения за окуляром в горизонтальной плоскости:

$$e = f'_{об} \cdot \alpha_2 / (\Gamma - 1), \quad (13.4)$$

где α_2 – допуск на расхождение оптических осей в горизонтальной плоскости.

Перемещением призм бинокля вдоль их главных сечений можно отъюстировать параллельность осей. Смещение каждой призмы бинокля в плоскости её главного сечения, перпендикулярной оптической оси, вызывает смещение изображения в фокальной плоскости объектива на величину, равную двойной величине смещения призмы.

Поворот призм вокруг оси, перпендикулярной ребру отражающего угла и параллельной преломляющей грани призмы, вызывает нарушение параллельности осей в плоскости, перпендикулярной главному сечению призмы.

Непараллельность осей со стороны окуляра:

$$\alpha = 2\beta \cdot l / f_{ок}, \quad (13.4)$$

где β – угол поворота призмы;

l – расстояние до призмы от фокальной плоскости объектива.

13.2. Юстировка и контроль визирной линии в телескопических приборах

Оптические системы многих телескопических приборов выполняют в основном роль визирного устройства: вначале наблюдаемый предмет обозначают, а затем, совмещая изображение предмета с условной меткой на сетке, прибор устанавливают в определенное положение относительно предмета пространства (рис. 13.4).

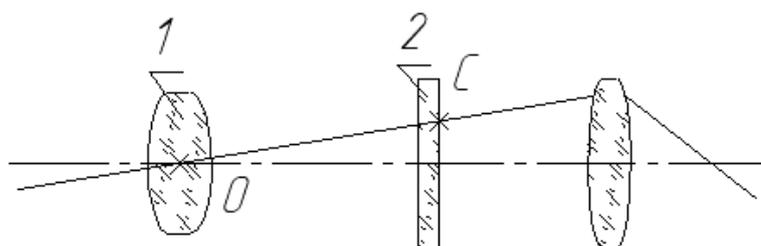


Рис. 13.4. Схема визирного устройства

Прямую CD , соединяющую определенный знак (например, центр C перекрестия) или марку сетки 2 прибора с задней узловой точкой O всей предшествующей части оптической системы 1, принято называть визирной линией или осью прибора.

Под визированием или наводкой подразумевают приведение визирной линии (оси) прибора в такое положение, при котором эта линия проходит через наблюдаемый предмет, визируемый на местности.

Юстировку и контроль ориентации визирных линий осуществляют при помощи контрольно-юстировочных приборов, представляющих собой коллиматоры. Испытуемый прибор закрепляют на кронштейн контрольно-юстировочного прибора. Наблюдая в окуляр проверяемого прибора, определяют положение его сетки относительно сетки коллиматора.

Ошибки положения визирной линии контролируемого прибора относительно его конструктивных элементов исправляют разными методами:

1) центрированием оптической системы путём перемещения оптической детали (объектива, сеток, призм и т. д.);

2) поворотом всей оптической системы прибора при помощи червячной передачи угломерного механизма (в угломерных приборах);

3) вращением вокруг вертикальной оси и наклон к горизонтальной оси головной призмы или зеркала (в приборах с вращающимися головными призмами или зеркалами).

Смещение объектива 1 относительно сетки на величину Δ перпендикулярно оси трубы вызывает изменение направления визирной линии в пространстве предметов на угол φ :

$$\varphi = 3\,438 \cdot \Delta / f'_{об}, \quad (13.4)$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива испытуемого прибора (рис. 13.5);

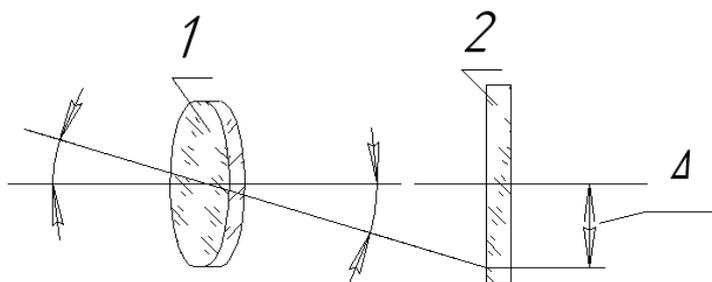


Рис. 13.5. Схема зависимости направления визирной линии в пространстве от смещения объектива

4) применением эксцентриковых оправ и **колец** объективов.

Наибольшее смещение визирной линии:

$$\varphi = 3\,438 \cdot 2e / f'_{об}, \quad (13.4)$$

где $f'_{об}$ – величина эксцентриситета оправы или кольца;

Если одна из призм монокуляра, имеющих по две отражающих грани, сместится в гнезде корпуса на величину Δ , то децентрировка на сетке монокуляра будет равна 2Δ , а визирная линия монокуляра наклонится на угол φ (рис. 13.6):

$$\varphi = 3\,438 \cdot 2\Delta / f'_{об}, \quad (13.5)$$

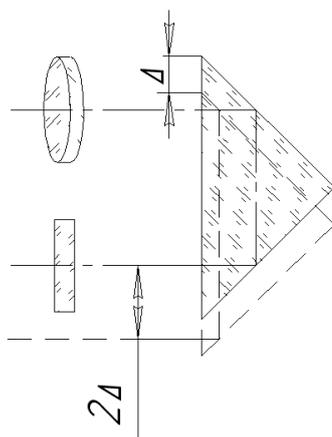


Рис. 13.6. Схема смещения визирной линии монокуляра

Эту ошибку исправляют одновременно с устранением поворота изображения предмета вокруг оптической оси монокуляра.

На положение визирной линии прибора может оказать влияние точность изготовления некоторых оптических деталей (рис. 13.7):

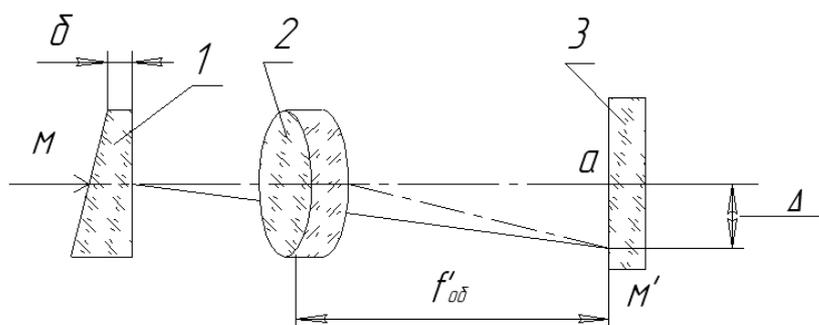


Рис. 13.7. Схема влияния неточности изготовления оптических деталей на положение визирной линии прибора

Установленное перед объективом 2 прибора клиновидное защитное стекло 1 смещает изображение M' визируемой точки M относительно центра O сетки 3 на величину:

$$\Delta = f'_{об} \cdot (n - 1)\sigma, \quad (13.5)$$

где σ – величина преломляющего клина защитного стекла.

При вращении клиновидного защитного стекла вокруг его геометрической оси точка M' пересечения визирного луча с сеткой будет описывать круг с радиусом Δ .

Это свойство клина используется в оптическом приборе для юстировки в нём положения визирной линии относительно конструктивных элементов контролируемого прибора, а в дальномерах – для юстировки параллельности визирных линий правой и левой частей прибора.

Если перед объективом 2 прибора установить прямоугольную призму 1, которая имеет клиновидность σ , то она окажет такое же действие на смещение визирной линии прибора, как и клиновидное защитное стекло (рис. 13.8):

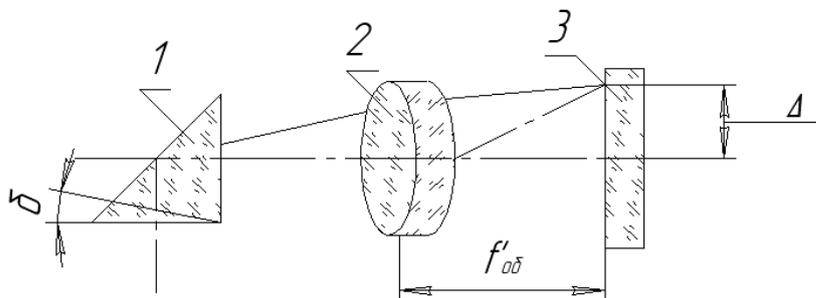


Рис. 13.8. Схема влияния клиновидности призмы на смещение визирной линии прибора

На положение визирной линии прибора оказывают влияние повороты и смещения зеркал, установленных между объективом и сеткой, а также смещение линз оборачивающих систем (рис. 13.9):

