

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

*САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ*



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

А.М. Бурбаев

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ИСПЫТАНИЙ, КОНТРОЛЯ И ЮСТИРОВКИ
ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Методические указания к лабораторному практикуму



Санкт-Петербург

2007

УДК 681.4.07

Бурбаев А.М. Методы и средства испытаний, контроля и юстировки оптических приборов. Методические указания к лабораторному практикуму. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2007. 112 с.

В методических указаниях рассматриваются методы и средства контроля и юстировки оптических приборов при обеспечении таких характеристик, как точность функционирования и качество изображения. Излагаются некоторые принципы разработки методик юстировки. Приводятся описания лабораторных установок и даются рекомендации по выполнению лабораторных работ.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 «Оптоэлектроника» и направлению подготовки дипломированных специалистов 200203 «Оптоэлектронные приборы и системы».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы.

Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет и информационных технологий, механики и оптики, 2007
© А.М. Бурбаев, 2007

Введение

Настоящее пособие представляет собой методические указания к лабораторным работам по курсу «Методы и средства испытаний контроля и юстировки оптико-электронных приборов» с теоретическими и научно-практическими выкладками, расширяющими представления об объекте контроля и методах его юстировки, а также поясняющими суть работ. Более подробно теоретические основы каждого метода изучаются с помощью литературы, приведенной в конце каждой лабораторной работы, и лекционного курса.

Целью пособия является помощь в приобретении навыков практического выполнения технологических операций контроля и юстировки типовых узлов и характерных оптических приборов, разработки методов юстировки и схем контроля с выбором средств контрольно-юстировочного оснащения.

Пособие охватывает широкий круг приборов и задач их юстировки. В нем приводятся технические требования к изготовлению (сборке) рассматриваемых изделий, описываются схемы, методы и средства контроля, методики выполнения работ. Кроме того, приводятся требования к отчету по лабораторной работе и некоторые вопросы, задаваемые при защите.

Лабораторная работа №1

СБОРКА, ЮСТИРОВКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ МИКРООБЪЕКТИВА

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться по чертежу с конструкцией микрообъектива МЩ 40×0,65, основными погрешностями сборки микрообъективов, влиянием этих погрешностей на дифракционное изображение точки и способами их устранения.
2. Отъюстировать микрообъектив 40×0,65, контролируя качество микрообъектива по дифракционному изображению точки.
3. Исследовать влияние изменения толщины покровного стекла и длины тубуса на качество изображения микрообъективов.
4. Исследовать и описать дефекты изображения комплекта прилагаемых микрообъективов 20×0,40, указать причины их появления и сравнить с качеством изображения образцового объектива.

Для зачета студент предъявляет отъюстированный микрообъектив, результаты исследования качества изображения неразбираемых микрообъективов 20×0,40, прилагаемых в комплекте лабораторной установки, и полностью оформленный отчет по работе с приведением как эскизных зарисовок характерных признаков в дифракционном изображении точки, так и их словесных описаний. В отчете следует перечислить основные аберрации микрообъектива, причины их возникновения и способы устранения в процессе юстировки.

2. Комплект установки

- | | |
|---|------------|
| 1. Микроскоп МБР с набором из трех штатных объективов | - 1 компл. |
| 2. Осветитель ОИ-19 с блоком питания | - 1 компл. |
| 3. Объектив 40×0,65 №61518, подлежащий юстировке | - 1 шт. |
| 4. Объективы 20×0,40 – испытуемые, не разбираемые и не юстируемые, №№ 64109, 65951, 65997, 64531 | -1 компл. |
| 5. Зеркало с внешним покрытием, используемое в качестве точечного препарата | - 2 шт. |
| 6. Окуляры компенсационные $\Gamma=10^x$; $\Gamma=15^x$ | - 1 компл. |
| 7. Втулка с крестообразным основанием и четырьмя резьбовыми отверстиями М3 под центрировочные винты | - 1 шт. |
| 8. Центрировочный винт с накатанной рукояткой и уменьшенным в диаметре до 1 мм наконечником | - 4 шт. |
| 9. Специальный ключ для отвинчивания и завинчивания прижимной втулки микрообъектива | - 1 шт. |

10. Эбонитовая оправка $\varnothing 9$ мм для установки линзовых компонентов в корпус объектива методом «столбика» - 1 шт.
11. Деревянная (бамбуковая) палочка - 1 шт.

3. Назначение, свойства и классификация микрообъективов. Требования, предъявляемые к их коррекции

Микрообъектив является основным и наиболее ответственным элементом любого светового микроскопа. Представляя собой самостоятельную, функционально законченную оптическую систему, микрообъектив определяет важнейшие характеристики микроскопа и, в первую очередь, увеличение, качество изображения и разрешающую способность.

Объективы микроскопа можно классифицировать по различным признакам, например, по спектральной области, для которой они рассчитаны и применяются, способу освещения наблюдаемого объекта, длине тубуса, на которую они рассчитаны, наличию покровного стекла и иммерсионной жидкости. Кроме того, микрообъективы, так же как и объективы телескопических систем можно классифицировать по оптико-конструктивным признакам, например, линзовые объективы, зеркально-линзовые и зеркальные. В зависимости от линейного увеличения и числовой апертуры микрообъективы можно разделить на следующие группы:

- микрообъективы небольшого увеличения, небольшой апертуры (слабые объективы);
- микрообъективы среднего значения увеличения и апертуры (средние объективы);
- микрообъективы сильных увеличений (сильные объективы), высокоапертурные микрообъективы.

Вместе с тем, наибольшее предпочтение заслуживает классификация объективов по степени коррекции хроматических аберраций, а также аберраций внеосевых пучков – астигматизма и кривизны изображения. В зависимости от степени исправления хроматических аберраций различают следующие типы объективов: монохроматы, ахроматы и апохроматы. Монохроматы – это объективы, у которых аберрации исправлены для одной длины волны или узкой спектральной области. Объективы, у которых ахроматизация выполнена для двух длин волн, называются ахроматами. Наиболее распространены ахроматические объективы, рассчитанные для применения в спектральной области от линии F ($\lambda = 486$ нм) до C ($\lambda = 656$ нм). У апохроматических объективов спектральная область расширена и ахроматизация выполняется для трех длин волн. У перечисленных типов объективов исправлены следующие аберрации. Так, у

монохроматов в первую очередь исправляются сферическая aberrация, кома и астигматизм. У ахроматов исправлению подлежат: сферическая aberrация, кома, астигматизм, хроматическая aberrация положения и отчасти сферохроматическая aberrация. Для точки на оси волновая aberrация у ахроматов для основной длины волны, как правило, не превышает $0,25\lambda$ (т.е. выполняется критерий Рэлея), а для всей спектральной области, на которую рассчитаны ахроматы, не более $0,5\lambda$.

У объективов с апохроматической коррекцией, кроме хроматизма положения, сферической aberrации, комы и астигматизма достаточно хорошо исправляются также вторичный спектр и сферохроматическая aberrация благодаря введению в оптическую схему линз из кристаллов (например, флюорита) и стекол с особым ходом частных относительных дисперсий (таких как ОФ4, СТК9). Сферическая aberrация для основного цвета у этого типа объективов обычно не превышает $(0,1- 0,15)\lambda$. Для спектральных линий C и F волновые aberrации не более $0,25\lambda$, а в области спектра от линии C до линии g – $0,5\lambda$.

После того, как были найдены способы исправления в объективах микроскопов астигматизма и пецвалеовой кривизны, возможность получения плоского поля изображения в пределах до 25 мм (по сравнению с 8-12 мм у обычных объективов) в сочетании с соответствующим уровнем коррекции хроматических aberrаций привела к созданию объективов с новым типом коррекции: планахроматов и планапохроматов.

4. Особенности технологии сборки микрообъективов

Как отмечалось выше, объективы микроскопов относятся к классу оптических систем, обладающих наиболее совершенным качеством изображения, в структуре которого определяющую роль играет явление дифракции. В зависимости от степени исправления хроматических aberrаций, а также коррекции aberrаций внеосевых пучков – астигматизма и кривизны изображения – сложилась следующая классификация объективов по типам коррекции:

- 1) ахроматические,
- 2) апохроматические,
- 3) планахроматические,
- 4) планапохроматические.

Чем более совершенна степень коррекции aberrаций и чем больше числовая апертура микрообъектива, тем более сложную оптическую конструкцию он имеет. Под усложнением конструкции объектива понимается не только увеличение числа оптических элементов, но и применение трехлинзовых склеенных компонентов и деталей, изготовленных из флюорита и квасцов – трудоемких в обработке материалов. Увеличение числа оптических элементов сопровождается

ужесточением допусков на их изготовление. Возрастают требования к точности центрировки компонентов. Так, например, компоненты высокоапертурных апохроматов и планапохроматических объективов требуют точности центрировки поверхностей в 1-2 мкм, что невозможно реализовать при существующем уровне технологии, при этом воздушные промежутки следует выдерживать с точностью не хуже 5 мкм.

Для обеспечения возможности серийного изготовления микрообъективов в настоящее время применяется технология сборки и юстировки, основные положения которой были сформулированы еще Эрнстом Аббе (1840-1905), известным немецким ученым-физиком, применительно к изготовлению ахроматических и апохроматических объективов. Согласно этим положениям слабые объективы изготавливаются и собираются с максимально возможной точностью, в сильных объективах остается регулируемым один из воздушных промежутков, с помощью которого компенсируются остаточные технологические aberrации (компенсатор сферической aberrации). Более того, для исключения влияния отклонений радиусов пробных стекол и показателей преломления оптических материалов от номинальных значений, еще на стадии подготовки производства выполняется дополнительный перерасчет высокоапертурных объективов применительно к фактическим константам оптического стекла и радиусам пробных стекол.

В большинстве своем объективы микроскопов имеют «насыпную» конструкцию с линзами, установленными в оправы и заранее отцентрированными по отношению к собственным оправам. По технологии, принятой на ОАО «ЛОМО», линзу или склеенный компонент центрируют относительно оправы, закрепленной в точной, не имеющей биения цанге токарно-арматурного станка. При этом наружный диаметр оправы имеет окончательное значение размера и принимается за базу, а на внутренний диаметр под линзу может быть оставлен припуск для расточки «по месту». Базирование одной сферической поверхности на кромку оправы обеспечивает автоматическое совмещение ее центра кривизны с осью наружного диаметра и осью шпинделя станка. Покачиванием линзы (бамбуковой палочкой) вокруг этого центра кривизны совмещают с осью вращения шпинделя центр кривизны второй ее поверхности. Это положение линзы фиксируется затвердевающим пихтовым бальзамом (или шеллачным клеем, обеспечивающим герметичность фронтального компонента), который предварительно наносится на внутреннюю поверхность оправы, разогретой с помощью спиртовки. Склеенные компоненты подвергаются дополнительной центрировке при креплении в оправе. Контроль ведется при помощи лупы наблюдением биения изображений источника света (настольной лампы), построенных поверхностями компонента в отраженном свете. После остывания бальзама (шеллака) производят закатку.

Процесс юстировки микрообъективов состоит в устранении (компенсации) остаточных aberrаций. Возможность компенсации комы на оси, вызванной децентрировкой, и астигматизма основана на векторном характере этих погрешностей. В многокомпонентных объективах обе эти aberrации (разумеется, не одновременно) могут быть устранены взаимным разворотом компонентов, что в условиях серийного производства неэффективно. В то же время суммарная кома децентрировки сложных многокомпонентных объективов может превысить допустимую величину, если не пойти на ужесточение допусков на центрировку отдельных поверхностей объектива. Для устранения комы в конструкциях средних и сильных серийных микрообъективов предусмотрен компенсационный сдвиг одного из компонентов поперек оптической оси. При этом удается полностью устранить кому на оси и для края зрачка. Остаточная кома децентрировки для других зон зрачка при этом, как правило, оказывается в пределах допустимой. Очевидно, что в качестве компенсационного предпочтительно выбирать компонент, имеющий исключительно одну влияющую поверхность, обладающий свойством компенсатора независимого типа – чтобы с устранением комы на оси не происходило ее увеличение на краю зрачка или другой зоне, и не появлялся астигматизм.

5. Контроль качества и исследование микрообъективов

При контроле микрообъективов, так же как и при контроле их компонентов, наибольшее распространение в условиях производства получил экспертный метод оценки структуры дифракционного изображения светящейся точки, построенного исследуемым объективом (дифракционный метод контроля). Этот метод является общепринятым как в цеховых, так и лабораторных условиях. Он отличается высокой чувствительностью, информативностью, производительностью и оперативностью. Необходимые для контроля точечные диафрагмы осуществляются в виде мельчайших отверстий различных размеров в тонком слое серебра (алюминия), осажденном на стеклянной пластине. Размеры таких отверстий могут составлять от долей до единиц микрометров. Изображения этих отверстий (размеры их для конкретного объектива должны соответствовать разрешающей способности объектива) при наблюдении их в проходящем свете весьма отчетливо обнаруживают все недостатки объектива: неправильности поверхностей линз, плохую сборку и тем более грубые ошибки изготовления.

Контролируемый объектив заворачивают в тубус или гнездо револьвера образцового микроскопа. При линейном увеличении объектива V и числовой апертуре A увеличение окуляра Γ подбирают таким образом, чтобы выходной зрачок микроскопа оказался равным $D = 0,5-1$ мм, что равноценно выполнению условия:

$$V \times \Gamma = (500 \div 1000)A.$$

Объектив, не имеющий aberrаций, превышающих критерий Рэлея (английский физик, лорд, 1842-1919), дает в плоскости наилучшей установки изображение светящейся точки в виде кружка Эйри (Джордж Эйри, английский астроном, 1801-1892), который представляет собой яркий, резко очерченный центральный максимум (диск), окруженный кольцами с быстро убывающей освещенностью в них (при обычном освещении различимо одно кольцо). Диск и кольцо имеют правильную круглую форму, причем кольцо не должно иметь разрывов (рис.1.1.A).

Исследованию качества объектива должна предшествовать настройка осветительной системы, при которой обеспечивалось бы заполнение светом всей апертуры испытуемого объектива, что легко проверяется при расфокусировании дифракционного изображения точки. Вначале рекомендуется убедиться в отсутствии грубых ошибок в изготовлении объектива. Наиболее типичные дефекты и причины, их вызывающие, следующие.

1. Сильная сферическая aberrация (рис.1.1.B,C), при которой наблюдается увеличенное число колец вокруг центрального диска, ослабленного в отношении яркости и значительно увеличенного в размере, белая пелена фоновой засветки, понижающая контрастность картины. Наиболее вероятная причина – разворот одного из компонентов (например, с близкими радиусами кривизны) на 180° по отношению к падающему пучку.

2. Сильный хроматизм (окрашенность картины). Возникает в результате случайного попадания на сборку компонента, изготовленного совершенно из иного, чем по расчету, сорта стекла, при идентичных с годной деталью геометрических параметрах.

3. Значительный астигматизм (рис.1.1.E) , при котором фокальное изображение точки принимает крестообразную форму, а предфокальное и зафокальное изображения представляют собой линии или эллипсы (в зависимости от величины aberrации и удаления от «фокуса»), вытянутые во взаимно перпендикулярных направлениях. Вероятная причина – деформация линзы при креплении или значительная несферичность поверхности, допущенная при изготовлении.

4. Остаточные напряжения стекла, обусловленные плохим отжигом, и деформация вследствие сжатия оптических деталей оправками превращают круглое изображение точки в треугольное или вытянутое (рис.1.1.G,H,I,K). Более отчетливо эти дефекты проявляются в искажениях внефокальных колец.

5. Изображение точки имеет неодносторонний разрыв колец, и при перефокусировке микроскопа в месте разрыва на увеличенном ореоле точки видно темную или светлую полосу, пересекающую ореол. Это свидетельствует о грубой неоднородности стекла, о наличии свилей.

Присутствие свилей проявляется также в «выбросе» части света из пятна в виде «хвостов» и «усов», в наличии локальных аномалий (рис.1.1.F).

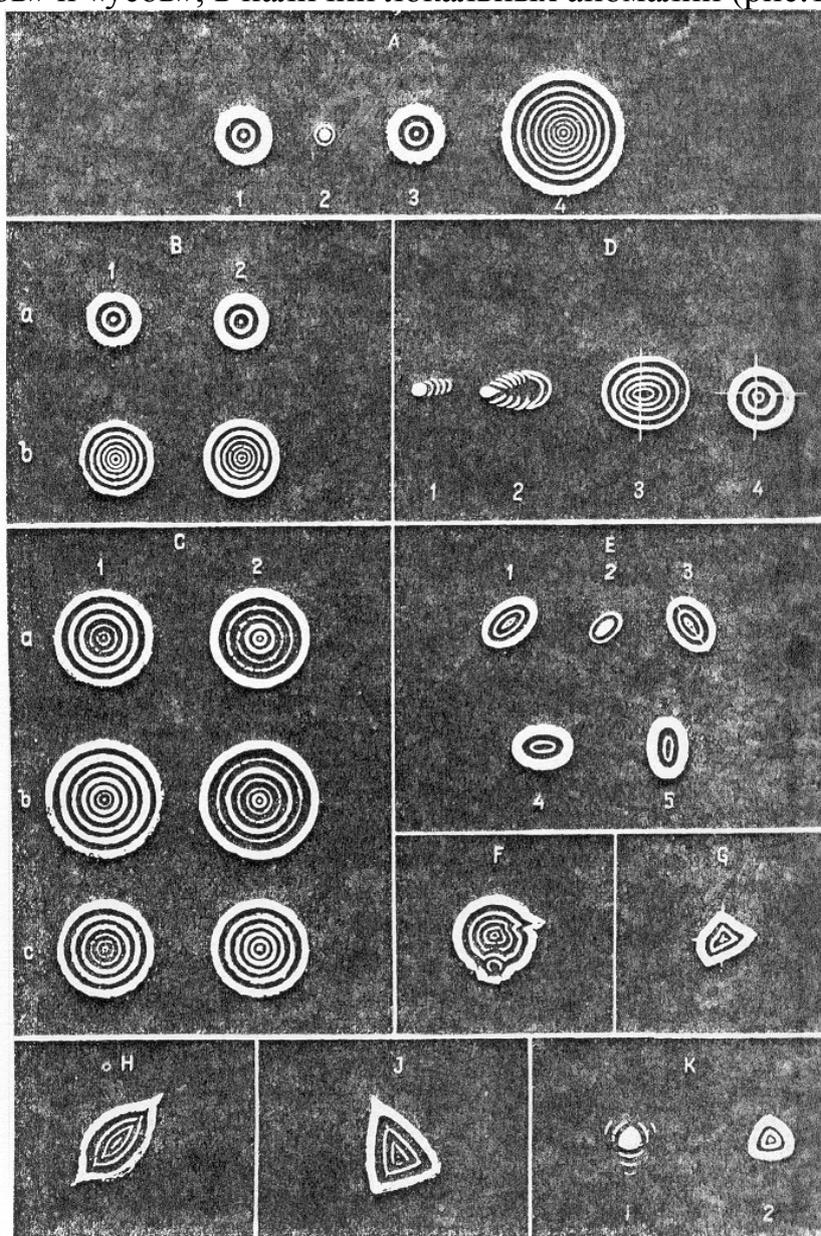


Рис.1.1. Дифракционные изображения точки, наблюдаемые в плоскости наилучшей установки, а также в близких к этой плоскости (или несколько удалённых от неё) сечениях пучка по обе её стороны:
A – кружок Эйри, созданный хорошим объективом;
B – в случае неисправленной на краю сферической аберрации;
C – в случае исправления сферической аберрации для какого-нибудь одного луча и с остаточными аберрациями для остальных лучей;
D – при плохой центрировке, приводящей к коме на оси;
E – в случае астигматизма на оси;
F – в результате неоднородности стекла (свилей);
G – в результате внутренних натяжений в стекле;
H, J, K – в случае деформаций линз вследствие сжатия их оправками.

6. Наличие на фоне светлого пятна – достаточно расфокусированного изображения точки – темных пятен произвольной формы и размеров с резкими очертаниями свидетельствует о присутствии грязи (мазков, осыпки) внутри объектива.

Перечисленные дефекты не поддаются компенсации и подлежат устранению. Способы выявления детали с дефектом – поочередное вращение компонентов или их замена.

В объективе, свободном от грубых дефектов изготовления, могут присутствовать следующие аберрации:

- сферическая аберрация, связанная с отклонениями показателей преломления материала линз, толщин линз и воздушных промежутков, она также может быть вызвана отклонениями толщины покровного стекла и длины тубуса микроскопа;
- кома на оси, вызванная децентрировкой поверхностей компонентов объектива, постоянная по всему полю зрения (рис.1.1.D);
- астигматизм в центре поля вследствие несферичности поверхностей (ΔN) и их деформаций в результате пережатия компонентов при закреплении в оправе (рис.1.1.E).

Идентификация аберраций с целью последующего их устранения может быть осуществлена по следующим признакам. При наличии значительной комы дифракционное изображение точки приобретает фигуру, напоминающую комету, а дифракционные кольца имеют односторонний разрыв или освещены с одной стороны больше, чем с другой. Незначительную кому можно идентифицировать по наличию разрыва или по неравномерности яркости (или утолщения со стороны, противоположной разрыву) первого дифракционного кольца при достаточно круглом ядре. Более отчетливо указанные признаки выявляются при небольшой расфокусировке микроскопа. Наличие сферической аберрации (в основном незначительной) легче всего выявить по различию предфокального и зафокального изображения точки, при условии устранения комы. Например, если при приближении микроскопа к тест-объекту в поле зрения наблюдается картина с резкими, четко ограниченными кольцами, с внешним самым ярким кольцом, это свидетельствует о том, что выбранное сечение пучка попало в зону каустики, то есть в зону большой концентрации лучей, а, следовательно, и большой световой интенсивности. При этом сам объектив обладает отрицательной (недоисправленной) сферической аберрацией. Чтобы убедиться в этом окончательно, следует удалить микроскоп от тест-объекта и исследовать зафокальное сечение пучка. В данном случае оно будет представлять слабо освещенный круг (все кольца, и особенно внешние, размыты), в центре которого более яркое, но размытое ядро. Для положительной (переисправленной) сферической аберрации характерны те же внешние проявления, но они меняются местами.

Наиболее просто исследование объективов на сферическую, а также хроматическую абберации производится при помощи тест-пластинки Аббе, состоящей из клинообразного покровного стекла, покрытого тонким слоем серебра, на котором процарапан ряд продольных зигзагообразных штрихов на расстояниях от 1,9 до 0,3 мкм. Толщина клина от 0,09 до 0,24 мм; наклеен он на предметное стекло. Если при переходе от центрального освещения, при котором производится фокусировка микроскопа на контур непрозрачной полоски, к косому освещению, оба ее края будут, по-прежнему, видны одинаково резко, то это укажет на полное отсутствие сферической абберации. Размытость одного из краев указывает на наличие сферической абберации. У объективов с недоисправленной сферической абберацией размытость появляется со стороны, где находится освещенная часть выходного зрачка объектива. У переисправленных объективов размытость появляется с противоположной стороны. На состояние хроматической коррекции объектива указывает (при переходе к косому освещению) отсутствие или наличие у краев полоски цветных каемок, их ширина и интенсивность.

Для оценки разрешающей силы микрообъективов используют препараты микроскопических структур растительных и животных тканей, например, набор известковых панцирей микроскопических водорослей – диатомей. Частота элементов этих структур заранее измерена и имеет определенное значение для данного вида. Таким образом, составляется набор (до десяти препаратов) различных диатомей, имеющих структуру с шагом от 1,8 до 0,25 мкм. Теоретическое же значение разрешающей силы микрообъектива определяют по известной формуле

$$e = r = 0,61\lambda/A,$$

где r – радиус кружка Эйри.

6. Юстировка микрообъективов

Юстировка микрообъективов, как отмечалось ранее в п.4, состоит в устранении остаточных аббераций. При этом целесообразнее начинать с более выраженных. Для устранения комы в конструкциях средних и сильных серийных микрообъективов (рис.1.2.) предусмотрен компенсационный сдвиг одного из компонентов поперек оптической оси. В большинстве конструкций объективов функция компенсатора возлагается на компонент, следующий за фронтальной линзой. Диаметр оправы этого компонента на 0,2 – 0,3 мм меньше, чем у оправ остальных линз. Сдвиг компонента в процессе юстировки производят с помощью приспособления, представляющего собой втулку, «одеваемую» на корпус объектива (при снятом колпачке), с четырьмя, расположенными под углом 90° друг к другу регулировочными винтами. Контакт этих винтов с оправой регулируемого компонента осуществляется через отверстия в корпусе объектива,

расположенные на уровне этой оправы. Для устранения комы изображение точки сдвигают в направлении «хвоста».

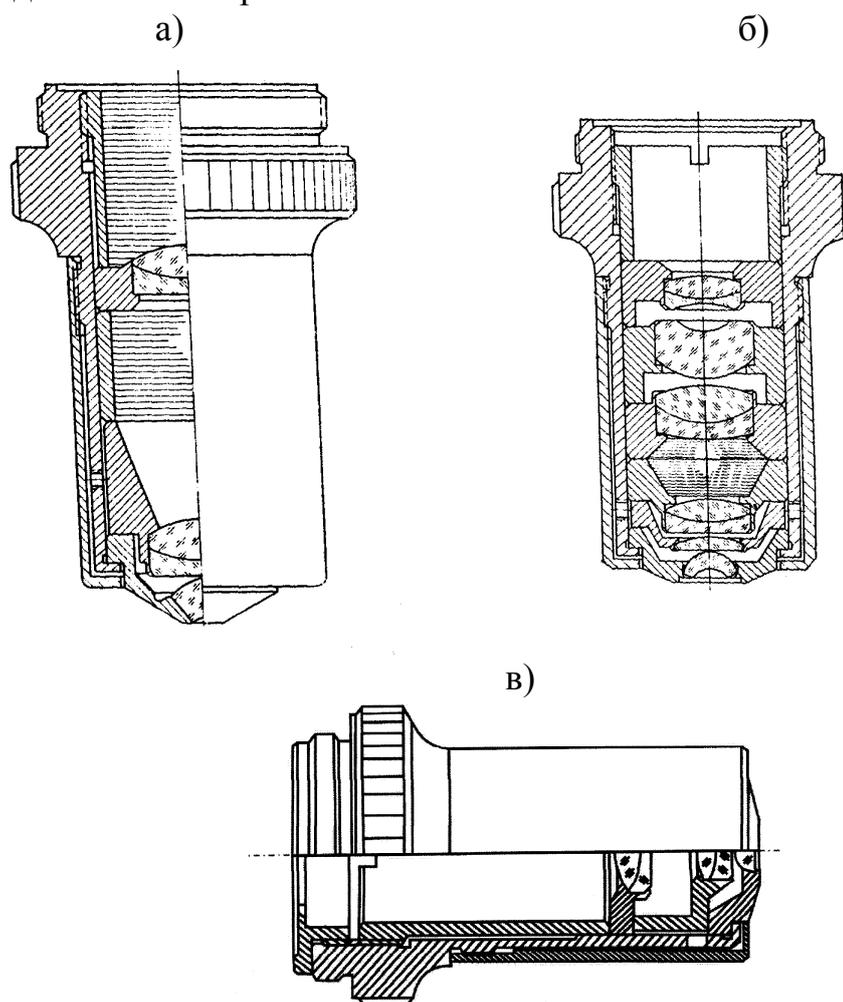


Рис.1.2. Конструкции объективов средних увеличений с различными типами коррекций аберраций:

- а) – объектив планахромат 20 х 0,40 (ОМ-31);*
- б) – объектив планахромат 40 х 0,65 (ОМ-29);*
- в) – объектив ахромат 40 х 0,65 (МЦ).*

В сильных объективах неизбежной при юстировке оказывается также и компенсация остаточной (технологической) сферической аберрации. Для этой цели предусмотрена регулировка одного из воздушных промежутков, например, расстояния между фронтальной линзой и мениском (рис.1.2.в). Уменьшение этого расстояния производится подрезкой торца оправы мениска, а увеличение – установкой между оправами специальных прокладных колец, полученных штамповкой из бронзовой и латунной лент толщиной 0,03 – 0,1 мм. Знак и величину необходимой компенсации определяют по величине изменения длины тубуса микроскопа, при которой наблюдают наилучшее дифракционное изображение точки. При недоисправленной аберрации тубус приходится поднимать (увеличивать), а между компонентами устанавливать прокладное кольцо. Для серийных

объективов целесообразно определить соотношение между величинами подъема (опускания) тубуса и требуемого изменения воздушного промежутка. Остаточная абберация недопустимо велика, если при расфокусировках изменением длины тубуса нельзя добиться симметричных картин. Допустимое отклонение в длине тубуса зависит от характера коррекции микрообъектива. Так, например, для объектива ахромата оно составляет ± 7 мм, а для апохромата $90\times 1,3$ – только ± 2 мм [1].

7. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться по чертежу с устройством объектива $40\times 0,65$ (рис.1.2.в).
2. Приподняв штатив микроскопа над предметным столиком, снять с объектива $40\times 0,65$ (№ 61518) защитный колпачок с маркировкой и поворотом револьверного устройства установить этот объектив в рабочую позицию (ощувив щелчок фиксатора).
3. Установить на корпус объектива втулку с предварительно ввинченными в нее четырьмя винтами так, чтобы сначала наконечник одного из винтов попал в отверстие на корпусе объектива. Затем аккуратно завинтить до упора с оправой юстируемого компонента остальные центрировочные винты.
4. Установить на предметный столик одно из зеркал, имеющих на своей поверхности заметную (невооруженным глазом) царапину.
5. Включить осветитель ОИ-19 и проверить фокусировку лампы: нить накала должна резко изображаться на экране, расположенном на расстоянии примерно 0,5 м.
6. Настроить осветитель ОИ-19, направив пучок света на осветительное зеркало под предметным столиком.
7. Опустить штатив микроскопа так, чтобы между передним торцом объектива и поверхностью зеркала остался промежуток примерно 1мм. Наклоном осветительного зеркала направить пучок света на тест-объект, наблюдая в окуляр микроскопа момент наилучшего освещения поля зрения через царапину на зеркале.
8. Медленно опуская штатив микроскопа с помощью механизма грубой наводки, добиться в поле зрения резкого очертания краев царапины.
9. С помощью препаратодителя или вручную сместить зеркало, введя в поле зрения область тест-объекта, содержащую светящиеся точки на достаточно темном фоне. Осветительным зеркалом добиться максимальной освещенности точечного препарата, а с помощью механизма тонкой наводки – наилучшей фокусировки. Отобрать для последующего контроля наиболее характерные светящиеся точки, обращая внимание на их форму и размер. В качестве примера на рис.1.3. приводятся дифракционные изображения точки, созданные микрообъективом до юстировки.

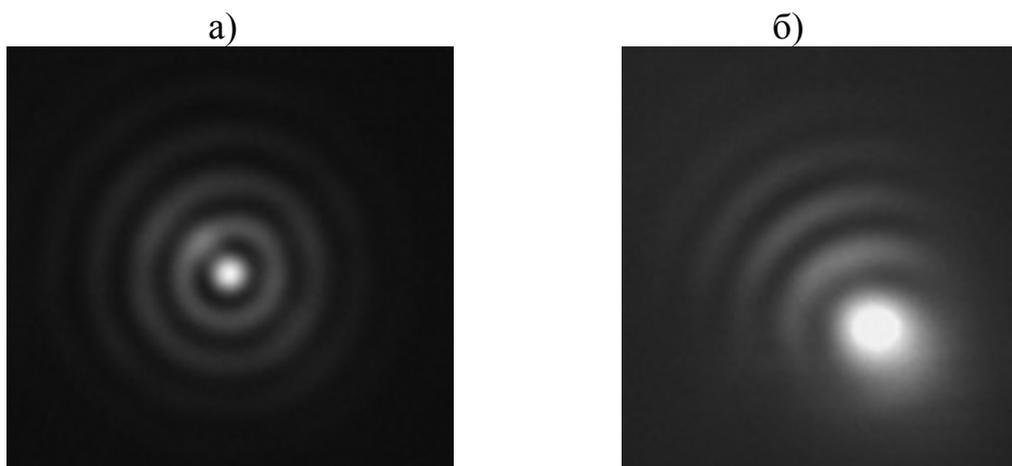


Рис.1.3. Дифракционное изображение точки исследуемого микрообъектива до юстировки

10. Действуя (достаточно деликатно, без чрезмерных усилий) одновременно парой встречных центрировочных винтов (вращая их в одном направлении) добиться наилучшего, с точки зрения устранения комы, дифракционного изображения точки. При этом рекомендуется исследовать также предфокальное и зафокальное сечения пучка и, действуя осветительным зеркалом, убедиться в полном заполнении световым пучком всей апертуры юстируемого объектива. Полученное дифракционное изображение точки показать преподавателю.
11. Перед завершением первой части работы требуется рассчитать размер выходного зрачка микроскопа.
12. Приподняв штатив с помощью маховичка грубой наводки, снять с объектива центрировочное приспособление, предварительно вывернув все винты.
13. Во второй части работы предстоит исследовать качество изображения комплекта объективов планохроматов $20\times 0,40$, не подлежащих юстировке, но имеющих характерные остаточные aberrации: кому, астигматизм и сферическую aberrацию. Задача исследования – научиться идентифицировать основные aberrации микрообъектива по характерным признакам дифракционного изображения точки, наблюдая и фиксируя их не только в плоскости наилучшего изображения, но и в сечениях пучка, смещенных от этой плоскости симметрично в одну и другую стороны.
14. Перед выполнением второй части работы студентам предлагается самостоятельно подобрать окуляр для микроскопа таким образом, чтобы выходной зрачок микроскопа оказался равным приблизительно 1 мм.

8. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что произойдет в дифракционном изображении точки, если работница при завальцовке линзы, входящей в состав компонентов

микрообъектива, из-за невнимательности перевернет ее в оправе на 180° ?

2. В чем суть предложенного Аббе метода устранения в процессе юстировки остаточной аберрации комы от децентрировки?
3. Почему при исследовании качества изображения микрообъектива важна настройка осветительной системы?
4. По каким характерным признакам в дифракционном изображении точки можно судить о пережатии линзы в оправе?
5. В процессе окончательной юстировки очередного объектива из целой партии в 50 штук работница, к своему великому изумлению, обнаружила дифракционное пятно рассеяния сильно окрашенным. В чем наиболее вероятная причина дефекта?
6. При перевозке микроскопа в результате тряски произошел откол края полупентапризмы, установленной в монокулярной насадке, и маленький осколок стекла упал на верхнюю поверхность последней линзы микрообъектива, занимая примерно 5-6% площади поверхности этой линзы. Что произойдет с качеством изображения объектива, если оценивать его по дифракционному изображению точки, и как легче всего разобраться в причине произошедшего изменения в качестве изображения?
7. По каким характерным признакам судят о наличии астигматизма?
8. Каким способом можно устранить незначительный величины остаточный астигматизм, и каковы при этом шансы на успех?
9. Рассчитайте размер пикселя ССД камеры, установленной в оптической схеме микроскопа с юстируемым объективом $40\times 0,65$ вместо окуляра, для уверенного исследования качества объектива по дифракционному изображению точки.
10. Что происходит со световой энергией в дифракционном пятне рассеяния при наличии в объективе сферической аберрации?
11. Что можно сказать о качестве объективов, дифракционные изображения точки которых в плоскости наилучшей установки показаны на рис. 1.3.?

9. Литература

1. Скворцов Г.Е. Панов В.А. и др. Микроскопы. – Л.: Машиностроение, 1969. 512 с.
2. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
3. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
4. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 89 с.

Лабораторная работа №2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЮСТИРОВКИ И КОНТРОЛЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться с конструкцией трубы по прилагаемому чертежу, ее техническими характеристиками и требованиями к сборке.
2. Разработать методику юстировки и контроля автоколлимационной трубы.
3. Разобрать трубу на следующие узлы: объектив в оправе, окуляр с основной сеткой, патрубок подсветки с конденсором и автоколлимационной (вспомогательной) сеткой, корпус автоколлимационного окуляра с куб-призмой и собственно корпус трубы.
4. Произвести сборку и юстировку автоколлимационной трубы в соответствии с разработанной методикой.

Для зачета предъявить отъюстированную трубу и отчет, содержащий разработанную методику юстировки с расчетом (обоснованием) необходимых допусков, обоснованием схем контроля и оценкой точности произведенных регулировок.

2. Комплект установки

1. Автоколлимационная (юстируемая) зрительная труба, с фокусным расстоянием объектива $f' = 380$ мм - 1 шт.
2. Монтажное основание (швеллер) с кронштейном-подставкой для трубы - 1 шт.
3. Специальная оптическая скамья, содержащая коллиматор с фокусным расстоянием объектива $f'=1650$ мм и направляющую - 1 шт.
4. Образцовая автоколлимационная зрительная труба с кремальерным механизмом из комплекта оптической скамьи ОСК-2 с фокусным расстоянием объектива $f'=430$ мм - 1 шт.
5. Торцовая автоколлимационная трубка ПК-179 с автоколлимационной ценой одного деления $1'$ (угловая минута) - 1 шт.
6. Трипель-призма на подставке - 1 шт.
7. Осветитель ОИ-19 с блоком питания - 1 шт.
8. Патрон с лампой 6В и проводом для подсветки АК-сетки - 1 шт.
9. Отвертка - 1 шт.

3. Назначение и состав автоколлимационной трубы

Автоколлимационные визирные трубы широко применяют для самых разнообразных контрольных операций в лабораториях и цехах. Они позволяют проверить положение плоской отражающей поверхности в пространстве, взаимное положение таких поверхностей или измерить с высокой точностью небольшой угол между ними. При сборке точных оптических приборов их применяют для контроля направляющих прямолинейного движения, отсчетных зубчатых соединений, взаимного расположения баз, центрирования элементов оптической системы, контроля точности угломерных приборов, фокусировки телескопических систем.

Автоколлимационная труба представляет собой телескопическую зрительную трубу, в которой предусмотрена подсветка сетки. Имеется большое число различных схем и конструкций автоколлимационных труб как визуальных, так и фотоэлектрических. Визуальные трубы отличаются, в основном, устройством автоколлимационных окуляров. Известны автоколлимационные окуляры со светоделительной куб-призмой, Аббе, Гаусса, Линника, Захарьевского, Монченко и другие.

4. Устройство автоколлимационной трубы

Автоколлимационная труба (см. чертеж или рис.2.1.- 2.2.) содержит следующие основные узлы и детали

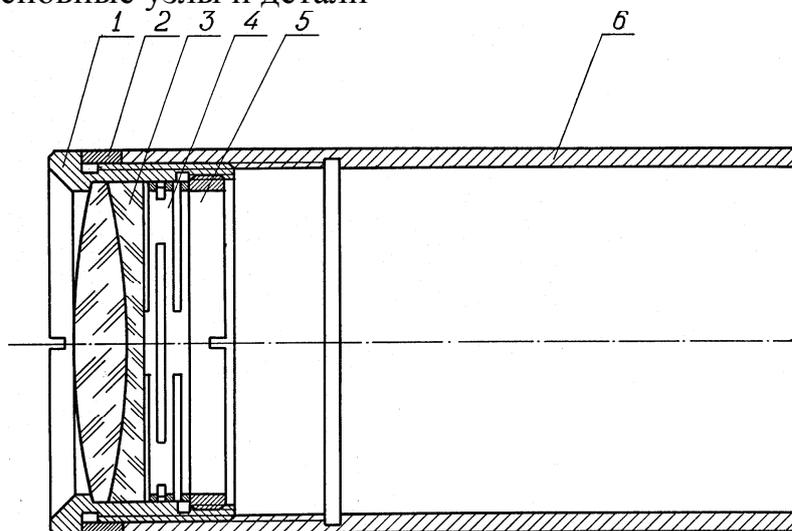


Рис. 2.1. Конструкция объективной части автоколлимационной трубы

- а) объектив 3 (ахроматическая пара) в оправе 1, закрепленный в ней с помощью пружинного 4 и резьбового 5 колец; б) корпус трубы 6;
в) окуляр 16 (симметричный) с основной сеткой 15 (представляющей собой две скрещенные шкалы), закрепленной с помощью герметика в оправе 17, которая, в свою очередь, соединена винтами 14 с корпусом 13;

г) патрубков подсветки 25 с конденсором 23 и автоколлимационной (вспомогательной) сеткой 19, представляющей собой светлое перекрестие на темном непрозрачном фоне, в оправе 26;

д) корпус 7 автоколлимационного окуляра со светоделительной куб-призмой 8, закрепленной в оправе 9.

Оправа 1 с объективом и корпус 7 автоколлимационного окуляра завинчиваются по резьбе в корпус трубы 6. Патрубок подсветки 25 крепится к корпусу 7 с помощью 4-х винтов 27 (M2×8). Окуляр с основной сеткой в корпусе 13 завинчивается по резьбе в корпус 7.

Изображение автоколлимационного перекрестия 19, установленного в фокальной плоскости объектива 3 и освещенного лампой подсветки с помощью конденсора 23, после отражения от автоколлимационного зеркала этим же объективом проектируется в плоскость основной сетки 15, где и рассматривается в окуляр 16.

5. Технические характеристики трубы

Фокусное расстояние объектива, мм	380
Относительное отверстие $D:f'$	1:10
Фокусное расстояние окуляра, мм	10
Угловое поле зрения визирной трубы 2β , град.	1
Цена деления автоколлимационной трубы, угл.сек.	13

6. Основные технические требования к автоколлимационной трубе и конструктивные элементы, обеспечивающие их выполнение

1. Сетки 15 и 19 (рис.2.2) должны быть расположены строго в фокальной плоскости объектива 3, величина допускаемого параллакса за окуляром автоколлимационной трубы – 0,8 дптр.
2. Качество изображения визирной трубы должно быть хорошим, при этом предел разрешения трубы должен составлять не более $\varepsilon = 140''/D = 140/38 \approx 3,68''$ (угл. сек.).
3. Центры перекрестий изображений двух сеток – основной и автоколлимационной – при наблюдении со стороны объектива должны быть совмещены, взаимный разворот их не допускается.

Для выполнения перечисленных требований при сборке и юстировке трубы предусмотрены следующие конструктивные и технологические компенсаторы.

- Кольцо установочное 2 между торцами корпуса трубы 6 и оправы 1 объектива (рис.2.1.), позволяющее путем изменения его толщины, например, подрезкой, уменьшить расстояние между объективом 3 и

сеткой 15 и тем самым совместить изображение бесконечно удаленного объекта с плоскостью этой сетки.

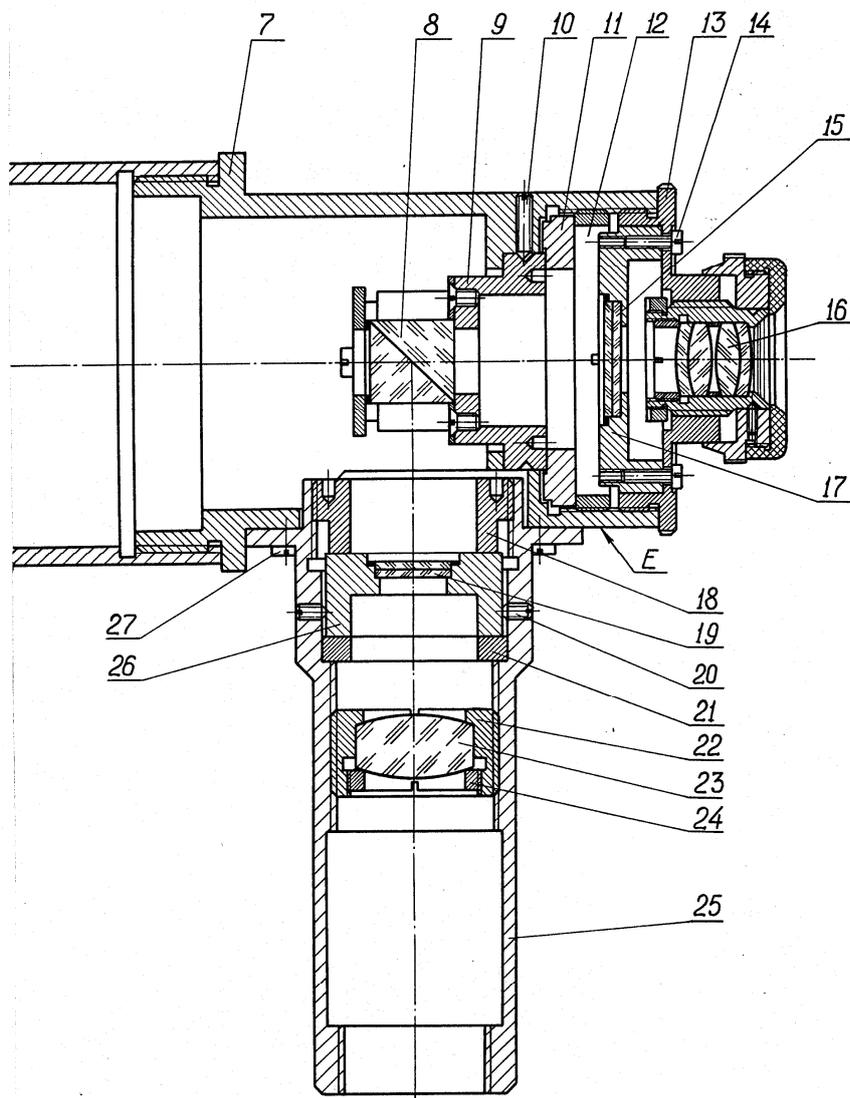


Рис. 2.2. Конструкция окулярной части автоколлимационной трубы

- Кольцо параллаксное 21, установленное в патрубке 25 под оправой 26 автоколлимационной сетки 19 (рис.2.2.), позволяющее путем изменения его толщины совместить перекрестие этой сетки с фокальной плоскостью объектива 3 с целью устранения параллакса между автоколлимационным изображением перекрестия, полученным при отражении от точного плоского зеркала, и изображением основной сетки 15 при наблюдении в окуляр.
- Регулировочные винты 20 (две пары) для сдвига оправы с сеткой 19 в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а также поводковый винт (на чертеже не показан) для разворота этой оправы вокруг оптической оси – позволяют совместить изображения обеих сеток при наблюдении со стороны объектива.

- Разворот оправы 9 со светоделительным кубиком 8 в цилиндрической расточке корпуса 7 автоколлимационного окуляра с последующей фиксацией тремя стопорными винтами 10 и закреплением резьбовым кольцом 12 через промежуточное кольцо 11, - позволяющий устранить наклон плоскости изображения сетки 19 по отношению к фокальной плоскости объектива 3, а в конечном итоге – расфокусировку автоколлимационного изображения перекрестия на краях поля. Кроме того, погрешность установки этой призмы не позволит заполнить изображением источника света входной зрачок трубы, а, следовательно, получить достаточно хорошо освещенным само автоколлимационное изображение.

7. Предварительное замечание

Прежде чем приступить к разработке методики юстировки автоколлимационной трубы, необходимо сделать важное замечание об особенностях фокусировки автоколлимационной трубы, содержащей окуляр с двумя сетками и светоделительный кубик.

Известно, что автоколлимационный метод установки труб на бесконечность – один из наиболее точных и простых: он вдвое чувствительнее обычного коллимационного метода фокусировки, а для его реализации требуется лишь точное плоское зеркало. Поэтому вполне естественно при устранении параллакса между изображениями сеток 15 и 19 воспользоваться именно автоколлимационным методом контроля фокусировки.

Приложив плоское зеркало к торцу трубы и, осветив сетку 19, получим ее автоколлимационное изображение вблизи сетки 15. Это изображение в общем случае не будет достаточно резким точно в плоскости сетки 15. Взаимное положение основной сетки 15 и изображения сетки 19 можно определить в диоптрийной мере фокусирующей подвижкой окуляра, а затем, зная его фокусное расстояние, вычислить необходимую величину подрезки или увеличения толщины прокладного кольца 21 для устранения параллакса между сетками. Однако, после устранения параллакса обе сетки (15 и 19) могут оказаться не в фокусе объектива 3 – одна из них (например, сетка 15) будет перед его фокусом, а другая (сетка 19) – на том же расстоянии за его фокусом. Отраженное от плоского зеркала изображение сетки 19 окажется перед фокусом объектива и совпадет с плоскостью сетки 15, и параллакса между ними не будет.

В автоколлимационной трубе, сфокусированной таким образом, цена деления не будет соответствовать расчетной, и, кроме того, возможно изменение ее величины и появление параллакса в зависимости от расстояния от трубы до автоколлимационного зеркала. Для выполнения первого требования технических условий – совмещения обеих сеток с

фокальной плоскостью объектива 3 – необходимо предварительно, хотя бы одну из них, например, основную сетку 15, совместить точно с этой плоскостью.

8. Порядок выполнения работы

1. Разобрать трубу на узлы в соответствии с пунктом 3 «Задания по работе».
2. Произвести контроль установки призмы-куб 8 в корпусе 7 автоколлимационного окуляра. Входная и выходная грани призмы 8 должны быть параллельны конструкторским базам: плоскости «E» корпуса, на которую устанавливается патрубок подсветки 25, а также плоскости опорного буртика «F», на который своим торцом базируется цилиндрический корпус трубы. Принимая в качестве допустимого отклонения величину $7'$ (угл. мин), предложить способ устранения измеренных погрешностей.

ПРИМЕЧАНИЕ:

а) перед операцией контроля рекомендуется сделать упрощенный эскиз контролируемого узла, обозначив его контур, призму-куб и измерительные базы, и введя систему координатных осей XYZ , совместив ее начало с точкой излома оптической оси на светоделительной грани призмы, направив оси Z и Y соответственно в сторону окуляра и осветительного патрубка, а ось X – перпендикулярно плоскости рисунка;

б) при контроле необходимо определить две составляющие отклонения от параллельности: в плоскости излома оптической оси и в плоскости ей перпендикулярной; полученные две пары значений следует обозначить соответственно φ_x , φ_y , φ_z и записать рядом с измерительными базами на эскизе;

в) технологический процесс устранения выявленных погрешностей в данной лабораторной работе может быть осуществлен лишь с разрешения преподавателя.

3. Произвести фокусировку объектива 3 на резкое изображение бесконечно удаленного объекта в плоскости сетки 15 или другими словами – совместить фокальную плоскость объектива 3 с плоскостью штрихов основной сетки.

Величина допустимой расфокусировки может быть определена из формулы для вероятной погрешности продольной наводки:

$$\Delta Z = 0,2/\sigma'^2 \text{ мкм.}$$

Предложенные способ и методика контроля должны не только обеспечить заданную точность установки сетки 15 в фокальной плоскости объектива 3, но и позволить быстро определить требуемую толщину установочного кольца 2.

ПРИМЕЧАНИЕ: Перед выполнением этой операции трубу необходимо полностью собрать.

4. Произвести контроль несовмещения автоколлимационной сетки 19 с фокальной плоскостью объектива 3.

Здесь необходимо принять во внимание первое требование технических условий о допустимой величине параллакса между изображениями автоколлимационной сетки и основной за окуляром - 0,8 дптр., а также замечание об особенностях фокусировки автоколлимационной трубы. В этом случае со всей очевидностью следует воспользоваться автоколлимационным методом контроля. Однако на практике величина несовмещения плоскости сетки с фокальной плоскостью объектива может превысить пределы фокусирующей подвижки окуляра, кроме того, при малом диаметре выходного зрачка чувствительность метода может оказаться недостаточной. В таком случае для контроля этой величины, а также определения знака (направления) смещения пользуются астрономической зрительной трубой с кремальерным механизмом и известной установкой ее на бесконечность. Фокусное расстояние такой трубы должно превышать фокусное расстояние объектива юстируемой системы в 3 – 5 раз (условие обеспечения метрологического запаса точности). Величину подвижки сетки 19 для совмещения ее с фокальной плоскостью объектива 3 вычисляют по формуле, полученной из формулы Ньютона:

$$\Delta Z_c = \Delta Z_{\text{азт}} \times (f'_{\text{об}}/f'_{\text{азт}})^2,$$

где $\Delta Z_{\text{азт}}$ – величина смещения окулярной выдвиги астротрубы из положения « ∞ » в положение фокусировки на резкое изображение автоколлимационной сетки; $f'_{\text{об}}$ и $f'_{\text{азт}}$ – фокусные расстояния объективов соответственно юстируемой и астротрубы.

Направление необходимого сдвига сетки 19 определяют, пользуясь известным правилом: «куда движется предмет, туда движется и изображение». Довольно часто, например, при отсутствии астротрубы с необходимыми параметрами фокусировку осуществляют в два этапа – сначала предварительно, с помощью имеющейся в наличии зрительной трубы с кремальерой, а затем, окончательно – автоколлимационным методом по параллаксу за окуляром.

ПРИМЕЧАНИЕ: В настоящей работе требуется лишь определить величину и «знак» изменения толщины параллаксного кольца 21.

5. Произвести совмещение центров перекрестий изображений обеих сеток 15 и 19, а также устранить взаимный разворот их штрихов при наблюдении со стороны объектива 3. При этом положение штрихов основной сетки принять за базовое.

Используя имеющиеся в наличии средства юстировки и контроля, следует предложить наиболее простой и производительный способ.

9. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. К каким дефектам автоколлимационной трубы могут привести погрешности установки призмы-куб?
2. Обоснуйте применение для контроля установки светоделительной призмы-куб метода, исключительно автоколлимационного.
3. Можно ли повысить точность совмещения фокальной плоскости объектива 3 с плоскостью основной сетки 15, если воспользоваться при контроле дополнительно диоптрийной трубкой ПК-375000 4×16, расположив ее за окуляром юстируемой трубы.
4. Рассчитайте погрешность измерения углов наклона зеркала с помощью отъюстированной Вами автоколлимационной трубы, если параллакс за окуляром между изображениями сеток не превышает 0,8 дптр.
5. Оцените вероятную погрешность величины несовпадения автоколлимационной сетки 19 с фокальной плоскостью объектива 3 при контроле с помощью зрительной трубы с кремальберным механизмом из комплекта оптической скамьи ОСК-2, примененной взамен астротрубы с фокусным расстоянием 1200 мм, имеющей следующие параметры:
 - Фокусное расстояние объектива, мм 430;
 - Диаметр входного зрачка, мм 50;
 - Видимое увеличение, крат 20;
 - Цена одного деления шкалы нониуса на тубусе окулярной выдвигки кремальберного механизма, мм 0,1.
6. Какие свойства трипель-призмы обусловили целесообразность ее применения при контроле и юстировке автоколлимационной трубы?
7. Почему при контроле установки светоделительной призмы по отношению к опорному (для корпуса трубы) буртику торцовую автоколлимационную трубку можно базировать на внешний торец резьбового пояса окулярного корпуса?
8. Как можно аттестовать цену деления сетки автоколлимационной трубы?
9. Подберите штриховую миру ГОИ для коллиматора с фокусным расстоянием объектива 1600 мм, по которой можно было бы оценить предел разрешения отъюстированной трубы, и укажите номер элемента миры, штрихи которого должны наблюдаться на пределе разрешения.