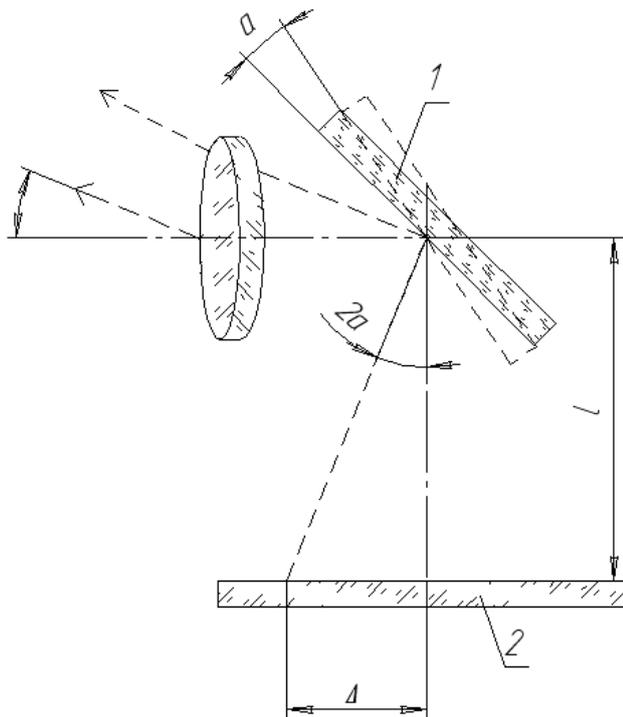


Рис. 13.9. Схема влияния поворотов и смещений зеркал на положение визирной линии прибора

Поворот зеркала 1 на угол α приводит к смещению луча в плоскости сетки 2 на величину $\Delta = l \cdot 2 \alpha / 3\,438$ и вызывает наклон визирной оси на угол $\varphi = 3\,438 \cdot \Delta / f'_{об}$.

Поступательное перемещение зеркала по горизонтали и вертикали на величину Δ приводит к изменению направления визирной линии также на угол $\varphi = 3\,438 \cdot \Delta / f'_{об}$ (рис. 13.10).

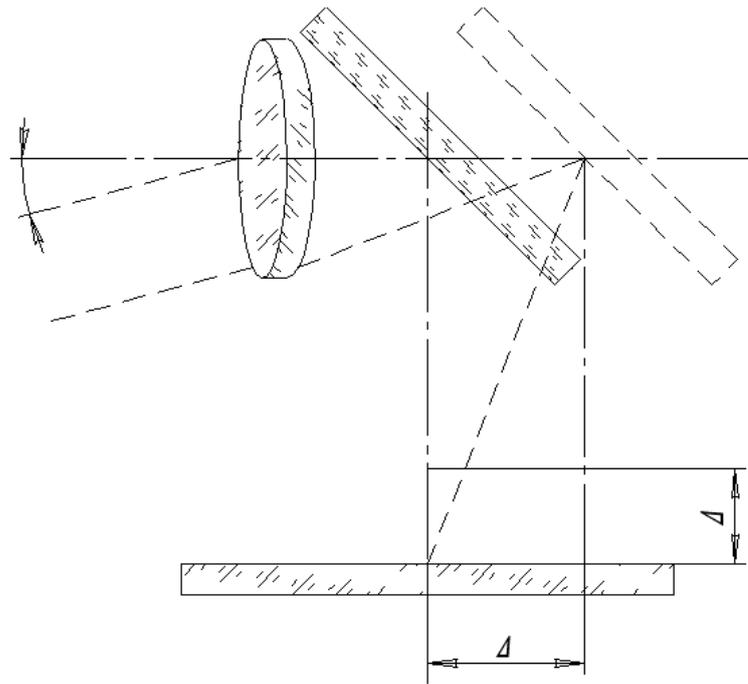


Рис. 13.10. Схема влияния перемещения зеркала по горизонтали и вертикали на положение визирной линии прибора

Кроме этого смещение зеркала, установленного между объективом и сеткой, вызовет параллактическое смещение изображения бесконечно удалённого предмета относительно сетки также на величину Δ .

Смещение линзовой оборачивающей системы 2 перпендикулярно оптической оси объектива 1 прибора на величину Δ вызовет смещение луча в плоскости сетки 3 на величину (рис. 13.11):

$$l = - \Delta \cdot (- S_{об.с} + S'_{об.с}) / S_{об.с}, \quad (13.6)$$

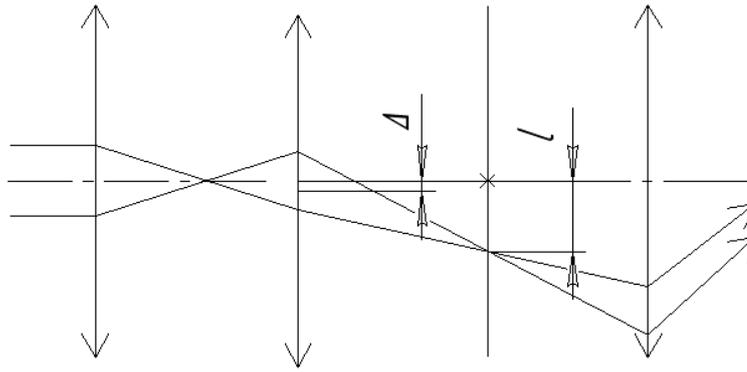


Рис. 13.11. Схема влияния смещения линзовой оборачивающей системы

Для исправления такого поворота призм в биноклях применяют прокладки, установленные под призмы.

Непараллельность осей в дальномерах устраняют передвиганием центрального мостика.

В стереотрубах юстировка параллельности осей осуществляется путём наклона и поворота вокруг оптической оси прибора головных призм или зеркал.

Перемещением окуляров в направлении, перпендикулярном оптической оси, устраняют непараллельность осей бинокулярного прибора.

Применяя в дальномерах клиновидные защитные стёкла, можно отъюстировать параллельность оптических осей. При этом один клин служит для устранения непараллельности в горизонтальной плоскости, второй клин – для устранения ошибки в вертикальной плоскости.

Влияние разности увеличений обеих частей ?

14. ЮСТИРОВКА БИНОКУЛЯРНОГО ПЕРИСКОПА

Перископ с качающимся головным зеркалом служит для наблюдения за местностью и измерения углов визирования в вертикальной плоскости (от горизонта) – путём поворота головного зеркала вокруг горизонтальной оси и в горизонтальной плоскости – путём поворота всего перископа вокруг вертикальной оси.

Принципиальная схема оптики прибора представлена на рис. 14.1.

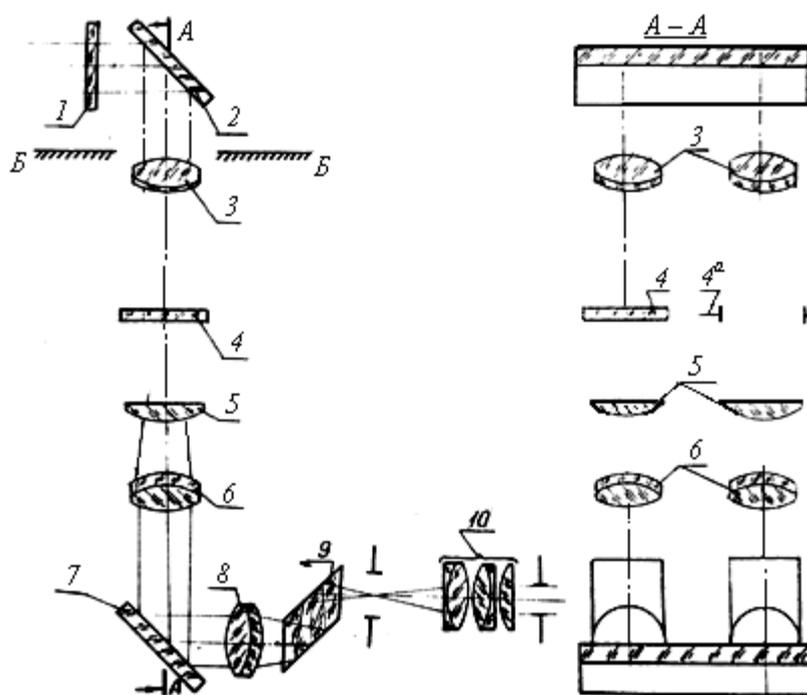


Рис. 14.1. Принципиальная схема оптики бинокулярного перископа

Принципиальная схема оптики бинокулярного перископа состоит из защитного стекла 1, головного качающегося зеркала 2, объективов 3, сетки 4 (расположенной только в правой ветви), полевой диафрагмы 4^а, коллективов 5, первого компонента оборачивающей линзовой системы 6, зеркала 7, второго компонента оборачивающей линзовой системы 8, ромбических призм 9 и окуляров 10. На рисунке 14.1 показан ход осевого пучка лучей.

Чтобы результаты измерения углов были правильны, визирная ось прибора в пространстве предметов, при наведении по углу места, должна перемещаться в вертикальной плоскости. След визирной оси на сферической поверхности с центром в точке пересечения визирной оси телескопа с осью вращения зеркала должен описывать дугу меридиана, а при наведении по горизонту след визирной оси на той же сферической поверхности должен описывать широтные круги, или параллели, на сфере.

Вследствие технологических погрешностей сборки и юстировки прибора, а также погрешности ориентирования прибора на местности, траектория движения визирной оси не совпадает с номинальной.

Отклонение визирной оси от плоскости меридиана называется уводом, по вертикали, или уводом от отвеса, а отклонение траектории следа визирной оси на упомянутой выше сфере от горизонта (при визировании по горизонту) называется уводом по горизонту. Эти ошибки могут привести к погрешностям измерения углов, причём увод от отвеса может вызывать ошибку измерения горизонтального угла $\Delta\varphi$ между точками, находящимися под различными углами места, а увод от горизонта может вызвать ошибку при измерении вертикального угла Δi между точками, расположенными в различных меридианах.

Чтобы избежать уводов визирной линии по вертикали и горизонта, необходимо при юстировке прибора выполнить следующие требования:

1) вертикальную ось вращения прибора установить строго вертикально. Отступление от этого условия называется наклоном вертикальной оси и обозначается – m ;

2) горизонтальная ось поворота головного зеркала должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения. Отступление от этого условия называется наклоном горизонтальной оси и обозначается – l ;

3) визирная ось в пространстве предметов должна быть перпендикулярна оси вращения, с которой непосредственно связано головное поворотное зеркало. Неперпендикулярность нормали головного зеркала к собственной оси поворота обозначается как коллимационная ошибка – K ;

4) визирная ось телескопа непосредственно перед головным зеркалом должна быть перпендикулярна оси качания зеркала. Отступление от этого условия обозначается как наклон оси визира – q .

Эти ошибки должны быть устранены при юстировке прибора, либо их допустимые значения должны быть обеспечены технологически путём изготовления деталей требуемой точности.

Допустимые значения указанных выше ошибок (или допустимые значения увода от вертикали и горизонта) определяют исходя из требуемой точности измерения прибором углов в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Математическая связь между уводом от вертикали и ошибкой измерения горизонтального угла, вызванной вышеперечисленными погрешностями, определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{oi} = -\frac{\delta_i}{\cos i}, \quad (14.1)$$

где δ_i – величина увода от вертикали при угле места точки визирования.

Увод от горизонта связан с ошибкой измерения углов в вертикальной плоскости соотношением:

$$\eta = \Delta i_{\varphi_2} - \Delta i_{\varphi_1}, \quad (14.2)$$

где η – увод от горизонта при визировании точек 1 и 2, расположенных под азимутальными углами φ_1 и φ_2 ;

Δi_{φ_1} , Δi_{φ_2} – ошибка вертикального угла наведения, соответственно, на точку 1 под азимутальным углом φ_1 и на точку 2 под азимутальным углом φ_2 .

В результате юстировки перископа должны быть выполнены следующие основные требования, обеспечивающие работу прибора в соответствии с техническим заданием на его разработку:

1) видимое увеличение $\Gamma = 7 - 6,65^\times$.

Разность увеличений левой и правой ветвей не более $0,13^\times$;

2) поле зрения прибора, $2\beta = 7 - 6^\circ 30'$;

3) диаметр зрачка выхода $d_{\beta'} = 4,0 - 3,8$ мм;

4) удаление зрачка выхода не менее 27,8 мм;

5) разрешающая сила прибора не более 8";

6) параллельность между центральным знаком сетки и изображением бесконечно-удалённого предмета – не более 2' в пространстве предметов;

7) неправильность оптических осей за окулярами в горизонтальной плоскости не более:

– 20' на схождение;

– 60' на расхождение;

– допустимый перекос в вертикальной плоскости – не более 15'.

Эти требования должны выполняться при любом значении межзрачкового расстояния в пределах 56 – 72 мм;

8) смещение центра сетки относительно центра полевой диафрагмы не более 30';

9) наклон изображения не более 1° ;

10) разность наклонов изображения левой и правой ветвей не более 30';

11) наклон сетки относительно изображения не более 30';

12) увод визирной линии от вертикали не более 3' при визировании по углу места от -5 до $+20^\circ$;

13) увод визирной линии от горизонта не более 5'.

При разработке методики юстировки прибора необходимо стремиться, чтобы максимальное количество юстировочных операций было независимым.

Независимая юстировка позволяет устранять каждую из ошибок отдельно и полностью в строго намеченной последовательности.

Для обеспечения технологичности конструкции прибора (с точки зрения технологии сборки и юстировки) весь прибор необходимо разбить на отдельные сборочные единицы, которые могут юстироваться отдельно. Окончательная юстировка прибора должна обеспечиваться минимальным количеством юстировочных подвижек.

Рассматриваемая схема может быть разбита на следующие сборочные единицы:

- головное качающееся зеркало;
- 1-ая телескопическая система, включающая в себя объективы 3, сетку 4, полевую диафрагму 4^а, коллективы 5 и первый компонент линзовой оборачивающей системы 6;
- плато окуляров, включающее окуляры 10 и ромбические призмы 9;
- 2-ая телескопическая система, включающая в себя сборочную единицу
- плато окуляров совместно со вторым компонентом оборачивающей линзовой системы 8 и зеркалом 7;
- телескоп, состоящий из первой и второй телескопических систем.

Для разработки методики юстировки отдельных сборочных единиц необходимо сформулировать технические требования к каждой сборочной единице. Кроме того, в конструкции прибора должна быть предусмотрена возможность независимой юстировки перечисленных сборочных единиц.

14.1 Юстировка головного качающегося зеркала

Необходимо обеспечить правильную установку зеркала и оси его вращения по отношению к базовой поверхности *ББ* (рис. 14.1). Наличие коллимационной ошибки и наклона оси вращения зеркала по отношению к базовой поверхности может вызвать увод визирной линии от вертикали.

Принимаем допустимый увод визирной линии от вертикали, вызванный указанными ошибками, не более 1.

Увод от вертикали вследствие наличия коллимационной ошибки определяется формулой:

$$\delta k_i = \sqrt{2} k \left(\cos \frac{i}{2} - \sin \frac{i}{2} - \cos i \right). \quad (14.3)$$

Ошибка в измерении угла места определяется формулой:

$$\Delta i_k = k^2 \cdot \sin i \cdot \operatorname{tg} i. \quad (14.4)$$

Аналогичные ошибки вследствие наличия наклона горизонтальной оси качания зеркала определяются формулой:

$$\delta l_i = l(1 - \sin i - \cos i), \quad (14.5)$$

$$\Delta i = \frac{l^2 (1 - \sin i)^2}{2} \cdot \operatorname{tg} i, \quad (14.6)$$

Как видно из приведённых формул, ошибки в измерении вертикальных углов являются ошибками второго порядка малости. Ниже, в таблице 14.1, приведены значения уводов визирной линии при различных углах места визируемой цели, вызванные наличием коллимационной ошибки и наклоном горизонтальной оси вращения. Цифровые значения увода рассчитаны по формулам (14.3 – 14.6) при $l = k = 1$.

Таблица 14.1

Значения уводов визирной линии

i	$\cos i$	$\sin i$	$\frac{i}{2}$	$\cos \frac{i}{2}$	$\sin \frac{i}{2}$	$\frac{\delta k_i}{k}$	$\frac{\delta l_i}{l}$
-10°	0,9848	-0,1736	-5°	0,9962	-0,0872	0,1390	0,1888
-5°	0,9962	-0,0872	$-2^\circ 30'$	0,9990	-0,0436	0,0356	0,0910
0°	1,0000	0,0000	0°	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5°	0,9962	0,0872	$2^\circ 30'$	0,999	0,0436	-0,0576	-0,0834
10°	0,9848	0,1736	5°	0,9962	0,0872	-0,1070	-0,1584
15°	0,9659	0,2588	$7^\circ 30'$	0,9914	0,1005	-0,1480	-0,2247
20°	0,9397	0,3420	10°	0,9848	0,1736	-0,1810	-0,2817
25°	0,8063	0,4226	$12^\circ 30'$	0,9763	0,2164	-0,2070	-0,3289
30°	0,8660	0,5000	15°	0,9659	0,2588	-0,2240	-0,3660

Продолжение таблицы 14.1

i	$\frac{\delta l_i}{l} - \frac{\delta k_i}{k}$	$\frac{\delta k_i}{k} \cdot 1,48$	$\frac{\delta l_i}{l} - \frac{\delta k_i}{k} \cdot 1,48$
-10°	0,0498	0,2060	-0,0172
-5°	0,0254	0,0970	-0,0060
0°	0,0000	0,0000	0,0000
5°	-0,0258	-0,0852	0,0018
10°	-0,0514	-0,1584	0,0000
15°	-0,0757	-0,2190	-0,0057
20°	-0,1007	-0,2680	-0,0137
25°	-0,1219	-0,3060	-0,0229
30°	-0,142	-0,3310	-0,0350

Эта же зависимость представлена на рис. 14.2 графически.