10. Литература

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. /2-е изд. –Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
2. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи: Справочник. / 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1989. 260 с.

Лабораторная работа № 3

КОНТРОЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ РЕБРА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЫ БР-180°

1. Задание и зачёт по работе

1. Изучить настоящие методические указания.
2. Ознакомиться с устройством установки, а также с техническими описаниями и инструкциями по эксплуатации автоколлимационного теодолита 2Т2А и оптического квадранта КО-10.
3. Настроить установку и произвести контроль (измерение) положения ребра прямоугольной призмы БР-180°. Вычислить угол наклона ребра призмы к горизонту и определить знак (направление) этого угла.
4. Измерить с помощью оптического квадранта угол наклона ребра призмы к горизонту и сравнить полученные данные с расчётными.
5. Оценить предельную погрешность измерения угла наклона ребра призмы.

Для зачёта предъявить результаты вычисления и непосредственного измерения угла наклона ребра призмы с оценкой относительной погрешности результата, полученного аналитическим методом; полностью оформленный отчёт, содержащий вывод аналитической зависимости, связывающей угол наклона γ ребра прямоугольной призмы БР-180° к горизонту и угловые смещения в горизонтальной плоскости автоколлимационного изображения перекрестия теодолита $\beta = \Delta H$ при наклоне визирной трубы в вертикальной плоскости на угол $\alpha = \Delta V$.

2. Комплект установки

- | | |
|--|----------------|
| 1. Автоколлимационный теодолит 2Т2А | 1 шт. |
| 2. Оптический квадрант КО-10 | 1 шт. |
| 3. Призма БР-180° в оправе на кронштейне | 1 шт. |
| 4. Столик монтажный с Т-образными пазами на трёх регулируемых опорах | 1 шт. |
| 5. Накладной уровень с цилиндрической ампулой | 1 шт. |
| 6. Блок питания с напряжением $U_{\text{вых}} = 3\text{В}$ | 1 шт. |
| 7. Провода подсветки теодолита и квадранта | 2 шт. |
| 8. Монтажное основание (швеллер) | 1 шт. |
| 9. Элементы крепления (болты, гайки, струбцины) | комплект |
| 10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации теодолита 2Т2А и квадранта КО-10 | по 1 комплекту |

3. Формулировка задачи контроля и вывод расчётной формулы

Оптические методы бесконтактного контроля пространственного положения (ориентирования, позиционирования) объектов широко применяются при контроле деформаций сооружений и установок, юстировке и испытаниях оптических приборов и комплексов.

В лабораторной работе, общий вид которой представлен на рис. 3.1., требуется с помощью автоколлимационного теодолита 2Т2А определить угол γ наклона к горизонту ребра прямоугольного углового зеркала или призмы типа БР-180°, а также оценить погрешность произведённого измерения.

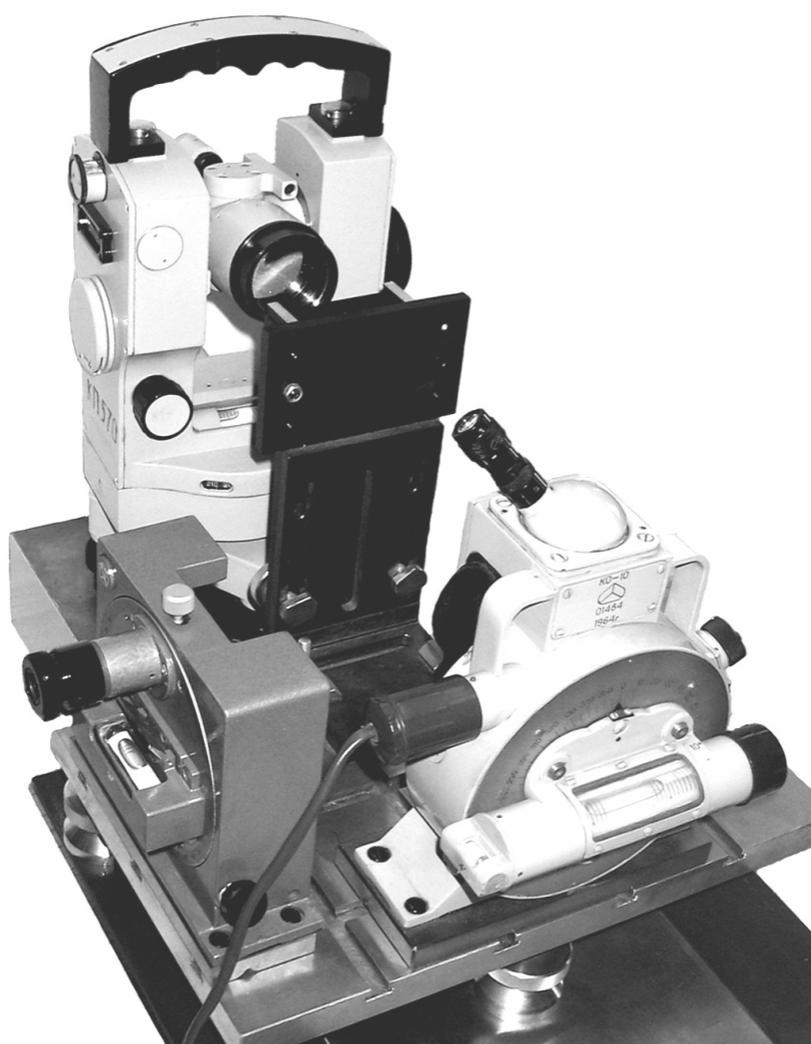


Рис.3.1. Общий вид лабораторной установки

Расположим плоскость XOZ неподвижной системы координатных осей XYZ параллельно горизонтальной плоскости, направив ось X параллельно ребру прямоугольного углового зеркала в его исходном (горизонтальном) положении, а ось Y – вверх, вдоль вертикальной оси теодолита (рис.3.2.). Очевидно, если направить на такое угловое зеркало

луч по орту A , перпендикулярному ребру углового зеркала, то отражённый луч A'' приобретёт строго противоположное направление, т.е. $A'' = -A$.

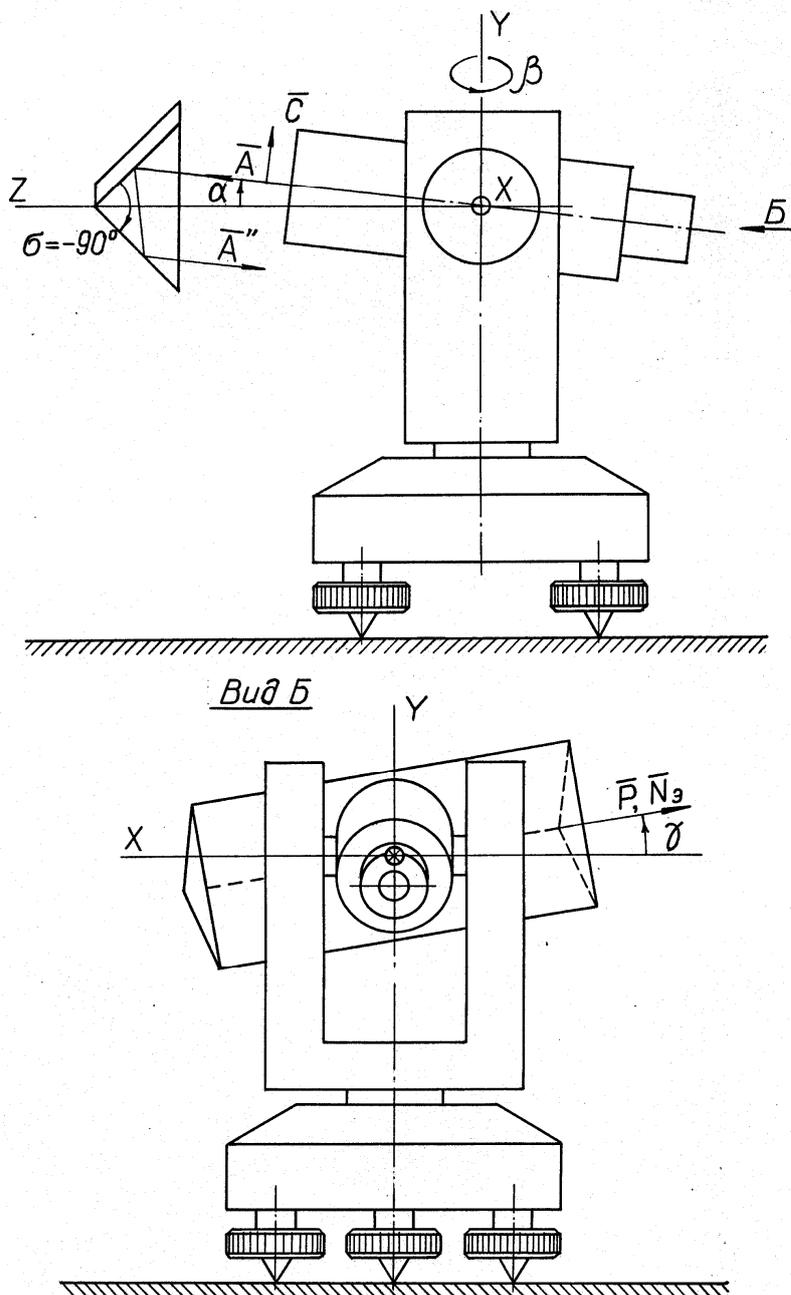


Рис.3.2. Схема контроля при определении угла наклона ребра призмы БР-180⁰ к горизонту

Также очевидно и то, что если поворачивать угловое зеркало вокруг оси падающего луча, то отражённый луч, оставаясь параллельным падающему, начнёт вращаться вокруг собственной оси в том же направлении, но с удвоенной скоростью. Так, например, при повороте углового зеркала вокруг оси Z на угол γ изображение орта C ,

перпендикулярного оси падающего луча, направленного вдоль оси Z , повернётся на угол 2γ вокруг той же оси.

Нетрудно теперь представить себе, что если на прямоугольное угловое зеркало, ребро которого повернуто на угол γ вокруг оси Z , направить луч по орту A , лежащему в плоскости YOZ , но составляющему с осью Z угол α , то отражённый луч уже не будет параллельным падающему, поскольку нарушится взаимная перпендикулярность ортов падающего луча A и ребра углового зеркала P , а отклонится в горизонтальном направлении на некоторый угол.

Требуется по измеренному с помощью теодолита углу отклонения обратно отражённого луча определить угол наклона ребра призмы к горизонту (к базовой плоскости) или иначе – определить отклонение от параллельности ребра призмы к горизонту (к базовой плоскости).

Основываясь на уже предложенной схеме контроля, задачу определения аналитической зависимости между указанными тремя угловыми величинами можно сформулировать следующим образом.

На какой угол β вокруг вертикальной оси от исходного положения следует повернуть трубу автоколлимационного теодолита, установленного перед прямоугольным угловым зеркалом (призмой типа БР-180°), ребро которого наклонено на малый угол γ к горизонтальной плоскости, если в исходном положении теодолита проекция на горизонтальную плоскость визирной оси его трубы, приподнятой над уровнем горизонта на угол α , перпендикулярна ребру P углового зеркала, - чтобы восстановить параллельность отражённого луча лучу падающему и чтобы выполнялось равенство

$$A'' = -A. \quad (1)$$

Теодолит предполагается отгоризонтированным.

С целью упрощения решения задачи заменим прямоугольное угловое зеркало эквивалентным ему по действию плоским зеркалом, перпендикулярным его ребру, направив орт $N_{\text{Э}}$ нормали эквивалентного зеркала по орту ребра P , и поменяв на противоположный знак перед ортом A падающего на угловое зеркало луча.

Тогда для орта A'' отражённого луча можно написать

$$A'' = M'' \cdot A = -M'_{\text{Э}} \cdot A = -M'_{\text{Э}} \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В системе осей XYZ выражение для орта A падающего луча, повернутого на угол β вокруг оси Y (рис.3.2) запишется следующим образом:

$$A_{\beta} = \cos \alpha \cdot \sin \beta \bar{i} + \sin \alpha \bar{j} + \cos \alpha \cdot \cos \beta \bar{k}, \quad (3)$$

и, кроме того в этой же системе осей

$$N_{\gamma} = P = -\cos \gamma \bar{i} + \sin \gamma \bar{j} + 0 \cdot \bar{k}. \quad (4)$$

Раскрывая значения элементов матрицы в выражении (2), производя подстановку из (3) и (4) и перемножая, далее получим:

$$\begin{aligned} A'' &= - \begin{pmatrix} 1 - 2N_X^2 & -2N_X N_Y & -2N_X N_Z \\ -2N_X N_Y & 1 - 2N_Y^2 & -2N_Y N_Z \\ -2N_X N_Z & -2N_Y N_Z & 1 - 2N_Z^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \\ A_Z \end{pmatrix} = \\ &= - \begin{pmatrix} (1 - 2N_X^2)A_X - 2N_X N_Y A_Y + 0 \\ -2N_X N_Y A_X + (1 - 2N_Y^2)A_Y + 0 \\ A_Z \end{pmatrix} = \\ &= - \begin{pmatrix} (1 - 2\cos^2 \gamma) \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta + 2\cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \sin \alpha \\ 2\cos \gamma \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta + (1 - 2\sin^2 \gamma) \sin \alpha \\ \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos 2\gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta - \sin 2\gamma \cdot \sin \alpha \\ -\sin 2\gamma \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta - \cos 2\gamma \cdot \sin \alpha \\ -\cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (5) \end{aligned}$$

Полагая углы γ и β - малыми, можно написать

$$A'' \approx \begin{pmatrix} \beta \cdot \cos \alpha - 2\gamma \cdot \sin \alpha \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Поскольку мы потребовали, чтобы $A'' = -A$, определим то значение угла β - поворота орта A падающего луча вокруг вертикальной оси, при котором достигается антипараллельность орта A'' отражённого луча.

Так как орты A и A'' - единичные, для определения величины β достаточно приравнять проекции указанных ортов на ось X в выражениях (3) и (6):

$$A''_X = -A_X \quad \text{или} \quad \beta \cdot \cos \alpha - 2\gamma \cdot \sin \alpha = -\beta \cdot \cos \alpha,$$

$$\text{откуда} \quad \beta = \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

а

$$\gamma = \frac{\beta}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что относительная погрешность угла γ определяется, в основном, относительной погрешностью измерения угла β :

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \approx \frac{\Delta\beta}{\beta}. \quad (9)$$

Поэтому для повышения точности измерения необходимо направлять падающий луч (орт A) на призму под возможно большим углом α к горизонту, чтобы при одной и той же величине угла γ наклона ребра углового зеркала измерять наибольшее отклонение β отражённого луча. Это условие можно выполнить, если трубу автоколлимационного теодолита наклонять в вертикальной плоскости не от горизонта вверх, а в пределах всего её входного зрачка, пока ещё наблюдается автоколлимационное изображение, от угла $-\alpha_H$, когда труба теодолита наклонена вниз от горизонта, до угла $+\alpha_B$, когда она направлена вверх.

Измеренные при этом углы отклонения β_α в соответствии с (7) составят

$$\beta_{-\alpha_H} = -\gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha_H, \quad \beta_{+\alpha_B} = \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha_B. \quad (10)$$

При этом общее (полное) отклонение отражённого луча в горизонтальной плоскости при наклоне трубы из крайнего нижнего положения в крайнее верхнее составит

$$\beta = \beta_{+\alpha_B} - \beta_{-\alpha_H} = \gamma \cdot (\operatorname{tg} \alpha_B + \operatorname{tg} \alpha_H). \quad (11)$$

Отсюда находится искомое значение величины угла γ

$$\gamma = \frac{\beta}{\operatorname{tg} \alpha_B + \operatorname{tg} \alpha_H}. \quad (12)$$

Преобразуем знаменатель в выражении (12), поскольку для ускорения процессов измерения углов и вычисления γ удобно по вертикальному кругу теодолита измерять полный угол вертикального наведения, равный

$\alpha = \alpha_H + \alpha_B$, а не каждую из его составляющих $-\alpha_H$ и α_B , отсчитываемых от плоскости горизонта. Итак

$$\gamma = \frac{\beta}{\operatorname{tg} \alpha_H + \operatorname{tg} \alpha_B} = \frac{\beta \cdot \cos \alpha_H \cdot \cos \alpha_B}{\sin(\alpha_H + \alpha_B)} = \beta \frac{\cos \alpha_H \cdot \cos \alpha_B}{\sin \alpha}. \quad (13)$$

Если учесть, что сами углы α_H и α_B - невелики, и составляют примерно $5^\circ \div 7^\circ$, а также принять $\alpha_H = \alpha_B = \alpha/2$, то с некоторым приближением можно написать

$$\gamma \approx \beta \frac{\cos^2 \alpha/2}{\sin \alpha} \approx \beta \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (14)$$

Оценим относительную погрешность определения величины γ в результате произведённого приближения

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{\gamma_{\text{точн}} - \gamma_{\text{прибл}}}{\gamma_{\text{точн}}} = 1 - \frac{1}{\cos \alpha_H \cdot \cos \alpha_B}. \quad (15)$$

Наибольшее значение это выражение примет при $\alpha_H = \alpha_B = \alpha/2$, т.е.

$$\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)_{\max} = 1 - \frac{1}{\cos^2 \alpha/2} = -\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (16)$$

Полагая $\alpha = 14^\circ$, после вычисления (16) получим

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = 1,5\%.$$

Такую погрешность в определении положения ребра прямоугольной призмы можно считать пренебрежимо малой величиной. Таким образом, окончательное выражение для определения угла γ наклона ребра прямоугольной призмы к горизонту имеет вид

$$\gamma = \frac{\beta}{\sin \alpha}. \quad (17)$$

4. Оценка предельной погрешности измерения

Предельную погрешность измерения угла наклона ребра призмы определим как сумму предельных значений методической погрешности и собственно погрешности измерения величины угла косвенным методом с помощью теодолита:

$$\delta_{\text{пред}} = \delta_{\text{метод}} + \delta_{\text{из}}, \quad (18)$$

где

$$\delta_{\text{из}} = 3\sigma_{\text{из}} = 3\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2 \sigma_{\beta}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 \sigma_{\alpha}^2}. \quad (19)$$

В выражении (19) в круглых скобках под корнем находятся частные производные от функции $\gamma = f(\alpha, \beta)$ по формуле (17), взятые по аргументам α и β . Здесь же σ_{β} и σ_{α} - средние квадратические погрешности измерения из одного приёма горизонтальных углов и зенитных расстояний. На основании паспортных данных на теодолит 2Т2А

$$\sigma_{\beta} = \sigma_{\alpha} = 4'' \text{ (угловых секунды)}. \quad (20)$$

Таким образом, раскрывая (19), можно написать

$$\delta_{\text{из}} = 3\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha} \sigma_{\beta}^2 + \left(\beta \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha}\right)^2 \sigma_{\alpha}^2}. \quad (21)$$

И далее, подставляя $\alpha = 14^\circ$, $\beta = 10' = 0,0029$, а σ_{β} и σ_{α} из (20), найдём

$$\delta_{\text{из}} = 3\sqrt{\frac{4^2}{0,249^2} + \left(0,0029 \frac{0,9703}{0,2419^2}\right)^2} \cdot 4^2 \approx 3\sqrt{273 + 0,036} \approx 50''. \quad (22)$$

Полученный результат ещё раз подтверждает, что для повышения точности измерения, необходимо наклонять трубу теодолита на возможно

больший угол α , для чего инструмент необходимо установить как можно ближе к контролируемой призме. И, кроме того, следует точнее измерять горизонтальный угол β .

Таким образом, окончательное выражение для предельной погрешности измерения угла γ примет вид

$$\delta_{\text{пред}} = \pm(50 + 0,15\gamma)'' \quad (23)$$

где угол γ - в угловых секундах.

5. Порядок выполнения работы

1. Отгоризонтировать теодолит 2Т2А.
2. Включить подсветку теодолита. Поворачивая теодолит вокруг вертикальной оси, найти автоколлимационное изображение перекрестия от призмы и сфокусировать трубу теодолита.
3. Измерить отклонение автоколлимационного перекрестия при наклоне трубы в вертикальной плоскости, для чего:

3.1. **Поднять** трубу теодолита в крайнее положение, пока ещё наблюдается автоколлимационное перекрестие, и, совместив в этом положении вертикальные штрихи основного и автоколлимационного перекрестий, снять отсчёты по вертикальному V_B и горизонтальному H_B лимбам. Причём, рекомендуется сделать несколько (3-5) наводок автоколлимационного перекрестия на основное при неизменном положении трубы в вертикальной плоскости и снять несколько отсчётов по горизонтальному кругу, после чего вычислить среднее арифметическое значение $\overline{H_B}$;

3.2. **Опустить** трубу теодолита в крайнее положение, пока ещё наблюдается автоколлимационное перекрестие, и снова, совместив вертикальные штрихи обоих перекрестий, снять отсчёты по вертикальному V_H и горизонтальному H_H лимбам. Здесь также рекомендуется сделать несколько наводок и вычислить среднее арифметическое значение $\overline{H_H}$.

При выполнении пункта 3 настоящей работы следует запомнить, в каком направлении смещается в поле зрения теодолита автоколлимационное перекрестие при подъёме трубы. Впоследствии необходимо убедиться в справедливости следующего правила: «Если при подъёме трубы теодолита автоколлимационное изображение перекрестия сдвигается вправо, ребро призмы вместе со столиком, на котором установлен кронштейн с её оправой, наклонено влево или против часовой стрелки».

4. Вычислить по формуле (17) величину угла γ наклона ребра прямоугольной призмы к плоскости горизонта, предварительно определив углы α и β по формулам

$$\begin{aligned}\alpha &= V_H - V_B; \\ \beta &= \overline{H}_H - \overline{H}_B.\end{aligned}\tag{24}$$

Если $\beta > 0$, то и $\gamma > 0$, чему соответствует наклон ребра призмы влево.

5. Определить по оптическому квадранту КО-10'' угол наклона столика к горизонту, для чего сначала от руки, а затем с помощью элевационного винта (маховичка) привести в нулевое положение пузырёк уровня и снять отсчёт ω_1 .

6. Наклоном столика (путём вращения двух передних маховичков регулируемых опор в противоположные стороны так, чтобы пузырёк поперечного уровня оставался посередине) привести ребро призмы в горизонтальную плоскость, добившись неподвижности автоколлимационного перекрестия при покачивании трубы теодолита в вертикальной плоскости.

7. Определить по квадранту угол наклона столика к горизонту в новом положении, сняв отсчёт ω_2 .

8. Вычислить разность

$$|\omega_2 - \omega_1| = \omega\tag{25}$$

и сравнить полученный результат с результатом вычисления угла γ , определив величину относительной погрешности ε_0

$$\varepsilon_0 = \frac{|\gamma| - \omega}{\omega} \cdot 100\%.\tag{26}$$

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Какой простейшей зеркальной системе эквивалентна прямоугольная призма с двумя отражениями типа БР-180°?
2. Погрешность измерения какого угла, горизонтального или вертикального, в большей степени определяет погрешность результата измерения угла γ ?
3. Какие погрешности теодолита оказывают влияние на точность измерения угла γ ?
4. Каково назначение второго квадранта (уровня) в лабораторной установке?
5. Какое практическое применение может найти схема контроля, используемая в лабораторной установке?
6. Как осуществить выверку оптического квадранта, то есть убедиться в том, что при отсчёте по лимбу «0°00'00''» и среднем положении

пузырька основного уровня, опорная плоскость квадранта строго горизонтальна?

7. Почему при наклоне столика с призмой рекомендуется вращать только передние две регулируемые опоры (маховички винтов), да и то в противоположные стороны?
8. Сформулируйте назначение такого оптического прибора, как квадрант.
9. Как устроен оптический квадрант?

7. Литература

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
2. Коломийцов Ю.В., Духопел И.И. и др. Оптические приборы для измерения линейных и угловых величин в машиностроении. (Справочная книга). Под ред. Ю.В. Коломийцова. М.: Машиностроение, 1964. 256 с.
3. Захаров А.И. Новые теодолиты и оптические дальномеры. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Недра, 1978. 261 с.

Лабораторная работа №4

ЮСТИРОВКА УЗЛА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ МОНОХРОМАТОРА

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться с помощью данного руководства:
 - а) с принципами построения спектральных приборов, их типами и классификацией;
 - б) с основными сведениями по теории плоской дифракционной решетки;
 - в) с техническими требованиями к юстировке узла решетки и особенностями конструкции ее оправы;
 - г) с устройством лабораторной контрольно-юстировочной установки.
2. По указанию руководителя занятий и под его наблюдением выполнить юстировку узла.

ПРИМЕЧАНИЕ: при выполнении работы следует быть чрезвычайно внимательным и аккуратным, чтобы не повредить реплику и элементы регулировочных устройств.

Для зачета предъявить лабораторную установку с узлом дифракционной решетки, отъюстированным в соответствии с техническими требованиями, и отчет.

Отчёт о работе должен содержать:

1. эскиз узла решетки и кронштейна для его установки в приборе;
2. технические требования к юстировке узла;
3. технические требования к контрольно-юстировочной установке;
4. описание методики юстировки (последовательности операций регулировки).

2. Комплект установки

- | | |
|---|------------|
| 1. Узел дифракционной решетки 300 штр/мм в оправе | - 1 шт. |
| 2. Основание установки (швеллер) с кронштейном | - 1 шт. |
| 3. Автоколлимационная визирная трубка типа ПК-436 | - 2 шт. |
| 4. Подставка для АК-трубки с элементами крепления | - 2 компл. |
| 5. Провод подсветки с лампой 6В | - 1 шт. |
| 6. Ключ гаечный | - 1 шт. |
| 7. Шпилька | - 1 шт. |

3. Принципы построения спектральных приборов

Спектральными называют все оптические приборы, в которых тем или иным способом осуществляется разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие.

В любом источнике света (исключение составляют лазеры) имеет место одновременное излучение многих атомов, находящихся во всех возможных энергетических состояниях; газовое облако источника испускает сложное излучение – набор квантов или набор частот излучения. Задача спектрального прибора состоит в том, чтобы сложное излучение различного спектрального состава, которое формируется в источнике света и падает на входную щель прибора, расположить в определенной последовательности по частотам или по длинам волн. Для этой цели используются следующие явления физической оптики: дисперсия света, дифракция света и интерференция света.

Дисперсия света происходит при преломлении света на поверхности раздела двух сред и определяется зависимостью относительного показателя преломления от длины волны

$$n = f(\lambda).$$

На основе явления дисперсии построены все призмные спектральные приборы. Диспергирующим элементом таких приборов является одна или несколько призм. В результате преломления света на гранях призмы происходит отклонение луча света на некоторый угол θ от первоначального направления. Угол отклонения зависит от показателя преломления вещества призмы и поэтому является функцией длины волны, т.е.

$$\theta = f(\lambda).$$

Дифракция света – явление, связанное с волновой природой света и возникающее при любом ограничении волновой поверхности диафрагмами.

В спектральных приборах используется явление дифракции параллельного пучка лучей от большого числа одинаковых узких щелей – дифракционной решетки. Явление дифракции сопровождается интерференцией многих лучей, вследствие чего имеют место резкие и узкие дифракционные максимумы, соответствующие различным углам дифракции. Связь углов дифракции с длиной волны определяется соотношением

$$m \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi$$

при нормальном падении параллельного пучка лучей на решетку. Здесь m – порядок интерференции или порядок дифракционного спектра, а d – постоянная, или период решетки. Следовательно, решетка, так же как и призма, выполняет роль разделителя длин волн.

Интерференция света – сложение двух или многих световых волн, отличающихся разностью фаз (разностью хода). В спектральных приборах

обычно используется многолучевая интерференция, когда происходит сложение многих световых волн с разностью хода, меняющейся вполне определенным образом. Например, после многократного отражения в плоскопараллельной пластинке лучи света образуют систему параллельных пучков разных направлений, которые дают в фокальной плоскости камерного объектива интерференционную картину, представляющую собой полосы равного наклона. Направление на интерференционный максимум является функцией длины волны, что определяет возможность использования этого принципа для спектрального разложения сложного излучения.

4. Принципиальная схема спектрального прибора

Современный спектральный прибор состоит из трех основных частей: осветительной I, спектральной (оптической) II и приемно-регистрирующей III (рис. 4.1).

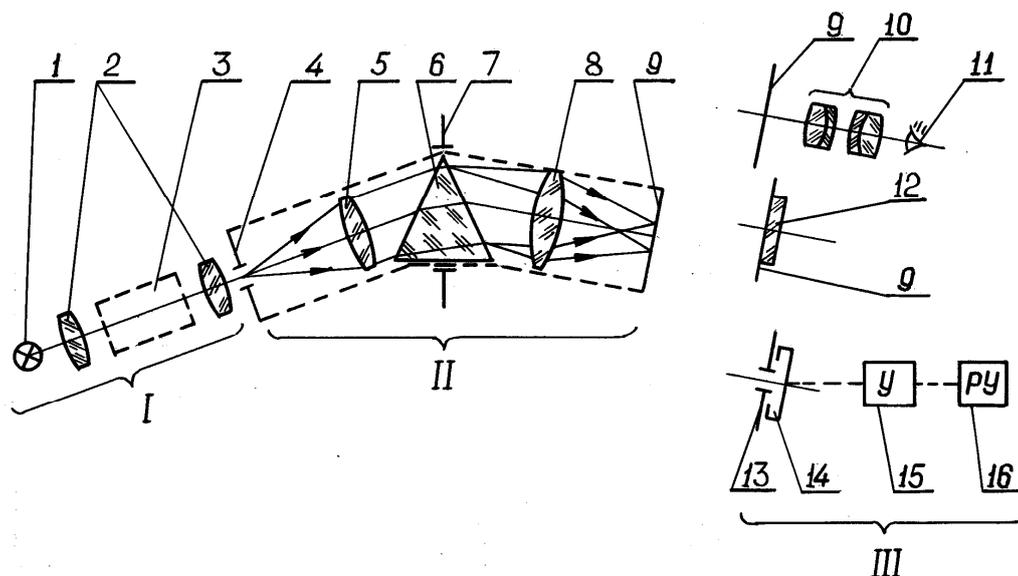


Рис. 4.1. Принципиальная схема спектрального прибора

В осветительную часть входят источник света 1 и конденсорные линзы или зеркала 2, равномерно освещающие входную диафрагму 4 или же входной зрачок 7 прибора; при абсорбционном анализе в осветительной части обычно помещают кюветное отделение 3, в котором устанавливаются исследуемый и эталонный образцы.

Спектральная часть состоит из входного коллиматора (входная диафрагма 4 и входной объектив 5), диспергирующей системы 6 (обычно призма или дифракционная решетка), световое отверстие которой, как правило, совмещают с входным зрачком 7 прибора, и выходного объектива 8; с его фокальной плоскостью 9 совмещают переднюю фокальную плоскость окуляра 10 (при визуальном методе регистрации спектра),

фотопластинку 12 (при фотографическом методе) или выходную диафрагму 13 (при фотоэлектрическом).

Приемно-регистрирующая часть в последнем случае состоит из фотоприемника 14 (фотоэлемент, ФЭУ, фотосопротивление, болометр, ЭОП и т.д.), усилительного устройства 15 и регистрирующего устройства 16 (измерительный прибор, осциллограф, телевизионная трубка, самописец, магнитная запись, цифровая печать и т.п.).

В последнее время появились приборы, в которых пространственное разделение излучения по длинам волн дополняется селективной модуляцией. Оптической частью этих приборов являются интерференционные или растровые модуляторы. Сюда можно отнести и фурье-спектрометры.

5. Классификация спектральных приборов и их типы

Признаки, по которым классифицируют спектральные приборы, могут быть самыми различными. По типу оптических систем различают обычные приборы с отдельно оформленными коллиматорной и камерной частями и автоколлимационные, в которых конструктивно совмещены коллиматор и камера.

По рабочей области спектра различают приборы, предназначенные для исследований в дальней (вакуумной) ультрафиолетовой области (1-185 нм), ультрафиолетовой (185-400 нм), видимой (400-760 нм), ближней инфракрасной (760-2500 нм), средней инфракрасной $(2,5-50) \times 10^3$ нм и дальней инфракрасной $(50-1000) \times 10^3$ нм.

Приборы с селективной оптической фильтрацией (пространственным разделением излучения по длинам волн) могут быть разделены по тем физическим явлениям, которые положены в основу их принципа действия – дисперсионные (призмные), дифракционные и интерференционные.

В зависимости от назначения селективного фильтра может быть выделен или узкий спектральный участок (одна спектральная линия) или же достаточно протяженный участок спектра. В первом случае оптическая часть прибора называется монохроматором, во втором – полихроматором.

Приборы, в которых излучение разлагается в спектр в результате модуляции различных видов, называют селективными спектральными модуляторами. Эта группа приборов в свою очередь может быть разделена по виду селективной модуляции (частотная или амплитудная) или типу модулятора (интерференционный, интерференционно-поляризационный и растровый).

Наиболее распространена классификация приборов по способу наблюдения или регистрации спектра – визуальному, фотографическому или фотоэлектрическому.

К приборам с визуальной регистрацией спектра относятся спектроскоп и стилоскоп, с фотографической регистрацией – спектрографы, стилометры и квантометры.

Спектроскоп – прибор, предназначенный для визуального наблюдения спектра. Его оптическая часть представляет собой полихроматор. Ввиду сравнительно малых возможностей глаза как приемника излучения этот прибор в настоящее время имеет ограниченное применение. Основным способ количественных измерений – визуальное уравнивание яркостей двух частей наблюдаемого поля – измеряемой и эталонной.

Стилоскоп представляет собой спектроскоп, приспособленный для грубоприближенного определения содержания различных элементов в сталях и сплавах по относительной интенсивности линий излучения.

Спектрограф является полихроматором и служит как для качественного, так и для точного количественного эмиссионного спектрального анализа. Из-за чувствительности фотоматериалов рабочий диапазон спектра ограничен видимой и ультрафиолетовой областями.

Спектрометр предназначен для проведения всех видов анализа. Его оптическая часть представляет собой монохроматор, выходная щель которого выделяет узкий участок спектра. Для получения информации о спектральном распределении энергии в широком диапазоне длин волн необходимо последовательно направлять на выходную щель различные участки спектра (сканировать спектр). Введение в оптическую систему спектрометра модулятора дает возможность использования для обработки сигналов приемника более совершенной электронной аппаратуры.

Стилометр служит для быстрого определения процентного содержания различных элементов в стали и сплавах по относительной интенсивности линий, измеряемой по величине возбуждаемого ими фототока при падении монохроматического светового потока на фотоэлемент.

Квантометр – многоканальный спектрометр, предназначенный для эмиссионного количественного анализа одновременно нескольких элементов, входящих в состав стали и сплавов. В отличие от стилометра вместо монохроматора в нем установлен полихроматор, за выходными щелями которого расположены фотоэлементы или ФЭУ.

СИСАМ – спектрометр с интерференционной селективной амплитудной модуляцией, в котором вместо призмного или дифракционного монохроматора установлен селективный (избирательный) модулятор. Приемно-регистрирующая часть прибора регистрирует только ту переменную составляющую, которая пропорциональна амплитуде модулированного сигнала. Селективный модулятор – это интерференционное устройство, в котором вместо концевых зеркал установлены диспергирующие элементы (как правило, дифракционные решетки).

Фурье-спектрометр – прибор, представляющий собой интерферометр, на выходе которого при линейном изменении разности хода (путем перемещения одного из зеркал) происходит модуляция светового потока с частотой, пропорциональной волновым числам или частотам электромагнитного излучения, т.е. происходит селективная частотная модуляция. Спектральный состав излучения определяется с помощью обратного преобразования Фурье (обычно с использованием ЭВМ).

6. Дифракционная решетка как диспергирующая система спектрального прибора

Дифракционные решетки являются диспергирующим устройством, заменяющим во многих случаях призму. Они незаменимы в далеких ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, где неизвестны прозрачные материалы для изготовления призм и преломляющей оптики.

Рассмотрим работу дифракционной решетки.

Дифракционная решетка представляет собой систему строго параллельных штрихов – канавок, расположенных на определенном, точно выдержанном расстоянии друг от друга. Для спектроскопических целей часто применяются отражательные дифракционные решетки. Штрихи наносятся на стеклянные заготовки, покрытые алюминиевым слоем. Расстояние d между штрихами решетки называется ее «**постоянной**». Профиль такой отражательной решетки приведен на рис.4.2. Число штрихов, наносимых на одном миллиметре длины решетки, составляет – 75, 100, 200, 300, 400, 600, 1200, 1800, 2400 и 3600 – для решеток на стекле, а также – 2, 4, 6, 12, 50 и 100 – для решеток на металле.

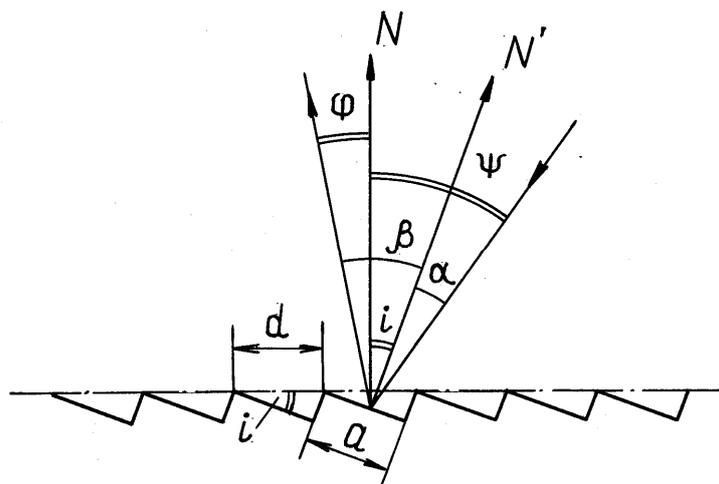


Рис. 4.2. Профиль отражательной решётки

Для получения хорошего качества спектральных линий постоянная дифракционной решетки d должна быть выдержана с точностью до 1%, а общая ошибка на всей длине решетки (средний размер решетки примерно 100 – 150 мм) не должна превышать 0,1 мкм. Эту точность обеспечивают

специальные винтовые делительные машины, работающие по принципу поперечно-строгального станка.

Отражающим свет элементом отражательной дифракционной решетки является грань шириной a (рис.4.2). Наклон этой грани к общей плоскости решетки определяет «угол блеска» i .

Распределение интенсивности после отражения света от решетки выражается формулой

$$I_{\varphi} = (I_0/N^2) \times (\sin^2 u/u^2) \times (\sin^2 NV/\sin^2 V), \quad (4.1)$$

где I_0 – интенсивность падающего света,

N – число штрихов решетки.

Второй множитель этой формулы определяет дифракцию от каждого отдельного элемента решетки. Здесь

$$u = \pi \cdot a (\sin \psi + \sin \varphi) / \lambda,$$

где φ – угол дифракции, a

ψ – угол падения,

углы ψ и φ – положительны, если они расположены по одну сторону от нормали к решетке.

Третий множитель формулы выражает интерференцию параллельных пучков и играет главную роль, так как определяет основные характеристики спектра и положение главных дифракционных максимумов. Здесь

$$V = \pi \cdot d (\sin \psi + \sin \varphi) / \lambda,$$

где d – постоянная решетки.

Интенсивность $I = 0$, если один второй или третий множитель в формуле (4.1) равен 0. Минимум для второго множителя будет иметь место, когда $u = k\pi$, то есть

$$k \cdot \lambda = a \cdot (\sin \psi + \sin \varphi), \quad k = 1, 2, 3,$$

Так как a очень мало (0,8 мкм, 1,6 мкм) минимумы от второго множителя очень редки. Наоборот, вследствие большого числа штрихов решетки N имеет место частые минимумы, определяемые третьим множителем. Условие минимума для него будет

$$NV = n\pi,$$

где n принимает любые значения целых чисел, кроме значения $n = 0, N, 2N, \dots, mN$, то есть кратных N .

В этих последних случаях

$$V = m\pi,$$

и третий множитель принимает значение N^2 .

Таким образом, вместо минимумов получаются главные максимумы, интенсивность I которых равна

$$I = I_0 \sin^2 u / u^2.$$

Условие главных максимумов тогда запишется в виде

$$d \cdot (\sin\psi + \sin\varphi) = m \cdot \lambda. \quad (4.2)$$

В этом основном выражении для решетки m может принимать любые целочисленные положительные или отрицательные значения, так как угол φ может лежать по обе стороны от регулярно отраженного луча $\varphi = -\psi$. Каждому значению $m = \pm 1, 2, 3$ и т.д. соответствуют спектры 1, 2-го и вообще m -го порядка. Для угла $\varphi = \psi$ будет наблюдаться нулевой дифракционный максимум, который не содержит разложения света в спектр.

С увеличением числа щелей растет интенсивность главных максимумов, ибо возрастает количество пропускаемого решеткой света. Однако самое существенное изменение, вносимое большим числом щелей (при заданном d), состоит в превращении расплывчатых максимумов в резкие узкие максимумы, разделенные практически темными промежутками, ибо вторичные максимумы очень слабы (не более 5% от главного). Это обеспечивает возможность надежно отличать близкие длины волн, для которых главные максимумы не будут перекрывать друг друга. Расстояние между главными максимумами для определенной длины волны λ определяется периодом решетки d .

Для отражательной решетки характерно неравномерное распределение энергии для различных углов φ , зависящее от профиля штриха решетки – угла блеска i . Дело в том, что плоский фронт волны, падая на решетку под углом ψ к нормали, испытывает дифракцию на каждом его зеркальном элементе, имеющем ширину a . Наклон зеркального элемента к общей касательной к поверхности решетки может быть разным. Вследствие этого направление на максимум дифракции от каждого отдельного элемента также будет меняться. В то же время интерференционные максимумы не изменят своего положения.

На рис.4.2. угол α соответствует углу падения, а угол β - углу дифракции от каждого зеркального элемента. Условие минимума при дифракции от отдельного зеркального элемента, имеющего ширину a , представим в виде

$$a \cdot (\sin\alpha + \sin\beta) = k \cdot \lambda. \quad (4.3)$$

Максимум энергии при отражении от решетки будет наблюдаться при условии $\alpha = -\beta$.

Для создания решетки с концентрацией энергии в заданном направлении необходимо правильно распределить световую энергию. При этом надо выполнить следующие условия:

1) нулевой максимум от отдельного зеркального элемента, представляющий регулярное отражение от зеркального элемента при $\alpha = -\beta$, должен

совпадать с направлением на главный рабочий дифракционный максимум от всей решетки, например для $\varphi = -2\lambda/d$;

2) спектр нулевого порядка решетки при этом должен попасть в направление минимума при дифракции от отдельного зеркального элемента.

Такое перераспределение световой энергии может быть обеспечено соответствующим выбором угла профиля канавки i .

Выполнению первого условия отвечает следующее соотношение

$$2\cos(\psi - i) \sin i = n\lambda/d, \quad (4.4)$$

позволяющее вычислить угол наклона рабочей грани i по заданному углу падения ψ и длине волны.

Из второго условия вытекает соотношение

$$\sin(\psi + i) - \sin(\psi - i) = 2\sin i \cos \psi = \lambda/a, \quad (4.5)$$

позволяющее при известном угле блеска i вычислить ширину элемента a . В соответствии с вычисленными значениями для i и a может быть заточен алмаз, применяемый для нанесения штрихов решетки.

Теперь можно говорить о распределении интенсивности в спектре отражательной решетки. Максимум интенсивности расположен в направлении зеркального отражения от рабочей грани решетки, то есть в направлении $-\beta = \alpha$. Выразив эти углы через углы φ , ψ и i в соответствии с рис. 4.2., получим

$$\varphi = 2i - \psi. \quad (4.6)$$

В этом направлении φ по формуле (4.6) располагается максимум отраженной от решетки энергии. В современных дифракционных решетках концентрация энергии достигает 70 – 80 %.

7. Технические требования к узлу решетки и особенности ее юстировки

7.1. Общие положения

Как уже отмечалось, изготовление дифракционной решетки (ДР) представляет собой сложный и трудоемкий процесс. Это определяет ее высокую стоимость. Поэтому в серийных приборах применяются копии (отпечатки) решетки-оригинала на пленке из желатина. В качестве подложки применяются стеклянные пластины с полированной поверхностью. На поверхность реплики напыляют слой алюминия.

Для того чтобы охватить более широкий спектральный диапазон, в спектральных приборах применяют комплекты ДР, имеющих различное количество штрихов на 1 мм или отличающихся углом блеска i . Число решеток в комплекте может составлять от двух до шести – семи.

В связи с этим технические требования к юстировке ДР подразделяются на требования, предъявляемые к ней как к отдельному самостоятельному функциональному узлу и требования, вытекающие из условия функционирования в приборе комплекта сменяемых ДР.

7.2. Установка ДР в оправу

Поскольку каждая ДР рассчитывается совершенно определенным образом, так что максимум излучения приходится на определенный порядок спектра слева или справа от нулевого порядка, то важно правильно установить ДР в оправу. Если установить решетку неверно, то есть повернуть на 180° вокруг центра, то, либо вообще на выходную щель не придет свет, либо придет спектр противоположного порядка, на который не приходится энергетический максимум.

Для определения правильного положения штрихов ДР берут в руку, так чтобы зеркальный слой был обращен к наблюдателю, и с помощью настольной лампы или другого осветителя имитируют схему работы решетки. Глаз наблюдателя помещается в положение дифрагированных пучков. При этом наблюдаются разложенные в спектры изображения нити лампы – в центре белое и по краям цветные. Максимум излучения в соответствии со схемой должен располагаться со стороны наблюдателя. Наклоном решетки необходимо убедиться, что яркий порядок приходит в поле зрения и располагается, например, слева от нулевого порядка. Если нет – решетку следует повернуть на 180° . После этого ДР можно устанавливать в оправу.

7.3. Установка ДР по отношению к оси ее вращения

1. Направление штрихов ДР, так же как и кромки ножей входной щели, должно быть строго параллельно оси вращения решетки. В случае невыполнения этого требования при повороте решетки будет иметь место косо расположение спектра.

2. Плоскость нарезанной грани решетки должна быть параллельна оси ее вращения. При невыполнении указанного требования будет наблюдаться смещение спектра по траектории, напоминающей дугу окружности, повернутую вверх или вниз в зависимости от знака ошибки.

7.4. Установка дифракционных решеток по углу блеска

Поскольку угол блеска i определяет направление на энергетический максимум, совпадающее с направлением зеркального отражения от рабочей грани решетки ($-\beta = \alpha$), в соответствии с которым согласован угол между коллиматорной и приемной частью прибора, то совершенно необходимо, чтобы все ДР в горизонтальной плоскости были установлены по углу блеска.

7.5. Базирование дифракционной решетки в приборе и основная конструкторская база узла

В спектральном приборе, где используется комплект ДР, каждая решетка в своей оправе может быть установлена на единый кронштейн 1, представляющий собой полураму на основании с базой, составленной из трех подпятников в виде конической лунки, призмы и плоскости, однозначно определяющей положение узла ДР 2 в пространстве (рис. 4.3.). Оправа решетки в качестве сопрягаемых базирующих элементов содержит три сферические регулируемые пяты, с помощью которых и осуществляются наклоны решетки относительно всех трех осей координатной системы осей XYZ . Одна из пят выполнена на эксцентриковой оси.

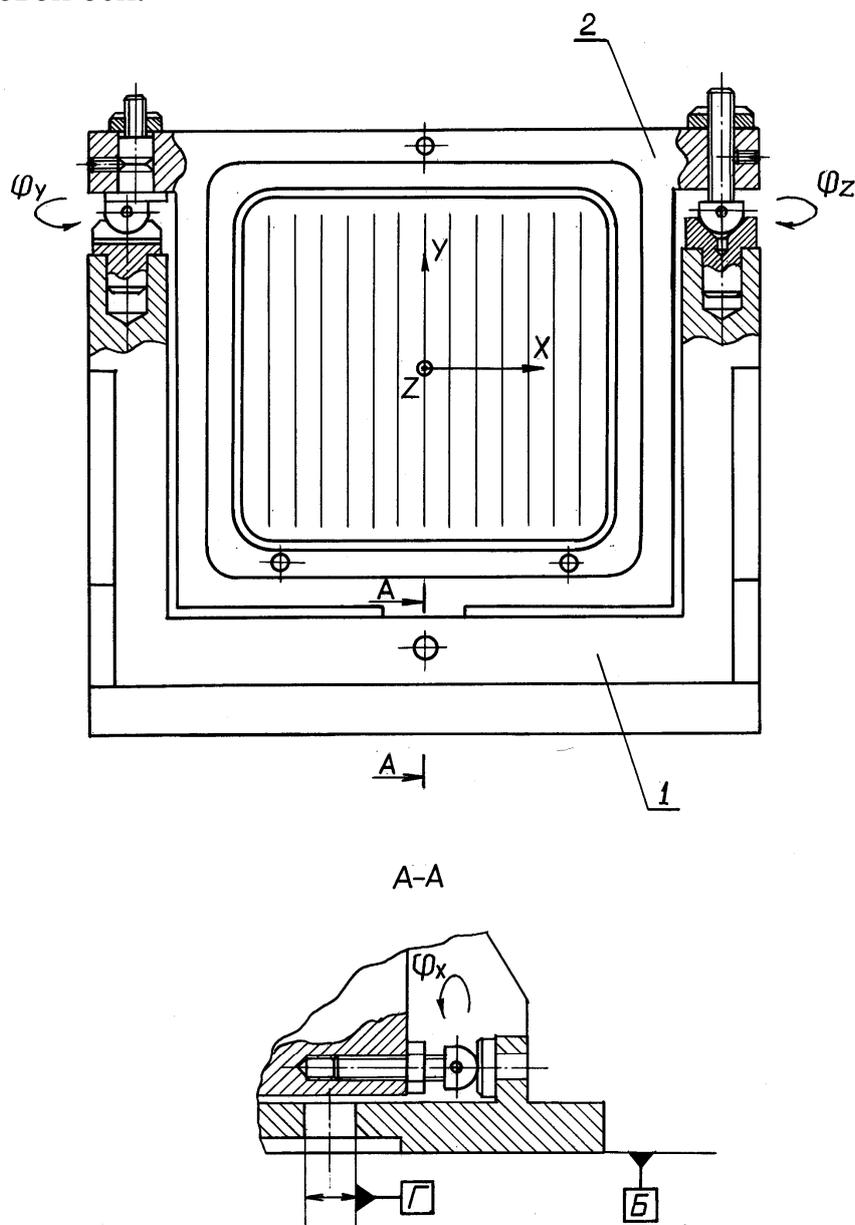


Рис.4.3. Конструкция базирующего кронштейна с узлом дифракционной решётки

В качестве основной конструкторской базы (КБ) и юстировочной базы узла здесь выступает плоскость «Б» основания кронштейна, которая в приборе строго перпендикулярна оси вращения поворотного столика механизма сканирования решеток по спектру. Поэтому при организации сборочных работ с выделением узловой сборки технические требования к установке ДР по отношению к оси ее поворота могут быть заменены адекватными требованиями:

1. Направление штрихов ДР должно быть строго перпендикулярным плоскости «Б» основания кронштейна.
2. Плоскость нарезанной грани решетки должна быть перпендикулярной плоскости «Б» основания кронштейна.

Таким образом, юстировку комплекта дифракционных решеток, предназначенного для определенного прибора, выполняют на штатном (рабочем) экземпляре кронштейна 1, который на период юстировки данного комплекта ДР устанавливается на контрольно-юстировочном приспособлении.

8. Описание контрольно-юстировочной установки

Установка предназначена для контроля и выставления узла ДР относительно кронштейна. Она состоит из основания, в виде швеллера, с обработанной шлифованием верхней плоскостью, на которой установлены кронштейн под узел дифракционной решетки и две визирные автоколлимационные трубки ПК-436 М. Указанная плоскость основания является основной базой установки. Визирные оси обеих трубок строго параллельны этой плоскости. Кроме того, визирная ось одной трубки, имеющей подсветку автоколлимационной сетки, установлена под углом блеска i к нормали, проведенной к плоскости нарезанной грани решетки. Таким образом, в поле зрения окуляра этой трубки можно наблюдать неокрашенное автоколлимационное изображение перекрестия, полученное при отражении пучка света от множества граней шириной a .

Визирная ось другой трубки, работающей в режиме зрительной, установлена в одном из порядков спектра, причем с увеличением угла между осями двух трубок, то есть при совмещении визирной оси второй трубки с направлением на более высокий порядок, повышается чувствительность установки к развороту штрихов ДР вокруг центра.

В цеховых условиях исходное положение кронштейна по отношению к трубкам (в плоскости основания) определяют по узлу ДР с наибольшим числом штрихов при среднем положении эксцентриковой пяты в оправе этой ДР. Юстировку узла решетки осуществляют ее наклонами и поворотом вокруг трех осей неподвижной координатной системы XYZ с помощью регулировочных элементов оправы этой ДР (рис. 4.3.).