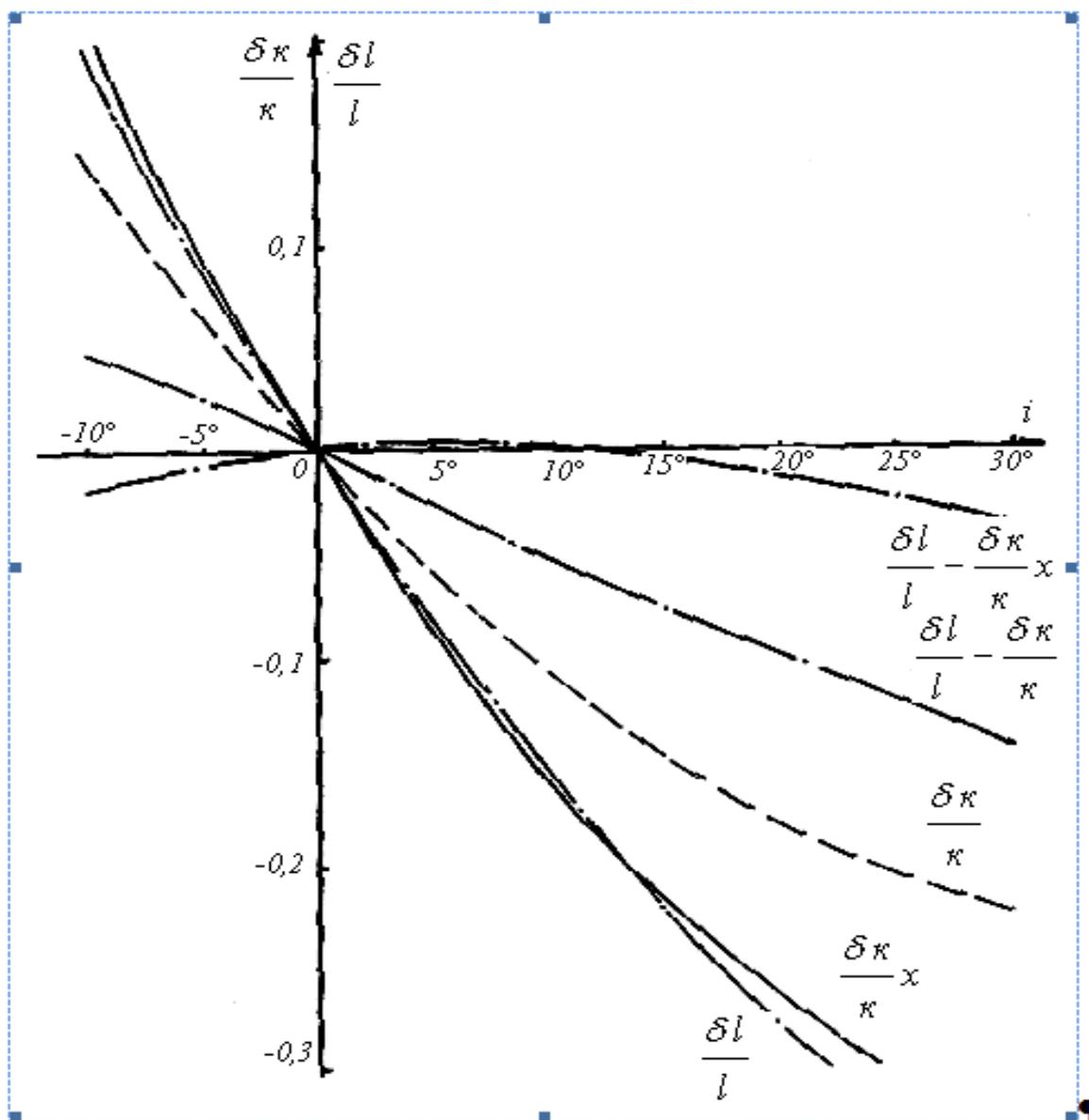


Рис. 14.2. График зависимости значений уводов визирной линии при различных углах места визируемой цели

Как видно из графиков, эти ошибки могут быть взаимокompенсированы. Для этого в конструкции головного зеркала должен быть предусмотрен один компенсатор.

В рассматриваемой конструкции в качестве компенсатора предусмотрена возможность наклона оси вращения зеркала (изменение значения l).

Максимальное значение k (по рабочим чертежам деталей) – $\frac{0,2}{100}$.

(или в угловой мере $\pm 7'$), следовательно, конструкция компенсатора должна обеспечивать наклон горизонтальной оси качания зеркала на величину

$$\beta = \frac{\gamma}{1,5} + \alpha,$$

где α – допустимая непараллельность оси вращения зеркала относительно базовой плоскости BB (рис.1).

Угол α определяется из расчёта размерной цепи сборочной единицы – головное качающееся зеркало – по рабочим чертежам.

Принципиальная оптическая схема контрольно-юстировочного прибора (КЮП) представлена на рис. 14.3.

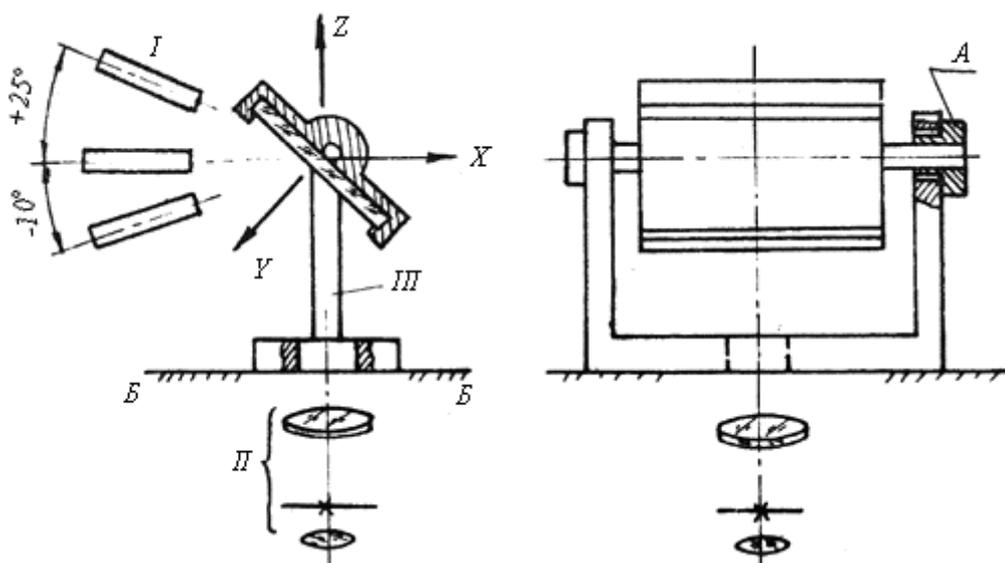


Рис. 14.3. Принципиальная оптическая схема контрольно-юстировочного прибора для юстировки головного качающегося зеркала

КЮП состоит из трёх коллиматоров I, визирные оси которых расположены под углами -10° , 0° , $+25^\circ$ к базовой поверхности BB , и зрительной трубы II. На опорную базовую плоскость BB устанавливается юстируемая сборочная единица III.

КЮП должен отвечать следующим техническим требованиям:

- в поле зрения коллиматоров должны быть перекрестия с угловыми делениями. Цена малого деления $30''$;
- фокусное расстояние коллиматора $f_{кол.} = 200$ мм;
- относительное отверстие $O = 1:4 - 1:10$;
- в поле зрения зрительной трубы имеется перекрестие. Увеличение зрительной трубы $\Gamma \geq 20^\times$, что обеспечит видимую величину сетки коллиматора $10 - 12'$;
- визирные оси зрительной трубы 3 и коллиматоров I должны находиться в одной плоскости, перпендикулярной базовой плоскости BB . Допустимое отклонение не более $6''$.

Юстировка и проверка КЮП производится с помощью теодолита (марка теодолита Т5, погрешность измерения $\pm 5''$).

Собранная сборочная единица устанавливается своей опорной поверхностью на базовую плоскость *ББ*.

Юстировка производится в следующем порядке:

– наблюдая в зрительную трубу, исключить наклон изображения путём поворота юстируемой сборочной единицы вокруг оси, перпендикулярной базовой посадочной плоскости *ББ*;

– подвижкой подшипников *А* оси вращения зеркала в направлении *Z* исключить увод от вертикали.

Проверка производится наблюдением в зрительную трубу при последовательном визировании на оптические оси коллиматоров путём поворота зеркала вокруг оси вращения. Допускаемое значение увода не более $1'$.

После окончания юстировки подшипник закрепить.

14.2 Юстировка первой телескопической системы

Принципиальная оптическая схема первой телескопической системы представлена на рис. 14.4.