9. Порядок выполнения работы

1. Включить подсветку сетки автоколлимационной трубки (АКТ) в сеть с напряжением 6В.
2. Наблюдать в поле зрения АКТ ахроматическое (неокрашенное) автоколлимационное изображение перекрестия.
3. Наблюдать в поле зрения визирной трубки (ВТ) изображение горизонтального штриха перекрестия АКТ на фоне спектра (дифрагированное изображение).
4. Произвести юстировку узла ДР в следующей последовательности (вариант 1):
 - 4.1. Совместить с центром перекрестия АКТ автоколлимационное изображение наклонами узла решетки вокруг осей X и Y .
 - 4.2. Совместить с горизонтальным штрихом перекрестия ВТ изображение горизонтального штриха сетки АКТ разворотом узла решетки вокруг оси Z .
 - 4.3. Проверить совмещение центров перекрестий в поле зрения АКТ и, при необходимости, ввести поправки, повторив пункты 4.1. и 4.2.
ПРИМЕЧАНИЕ: допуски на юстировку углового положения узла решетки составляют 10"- 15" (угловых секунд). Это соответствует в поле зрения АКТ отклонениям не более 0,5 деления сетки, а в поле зрения ВТ – отклонению в толщину штриха.
5. Предъявить установку с отрегулированным узлом решетки преподавателю.
ПРИМЕЧАНИЕ: после проверки правильности выполнения работы преподаватель возвращает установку с узлом ДР в исходное состояние, вводя погрешности φ_x , φ_y , φ_z .
6. Произвести повторно юстировку узла ДР в другой последовательности (вариант 2):
 - 6.1. Добиться одинакового отклонения (расположения) горизонтальных штрихов автоколлимационного и дифрагированного изображений перекрестия, наблюдаемых в поле зрения АКТ и ВТ, по отношению к горизонтальным штрихам собственных перекрестий разворотом узла решетки вокруг оси Z .
 - 6.2. Совместить горизонтальные штрихи автоколлимационного и дифрагированного изображений перекрестия с одноименными штрихами перекрестий АКТ и ВТ наклоном узла решетки вокруг оси X .
 - 6.3. Совместить вертикальные штрихи автоколлимационного изображения и перекрестия сетки АКТ наклоном узла решетки вокруг оси Y .
 - 6.4. Проверить совмещение горизонтальных и вертикальных штрихов в поле зрения АКТ и ВТ и, при необходимости, ввести поправки, повторив пункты 6.1. – 6.3.

7. Сравнить два варианта юстировки узла ДР по произведенным затратам времени, отразив свои выводы в отчете.

10. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Каково назначение спектральных приборов и какие явления физической оптики лежат в основе работы этих приборов?
2. Из каких основных частей состоит спектральный прибор? Какие элементы может включать каждая из этих частей?
3. По каким признакам классифицируют спектральные приборы?
4. Что представляет собой дифракционная решетка и какими параметрами она характеризуется?
5. Что определяют такие параметры решетки, как период решетки d , число штрихов решетки N , угол блеска i ?
6. Почему в настоящее время в спектральных приборах практически не используют прозрачную дифракционную решетку?
7. Какой принцип конструирования в первую очередь должен быть тщательно выполнен при закреплении решетки в оправе?
8. Что является основной конструкторской и юстировочной базой для узла дифракционной решетки в спектральном приборе?
9. Подсчитайте, достаточна ли чувствительность регулировочных устройств в конструкции оправы ДР для выполнения заданных требований точности ее установки?

11. Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.
2. Нагибина И.М., Прокофьев В.К. Спектральные приборы и техника спектроскопии. Л.: Машиностроение, 1967. 324 с.
3. Скоков И.В. Оптические спектральные приборы. М.: Машиностроение, 1984. 240 с.
4. Тарасов К.И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1977. 368 с.
5. Hutley M.C. DIFFRACTION GRATINGS. Techniques of Physics: 6, 1982, ACADEMIC PRESS, London New York.

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИНИАТЮРНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ УСТАНОВКИ МТУ-1

Цель работы: ознакомление с устройством и принципом действия телевизионной установки как составного элемента многих оптико-измерительных информационных систем контроля в оптическом производстве, создающего комфортность и дополнительные возможности групповой экспертной оценки качества системы, а также приобретение практических навыков в определении важнейших характеристик миниатюрной телевизионной установки.

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться с помощью руководств по эксплуатации и принципиальных электрических схем с устройством миниатюрной телевизионной установки МТУ-1, состоящей из телевизионной камеры с объективом и видеоконтрольного устройства (телевизионного монитора), с элементами управления и надписями на задней стенке корпуса и панели управления ВКУ.
2. Определить (измерить) эквивалентное фокусное расстояние $f'_{\text{ЭКВ}}$ телевизионной камеры с монитором.
3. Измерить увеличение $V_{\text{эл}}$, обеспечиваемое электронной схемой переноса изображения с мишени видикона на экран монитора.
4. Определить разрешающую способность (по Фуко) $R_N \text{ мм}^{-1}$ приемной площадки мишени видикона.
5. Полученные результаты предъявить преподавателю.

Отчет должен содержать:

- а) Задание для работы (по пунктам практического выполнения).
- б) Схему и методику контроля (измерения) того или иного параметра устройства, формулы и результаты расчетов.
- в) Оценку точности выполненных измерений и выводы по работе, содержащие замечания или предложения по выбору методик и схем измерений.

2. Комплект установки

1. Камера телевизионная «Электроника Л-50» с объективом фотографическим «Индустар-50-2» и соединительным кабелем.....1 шт.
2. Видеоконтрольное устройство «Электроника 409-ВКУ».....1 шт.

3. Руководства по эксплуатации телевизионной камеры и видеоконтрольного устройства (ВКУ) 1 компл.
4. Рейка нивелирная ... 1 шт.
5. Рулетка $L=7,5$ м..... 1 шт.
6. Измерительная металлическая линейка $L=150$ мм 1 шт.
7. Планшет с радиальной 256-лучевой мишенью 1 шт.
8. Указка (деревянная) 1 шт.
9. Подставка вспомогательная для TV-камеры 1 шт.

3. Требования по технике безопасности

Необходимо соблюдать осторожность при эксплуатации установки, поскольку в ней используется опасное для жизни напряжение: до 11 кВ в ВКУ и до 600 В в камере. Перед заменой предохранителя в ВКУ следует вынимать вилку из розетки электросети.

Особую осторожность следует соблюдать в обращении с кинескопом – предохранять от ударов и царапин.

4. Описание миниатюрной телевизионной установки

Миниатюрная телевизионная установка МТУ-1 является однокамерной телевизионной установкой замкнутого типа. Она предназначена для передачи черно-белого телевизионного изображения и наблюдения его на экране ВКУ.

Телевизионная камера «Электроника Л-50» представляет собой устройство для преобразования оптического изображения в электрические сигналы с помощью передающей трубки типа ЛИ437-1 – полудюймового видикона с отделенной сеткой, электростатической фокусировкой и электромагнитным отклонением луча. Режим разложения 625 строк при 25 кадрах в секунду. Рабочая площадь мишени $4,9 \times 6,5$ мм. Видеосигнал, сформированный видиконом, усиливается предварительным усилителем и через соединительный кабель поступает на вход видеоусилителя ВКУ.

Камера «Электроника Л-50» может работать только в комплекте с видеоконтрольным устройством «Электроника 409-ВКУ», от которого получает напряжение питания отдельных каскадов электрической схемы, напряжения разверток строчной и кадровой частот и смесь гасящих импульсов. Формирователь гасящих импульсов обеспечивает гашение луча во время обратного хода строчной и кадровой развертки. Схема автоматической регулировки чувствительности обеспечивает постоянство размаха видеосигнала при различных уровнях освещенности передаваемого объекта в пределах от 200 до 10000 лк.

Камера снабжена фотографическим объективом «Индустар-50-2» с относительным отверстием от 1:3,5 до 1:16 и фокусным расстоянием 50 мм.

В ВКУ применен кинескоп с размером экрана по диагонали 16 см и углом отклонения электронного луча 70° . Разрешающая способность по горизонтали в центре – не менее 400 линий. Яркость свечения экрана не менее 140 кд/м^2 .

5. Описание испытательного стенда

Стенд для испытания миниатюрной телевизионной установки состоит из нивелирной рейки 1 со шкалой в виде чередующихся белых и красных полей (шашек), которыми рейка разбита на участки длиной 5 см, закрепленной в горизонтальном положении на стене на высоте примерно 1,5 метра над полом помещения (рис. 5.1.). Рядом с рейкой располагается планшет с 256-лучевой радиальной мишенью, реализованной на секторе в четверть полного круга (на рисунке не показан). На расстоянии примерно 7 метров от стены, где расположены рейка с мишенью, на лабораторном столе с помощью специальной подставки закреплена телевизионная камера 2, а рядом с ней на приборной полке установлен монитор 3.

Лучистый поток Φ от объекта наблюдения u в виде рейки (рис.5.1.) падает на накопительную мишень видикона МВ и создает на ней (благодаря объективу) изображение u' этого объекта. Электронный прожектор П формирует развертывающий (коммутирующий) пучок, который фокусируется на мишень с помощью фокусирующих катушек ФК. Благодаря отклоняющим катушкам ОК пучок электронов построчно сканирует мишень видикона. Корректирующие траекторию пучка катушки КК служат для компенсации погрешностей сборки электронного прожектора. Здесь, на рис. 5.1. R_n – нагрузочный резистор, через который на сигнальную пластину мишени видикона подается положительный потенциал $U_{\text{сп}}$.

В результате воздействия лучистого потока каждый элемент (ячейка) мишени видикона заряжается, причем, его заряд зависит от интенсивности падающего на него света. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы сначала одной строчки мишени, затем другой строчки и т.д. (всего 625 строк). От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе R_n . Поэтому напряжение на резисторе изменяется пропорционально изменению освещенности вдоль строк кадра.

Полученный сигнал передается в видеоконтрольное устройство. Он преобразуется в видимое изображение на экране приемной вакуумной электронной трубки – кинескопа. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек

горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегал мишень видикона в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приемной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.

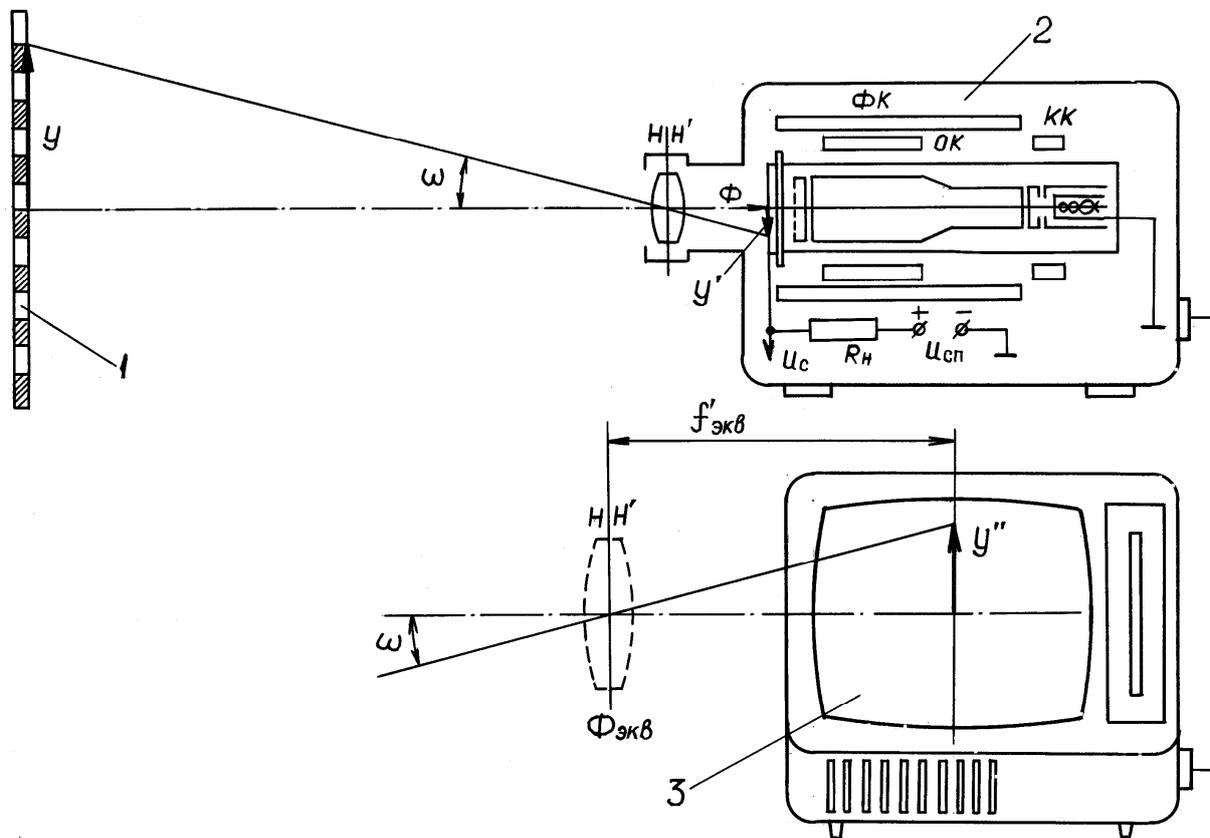


Рис. 5.1. Схема измерений электронно-оптических характеристик МТУ-1 на испытательном стенде:

1- нивелирная рейка со шкалой; 2 – камера телевизионная с объективом фотографическим «Индустар-50» и передающей трубкой «видикон»;

3 – видеоконтрольное устройство (телевизионный монитор).

В основу принципиальной схемы измерения перечисленных выше (в задании для работы) характеристик ВКУ положена аналогия **двух встречных коллиматоров**. Напомним, что в соответствии с упомянутой типовой схемой оптических измерений между размером y предмета, установленного в фокальной плоскости объектива коллиматора с фокусным расстоянием f'_k , и размером его изображения y' , наблюдаемого в задней фокальной плоскости объектива зрительной трубки с фокусным расстоянием f'_m , существует простая зависимость

$$y' = y \times f'_m / f'_k.$$

Первичное изображение y' предмета в виде отрезка шкалы, выбранной на нивелирной рейке, образуется в плоскости фотокатода передающей телевизионной трубки. Электронная система сканирует это

изображение и выработывает видеосигнал, поступающий на вход видеоконтрольного устройства «Электроника 409-ВКУ», создающего на экране телевизионного монитора $З$ уже черно-белое, вторичное изображение $у''$ предмета. С этим изображением и работает оператор.

Таким образом, под эквивалентным фокусным расстоянием видеокамеры с монитором (рис.5.1) следует понимать такое фокусное расстояние объектива эквивалентной зрительной трубы, при котором размер изображения в его задней фокальной плоскости был бы равен размеру изображения на экране монитора.

6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством миниатюрной телевизионной установки МТУ-1, состоящей из телевизионной камеры и видеоконтрольного устройства ВКУ (телевизионного монитора), и его техническими характеристиками, используя руководства по эксплуатации и настоящие методические указания.
2. Определить (измерить) эквивалентное фокусное расстояние $f'_{\text{экв}}$ телевизионной камеры с монитором.
3. Измерить увеличение $V_{\text{эл}}$, обеспечиваемое электронной схемой переноса изображения с мишени видикона на экран монитора.
4. Определить разрешающую способность $R_N \text{ мм}^{-1}$ приемной площадки мишени видикона.
5. Исследовать, как влияет настройка изображения на экране монитора с помощью рукояток «Яркость» и «Контрастность», а также изменение относительного отверстия объектива на разрешающую способность.
6. Полученные результаты предъявить преподавателю.
7. Оценить погрешность выполненных измерений.

7. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. В каких устройствах производственного контроля можно было бы с успехом применить подобную миниатюрную телевизионную установку взамен окулярного наблюдения?
2. Какие новые свойства приобретают оптические приборы при использовании телевизионных систем?
3. Что такое развертка изображения, и каковы принципы ее осуществления?
4. Опишите процесс преобразования изображения в видиконе.
5. Назовите основные недостатки видиконов.
6. Рассчитайте размеры прямоугольника допусков, который следовало бы поместить на экране монитора, в случае использования этой

установки для контроля параллельности осей пучков, выходящих из окуляров стереомикроскопа от одной и той же точки пространства предметов.

7. Рассчитайте размер изображения диска Луны на экране монитора, если ее угловой размер составляет примерно 30 угловых минут.
8. На каком наименьшем расстоянии от телевизионной камеры может находиться геодезическая рейка, чтобы погрешность измерения эквивалентного фокусного расстояния оказалась пренебрежимо малой?
9. Как связана погрешность измерения эквивалентного фокусного расстояния с размером предмета, выбранного для этой цели?
10. Выведите формулу, связывающую элемент разрешения в плоскости предмета (радиальной меры) с числом пар секторов меры, на которые она разделена, и радиусом кружка размытия наблюдаемого изображения.
11. Какие характеристики телевизионной камеры и монитора определяют разрешающую способность установки?
12. Рассчитайте размер изображения на экране монитора человека, находящегося от камеры на расстоянии 50 метров, если его рост составляет 170 см.

8. Литература

1. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. и др. Теория оптических систем. Учебник для вузов./ 2-е изд., перераб. и доп. М.:Машиностроение, 1981. 432 с.
2. Фукс-Рабинович Л.И., ЕлифановМ.В. Оптико-электронные приборы: Учебное пособие для оптико-механических и приборостроительных техникумов. Л.: Машиностроение, 1979. 362 с.
3. Ельников Н.Т. и др. Сборка и юстировка оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1974. 352 с.
4. Мальцев М.Д. и Каракулина Г.А. Прикладная оптика и оптические измерения. М.: Машиностроение, 1968. 472 с.
5. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. Учебное пособие СПб ГУ ИТМО. СПб. 2005. 89 с.
6. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения: Учеб. Пособие для вузов.- СПб.: Политехника, 2000. 277 с.

Лабораторная работа №6

ЮСТИРОВКА И КОНТРОЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ УГЛОМЕРНОЙ ГОЛОВКИ

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться по чертежу и данному руководству с устройством и оптическими характеристиками угломерной головки, основными погрешностями ее сборки и техническими требованиями к ней.
2. Ознакомиться с конструкцией и назначением контрольно-юстировочного приспособления (КЮП), а также параметрами стандартных КЮП, входящих в его состав.
3. Настроить установку и произвести контроль центрировки лимба по центрировочной (технологической) круговой риске или по концам штрихов – градусных делений лимба.
4. Настроить установку для контроля основной погрешности угломерной головки и произвести ее поверку.

Для зачета предъявить установку, настроенную для проверки основной погрешности угломерной головки и результаты измерений эксцентриситета лимба и погрешности головки; полностью оформленный отчет, содержащий график изменения накопленной погрешности угла в диапазоне от 0 до 360°, анализ полученной зависимости, выводы и практические рекомендации по устранению выявленного отклонения. Кроме того, требуется рассчитать:

- Допустимую величину эксцентриситета лимба;
- Необходимую точность установки (фокусировки) собственного отсчетного микроскопа угломерной головки на плоскость делений лимба при устранении параллакса.
- Необходимую точность (допустимую погрешность) продольной установки объектива при устранении рена.

2. Комплект установки

1. Угломерная головка	1 шт.
2. Контрольно-юстировочное приспособление	1 шт.
3. Отсчетный микроскоп МИР-2	1 шт.
4. Автоколлимационная трубка типа ИК	1 шт.
5. Образцовая восьмигранная призма в регулируемой оправе	1 шт.
6. Провод подсветки с лампой 6 В	2 шт.

3. Назначение, устройство и характеристики угломерной головки

Угломерная головка (рис.6.1) предназначена для задания угла поворота вала 13 в пределах полного оборота с предельной погрешностью не более 0,5 минуты угла. С валом 13 жестко скреплен лимб 5 с градусными делениями, вращение которого осуществляется от маховичка 21 посредством пары цилиндрических колес – триба 9 и шестерни 16, закрепленной на валу 13 посредством конического штифта 62. Положение маховичка 21, а, следовательно, триба 9 и шестерни 16 с валом 13, в любом положении можно застопорить, затянув гайку 22.

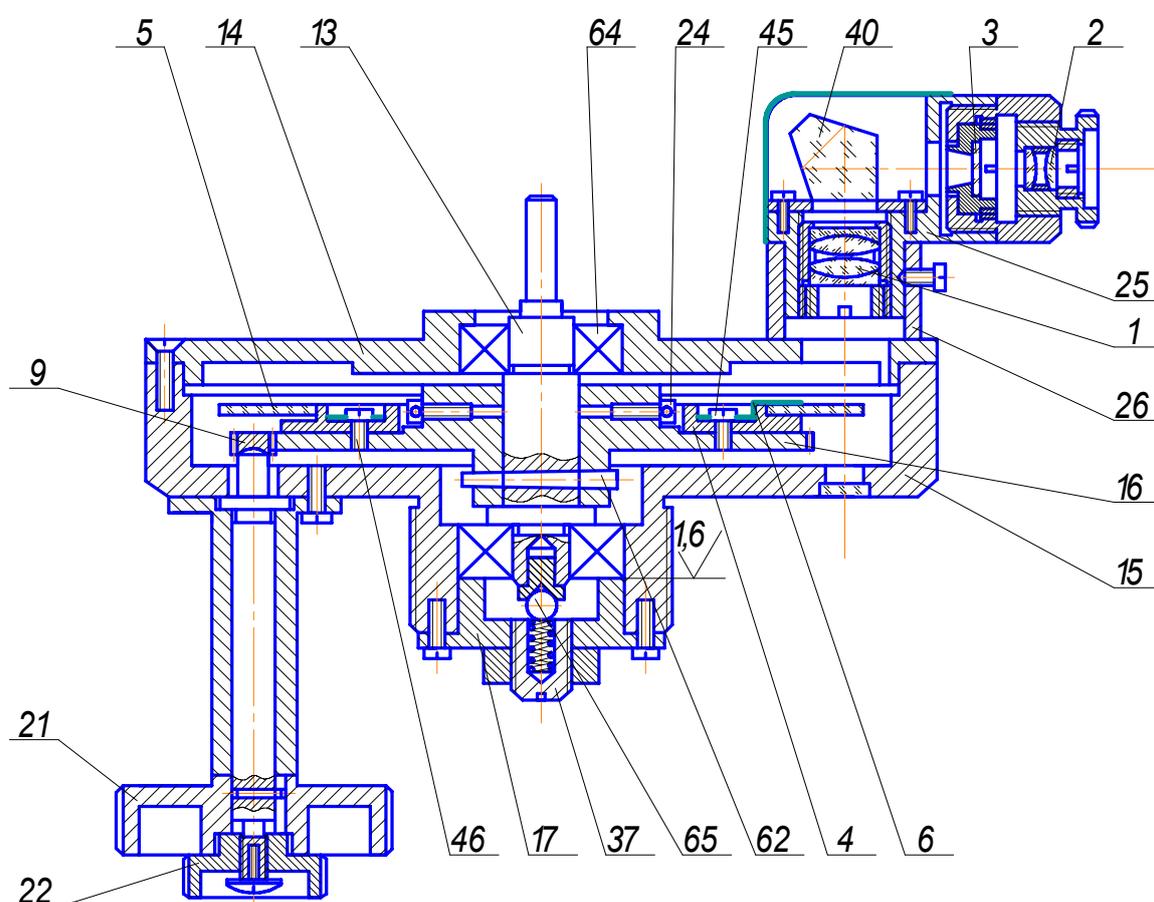


Рис. 6.1. Конструкция оптической угломерной головки

Вал 13 вращается в двух радиальных шарикоподшипниках 64, один из которых закреплен в крышке 14, а другой в корпусе 15. Осевой люфт вала 13 устраняется подрезкой упорного торца втулки 17, а момент на его оси регулируется давлением пружины со стороны торца через шарик 65 с помощью гильзы 37 и должен быть в пределах $2 \div 3 \text{ Н}\cdot\text{см}$.

Лимб 5 лежит на трех платиках оправы 4 и прижимается к ним тремя лепестками фигурной пружинящей планки 6 с помощью трех винтов 45. В свою очередь оправа 4 с лимбом 5 крепится к шестерне 16 с помощью трех винтов 46. Центрировка лимба относительно оси вращения вала 13 производится подвижкой оправы 4 совместно с лимбом относительно шестерни 16 при отпущенных винтах 46 с помощью четырех винтов 24 со сферическими головками, упирающимися в оправу 4.

Отсчеты с лимба снимаются с помощью шкалового микроскопа, который состоит из объектива 1 с линейным увеличением $\beta = -2^{\times}$, пентапризмы 40, нониусной (минутной) шкалы 3, содержащей 60 делений, и окуляра 2 с увеличением $\Gamma_{ок} = 32^{\times}$. Линейное поле микроскопа $2y = 2$ мм, апертура $A = 0,15$, диаметр выходного зрачка $D' = 1$ мм. Весь микроскоп собран в корпусе 25 и крепится к крышке 14 с помощью фланца 26.

4. Основные технические требования к сборке и юстировке угломерной головки

1. Лимб 5 необходимо отцентрировать на оси вращения с такой точностью, чтобы предельная погрешность измерения углов не превышала 30 секунд угла.
2. Отсчетный микроскоп необходимо сфокусировать на плоскость делений лимба так, чтобы не было заметной нерезкости и недопустимого параллакса между изображениями градусных штрихов лимба 5 и штрихами минутной шкалы 3.
3. Устранить рен, то есть отрегулировать увеличение объектива 1 с такой точностью, чтобы в интервал между изображениями соседних штрихов градусной шкалы лимба 5 поместилось точно 60 делений минутной шкалы 3 с допуском не более половины толщины штриха этой шкалы.
4. Штрихи минутной шкалы 3 должны быть параллельны штрихам градусной шкалы лимба 5 и при этом не должны иметь заметного на глаз наклона по отношению к линии отвеса при вертикальном положении вала 13. Кроме того, штрихи градусной шкалы должны полностью перекрывать штрихи минутной шкалы, а их оцифровка не должна пересекать зону штрихов минутной шкалы с одной стороны и выходить за границы поля, ограниченного диафрагмой, - с другой.

5. Анализ влияния погрешностей сборки на свойства угломерной головки и особенности ее юстировки

5.1 Эксцентриситет лимба

Эксцентриситет лимба, в случае одностороннего снятия отсчета, вызывает появление погрешности измеряемого по штрихам лимба угла

поворота вала, изменяющейся по периодическому закону. Эта погрешность, складываясь с погрешностью положения штрихов лимба, с погрешностями измерения вследствие неперпендикулярности плоскости лимба к собственной оси вращения, из-за нестабильности этой оси, рена, параллакса и других дефектов, может существенно превалировать среди них.

На рис.6.2 показана схема образования погрешности измерения угла φ при наличии эксцентриситета $\overline{\Delta e}$ для двух диаметрально противоположных положений I и II отсчетного микроскопа. Причем, в начальном положении лимба вектор эксцентриситета $\overline{OC} = \overline{\Delta e}$ совпадает с диаметром II – I, где O – ось вращения лимба, а C – его геометрический центр. Поворот лимба на угол φ против часовой стрелки условно заменен перемещением отсчетного микроскопа I в положение I', а микроскопа II - в положение II'. Причем, прямая, соединяющая эти две точки отсчета по лимбу, проходит через ось поворота – точку O.

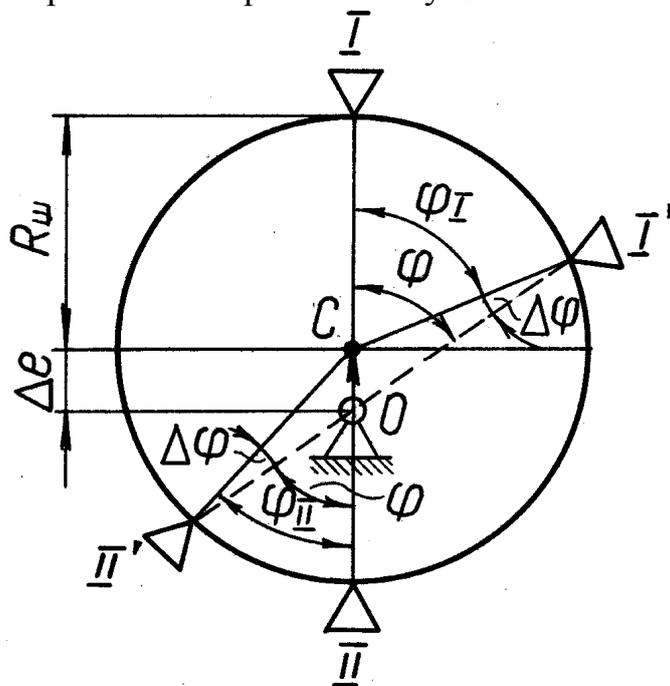


Рис. 6.2. Схема возникновения погрешности измерения вследствие эксцентриситета лимба

Из рис.6.2 видно, что измеренная по лимбу с помощью отсчетного микроскопа величина угла поворота для первого положения составляет $\varphi_I = \varphi + \Delta\varphi$, а для второго – $\varphi_{II} = \varphi - \Delta\varphi$. Величина угла $\Delta\varphi$ может быть определена из рис. 6.3. Ввиду малости этого угла:

$$\Delta\varphi \approx \Delta e \cdot \sin\varphi / R_{ш}, \quad (1)$$

где $R_{ш}$ – радиус окружности градусных штрихов лимба.

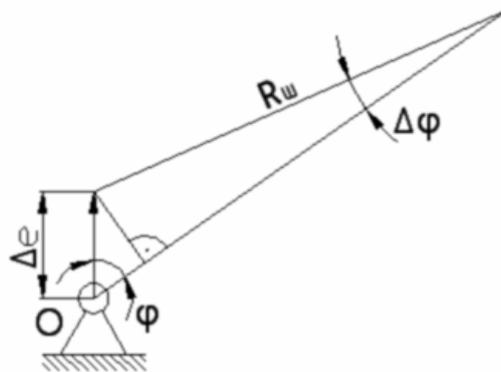


Рис. 6.3. К выводу формулы для определения величины погрешности измерения

График изменения погрешности $\Delta\varphi$ в зависимости от угла поворота лимба, для случая нулевой начальной фазы эксцентриситета (см. рис. 6.2), представлен на рис. 6.4. Это синусоида с амплитудой $\Delta e/R_{ш}$. Таким образом,

$$\Delta\varphi_{\max} = 2\Delta e/R_{ш}. \quad (2)$$

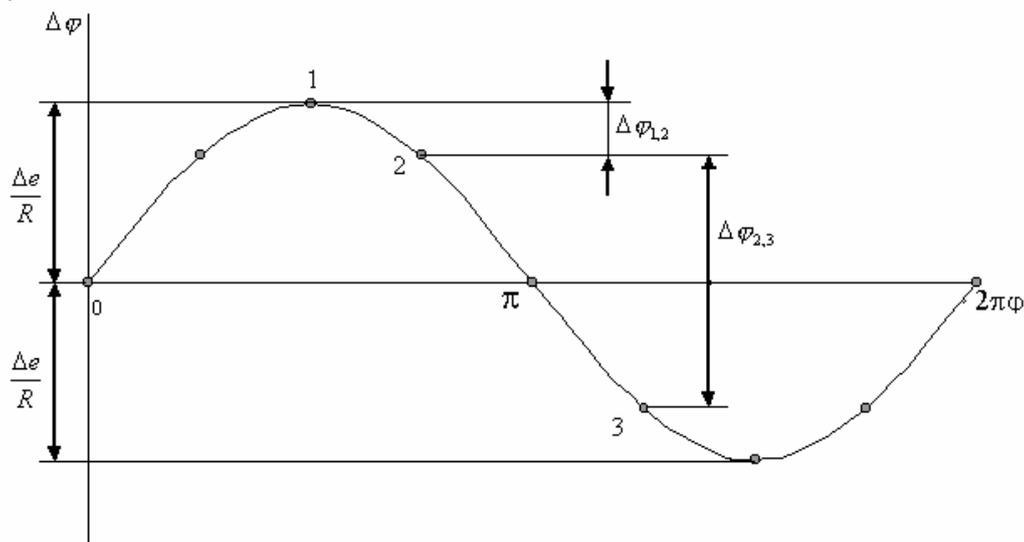


Рис.6.4. График изменения погрешности $\Delta\varphi$ в зависимости от угла поворота лимба для случая нулевой начальной фазы эксцентриситета

Однако на практике в процессе измерения началу отсчета по лимбу может соответствовать не нулевая, а произвольная фаза вектора эксцентриситета, и тогда выражение для погрешности угла измерения вследствие эксцентриситета примет вид:

$$\Delta\varphi_{\Delta e} = 1/R_{ш} [\sin(\varphi - \theta_0) + \sin \theta_0] \cdot \Delta e, \quad (3)$$

где θ_0 – начальная фаза вектора $\overline{\Delta e}$.

При окончательной юстировке угломерных приборов с односторонним снятием отсчетов для устранения остаточной погрешности измерения угла из-за эксцентриситета требуется по результатам этих измерений определить величину и направление вектора Δe с целью введения поправки в положение лимба относительно оси его вращения.

ПРИМЕЧАНИЕ. Предварительная центрировка лимба может производиться двумя способами:

- 1) с помощью одного отсчетного микроскопа типа МИР-2, который визируют либо на вспомогательную центрировочную окружность на лимбе, нанесенную на его поверхность в процессе деления одновременно (с одной установки) с нанесением градусных штрихов, либо на концы этих штрихов;
- 2) с помощью двух отсчетных микроскопов, визирующих два диаметрально противоположных штриха лимба.

В первом случае добиваются устранения биения центрировочной окружности или концов штрихов при вращении лимба. При этом используют прием – поворот лимба на 180° для двух взаимно перпендикулярных его сечений. Во втором случае добиваются совмещения с осью вращения двух взаимно перпендикулярных диаметров, проходящих через два диаметрально противоположных штриха лимба. Здесь используют тот же прием, позволяющий выявить соответствующие вектора Δe в удвоенном масштабе. Второй способ более точный.

На рис.6.5 представлен график изменения погрешности $\Delta\varphi_{\Delta e}$ в самом общем случае, то есть график функции (3).

Это также синусоида, с амплитудой $\Delta e/R_{ш}$, сдвинутая относительно оси ординат ($\Delta\varphi_{\Delta e}$) на величину θ_0 , и относительно оси абсцисс (φ) на величину $(\Delta e/R_{ш})\sin\theta_0$, равную $0,5(\Delta\varphi_{\Delta e\text{ нб}} + \Delta\varphi_{\Delta e\text{ нм}})$. Угол θ_0 определяет направление вектора Δe и отсчитывается от нулевого штриха лимба в сторону увеличения отсчета. Таким образом, для устранения погрешности $\Delta\varphi_{\Delta e}$ лимб следует сместить в направлении противоположном вектору Δe , то есть от штриха с оцифровкой θ_0 к центру.

Подсчитаем допустимую величину эксцентриситета лимба $\Delta e_{\text{доп}}$ при условии, что погрешность измерения углов из-за эксцентриситета $\Delta\varphi_{\Delta e}$ не превысит $2/3$ от предельной погрешности измерения, составляющей $\delta_{\Sigma} = 30''$ (угловых секунд).

Подставив в формулу (2) $\Delta\varphi_{\text{max}} = \Delta\varphi_{\Delta e} = 2\delta_{\Sigma}/3$ и $R_{ш} = 40\text{мм}$, получим

$$\Delta e_{\text{доп}} = R_{ш} \delta_{\Sigma} / 3 = 40 \cdot 30 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 3 = 0,002 \text{ мм.}$$

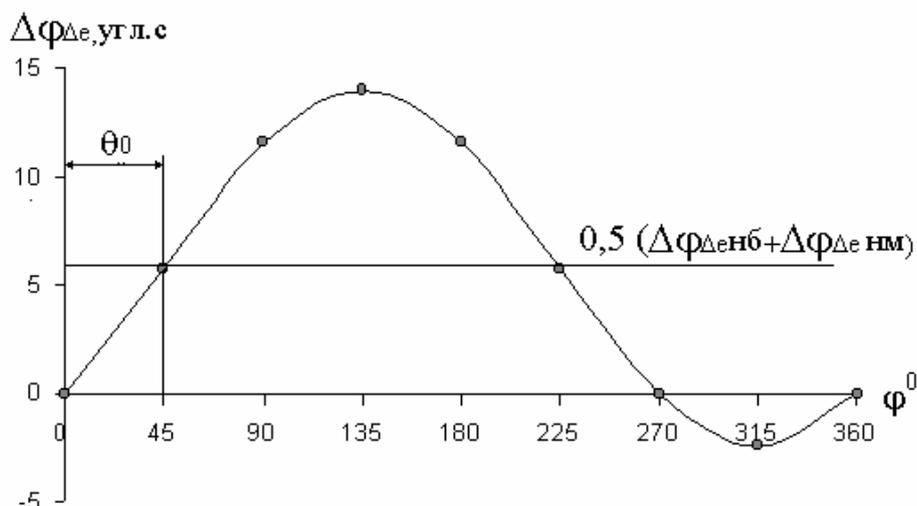


Рис.6.5. График изменения погрешности $\Delta\varphi$ в общем случае

5.2. Фокусировка микроскопа, устранение параллакса и рена шкалы

Юстировка нормального увеличения объектива отсчетного микроскопа или устранение рена шкалы, как правило, сопровождается фокусировкой объектива на плоскость делений шкалы, т.е. устранением параллакса, поэтому эти операции рассматриваются совместно.

Следует отметить, что в схеме оптической угломерной головки имеет место нетелецентрический ход главного луча в пространстве предметов, и поэтому изменение фокусировки вызывает изменение масштаба изображения. Учитывая, что в данной конструкции входной зрачок микроскопа находится вблизи передней узловой точки объектива (рис.6.6), для масштаба изображения можем записать следующее соотношение

$$M = y'/y = a'/a = V,$$

где y – размер предмета (например, линейный интервал между соседними штрихами градусной шкалы лимба), y' – размер изображения того же предмета; a – передний (предметный) отрезок, т.е. расстояние от передней узловой точки микрообъектива до предмета; a' – задний (картинный) отрезок, т.е. расстояние от задней узловой точки микрообъектива до плоскости изображения.

Изменение масштаба изображения или увеличения в данной конструкции может быть достигнуто изменением отрезков a и a' . Определим величину изменения расстояния между объективом и плоскостью шкалы $\Delta a'$ для получения нормального увеличения V_0 , а также величину смещения всего микроскопа Δl во фланце 26 (см. рис.6.1)

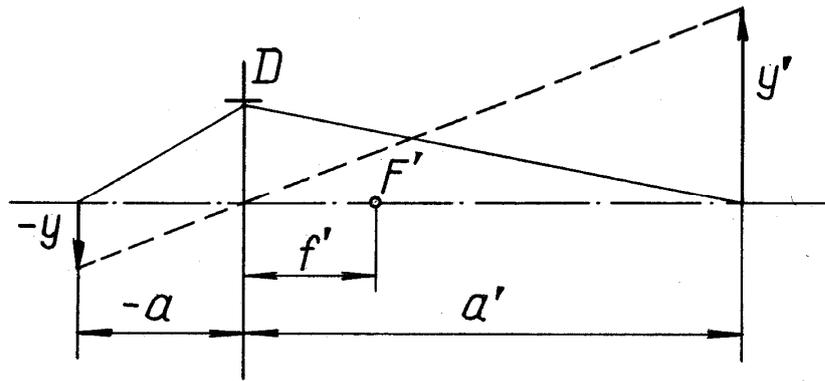


Рис. 6.6. К выводу формулы для определения масштаба изображения для восстановления резкости изображения штрихов лимба, если в результате первоначальной фокусировки, которую можно осуществить перемещением объектива в резьбе (в случае ремонта) или перемещением всего микроскопа в технологическом, укороченной длины фланце 26 (в производственных условиях), увеличение объектива составляет:

$$V = V_0 + \Delta V.$$

Вспользуемся формулой отрезков $1/a' - 1/a = 1/f'$, где f' - фокусное расстояние объектива, a и a' - передний и задний отрезки. Выразим $a = a'/V$ и определим a' :

$$a' = f'(1 - V).$$

Для случая нормального увеличения объектива можно написать $a'_0 = f'(1 - V_0)$. Отсюда величина изменения заднего отрезка для получения нормального увеличения равна

$$\Delta a' = a'_0 - a' = f'(V - V_0) = f'(V_0 + \Delta V - V_0) = f' \cdot \Delta V.$$

Итак, $\Delta a' = \Delta V \cdot f'$. (4)

Причем, если увеличение объектива необходимо уменьшить (по абсолютной величине), расстояние между объективом и шкалой также следует уменьшить, и наоборот. Отметим, что в рассматриваемой конструкции изменение расстояния между объективом и шкалой осуществляется подвижкой объектива.

Определим теперь величину смещения всего микроскопа во фланце 26 по отношению к его первоначальной установке для восстановления резкости изображения штрихов лимба. Для этого воспользуемся формулой 26 на стр.65 монографии [1], связывающей смещение линзы (объектива) с расфокусировкой изображения при неизменном положении предмета:

$$\Delta l = -(1 - V_0 V) \Delta z_{\text{л}}. \quad (5)$$

Здесь Δl - величина смещения плоскости изображения, совместно с плоскостью шкалы, равная искомой подвижке микроскопа, которую обозначим dz ; вместе с тем $\Delta z_{\text{л}} = \Delta a' - \Delta l$ - итоговое смещение объектива относительно неподвижного лимба; $V = V_0 + \Delta V$ - увеличение объектива до сдвига его на величину $\Delta a'$.

Произведя подстановку в формуле (5), окончательно получим

$$dz = \Delta a' (1 - 1/V_0^2 + V_0 \Delta V) \approx \Delta a' (1 - 1/V_0^2). \quad (6)$$

Таким образом, формулы (4) и (6) позволяют при юстировке нормального увеличения рассчитать подвижки как объектива, так и всего микроскопа, причем сдвиг микроскопа противоположен сдвигу объектива.

Определим допустимую погрешность продольной установки объектива при устранении рена. По техническим условиям допуск на отклонение нормального увеличения равен половине толщины штриха шкалы, что составляет 1/10 ее деления, то есть

$$\Delta V_{\text{доп}}/V_0 = 1/600, \text{ откуда } \Delta V_{\text{доп}} = V_0 \cdot 1/600 = 1/300.$$

Подставляя в формулу (4) значения $\Delta V = \Delta V_{\text{доп}}$ и $f' = 12,07 \text{ мм}$, получим

$$\Delta a'_{\text{доп}} = \Delta V_{\text{доп}} \cdot f' = 1/300 \cdot 12,07 \approx 0,04 \text{ мм}.$$

При шаге резьбы на оправе объектива $t = 0,5 \text{ мм}$ это перемещение соответствует углу поворота

$$\varphi_{\text{доп}} = 2\pi/t \cdot \Delta a'_{\text{доп}} = 360^\circ/0,5 \cdot 0,04 \approx 30^\circ.$$

Учитывая то обстоятельство, что погрешность фокусировки вследствие нетелецентрического хода лучей приводит к погрешности масштаба изображения, подсчитаем по формуле (6) требующуюся точность сдвига микроскопа

$$(dz_{\text{микр}})_{\text{доп}} = \Delta a'_{\text{доп}} \cdot (1 - 1/V_0^2) = 0,03 \text{ мм}.$$

5.3. Параллакс

Определим теперь точность установки (фокусировки) отсчетного микроскопа на плоскость делений лимба из условия, что погрешность отсчета вследствие параллакса не должна превышать толщины штриха, что соответствует 1/5 деления минутной шкалы или в линейной мере 0,005 мм в фокальной плоскости окуляра, то есть

$$P_{\text{доп}} = 0,005 \text{ мм}.$$

Из рис. 6.7, где показана схема возникновения линейного параллакса P при несовпадении плоскости изображения с плоскостью шкалы на величину $z_{\text{ок}}$, получаем:

$$(z_{\text{ок}})_{\text{доп}} = P_{\text{доп}} / \arctg \sigma'_A \approx P_{\text{доп}} \cdot V_{\text{доп}} / \sigma_A = 0,005 \cdot 2 / 0,15 = 0,067 \text{ мм}.$$

При фокусировке микроскопа по признаку одновременной резкости изображений штрихов лимба и шкалы величина несовпадения их плоскостей перед окуляром может составить

$$(z_{\text{ок}})_{\text{резк}} = f_{\text{ок}}^2 \cdot A_{\text{резк}} / 1000 = f_{\text{ок}}^2 \cdot 0,8 \text{ дптр} / 1000 \cdot D^2 = 0,046 \text{ мм}.$$

То есть $(z_{\text{ок}})_{\text{резк}} < (z_{\text{ок}})_{\text{доп}}$, а потому фокусировка микроскопа по признаку одновременной резкости штрихов лимба и шкалы гарантирует устранение параллакса, недопустимого по ТУ.

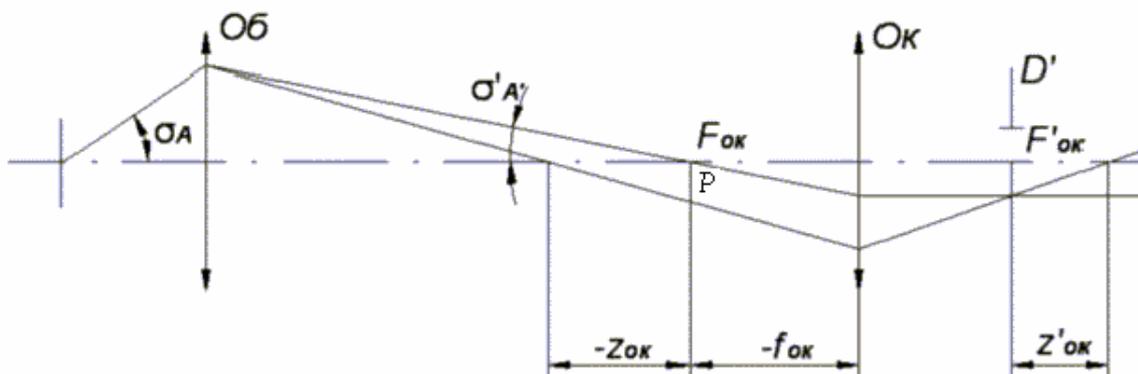


Рис. 6.7. Схема возникновения линейного параллакса Р

Необходимую точность установки (фокусировки) микроскопа при устранении параллакса можно определить, пользуясь соотношением

$dz'/dz = Q$, где Q – продольное увеличение, откуда

$$dz_{\text{микр}} = dz'/Q = (z_{\text{ок}})_{\text{резк}} / V^2 \approx 0,012 \text{ мм.}$$

Так как допустимая погрешность установки микроскопа из условия устранения параллакса $dz_{\text{микр.пар}}$ меньше аналогичной погрешности установки, рассчитанной из условия ограничения погрешности масштаба изображения $(dz_{\text{микр.масш}})_{\text{доп}}$, то первая и принимается в качестве окончательного допуска на фокусировку микроскопа. Таким образом, $(dz_{\text{микр}})_{\text{доп}} = 0,012 \text{ мм.}$

6. Описание конструкции контрольно-юстировочного приспособления

Приспособление предназначено для контроля центровки лимба, а также проверки основной погрешности измерения угломерной головки. Оно состоит из массивного основания-швеллера, на котором с помощью трех вертикальных колонок установлены:

- 1) микроскоп отсчетный МИР-2 в поворотном кронштейне;
- 2) переходная втулка-гайка для закрепления юстируемой (поверяемой) угломерной головки и кронштейн с двумя гнездами для патронов подсветки;
- 3) автоколлимационная трубка типа ИК (коленчатая) в кронштейне, позволяющем производить регулировку ее положения – наклоны в двух взаимоперпендикулярных плоскостях с помощью винтов с накаткой.

Кроме того, в состав приспособления входят **образцовая восьмигранная призма** 2-го разряда (или 0 класса) по ГОСТ 2875-66 в регулируемой оправе, закрепляемой на валу 13 (см. рис.6.1) угломерной головки перед ее поверкой, а также сдвоенный провод подсветки с лампами 6В.

Отсчетный микроскоп МИР-2 состоит из микрообъектива ОМ-12 с линейным увеличением $V_{об} = -3,7^{\times}$ и числовой апертурой $A=0,11$, а также окуляра Гюйгенса М7 с видимым увеличением $\Gamma_{ок} = 7^{\times}$, содержащего сетку в виде перекрестия и шкалы. При длине тубуса микроскопа 160 мм **цена одного наименьшего деления шкалы сетки составляет 0,045 мм** (в предметной плоскости). Отсчетный микроскоп предназначен для измерения величины биения вспомогательной центрировочной окружности или концов градусных штрихов при наличии эксцентриситета лимба. Микроскоп может фокусироваться на плоскость штрихов лимба перемещением всего тубуса в кронштейне от руки при отпущенном винте с накаткой и им же фиксироваться. После измерения величины биения лимба, перед установкой на вал 13 оправы с образцовой призмой микроскоп отводится в сторону поворотом кронштейна на 180° , где фиксируется винтом с накаткой.

Автоколлимационная трубка ИК имеет увеличение 10^{\times} , а цена наименьшего деления ее шкалы при автоколлимационных измерениях составляет $1'$ угловую минуту. Трубка служит для фиксации граней образцовой призмы при повороте ее вместе с валом угломерной головки. Кроме того, она используется при контроле и устранении коллимационной погрешности призмы.

Грани образцовой призмы пронумерованы от «1» до «8». В прилагаемом аттестате (паспорте) приводятся действительные значения центральных углов между нормалью к 1-й грани и нормалью к каждой последующей грани – от 0° до 360° через 45° . То есть образцовая призма совместно с автоколлимационной трубкой используется в установке для задания образцовых (точных) значений углов поворота вала угломерной головки при ее поверке.

Для регулировки призмы относительно оси вращения вала угломерной головки предусмотрены 3 винта наклона площадки с призмой, один из которых совпадает с гранью «1».

7. Порядок выполнения работы

7.1. Определение величины эксцентриситета лимба и направления его вектора

1. Включают подсветку лимба.
2. Поворотом кронштейна с микроскопом МИР-2 устанавливают последний точно над отверстием в крышке и наблюдают изображение участка центрировочной окружности или градусных штрихов лимба. Вращением глазной линзы окуляра добиваются резкого изображения штрихов шкалы окуляра, а продольным смещением всего тубуса микроскопа - резкости изображения центрировочной окружности лимба и отсутствия параллакса между ней и штрихами шкалы. Кроме того,

разворотом самого окуляра со шкалой устанавливают ее штрихи параллельно касательной к центрировочной окружности в средней ее точке.

3. Вращением маховичка 21 поворачивают лимб угломерной головки и следят в микроскоп за перемещением линии центрировочной окружности. Отмечают по окулярной шкале (с точностью до десятых долей ее деления) два крайних положения наблюдаемой линии, а также оцифровку градусных штрихов лимба, соответствующих этим крайним точкам, т.е. точкам «зависания» или «возврата» перемещающейся в поле зрения линии.
4. Рассчитывают величину эксцентриситета лимба по формуле:
$$\Delta e = \delta / 2 = 0,5(A_2 - A_1) \cdot c \text{ (мм)},$$
где δ – величина биения линии окружности, A_2 и A_1 – отсчеты по шкале окуляра, соответствующие крайним положениям этой линии, установленные с точностью до десятых долей деления; c – цена одного (наименьшего) деления шкалы окуляра.
5. Устанавливают направление вектора эксцентриситета $\overline{\Delta e}$, полагая, что начало вектора совпадает с центром (осью) вращения лимба, а конец указывает на геометрический центр лимба и на штрих градусной шкалы искомой оцифровки.

7.2. Проверка основной погрешности измерения угломерной головки

1. Поворотом кронштейна на 180° отводят отсчетный микроскоп в сторону.
2. Устанавливают один из патронов подсветки под входным окном отсчетного микроскопа угломерной головки, а другой - на окуляре автоколлимационной (АК) трубки контрольного приспособления.
3. Вращением маховичка 21 устанавливают по шкале микроскопа нулевой отсчет, т.е. « $0^\circ 00'$ » и фиксируют это положение лимба, а следовательно и вала 13 с помощью гайки 22.
4. Устанавливают на валу 13 оправу с образцовой призмой таким образом, чтобы в поле зрения АК трубки попало автоколлимационное изображение марки от грани «1». Располагают перекрестие марки как можно ближе к центру перекрестия сетки АК трубки, имеющей вид двух скрещенных шкал. В этом положении оправу призмы фиксируют винтом.
5. С помощью регулировочных винтов наклона АК трубки в двух плоскостях приводят автоколлимационное изображение марки от грани «1» к центру перекрестия сетки АК трубки.
6. Выявляют и при необходимости устраняют неперпендикулярность горизонтального штриха сетки АК трубки к оси поворота образцовой

призмы. Для этого, освободив гайку 22, вращением маховичка 21 вперед-назад в пределах малого угла перемещают автоколлимационное изображение марки (в пределах поля зрения) и следят за отклонением от параллельности траектории перемещения перекрестия по отношению к горизонтальному штриху сетки АК трубки. Погрешность устраняют небольшим поворотом самой АК трубки вокруг продольной оси, предварительно отпустив винт хомутового зажима. Допустимое отклонение половина деления на длине штриха.

7. Выявляют и при необходимости устраняют коллимационную погрешность – непараллельность граней призмы оси вращения. Для этого маховичком 21 разворачивают призму на пол-оборота до появления в поле зрения автоколлимационного изображения марки от грани «5». Отклонение изображения перекрестия марки в вертикальной плоскости характеризует в угловой мере и в удвоенном масштабе составляющую коллимационной погрешности в диаметральном сечении призмы, перпендикулярном граням «1» - «5». При этом полагают, что призма не имеет пирамидальности. Вращением регулировочного винта оправы, расположенного под гранью «1», придерживая рукой оправу призмы и наблюдая в окуляр АК трубки, перемещают перекрестие марки к началу отсчета ровно на половину величины отклонения в вертикальной плоскости. Запоминают вертикальную координату перекрестия марки по шкале сетки и после поворота призмы на 180° оценивают остаточную величину коллимационной погрешности. Допустимое смещение – одно деление (по вертикальной шкале). Аналогично выявляют и устраняют перпендикулярную составляющую коллимационной погрешности призмы – в сечении, перпендикулярном граням «3» - «7». При этом наклон оправы с призмой целесообразнее осуществлять одновременным вращением пары регулировочных винтов, расположенных по линии «3» - «7» но в противоположном направлении.
8. С целью упрощения обработки результатов измерения производят согласование нулевых отсчетов по шкале микроскопа угломерной головки и по шкале АК трубки. Для этого после установки по шкале микроскопа отсчета ровно « $0^\circ 00'$ » регулировкой АК трубки устанавливают точно на «нуль» автоколлимационное изображение марки от грани 1 образцовой призмы, совмещая вертикальный штрих перекрестия марки с вертикальным штрихом сетки АК трубки.
9. Выполняют непосредственно поверку основной погрешности угломерной головки путем сравнения измеренных по лимбу с помощью отсчетного микроскопа углов поворота выходного вала 13 с углами образцовой призмы. С помощью маховичка 21 поворачивают вал 13 с образцовой призмой, последовательно устанавливая перед объективом АК трубки вторую, третью и последующие грани призмы и производя точное совмещение вертикального штриха перекрестия

автоколлимационного изображения марки с нулевой отметкой шкалы, т.е. с вертикальным штрихом сетки. Всякий раз после поворота вала 13 на угол, задаваемый образцовой призмой, по шкале отсчетного микроскопа угломерной головки определяют измеренное значение этого угла. Полученные данные заносят в таблицу 1, где φ_i действ. - действительное значение центрального угла, заключенного между нормалью к 1-ой грани и нормалью к i -ой грани (по паспорту). Цикл измерений считается законченным, если в результате полного оборота вала 13 с образцовой призмой сохранится первоначальное (нулевое) согласование отсчетов по шкалам АК трубки и микроскопа.