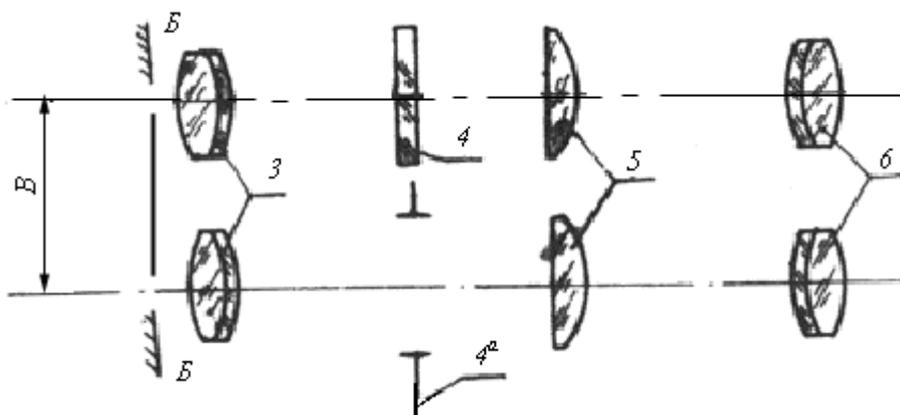


Рис. 14.4. Принципиальная оптическая схема 1-ой телескопической системы

При юстировке необходимо обеспечить следующее:

1) совместить фокальную плоскость объектива 3 (рис. 14.4) с плоскостью делений сетки 4 в правой ветви и с плоскостью полевой диафрагмы 4^a в левой ветви. Допустимый параллакс не более $2'$ в пространстве предметов;

2) телескопичность обеих ветвей с точностью 0,1 диоптрии;

3) перпендикулярность визирной оси правой ветви базовой плоскости *ББ*. Допустимая перпендикулярность не более $2'$ в пространстве предметов;

4) параллельность оптических осей. Допустимое отклонение не более $2'$ в пространстве изображений;

5) выдержать межзрачковое расстояние B . Допустимое отклонение не более $0,2 - 0,3$ мм.

Контрольно-юстировочный прибор для юстировки этой сборочной единицы может быть выполнен по принципиальной схеме, представленной на рис. 14.5.

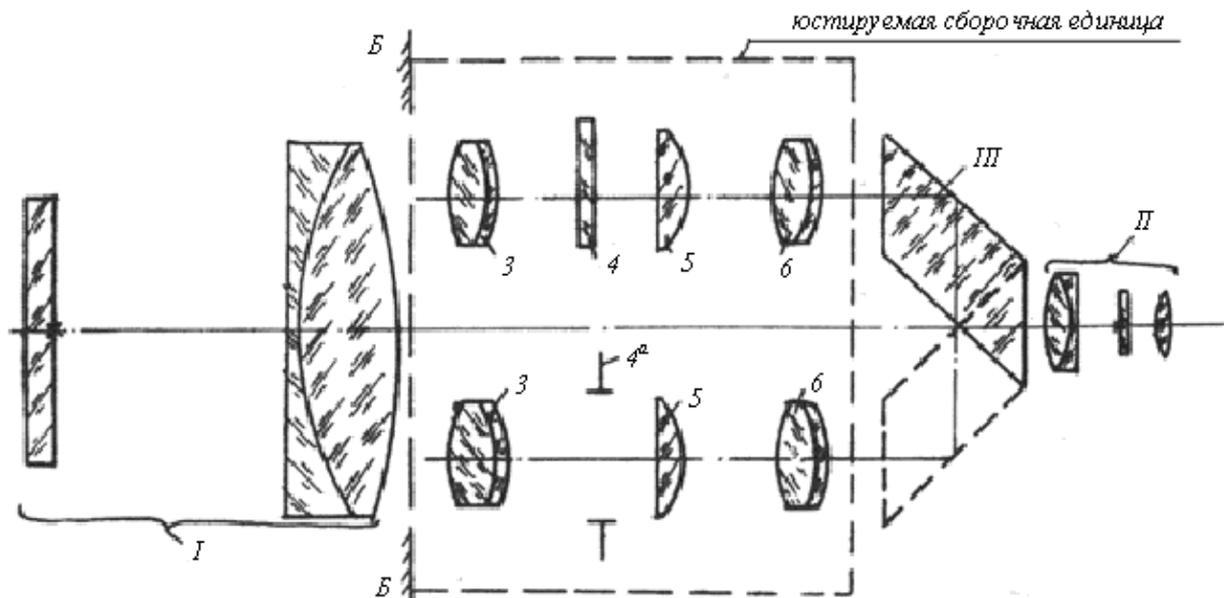


Рис. 14.5. Принципиальная оптическая схема контрольно-юстировочного прибора для юстировки 1-ой телескопической системы

Прибор состоит из широкоугольного коллиматора I, визирная ось которого перпендикулярна базовой плоскости BB , имеющейся на КЮП, к которой крепится посадочная плоскость юстируемой сборочной единицы, трубки II с перекидной призмой III перед объективом.

Визирная ось трубки II также устанавливается перпендикулярно базовой плоскости BB . Зрительная трубка имеет подвижной окуляр с кремальерой.

Основные технические требования к КЮП

$$-D \geq 1,2(D_p + B),$$

где D – диаметр объектива широкоугольного коллиматора,

D_p – диаметр зрачка входа юстируемой сборочной единицы,

B – расстояние между оптическими осями ветвей юстируемой сборочной единицы;

$$-2\beta_{\text{кал}} > 2\beta_c,$$

где $2\beta_{\text{кал}}$ и $2\beta_c$ – поле зрения широкоугольного коллиматора и юстируемой сборочной единицы, соответственно;

компонента оборачивающей системы:

$$-f'_{об.тр.} \geq f'_I,$$

где $f'_{об.тр.}$ – расстояние объектива зрительной трубы,

f'_I – фокусное расстояние I компонента оборачивающей системы;

$$-D_{тр} \geq 1,2d'_p,$$

где $D_{тр}$ – диаметр зрачка входа зрительной трубы,

d'_p – диаметр зрачка входа юстируемой системы.

В поле зрения визирной зрительной трубки имеется перекрестие, а на сетке широкоугольного коллиматора имеется шкала с ценой деления 1[?].

Неперпендикулярность визирных осей коллиматора и зрительной трубки к базовой плоскости *ББ* не более 10". Собранный сборочная единица устанавливается своей посадочной плоскостью на базовую плоскость КЮП. Сначала юстируется правая ветвь сборочной единицы.

Юстировка производится в следующем порядке:

– подвижкой I компонента линзовой оборачивающей системы 6 вдоль оптической оси навести на резкое видение сетки 4 правой ветви (рис. 14.5);

– подвижкой сетки 4 в плоскости, перпендикулярной оптической оси, совместить её центр с центром сетки зрительной трубы II;

– подвижкой объектива 3 юстируемой сборочной единицы вдоль оптической оси совместить его фокальную плоскость с плоскостью делений сетки 4, при этом сетка коллиматора I и сетка юстируемой системы 4 должны быть видны одновременно резко без заметного на глаз параллакса.

Несовпадение центра перекрестия 4 с нулевым делением сетки коллиматора I указывает на перпендикулярность визирной оси юстируемой сборочной единицы посадочной плоскости *ББ*;

– подвижкой объектива 3 в направлениях, перпендикулярных визирной оси, совместить центр сетки 4 с нулевым делением сетки коллиматора I.

Перед юстировкой левой ветви юстируемой сборочной единицы на полевую диафрагму 4^а наклеить перекрестие нитей с центром, совпадающим с центром диафрагмы. Юстировка левой ветви ведётся при помощи ромбической призмы III КЮП, указанной пунктиром (рис. 14.5).

Юстировка левой ветви производится в следующей последовательности:

– подвижкой 1 компонента линзовой оборачивающей системы 3 вдоль оптической оси навести на резкое видение перекрестия полевой диафрагмы 4^а (рис. 14.5);

– подвижкой полевой диафрагмы 4^а в плоскости, перпендикулярной оптической оси, совместить центр перекрестия нитей с центром сетки зрительной трубы II;

– подвижкой объектива 3 юстируемой сборочной единицы вдоль оптической оси совместить его фокальную плоскость с плоскостью перекрестия нитей полевой диафрагмы 4^a , при этом изображение сетки коллиматора I и изображение перекрестия нитей полевой диафрагмы должны быть видны одновременно резко без заметного на глаз параллакса. Несовпадение центра перекрестия нитей полевой диафрагмы 4^a с нулевым делением сетки коллиматора I указывает на перпендикулярность визирной оси юстируемой сборочной единицы посадочной плоскости $ББ$;

– подвижкой объектива 3 в направлениях, перпендикулярных визирной оси, совместить центр перекрестия нитей полевой диафрагмы 4^a с нулевым делением сетки коллиматора I. Этой подвижкой обеспечивается параллельность оптических осей левой и правой ветвей.

При юстировке параллельности может быть допущена небольшая

($\Delta\alpha = 2'$) сходимость оптических осей, которая вызовет за окуляром расходимость осей на величину, равную $\Delta\alpha \cdot \Gamma_2$, причём:

$$\Gamma_2 = -\frac{f'_8}{f'_{ок}}$$

где Γ_2 – угловое увеличение 2-ой телескопической системы;

f'_8 – заднее фокусное расстояние 2-го компонента линзовой обрабатывающей системы 8 (рис. 2.1);

$f'_{ок}$ – заднее фокусное расстояние окуляра 10.