ПРИМЕЧАНИЕ. Отсчеты по шкале микроскопа следует производить с точностью до десятых долей угловой минуты.

10. По результатам проведенных измерений строят график зависимости накопленной погрешности угломерной головки δ_Σ от угла поворота вала $\varphi_{\text{действ.}}$. В случае периодического закона изменения погрешности определяют амплитудное ее значение, начальную фазу θ_0 и рассчитывают модуль вектора Δe эксцентриситета, приняв $R_{\text{ш}} = 40$ мм. Полученные данные сопоставляют с аналогичными величинами, определенными в первой части работы.

Таблица 1

№ № п/п	Порядковый номер грани i	φ_i действ.	A_i отсчет по микроскопу	$\varphi_{i \text{ изм}} = A_i - A_1$	$\delta_\Sigma = \varphi_{i \text{ изм}} - \varphi_i$ действ.
1	1	0° 00'			
2	2	45° 00'			
3	3	90° 00'			
4	4	135° 00'			
5	5	180° 00'			
6	6	225° 00'			
7	7	270° 00'			
8	8	315° 00'			
9	1	360° 00'			

8. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Перечислите все первичные погрешности изготовления основных схемных элементов, а также сборки угломерной головки, приводящие к погрешности измерения угла поворота вала.
2. Если руководствоваться критериями оценки технологичности конструкции с точки зрения ее юстировки [3], то на какой недостаток оптической схемы можно указать в первую очередь?

3. Что такое **рен** шкалы (отсчетного микроскопа) и какое отношение он имеет к точности измерений?
4. Какова функция АК трубки в установке для контроля основной погрешности угломерной головки?
5. Рассчитайте допуск на децентрировку лимба круглого стола СТ-9, если диаметр его лимба $\varnothing_{\text{лимба}} = 200$ мм, а допустимая составляющая общей погрешности из-за эксцентриситета $\Delta\varphi_{\Delta e} = 10''$ угловых секунд. Оптическая отсчетная система стола аналогична оптической системе угломерной головки.
6. С какой целью во многих углоизмерительных приборах устанавливают два отсчетных микроскопа?
7. Обоснуйте допуск на эксцентриситет лимба теодолита типа Т2, если средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных углов составляет $2''$ угловые секунды, а рабочий диаметр горизонтального круга равен $\varnothing_{\text{лимба}} = 90$ мм.
8. Почему при измерении величины эксцентриситета лимба, а также при анализе основной погрешности угломерной головки определяют начальную фазу эксцентриситета?
9. В каких случаях рекомендуется фокусировку отсчетного микроскопа, выполненную по признаку одновременной резкости штрихов основной шкалы и шкалы-нониуса (индекса), уточнять, используя метод параллакса?

9. Литература

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.
2. Латыев С.М. Компенсация погрешностей в оптических приборах.- Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.
3. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие.- СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 95 с.
4. Захаров А.И. Новые теодолиты и оптические дальномеры. Изд.2, перераб. и доп.М., «Недра», 1978. 261 с.

Лабораторная работа №7

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ТИПА УИМ-21, УИМ-23 И ДИП-6 НА ПРИМЕРЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА УИМ-21

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться по чертежам, данному руководству, а также техническому описанию и инструкции по эксплуатации с устройством микроскопа УИМ-21 (УИМ-23) и техническим требованиям к нему.
2. Ознакомиться с методикой регулировки механических систем прибора, методикой поверки технических требований, а также средствами поверки.
3. По указанию руководителя занятий выполнить поверку отдельных технических требований в соответствии с методикой, а в некоторых случаях, при наличии расстройств систем прибора, и регулировку.
4. Установить и проанализировать возможные причины выявленных расстройств прибора, указать способы их устранения рассчитать требуемые величины регулировочных подвижек и необходимую точность их выполнения.

Для зачета предъявить результаты поверки, микроскоп, отрегулированный по тому или иному пункту технических условий, и отчет с описанием выполненной работы и полученными результатами, анализом возможных причин выявленных расстройств прибора и необходимыми расчетами.

2. Комплект установки

1. Универсальный измерительный микроскоп УИМ-21 (УИМ-23)..... 1 шт.
2. Трубка оптиметра (ГОСТ 5405-64) со сферическим наконечником 1 шт.
3. Индикатор многооборотный типа МИГ или головка измерительная пружинная с ценой деления 0,001 мм типа ИПМ (ГОСТ 14712-69) 1 шт.
4. Специальная лекальная линейка с отклонением от плоскостности не более 0,25 мкм на длине 220 мм в регулируемой оправе 1 шт.

5. Угольник типа УШ-0-160, класс точности 0 (ГОСТ 3749-65)..... 1 шт.
6. Оптический квадрант КО-10 на специальном кронштейне..... 1 шт.
7. Контрольный валик с лезвием ножа в плоскости центров 1 шт.
8. Лекальная линейка четырехгранная типа ЛЧ, класс точности 0, размеры 200x20 мм (ГОСТ 8026-64)..... 1 шт.
9. Уровень брусковый с ценой деления ампулы 0,05 мм/м (ГОСТ 9392-60) 1 шт.
10. Плоская стеклянная пластина с двумя взаимно перпендикулярными линиями (отклонение угла 90° не более 4") 1 шт.
11. Стеклянная пластина с перекрестием 1 шт.
12. Плоскопараллельная пластина $H=24$ мм ($H=12$ мм) 1 шт.
13. Комплект специальных ключей (6 шт.) 1 шт.
14. Техническое описание и инструкция по эксплуатации
15. Чертежи общего вида и отдельных узлов микроскопа

3. Технические данные микроскопа

Пределы измерения длин, мм

В продольном направлении по координате X 0-200

В поперечном направлении по координате Y 0-100

Пределы измерения углов 0-360°

Цена деления:

линейных шкал, мм 1

шкалы угломерной головки 1°

шкал спирального окулярного (УИМ-21) и оптического (УИМ-23) микрометров, мм 0,001

минутной шкалы угломерной головки 1'

Увеличение визирного микроскопа 10^{\times} , 15^{\times} , 30^{\times} , 50^{\times}

Увеличение отсчетного устройства для линейных измерений 60^{\times}

Пределы допускаемой основной погрешности прибора

при измерении образцовой стеклянной шкалы 2-го разряда, мкм

при введении поправки по аттестату шкалы $\pm (1 + \frac{L}{100})$,

без учета поправок по аттестату шкалы $\pm (1,4 + \frac{L}{80})$,

где L – номинальная измеряемая величина в миллиметрах.

Остальные технические характеристики и нормы точности универсальных измерительных микроскопов приведены в технических описаниях, а также в [1].

4. Описание конструкции

Микроскоп состоит из следующих основных частей: основания, кареток продольного и поперечного перемещения, визирной и отсчетной систем, колонки и осветительного устройства.

В отличие от микроскопа УИМ-21 в микроскопе УИМ-23, а также в приборе ДИП-6 визирование на измеряемый объект и снятие отсчетов по шкалам производится на экранах проекционных устройств (в ДИП-6 – на цифровом индикаторе), удобно расположенных перед наблюдателем и позволяющих ему работать сидя, что снижает утомляемость и повышает производительность труда при измерениях. Это обусловило различие в конструкциях таких основных частей микроскопов УИМ-21 и УИМ-23, как основание прибора, каретка поперечного перемещения, визирная и отсчетные системы, осветительное устройство. Однако оба этих типа микроскопа в конструктивном плане объединяет сходство компоновок основных частей приборов, тождественность принципиальных схем и общность основных элементов направляющих обеих кареток, заимствование из прибора УИМ-21 большого ряда ответственных узлов и деталей в прибор УИМ-23 и ДИП-6, одинаковые точностные требования к механическим системам приборов.

Основание микроскопа представляет собой массивную чугунную отливку, в которой на крупногабаритном фрезерном и расточном станках обработаны базы – плоскости платиков под установку направляющих, корпусов микроскопов (УИМ-21), узлов проекционных отсчетных систем (УИМ-23), кронштейнов опорных шарикоподшипников и других узлов, а также цилиндрические отверстия под оси шарикоподшипников.

По призматическим, прямоугольной формы направляющим, установленным на основании, на прецизионных шарикоподшипниках перемещается каретка поперечного хода (Y), несущая на себе колонку с визирной системой и центральное осветительное устройство. В конструкции каретки продольного перемещения (X), в отличие от предыдущей применена инверсия, то есть призматические направляющие перенесены на каретку, а опорные и направляющие прецизионные шарикоподшипники – на основание. Продольная каретка по всей своей длине имеет желоб - цилиндрическую направляющую, на которой устанавливаются центровые бабки. На опорные поверхности, расположенные в средней части продольной каретки, помещают плоский предметный стол, круглый стол, планки для ножей и другие приспособления.

В качестве рабочих мер микроскопа применяются точные стеклянные штриховые шкалы, а в приборе ДИП-6 дифракционные решетки, размещенные в каретках. Грубое перемещение кареток осуществляется от руки, а точное при помощи маховичков при зажатых винтах (рукоятках)

тормозных устройств. В приборе УИМ-21 изображение штрихов каждой миллиметровой шкалы проецируется в фокальную плоскость окуляра спирального микрометра ОМС-2(3), где расположены шкалы десятых и тысячных долей миллиметра, а в приборе УИМ-23 изображение миллиметровых шкал и шкал оптических микрометров проецируется на экран.

Визирная система прибора представляет собой микроскоп с окулярной угломерной головкой в УИМ-21 и со сменными насадками – проекционным экраном и бинокляром - в УИМ-23. Визирная система вместе с несущим её кронштейном имеет возможность перемещаться по высоте с помощью маховика и реечной передачи по направляющим типа "ласточкина хвоста" колонки.

Колонка вместе с визирной и осветительной системой может наклоняться в обе стороны от вертикального положения на угол $\pm 12,5^\circ$.

5. Назначение, принцип работы и обоснование технических требований к универсальному измерительному микроскопу

Универсальный измерительный микроскоп предназначен для измерения линейных и угловых размеров различных изделий в прямоугольных и полярных координатах. В частности, на микроскопе можно измерять всевозможные резьбовые изделия, режущий инструмент, профильные шаблоны и лекала, кулачки, конусы, метчики, резьбонарезные гребенки и др.

В основу принципа действия универсального измерительного микроскопа положен оптический визирный метод. В процессе измерения изображение контролируемого изделия наблюдается в поле зрения окулярной головки (экрана или биноклярной насадки). Совмещение изображения изделия с изображением штриховых линий сетки визирной системы осуществляется соответствующими перемещениями кареток. Величину перемещения кареток по координате X в продольном и по координате Y в поперечном направлениях определяют при помощи отсчетных микроскопов.

Одним из основных назначений микроскопа является измерение элементов резьбовых изделий – среднего диаметра d_2 , шага резьбы S и половины угла профиля резьбы $\alpha/2$. Причем, конструкцией прибора предусмотрены два метода измерения: метод теневого изображения (проекционный) и метод осевого сечения (с помощью ножей). При измерении проекционным методом для получения резкого изображения образующей профиля винтовой поверхности колонку визирной системы (главный микроскоп) наклоняют на средний угол подъема резьбы, который определяют по формуле

$$\omega = \arctg \frac{S}{\pi d_2} \approx 18,25 \frac{S}{d_2} \text{ (град.)}$$

При наводке микроскопа на противоположную сторону профиля резьбы при измерениях среднего диаметра и половины угла профиля колонку с главным микроскопом наклоняют на тот же угол ω , но в противоположную сторону.

Требования к точности и специфика измерения элементов резьбовых, а также других изделий машиностроения на универсальном измерительном микроскопе в основном и определяют большинство технических требований к микроскопу.

5.1. Прямолинейность движения кареток

Схема возникновения погрешностей измерения шага ΔS и среднего диаметра Δd_2 при наличии отклонений $\delta_{\text{прод.}}$ и $\delta_{\text{попер.}}$ от прямолинейности движения продольной и поперечной кареток представлена на рис.7.1.

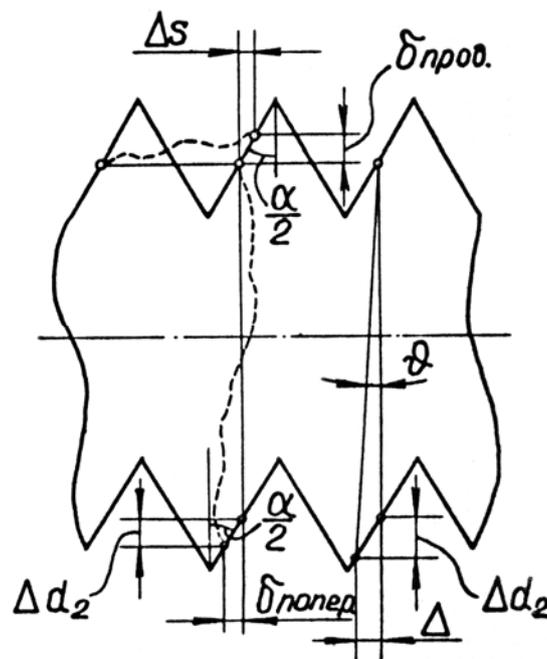


Рис. 7.1. Схема возникновения погрешностей измерения параметров резьбы

Непосредственно из схемы получаем:

$$\frac{\Delta S}{\delta_{\text{прод}}} = \text{tg} \frac{\alpha}{2} \quad \text{и} \quad \frac{\delta_{\text{попер}}}{\Delta d_2} = \text{tg} \frac{\alpha}{2},$$

откуда
$$\delta_{\text{прод}} = \frac{\Delta S}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad \text{и} \quad \delta_{\text{попер}} = \Delta d_2 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Если положить $\alpha = 60^\circ$, а $\Delta S = \Delta d_2 = 0,003$ мм, получим:

$$\delta_{\text{прод}} = 0,0052 \text{ мм}, \quad \text{а} \quad \delta_{\text{попер}} = 0,0017 \text{ мм}.$$

Непрямолинейность перемещения кареток приводит также к возникновению погрешностей при компарировании Δk из-за нарушения принципа Аббе для продольных измерений и в случае измерений высоких изделий:

$$\Delta k = A\varphi,$$

где $A = 80$ мм – вынос продольной шкалы, φ – непрямолинейность перемещения каретки в горизонтальной плоскости, в угловой мере.

Положив $\Delta k = 0,001$ мм, получим $\varphi = 2,5''$.

5.2. Взаимная перпендикулярность направлений движения кареток

Наличие отклонения ϑ от перпендикулярности направлений движения кареток (см. рис. 7.1) приводит к появлению погрешности измерения среднего диаметра резьбы Δd_2 .

Из рисунка определяем ϑ .

$$\vartheta \approx \frac{\Delta}{d_2}, \text{ где } \Delta = \Delta d_2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

таким образом, $\vartheta = \frac{\Delta d_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha/2}{d_2}$.

Если положить $\alpha = 60^\circ$, $\Delta d_2 = 0,004$ мм, а $d_{2\max} = 100$ мм, получим $\vartheta \approx 5''$.

5.3. Совмещение оси центров с осью наклона колонки

Наличие отклонения a вызывает смещение изображения объекта величиной Δ (рис.7.2) при наклоне колонки визирного микроскопа в обе стороны на угол $12,5^\circ$ относительно вертикального положения.

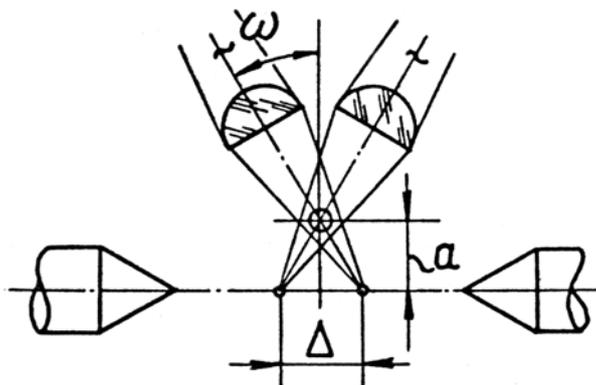


Рис. 7.2. Схема возникновения погрешности измерения при непересечении оси центров с осью наклона колонки

Это смещение в свою очередь приводит к возникновению погрешности измерения среднего диаметра резьбы Δd_2 по схеме на рис.7.1:

$$\Delta d_2 = \frac{\Delta}{\operatorname{tg} \alpha/2}, \quad \text{где } \Delta = 2a \cdot \operatorname{tg} \omega,$$

откуда
$$a = \frac{\Delta}{2 \operatorname{tg} \omega} = \frac{\Delta d_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha/2}{2 \operatorname{tg} \omega}.$$

Если положить $\alpha = 60^\circ$, $\Delta d_2 = 0,004$ мм, а $\omega_{\max} = 12,5^\circ$, получим $a \approx 0,005$ мм.

При этом $\frac{\Delta}{2} = a \cdot \operatorname{tg} \omega = 0,001$ мм.

5.4. Совмещение визирной оси микроскопа с осью наклона колонки

Наличие отклонения b (рис.7.3), хотя и вызывает смещение изображения объекта величиной $\Delta = b \frac{1 - \cos \omega}{\cos \omega}$ при наклоне колонки на угол ω от вертикального положения, однако, непосредственно не приводит к погрешности измерений среднего диаметра резьбы, вследствие чётности функции $\Delta \omega$. Тем не менее, на точности измерения отклонение b может сказаться косвенно через погрешность при визировании на границу профиля из-за недостаточной резкости изображения вследствие "ухода" предметной точки микроскопа из диаметрального сечения.

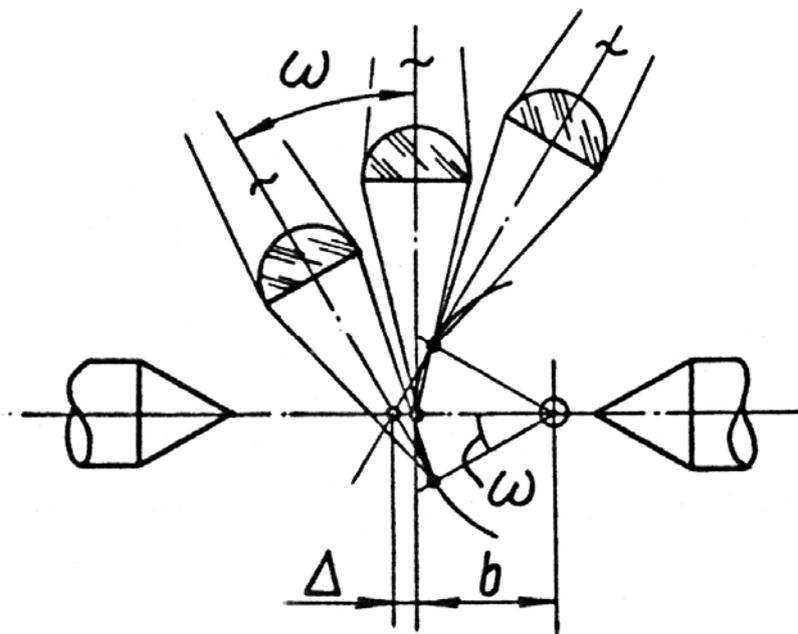


Рис.7.3. Схема возникновения погрешности измерения при непересечении визирной оси микроскопа с осью наклона колонки

5.5. Перпендикулярность направления перемещения главного микроскопа (при тонкой фокусировке) к плоскости опорных платиков продольной каретки

Наличие отклонения β от указанной перпендикулярности приводит к погрешности измерения детали в случае использования между отсчетами по шкалам X и Y вертикальной наводкой, например, при контроле ступенчатых деталей. Величина погрешности может составить:

$$\delta_{\max} = h_{\max} \cdot \operatorname{tg} \beta \approx h_{\max} \cdot \beta.$$

Если положить $h_{\max} = 8$ мм – предел точного перемещения визирного микроскопа (по координате Z) для УИМ-21, а $\delta_{\max} = 0,005$ мм, получим $\beta = 2'$.

6. Основные технические требования к универсальному измерительному микроскопу

Из перечня технических требований, включающего более пятидесяти пунктов, выделим здесь лишь основные, притом только те, которые характеризуют точность функционирования механических систем прибора.

1. Отклонения на длине 200 мм от прямолинейности движения каретки продольного перемещения не должны быть более 5 мкм ($10''$ в угловой мере) в вертикальной плоскости, и 2 мкм ($8''$) – в горизонтальной плоскости.

2. Отклонения на длине 100 мм от прямолинейности движения каретки поперечного перемещения не должны быть более 3 мкм ($10''$ в угловой мере) в вертикальной плоскости, и 1 мкм ($8''$) – в горизонтальной плоскости.

3. Непараллельность каждой опорной поверхности каретки продольного перемещения направлению ее движения на длине 200 мм не должна быть более 10 мкм, при этом взаимная непараллельность опорных поверхностей допускается не более 5 мкм.

4. Непараллельность опорных поверхностей каретки продольного перемещения (в любом сечении) направлению движения каретки поперечного перемещения на длине 100 мм не должна быть более 5 мкм.

5. Отклонение от взаимной перпендикулярности направлений движения кареток продольного и поперечного перемещения на длине 200 мм не должно быть более 10 мкм.

6. Отклонение на длине 120 мм от прямолинейности в двух взаимно перпендикулярных направлениях движения визирной системы по направляющим колонки относительно опорных поверхностей продольной каретки не должно быть более 18 мкм.

7. Пределы углов наклона колонки в обе стороны от вертикального положения должны быть не менее $12^{\circ}30'$, при этом показания шкалы колонки должны соответствовать действительным значениям углов с точностью $\pm 5'$.

8. Смещение изображения при наклоне колонки с визирной системой на $12^{\circ}30'$ в обе стороны от вертикального положения не должно превышать 5 мкм.

9. Смещение изображения при изменении точной фокусировки микроскопа визирной системы должно быть не более 5 мкм для прибора УИМ-21 и не более 3 мкм для прибора УИМ-23. Пределы точного перемещения визирного микроскопа должны составлять соответственно ± 4 мм и ± 2 мм.

7. Порядок выполнения сборки и регулировки универсального измерительного микроскопа

Сборка микроскопа разделяется на предварительную и окончательную. Предварительная сборка включает сборку основания, кареток, колонки с кронштейном, механизмов наклона колонки и тонкого перемещения кареток, а также других механических систем. Сюда же относят и сборку всех оптических узлов. Окончательная сборка в свою очередь разделяется на сборку и регулировку механических систем прибора и на юстировку оптических систем в соответствии с требованиями технических условий.

В данной лабораторной работе рассматриваются лишь сборка и регулировка механических систем универсального измерительного микроскопа УИМ-21. Изложенная методика целиком приемлема и для сборки приборов УИМ-23 и ДИП-6 с несущественными поправками на некоторые непринципиальные различия в конструкции механических систем.

8. Предварительная сборка

8.1. Сборка основания с направляющими

Задача сборки – установить на основании 1 направляющие 2, 3, 4 и 5 (рис.7.4) таким образом, чтобы обеспечить строгую параллельность, во-первых, верхних граней всех направляющих, во-вторых, боковых рабочих граней направляющих 2 и 3, в-третьих, боковых граней этих направляющих по отношению к осям отверстий $\text{Ø}17H7$ в основании под оси опорных подшипников 6 и 7. Цель сборки – обеспечить прямолинейность движения поперечной каретки и взаимную перпендикулярность ходов.

Неплоскостность рабочих поверхностей призматических направляющих допускается до 0,25 мкм ($N=1$) при шероховатости обработки, соответствующей $R_z = 0,08$ мкм ($\sqrt{13}$). Допустимая непараллельность верхней рабочей и нижней базовой плоскостей направляющих 1 мкм. Взаимная непараллельность осей расточек $\text{Ø}17H7$ в основании 5'.

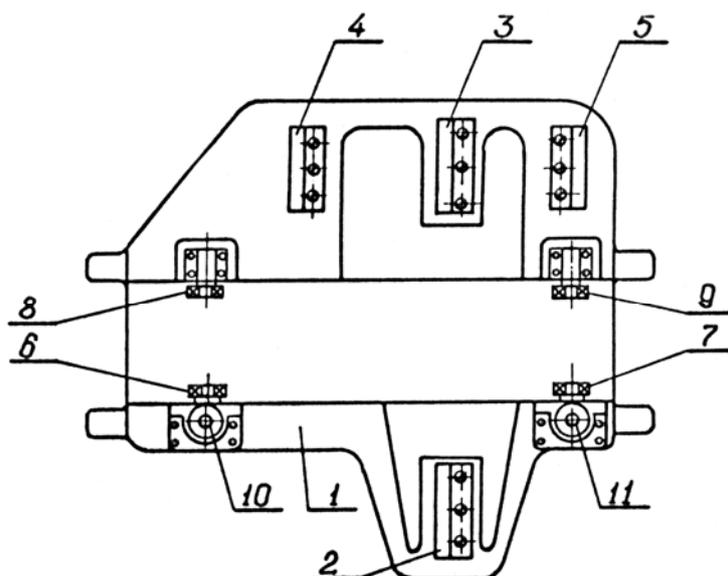


Рис. 7.4. Основание прибора со схемой расположения на нём призматических направляющих 2-5, а также опорных 6-9 и направляющих 10-11 шарикоподшипников

Перед установкой направляющих с помощью брускового уровня контролируют взаимную параллельность платиков основания, отгоризонтировав само основание по платику под направляющую 2. Допустимое отклонение 10". Исправление производят шабрением.

Далее на основание устанавливают направляющую 2 так, чтобы ее боковая рабочая грань оказалась параллельной оси отверстия под подшипник 6. Для этой цели используют квадратные коллиматор и зрительную трубку, точную пентапризму на подставке, а также приспособление, состоящее из цилиндрического шлифованного пальца и перпендикулярной к его оси доведенной площадки. Палец приспособления вставляют в отверстие под ось подшипника 6 и закрепляют гайкой. С помощью струбцинок к площадке приспособления прижимают зрительную трубку, а к боковой рабочей грани направляющей 2 – коллиматор. Наблюдая в трубку через пентапризму, регулировкой направляющей добиваются совмещения перекрестий трубки и коллиматора. Тем самым обеспечивая параллельность боковой грани направляющей 2 и оси отверстия в основании с погрешностью не более 1'. Затем переставляют зрительную трубку на направляющую 3 и разворотом последней добиваются параллельности боковых рабочих граней направляющих 2 и 3 с погрешностью не более 20". Направляющие 4 и 5 являются лишь опорными и установки в горизонтальной плоскости не требуют. Все направляющие после закрепления проверяются по пробному стеклу на отсутствие деформаций.