Достигнутые положения элементов юстируемой сборочной единицы фиксируются.

14.3 Юстировка плато окуляров

На рис. 14.6 представлена принципиальная оптическая схема плато окуляров.

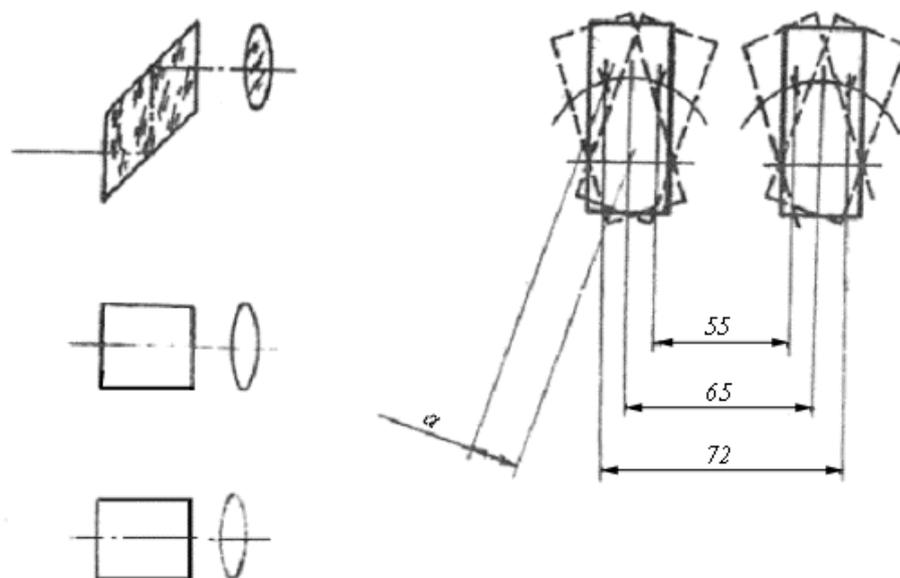


Рис. 14.6. Принципиальная оптическая схема плато окуляров

Для телескопических бинокулярных труб оси пучков лучей, выходящих из обоих окуляров и исходящих от одной и той же точки предмета, должны быть параллельны между собой в пределах следующих допусков:

- в горизонтальной плоскости при конвергенции осей – не более $60'$,
- при дивергенции осей – не более $20'$,
- в вертикальной плоскости – не более $\pm 15'$.

Эти условия должны выдерживаться при любом возможном расстоянии между центрами выходных зрачков, а также при любой возможной диоптрийной установке окуляров.

Непараллельность осей при изменении межзрачкового расстояния вызывается следующими факторами:

- 1) непараллельностью осей вращения из-за ошибок изготовления механических деталей;
- 2) ошибками изготовления ромбических призм;
- 3) несовпадением оптической оси окуляра с механической осью вращения.

Первые две ошибки не компенсируются юстировкой; 3-я ошибка юстируемая.

Задачей юстировки плато окуляров является обеспечение указанного выше условия, но допускаемые отклонения от параллельности должны быть ниже, т.к. рассматриваемая сборочная единица является одним из элементов, вызывающих непараллельность оптических осей прибора. Примем допускаемое значение непараллельности осей выходящих за окуляром пучков не более $3'$.

В системах, где окулярную базу изменяют с помощью ромбической призмы, дополнительная непараллельность выходящих пучков лучей не возникает только в том случае, если узловая точка окуляра окажется на оси вращения ромбической призмы.

Принципиальная схема КЮП для сборочной единицы представлена на рис. 14.7.

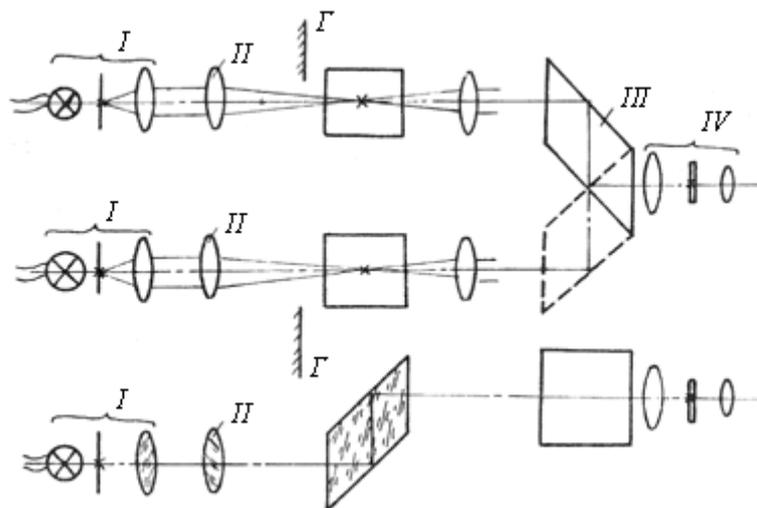


Рис. 14.7. Принципиальная оптическая схема КЮП для юстировки плато окуляров

Прибор состоит из двух коллиматоров I с проекционными объективами II, оптические оси которых совпадают с оптическими осями объективов коллиматоров, зрительной трубы IV и перекидной ромбической призмы III. Зрительная труба IV имеет кремальберный механизм для перемещения окуляра с сеткой вдоль оптической оси. Плато окуляров устанавливается на базовую плоскость $ГГ$, перпендикулярную оптической оси коллиматора. Коллиматоры I с объективами II проектируют перекрестия сеток в фокальную плоскость окуляра.

Основные технические требования к КЮП

Расстояние между изображениями перекрестий равно номинальному расстоянию между оптическими осями предшествующей оптической системы. Допускаемое отклонение Δ определяется из соотношения:

$$\Delta = f'_{ок} \cdot \operatorname{tg} I',$$

где $f'_{ок}$ – фокусное расстояние юстируемого окуляра.

Зрительная труба IV имеет увеличение $3 - 4^{\times}$ и диоптрийную подвижку окуляра в пределах ± 4 диоптрии.

На сетке зрительной трубы имеется допусковая окружность, радиус которой соответствует трём угловым минутам. Диаметр $D_{окр}$ окружности определяется из соотношения:

$$D_{окр} = 2 \operatorname{tg} 3' \cdot f'_{об.зр.тр.},$$

где $f'_{об.зр.тр.}$ – фокусное расстояние зрительной трубы.

Для юстировки окулярное плато нужно установить на базовую плоскость $ГГ$. Меняя межзрачковое расстояние окуляров (путём поворота ромбических призм совместно с окулярами) и перемещая правый окуляр в направлении, перпендикулярном его оптической оси, добиться, чтобы изображение перекрестия коллиматора не выходило за пределы допусковой окружности.

Перекинув ромбическую призму III в положение, указанное на рис. 2.7 пунктиром, проделать аналогичные действия с левым окуляром. Затем произвести проверку параллельности оптических осей при следующих значениях межзрачкового расстояния – 56; 65; 70 мм.

Допускаемое значение непараллельности не более $3'$.

14.4 Юстировка второй телескопической системы

Сборочная единица – вторая телескопическая система – состоит из плато окуляров и второго компонента оборачивающей линзовой системы 8 (рис. 14.1) и представляет собой бинокулярную телескопическую систему.

Принципиальная оптическая схема второй телескопической системы представлена на рис. 14.8.

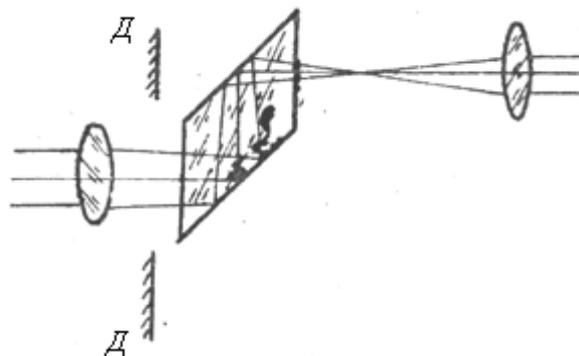


Рис. 14.8. Принципиальная оптическая схема второй телескопической системы

В результате юстировки необходимо обеспечить выполнение следующих, требований:

- телескопичность системы. Допускаемое отклонение ± 0.1 диоптрий;
- ось параллельного пучка лучей, входящего в правую ветвь оптической системы перпендикулярно базовой посадочной поверхности $ДД$ сборочной единицы, должна остаться перпендикулярной после выхода лучей из окуляра.

Допускаемое отклонение от перпендикулярности не более $2'$;

- оси пучков лучей, выходящих из обоих окуляров и исходящих из одной и той же точки предмета, должны быть параллельны между собой.

Допускаемые отклонения:

- в плоскости оптических осей окуляров при конвергенции – не более $7'$,
- в вертикальной плоскости – не более $5'$.

Принципиальная схема КЮП представлена на рис. 14.9.

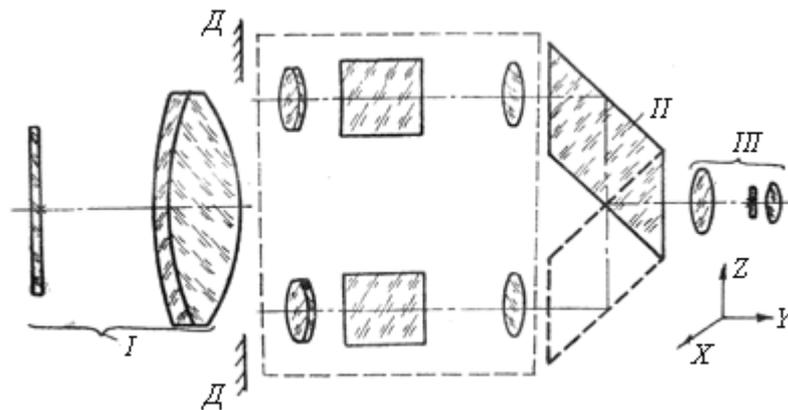


Рис. 14.9. Принципиальная оптическая схема КЮП для юстировки второй телескопической системы

КЮП состоит из коллиматора I с перекрестием в поле зрения, базовой посадочной плоскости $ДД$, зрительной трубки III с перекрестием в поле зрения, перекидной ромб-призмы II и диоптрийной трубки.

Основные технические требования к КЮП:

$$- D \geq (D_p + B) \cdot 1,2,$$

где D – диаметр объектива широкоугольного коллиматора,

D_p – диаметр зрачка входа юстируемой сборочной единицы,

B – расстояние между оптическими осями обеих ветвей юстируемой сборочной единицы;

$$- f'_{кол} > 10D, \quad 2\beta_{кол} > 2\beta_c,$$

где $f'_{кол}$ – фокусное расстояние объектива коллиматора;

$2\beta_{кол}$ и $2\beta_c$ – поле зрения коллиматора и юстируемой сборочной единицы, соответственно;

$$- 2\beta_{тр} > 2\beta'_c,$$

где $2\beta_{тр}$ и $2\beta'_c$ – поле зрения зрительной трубки и окулярное поле зрения юстируемой телескопической системы, соответственно;

$$- D_{тр} \geq 1,2d'_p,$$

где $D_{тр}$ – диаметр зрачка входа зрительной трубки,

d'_p – диаметр зрачка выхода юстируемой системы;

$$- \Gamma_{mp} = 4 - 5^\times.$$

В поле зрения визирной трубки имеется перекрестие, в поле зрения коллиматора – перекрестие со шкалой. Цена деления шкалы 1'.

Неперпендикулярность визирных осей коллиматора и зрительной трубки к базовой плоскости *ДД* (рис. 14.9) – не более 10".

Собранная сборочная единица устанавливается своей посадочной плоскостью на базовую плоскость *ДД* КЮП.

Юстировка производится в следующем порядке:

– правый окуляр устанавливается в резкое положение (возможная диоптрийная подвижка окуляра симметрична относительно этого положения);

– левый окуляр устанавливается так, чтобы задний срез оправы был в одной плоскости с задним срезом оправы правого окуляра;

– установить диоптрийную трубку на нулевое деление. Наблюдая с помощью диоптрийной трубки через окуляр прибора и перемещая второй компонент линзовой оборачивающей системы вдоль оси *Y*, добиться резкого видения изображения сетки коллиматора в обеих оптических ветвях без заметного на глаз параллакса между изображением сетки коллиматора и диоптрийной трубки;

– подвижкой второго компонента оборачивающей системы правой и левой ветви в плоскости *ZOX* добиться совпадения изображения перекрестия коллиматора с перекрестием зрительной трубки.

Примечание: при сборке первой и второй телескопических систем линзовые компоненты левой и правой ветвей комплектуются по действительным значениям фокусных расстояний таким образом, чтобы разность увеличений левой и правой ветвей телескопа была не более 0,13[×].

14.5 Окончательная юстировка прибора

Окончательно отъюстированный прибор должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) увеличение $\Gamma = 7 - 6,65^\times$;
- 2) разность увеличений левой и правой ветвей не более 0,13[×];
- 3) поле зрения прибора $2\beta = 7 - 6^\circ 30'$ (обеспечивается конструктивными параметрами);
- 4) удаление зрачка выхода не менее 27,8 мм;
- 5) диаметр зрачка выхода $d'_p = 4 - 3,8$ мм;
- 6) наклон изображения не более 1°;
- 7) разность наклона изображений в левой и правой ветвях не более 30'.

В рассматриваемой схеме разность наклона изображения в левой и правой ветвях может быть вызвана только за счёт ошибок изготовления ромбических призм (пирамидальности – II).

КЮП для окончательной юстировки прибора должен состоять из широкоугольного коллиматора I (рис. 14.10), двух параллельных зрительных трубок II, диаметра, диоптрийной трубки и универсального наклономера УН.

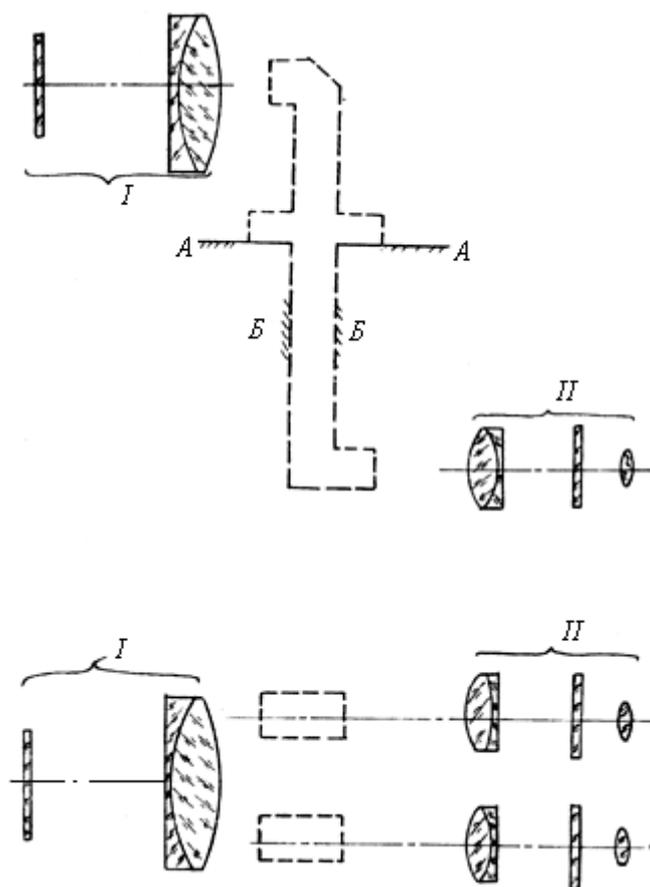


Рис. 14.10. Принципиальная оптическая схема КЮП для окончательной юстировки прибора

Визирная ось коллиматора устанавливается параллельно плоскости AA и перпендикулярно плоскости BB , которые являются базовыми.

После предварительной стыковки сборочных единиц их посадочными местами производится окончательная вотировка вокруг вертикальной оси.

Контролем правильности установки зеркала может служить:

- 1) параллельность вертикальных линий сеток коллиматора и прибора;
- 2) отсутствие увода от вертикали линии визирования при покачивании зеркала.

Далее юстируют нижнее зеркало 7.

Юстировкой нижнего зеркала устраняется:

- 1) срезание зрачка выхода – подвижкой зеркала вдоль оптической оси;

2) срезание поля зрения по вертикали – разворотом зеркала вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, и срезание по горизонту – разворотом вокруг оси, лежащей в плоскости чертежа и параллельной оптической оси прибора;

3) наклон изображения – одновременно с устранением срезания поля зрения по горизонту.

Возможная разность увеличений левой и правой ветвей может быть устранена изменением фокусного расстояния первой линзы 6 оборачивающей системы за счёт изменения расстояния между линзой и коллективом 5 (при условии сохранения неизменными остальных параметров прибора).

15. ЮСТИРОВКА ОБЪЕКТИВОВ ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ И МИКРООБЪЕКТИВОВ

Качество объектива телескопической системы определяется пределом разрешения и качеством изображения точечного источника света.

Пределом разрешения объектива называют наименьшее угловое расстояние между точками или линиями, которые объектив воспроизводит раздельно.

Объективы телескопических систем имеет малое угловое поле зрения, поэтому качество изображения таких приборов контролируют в центре поля объектива (рис. 15.1).

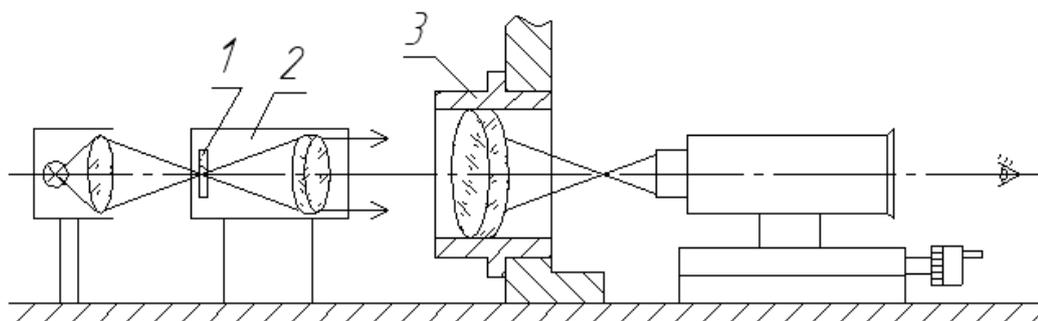


Рис. 15.1. Схема с объективом телескопической системы

Короткофокусные объективы проверяют на оптической скамье. Контролируемый объектив 3 устанавливают в держатель, опорная плоскость которого перпендикулярна оси коллиматора 2, а посадочное отверстие соосно с оптической осью коллиматора. Диаметр линз коллиматорного объектива не должен быть меньше диаметра зрачка входа проверяемого объектива, а фокусное расстояние коллиматора в 2 – 3 раза должно превышать фокусное расстояние испытуемого объектива.

Предел разрешения объектива определяют по изображению штриховой миры 1, образованному контролируемым объективом и наблюдаемому в микроскоп 4.

Теоретический угловой предел разрешения объектива в радианах, определяемый дифракцией света, вычисляют по формуле 15.1.

$$\alpha = 1,22\lambda / D, \quad (15.1)$$

где λ – длина волны света в мм;

D – диаметр входного зрачка объектива в мм.

При наблюдении в зелёном свете ($\lambda = 0,56$ км) предел разрешения в угловых секундах $\alpha = 140'' / D$.

Вследствие остаточных аббераций и дефектов изготовления и сборки реальный предел разрешения объективов составляет $(1,1 - 1,2)\alpha$.

При определении предела разрешения объектива изображения миры, **об-
разуемого** испытуемым объективом, рассматривают с помощью микроскопа 4. Увеличение микроскопа должно быть таким, чтобы расстояние между штрихами 25-го элемента в изображении миры было больше предела разрешения глаза, вооружённого микроскопом.

Апертура микрообъектива должна превышать апертуру испытуемого объектива. Изображение миры рассматривают от крупных штрихов к мелким.

Последний элемент, в котором отдельно различают штрихи всех 4-х направлений, определяет предел разрешения объектива.

Предел разрешения объектива R_N – число линий на 1 мм:

$$R_N = f'_k / f'_{об} \cdot 2a, \quad (14.2)$$

где a – ширина штриха предельно разрешаемого элемента миры в мм.

В угловой мере предел разрешения α'' :

$$\alpha'' = 206\,265 \cdot 2a / f'_k, \quad (14.2)$$

где 206 265 – число угловых секунд в одном радиане.

Кроме остаточных расчётных аббераций на разрешающую силу объектива оказывает влияние искажение изображения, возникающее из-за дефектов линз при их изготовлении и сборке. Влияние этих дефектов на качество изображения можно оценить по виду дифракционной точки изображения точечной диафрагмы, установленной в фокальной плоскости коллиматора. Обычно для микрообъективов диаметр отверстия точечной диафрагмы определяется как

$$\alpha''_T \leq \alpha \cdot f'_k,$$

где α – в радианах.

Если в изображении точки видно яркое неокрашенное светлое пятно, окружённое одним или двумя концентрическими кольцами, не имеющими разрывов, то объектив выбран правильно (рис. 15.2).

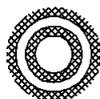


Рис. 15.2. Изображение точки, окружённое одним или двумя концентрическими кольцами

Несимметрия в распределении освещённости колец указывает на наличие децентрировки линз объектива.

При грубой децентрировке точка превращается в геометрическую фигуру, называемую комой (рис. 15.3).

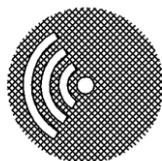


Рис. 15.3. Изображение точки в виде комы

Увеличенное число колец вокруг центрального пятна указывает на повышенную сферическую aberrацию, вызываемую погрешностью выполнения толщин линз и воздушных промежутков объектива или большим отклонением радиусов поверхностей линз (рис. 15.4).

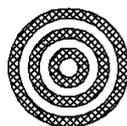


Рис. 15.4. Сферическая aberrация

Изображение точки в виде креста, переходящего при перефокусировке микроскопа в горизонтальную или вертикальную полосы, даёт объектив, имеющий недостаток, называемый *астигматизмом* (рис. 15.5). Астигматизм [а – отрицательная частица и *stigma* (*греч.*) – точка] – недостаток оптической системы, получающийся вследствие неодинаковой кривизны оптической поверхности в разных плоскостях сечения падающего на неё светового пучка

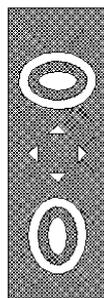


Рис. 15.5. Изображение точки в виде креста

Причина – искажение поверхности линзы в одном направлении, вызванное деформацией линзы при её сборке или изготовлении.

Если изображение точки имеет неодносторонний разрыв колец и при перефокусировке микроскопа в месте разрыва на увеличенном ореоле точки видно тёмную или светлую полосу, пересекающую ореол, то это свидетельст-

вует о грубой неоднородности показателя преломления в стекле (свиль) (рис. 15.6).

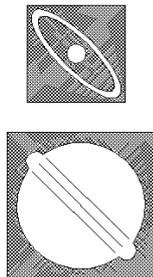


Рис. 15.6. Изображение при грубой неоднородности показателя преломления в стекле

Разрыв первого дифракционного кольца в виде хвоста означает, что одна из линз по краю имеет местный завал поверхности, так называемую фаску (рис. 15.7).



Рис. 15.7. Изображение при наличии фаски линзы

Все эти дефекты недопустимы для объективов телескопов и нежелательны для объективов зрительных труб, так как снижают разрешающую силу и контраст изображения.

Эти дефекты изображения исправляют при проверке правильности изготовления линз и сборки.

Дефектную линзу обнаруживают при повороте линзы в оправе вокруг оптической оси объектива.

Если дефект перемещается в изображении точки на такой же угол, что и линза, то он принадлежит поворачиваемой линзе.

Хорошие результаты при контроле разрешающей силы микрообъективов даёт автоколлимационный способ, предложенный Т. И. Соколовой (рис. 15.8).

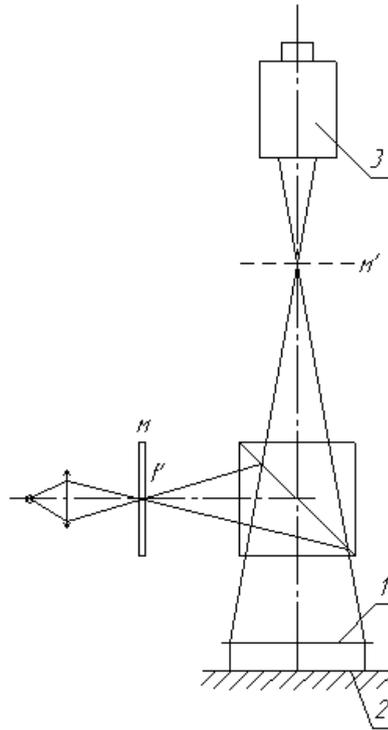


Рис. 15.8. Схема контроля разрешающей силы микрообъективов автоколлимационным способом,

Испытуемый объектив 1 устанавливается так, чтобы его задний фокус (F') совпал с мирой M , освещенной системой 1.

Автоколлимационное изображение M' миры, даваемое с помощью зеркала 2, рассматривается микроскопом 3. Оценка качества при помощи миры рассмотрена ранее.

Библиографический список

1. Погарев, Г.В. О чувствительности поперечных и продольных установок, выполняемых с помощью отсчётных труб и микроскопов/ Г.В. Погарев. – Изд. ЛИТМО, Ленинград.
2. Погарев, Г.В. Юстировка оптических приборов/ Г.В. Погарев. – М.-Л.: Машиностроение, 1968.
3. Пер, А.Г. Производство оптико-механических приборов/ А.Г Пер. – М.: Оборонгиз, 1959.
4. Слюсарев, Г.Г. Методы расчёта оптических систем/ Г.Г. Слюсарев. – Машиностроение, 1937.
5. Тудоровский, В.Н. Теория оптических приборов/ В.Н. Тудоровский. – Изд. АН СССР, 1948.
6. Чуриловский, В.Н. Теория оптических приборов/ В.Н. Чуриловский. – М.-Л.: Машиностроение, 1966.
7. Оптические скамьи ОСК-2 и ОСК-3: краткое описание, – Новосибирский приборостроительный завод им. В.И. Ленина. – Новосибирск, 1974.