Через отверстия $\text{Ø}17H7$ в основании с помощью вспомогательного валика центрируют кронштейны подшипников 8 и 9, чем обеспечивают

параллельность осей их вращения осям вращения подшипников 6 и 7. Контролируя индикатором на стойке, все подшипники 6, 7, 8 и 9 разворотом эксцентриковых осей устанавливают в среднее положение по высоте.

8.2. Сборка поперечной каретки

Задача сборки – установить оси вращения трех опорных подшипников 1, 2 и 3 (рис.7.5) так, чтобы обеспечить строгую параллельность проекций этих осей на горизонтальную плоскость в рабочем положении каретки. Это необходимо для того, чтобы плоскости вращения всех опорных подшипников оказались строго параллельными направлению движения каретки 4, обеспечивая прямолинейность ее хода. В противном случае, при наличии трения скольжения между подшипником и направляющей, возникает поперечная сила, которая стремится увести каретку в перпендикулярном к движению направлении и при реверсе движения меняет знак.

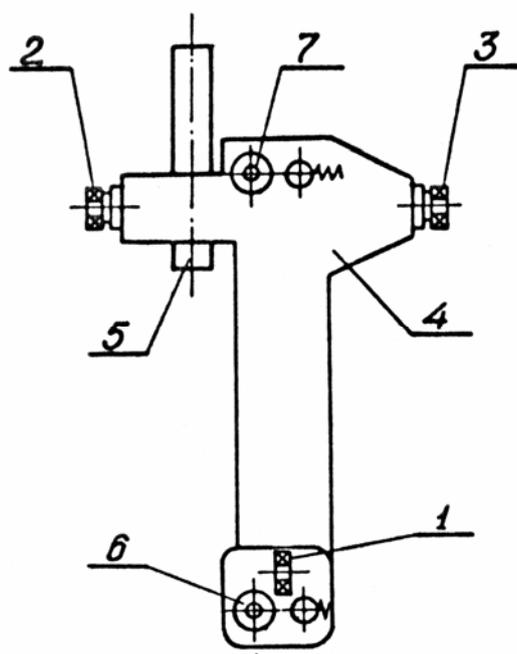


Рис.7.5. Поперечная каретка с тремя опорными 1-3 и двумя направляющими 6,7 шарикоподшипниками

Прецизионные шарикоподшипники, применяемые в микроскопе, имеют радиальное биение не более 0,001 мм, а осевой люфт – 0,04 мм. Внешняя поверхность большого кольца шарикоподшипника шлифована по сфере, а биение его беговой дорожки относительно торцев не более 0,002 мм. Таким образом, торец подшипника строго перпендикулярен оси его вращения. Это обстоятельство и используется при контроле.

Для выставления подшипников каретку укрепляют на регулируемой плите в вертикальном положении, так, чтобы оправа 5 шкалы и торцы

подшипников 1, 2 и 3 оказались горизонтальными. Приняв подшипник 1 за базовый, на торец его внешнего кольца устанавливают приспособление в виде стальной доведенной планки с выемкой, с уровнем и двумя плоскими прижимными пружинами. Контролируя положение торца подшипника 1 в двух взаимно перпендикулярных направлениях, регулировкой плиты, с закреплённой на ней кареткой, пузырек уровня приводят в нулевое положение.

Выставление осей вращения подшипников 2 и 3 производят разворотом клиновидных шайб, помещённых между фланцем оси и торцом внутреннего кольца. Требуемый наклон оси после затягивания гайки происходит вследствие небольшого зазора между осью и внутренним кольцом подшипника. Таким образом, с помощью приспособления добиваются параллельности торцов подшипников, а следовательно, и плоскостей их вращения, оси оправы 5 шкалы, то есть направлению движения каретки 4. Допустимая погрешность 30".

8.3. Сборка продольной каретки

Задача сборки – установить боковые рабочие грани направляющих 1 и 2 (рис.7.6) строго параллельно между собой, а также образующей цилиндрического желоба под центровые бабки.

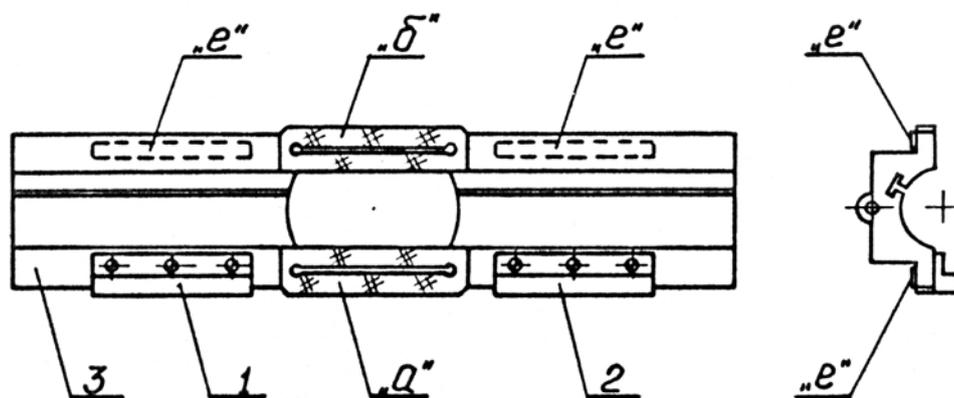


Рис. 7.6. Продольная каретка с двумя призматическими направляющими 1,2

Непрямолинейность образующей цилиндрической поверхности желоба Ø110H6 на всей длине допускается не более 0,005 мм, а конусность – 0,01 мм. Такой точности добиваются на специальных станках с помощью притиров. Плоскости четырех нижних опорных платиков "e" каретки 3, которые являются беговыми дорожками при ее перемещении, должны лежать в одной или параллельных плоскостях на расстоянии не более 0,05 мм. Непараллельность платиков друг относительно друга, а также относительно образующей желоба допускается не более 0,005 мм. Передняя "а" и задняя "б" верхние опорные поверхности каретки должны

быть параллельны образующей желоба и нижним платикам "е", а также должны лежать в одной плоскости с допустимым отклонением 0,005 мм.

Выставление направляющих 1 и 2 на каретке 3 производят с помощью приспособления, состоящего из специальной центральной бабки с кронштейном, в котором закреплена трубка оптиметра или измерительная головка с ценой деления 1 мкм. При перемещении приспособления по желобу наконечник измерительного устройства касается рабочей грани направляющей. Регулировкой каждой направляющей добиваются того, чтобы показания по шкале измерительного устройства при перемещении на 200 мм не изменялись более чем на 1 мкм. Таким образом, обе направляющие оказываются параллельны образующей желоба, а, следовательно, и между собой. После закрепления их проверяют по пробному стеклу на отсутствие деформаций.

8.4. Сборка колонки с кронштейном

Задача сборки – обеспечить прямолинейность перемещения кронштейна по колонке. Направляющие типа "ласточкин хвост" колонки и кронштейна предварительно фрезеруют на трехшпиндельных станках. Затем плоскости направляющих шабруют до 4-5 точек на 1 см², контролируя плоскостность по краске с помощью специальных контрольных плит.

Регулируют плавность зацепления триба с рейкой, при необходимости пришабривая платики нижней опорной плоскости рейки. Контролируют прямолинейность перемещения кронштейна с помощью индикатора с ценой деления 1 мкм в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Проверку осуществляют на приспособлении, которое состоит из плиты, где с помощью специальных прижимов закрепляют колонку, и двух вертикальных, развернутых друг относительно друга на 90°, регулируемых линеек, длиной 200 мм и отклонением от плоскостности не более 0,25 мкм. Перемещая кронштейн с индикатором, закрепленным в специальной оправе, регулировкой добиваются одинаковых показаний индикатора в крайних положениях кронштейна с точностью до 1 мкм. Отклонение стрелки индикатора в промежуточном положении характеризует непрямолинейность его перемещения в одной из плоскостей. Аналогично осуществляют контроль в другой плоскости. Одновременно проверяют увод кронштейна при зажиме стопорного винта, допустимое отклонение 0,01 мм.

В процессе предварительной сборки колонки осуществляют также совместную притирку цилиндрического хвостовика оправы шкалы 5 (см. рис.7.5) с отверстием в колонке до плавного вращения без заеданий и люфта.

По окончании предварительной сборки на направляющие основания прибора устанавливают сначала поперечную каретку в сборе с колонкой, механизмом наклона ее и кронштейном главного микроскопа, а затем продольную каретку, накладные кронштейны с направляющими

подшипниками 10 и 11 (см. рис.7.4) и механизмы тонкого перемещения кареток.

9. Окончательная сборка и регулировка

1. Горизонтируют основание прибора с помощью брускового уровня с ценой деления 10", устанавливаемого на одну из направляющих основания.
2. Устанавливают параллельность опорных поверхностей каретки продольного перемещения направлению движения каретки поперечного перемещения. Для контроля используют лекальную линейку ЛЧ, устанавливаемую на переднюю "а" и заднюю "б" (см. рис.7.6) поверхности каретки параллельно направлению движения каретки поперечного перемещения, а также контактную измерительную головку 1-ИПМ, закрепляемую с помощью переходной оправы в тубусе визирного микроскопа. Допустимое отклонение 5 мкм. Регулировку осуществляют подъемом или опусканием подшипников 8 и 9 (см. рис.7.4) на эксцентриковых осях. При этом следят за тем, чтобы на всем диапазоне перемещения продольной каретки оба подшипника 8 и 9 имели контакт с ее платиками "е" (см. рис.7.6) и поворачивались. Кроме того, при крайних (консольных) положениях каретки, когда на одну из пар опорных подшипников нагрузка уменьшается, усилия торможения подшипников 8 и 9, определяемые на ощупь, при движении каретки были примерно одинаковы. Перед выполнением этой операции с помощью винтов с красными головками на накладных кронштейнах отводят прижимные подшипники от направляющих продольной каретки.
3. Устанавливают перпендикулярность направления движения визирной системы по направляющим колонки относительно опорных поверхностей продольной каретки. Для контроля используют точный угольник УШ-0-160, закрепляемый на опорной поверхности каретки, и контактную измерительную головку 1-ИПМ. Проверку производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях перемещением кронштейна из нижнего положения, где измерительную головку приводят в контакт с поверхностью угольника и устанавливают нулевой отсчет по ее шкале, в верхнее при вертикальном положении колонки, которому соответствует нулевой отсчёт по шкале механизма наклона.

Одновременно контролируют и прямолинейность движения, для чего при подъеме кронштейна на высоте $h_1 = 10$ мм, $h_2 = 20$ мм, $h_3 = 30$ мм и $h_4 = 120$ мм снимают отсчеты по шкале измерительной головки. Отклонения на этих высотах не должны превышать соответственно 1,5 мкм, 3 мкм, 9 мкм и 18 мкм; при этом на промежуточных участках отклонения не должны выходить за пределы угла, образованного

перпендикуляром и линией, которую можно провести через точки, соответствующие допустимым отклонениям на вышеуказанных высотах.

Неперпендикулярность движения визирной системы вдоль хода продольной каретки устраняют наклоном самой колонки, поступательно перемещая эксцентриковый упор в механизме наклона. Неperпендикулярность вдоль хода поперечной каретки устраняют наклоном этой каретки совместно с колонкой за счет подъема или опускания на эксцентрик переднего опорного подшипника 1 (см. рис.7.5).

4. Регулируют прямолинейность движения поперечной каретки. Проверку производят в горизонтальной и вертикальной плоскостях с помощью специальной лекальной линейки в регулируемой оправе, в виде угольника, устанавливаемой на опорные поверхности продольной каретки, и трубки оптиметра, закрепляемой в тубусе визирной системы. Рабочую поверхность линейки выставляют "параллельно" направлению движения каретки, добиваясь с точностью 0,2 мкм одинаковых показаний по шкале трубки оптиметра в крайних точках. Медленно перемещают каретку в прямом и обратном направлениях и наблюдают за отклонением показания шкалы. Разность между наибольшим и наименьшим отсчетами по шкале соответствует наибольшему отклонению от прямолинейности движения каретки. Если это отклонение в горизонтальной плоскости превышает 1 мкм, то регулировку осуществляют небольшим поворотом каретки в горизонтальной плоскости за счет разворота в разные стороны эксцентриковых осей переднего 6 и заднего 7 (см. рис.7.5) направляющих подшипников. Этим добиваются параллельности плоскостей вращения опорных подшипников 1, 2, 3 каретки направлению ее движения, которое задается направляющими основания.

Допустимое отклонение в вертикальной плоскости 3 мкм.

Перед следующим этапом регулировки собирают и юстируют визирную и осветительную системы прибора, а также системы отсчетных микроскопов.

5. Устанавливают взаимную перпендикулярность направлений движения кареток. Для контроля используют стеклянную пластину с двумя взаимно перпендикулярными штриховыми линиями либо точный угольник, которые помещают на предметный стол.

Фокусируют микроскоп на плоскость штрихов пластины и визируют вертикальный штрих. Регулировкой предметного стола добиваются параллельности вертикального штриха пластины направлению движения поперечной каретки на длине 100 мм. Затем перемещением кареток визируют микроскопом левый край горизонтального штриха пластины и снимают отсчет по микроскопу поперечного хода. Переместив каретку со столом и пластиной в крайнее левое положение, снова визируют

микроскопом горизонтальный штрих и снимают второй отсчет. Разность отсчетов не должна превышать 10 мкм на длине 200 мм.

Регулировку направления движения продольной каретки осуществляют сдвигом одного из направляющих подшипников 10 или 11 (см. рис.7.4), расположенных в накладных кронштейнах, перпендикулярно ее ходу путем разворота эксцентриковой оси.

6. Совмещают ось центров с осью качания колонки. Проверку производят с помощью контрольного валика с лезвием ножа, устанавливаемого в центрах центровых бабок.

При вертикальном (нулевом) положении колонки фокусируют микроскоп на лезвие ножа и совмещают изображение вертикальной штриховой сетки угломерной головки, при нулевом положении угломерной шкалы, с изображением его края. Снимают отсчет a_0 по шкале продольного перемещения. Поочередно наклоняют колонку на угол $12,5^\circ$ влево и вправо от нулевого положения и наблюдают за взаимным расположением изображений края ножа и вертикальной линии штриховой сетки. Совмещают указанные изображения и вновь снимают отсчеты $a_{\text{лев}}$ и $a_{\text{пр}}$ по той же шкале. Величину несовмещения оси центров с осью качания колонки определяют по формуле:

$$\delta_z = \frac{a_{\text{лев}} - a_{\text{пр}}}{2} \cdot \operatorname{ctg} 12,5^\circ \approx 2,25(a_{\text{лев}} - a_{\text{пр}}).$$

Ошибку δ_z устраняют путем подъема или опускания продольной каретки на опорных подшипниках. Причем, если $\delta_z < 0$, каретку необходимо поднять, если же $\delta_z > 0$ – опустить.

Однако сдвиг изображения края ножа при наклоне колонки происходит и по причине несовмещения визирной оси главного микроскопа с осью качания колонки. Величину этой ошибки можно определить из следующей формулы:

$$\delta_x = \left(\frac{a_{\text{лев}} + a_{\text{пр}}}{2} - a_0 \right) \cdot \frac{\cos 12,5^\circ}{1 - \cos 12,5^\circ} \approx 41,2 \left(\frac{a_{\text{лев}} + a_{\text{пр}}}{2} - a_0 \right).$$

Существует простое правило выявления и устранения этих двух ошибок. Если изображение края ножа смещается в сторону наклона колонки, каретку необходимо поднять, и наоборот. Если сдвиг изображения происходит влево при наклоне колонки в обе стороны, тубус микроскопа нужно сдвинуть влево, и наоборот.

Ошибку δ_x окончательно устраняют лишь на последнем этапе регулировки прибора, вследствие возможного изменения положения визирной оси главного микроскопа в процессе выполнения предшествующих операций. Но поскольку смещение изображения при наклоне колонки есть результат одновременного действия двух ошибок, то для упрощения процесса контроля ошибки δ_z и проверки

возможности устранения смещения изображения в соответствии с требованиями ТУ (допуск 5 мкм), вначале устраняют ошибку δ_x . С целью ускорения процесса совмещения визирной оси микроскопа с осью качания колонки и, учитывая предварительный характер регулировки, используют не параллельный сдвиг тубуса визирного микроскопа, а его разворот относительно кронштейна с помощью предусмотренной конструкцией эксцентрика при трех отпущенных винтах.

Перед последующей операцией устранения ошибки δ_z еще раз уточняют установку основания прибора в горизонтальное положение (см. п.1, разд.9). Продольную каретку приводят в среднее положение и на ее опорную поверхность устанавливают брусковый уровень с двумя взаимно перпендикулярными ампулами (либо два уровня), ориентируя основную ампулу вдоль направления движения поперечной каретки. Пузырек этой ампулы должен занять нулевое положение. По смещению пузырька поперечной (вспомогательной) ампулы определяют, какую из сторон продольной каретки следует поднять (опустить). Подъем (опускание) каретки осуществляют поочередным вращением эксцентриковых осей соответствующей пары опорных подшипников 6,8 или 7,9 (см. рис.7.4). Причем, всякий раз, завершая очередной прием, возвращают пузырек основной ампулы в нулевое положение. Операцию продолжают до тех пор, пока пузырек поперечной ампулы не займет нулевое положение. После этого вновь контролируют смещение изображения при наклоне колонки в обе стороны. Если произведенной регулировки оказалось недостаточно, подъем (опускание) каретки осуществляют последовательно уже двумя парами подшипников, наблюдая за пузырьками уровня.

Устранив смещение изображения при наклоне колонки, приступают к фиксации положений эксцентриковых осей четырех подшипников. До завершения этой операции перемещать продольную каретку нельзя. Начинают фиксацию с оси подшипника, установленного непосредственно в основании, например, 6 (см. рис. 7.4). Для этого на левый край опорных поверхностей каретки поперек ее ходу устанавливают лекальную линейку ЛЧ и приводят в контакт с ее рабочей поверхностью, вблизи фиксируемого подшипника, наконечник измерительной головки, закрепленной в тубусе микроскопа. Производят затягивание гаек, следя за изменением показания измерительной головки. Допустимый увод 5 мкм. Затем линейку ЛЧ сдвигают на правый край опорных поверхностей каретки и измерительную головку устанавливают над подшипником 7. Фиксацию его осуществляют аналогично.

Перед закреплением осей подшипников 8 и 9 (см. рис. 7.4) контролируют снова параллельность опорных поверхностей продольной каретки направлению движения поперечной каретки, а также величины

усилий торможения этих подшипников при крайних положениях каретки (см. п.2, разд. 9). При необходимости вносят поправки. Затягивают гайки и следят, чтобы не было уводов.

7. Регулируют прямолинейность движения продольной каретки. С помощью винта с красной головкой отводят прижимной подшипник левого накладного кронштейна от призматической направляющей. В этом положении левая направляющая каретки прикасается к направляющему подшипнику 10 (см. рис. 7.4), только благодаря трению между кареткой и левой парой опорных подшипников 6 и 8. Не прикладывая к каретке поперечных усилий, плавным толчком (двумя руками), в свободном движении пускают каретку в одном, а затем в обратном направлении. По вращению подшипника судят о наличии контакта с ним направляющей.

В случае непараллельности плоскостей вращения подшипников 6 и 8 направлению движения каретки, возникает знакопеременная поперечная сила, которая при движении каретки в одном направлении стремится сильнее прижать направляющую к подшипнику 10, а при движении в обратном направлении приводит к появлению между ними зазора. Путем разворота на базе кронштейна подшипника 8 при трех опущенных винтах добиваются проворачивания подшипника 10 при перемещении каретки в обоих направлениях.

Затем прижимной подшипник приводят в рабочее положение. Такую же операцию повторяют и с правым кронштейном опорного подшипника 9.

Контролируют прямолинейность движения каретки в горизонтальной плоскости с помощью лекальной линейки в регулируемой оправе, устанавливаемой вдоль движения каретки, и трубки оптиметра, закрепляемой в тубусе микроскопа, по методике изложенной в п.4 разд.9. Если отклонение от прямолинейности в горизонтальной плоскости превышает 2 мкм на длине 200 мм, регулировку кронштейнов с подшипниками 8 и 9 уточняют, добиваясь, прежде всего, устранения скачка изображения шкалы оптиметра при реверсе движения в крайних положениях каретки.

Контролируют прямолинейность движения каретки и в вертикальной плоскости. Допустимое отклонение 5 мкм на длине 200 мм.

8. Устанавливают перпендикулярность направления движения визирной системы по направляющим колонки относительно опорных поверхностей продольной каретки в плоскости, параллельной ходу этой каретки. Контроль и регулировку осуществляют по методике, изложенной в п.3, разд. 9.
9. Проверяют и регулируют соответствие действительных значений углов наклона колонки показаниям шкалы. Предварительно проверяют установку шкалы маховика наклона колонки в нулевое положение и при

необходимости разворачивают шкалу, отпустив четыре внешних винта на торце маховика.

Закон движения, воспроизводимый механизмом наклона колонки, имеет следующий вид

$$y = \arcsin \frac{kt}{2\pi R} x,$$

где y – угол наклона колонки;

x – угол поворота шкалы;

$k = 2$ – число заходов винта;

$t = 3$ мм – шаг винта.

$R = 110$ мм – длина плеча рычага, т.е. расстояние от оси наклона колонки до центра шарика эксцентрикового упора на колонке.

Для контроля механизма используют оптический квадрант, закрепляемый с помощью специального кронштейна на колонке. При нулевом положении колонки микрометрическим винтом квадранта горизонтируют уровень и снимают начальный отсчет. Наклоняют колонку точно на $12,5^\circ$ по шкале механизма наклона сначала в одну, а затем в другую сторону. При этом каждый раз горизонтируют уровень квадранта и снимают отсчет по его лимбу. Определяют действительное значение углов наклона. Если разность между абсолютными значениями измеренных углов больше $5'$, то ошибку, так называемый сдвиг нуля нелинейной шкалы измерительного устройства, устраняют смещением вдоль оси винта точки контакта сферического эксцентрикового упора с пяткой винта в сторону, где измеренный угол оказался меньше, сохранив вертикальность колонки и нулевой отсчет по шкале ее наклона. Для этого отвинчивают все восемь винтов на торце маховика и отделяют последний от фланца рабочего винта. Поворачивают винт в соответствующую сторону на угол, кратный четверти оборота, из расчета устранения разности углов наклона в $5'$ при повороте винта на пол-оборота. После чего закрепляют на фланце маховик со шкалой, так, чтобы отверстие фиксатора оказалось внизу. Сдвигом индекса на величину смещения шкалы при отпущенных стопорах, а также разворотом шкалы вновь устанавливают нулевой отсчет. Чтобы при этом сохранить вертикальность колонки, в том же направлении, что и винт, поступательно смещают сферический эксцентриковый упор, добиваясь возвращения на ноль уровня квадранта.

Повторно измеряют углы наклона колонки. Если при этом разность между значениями углов, измеренных квадрантом и отсчитанных по шкале наклона, по абсолютной величине превышает $5'$, ошибку устраняют изменением длины плеча рычага за счет поворота на некоторый угол сферического эксцентрикового упора.

После этого окончательно контролируют перпендикулярность направления движения визирной системы по направляющим колонки

относительно опорных поверхностей продольной каретки в плоскости, параллельной ходу этой каретки. Контроль и, при необходимости, регулировку осуществляют по методике, изложенной в п.3, разд.9.

10. Проверяют и регулируют перпендикулярность направления движения главного микроскопа по направляющим механизма тонкой фокусировки относительно опорных поверхностей продольной каретки. Для контроля используют стеклянную пластину с перекрестием, закрепляемую на опорной поверхности каретки, и плоскопараллельную пластину (столбик) высотой H .

Механизмом тонкой фокусировки главный микроскоп опускают в крайнее положение, а маховиком грубой фокусировки наводят микроскоп на перекрестие пластины. Совмещают изображения перекрестий пластины и штриховой сетки и снимают отсчеты по шкалам продольного и поперечного перемещения. На стеклянную пластину устанавливают плоскопараллельную пластину высотой H и с помощью уже только механизма тонкой наводки снова фокусируют микроскоп на резкое изображение перекрестия пластины. Вновь совмещают изображения перекрестий и снимают отсчеты по шкалам микроскопа. Допустимое смещение изображения перекрестия пластины 5 мкм для прибора УИМ-21 и 3 мкм – для УИМ-23.

Ошибку устраняют изменением направления движения главного микроскопа: продольную составляющую – разворотом тубуса визирного микроскопа относительно кронштейна с помощью эксцентрика при трех отпущенных винтах, а поперечную составляющую – шабровкой четырех платиков кронштейна.

11. Совмещают визирную ось главного микроскопа с осью качания колонки. Проверку производят с помощью контрольного валика с лезвием ножа, устанавливаемого в центрах, по методике, изложенной в п.6, разд.9.

Выявленную ошибку δ_x устраняют параллельным горизонтальным сдвигом тубуса визирного микроскопа относительно кронштейна. Причем, если $\delta_x < 0$, тубус необходимо сместить влево, если $\delta_x > 0$ – вправо. Для этой цели к тубусу микроскопа прикрепляют специальный уровень на Т - образном кронштейне с опорной поверхностью, перпендикулярной оси его ампулы. С помощью регулировочных винтов при основании кронштейна уровень горизонтируют. Сдвиг тубуса осуществляют с помощью эксцентрика при трех отпущенных винтах применением специальной последовательности затягивания винтов, контролируя по уровню.

На этом сборка и регулировка механических систем прибора в основном заканчивается.

Дополнительные сведения и технические подробности приведены в литературе [1, с.93-126; 2, с.119-266].

10. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Какие характеристики рассмотренных приборов предопределили их универсальность не только для контроля всевозможных оптических и механических деталей, но и для целей юстировки оптических приборов.
2. Перечислите дополнительные приспособления к приборам, которые вместе с собственными (встроенными) устройствами существенно расширяют возможности приборов.
3. Поясните необходимость иметь в приборе целый комплект объективов, отличающихся линейным увеличением и числовой апертурой.
4. Для чего при измерении параметров резьбы деталей колонку с визирным микроскопом наклоняют?
5. Можно ли, не наклоняя колонки с визирным микроскопом, произвести измерение параметров резьбы?
6. Почему в измерительных приборах стараются выполнить принцип Аббе? Попробуйте его сформулировать.
7. Чем определяется точность измерений, производимых на приборах УИМ-21 (23), по координате Z ?
8. Для чего верхнюю «нерабочую» поверхность 200-миллиметровой призматической направляющей, установленной на продольной каретке, доводят с такой же почти точностью, что и рабочую, боковую поверхность?
9. Почему при контроле отклонения от прямолинейности движения продольной каретки в горизонтальной плоскости применяют трубку оптиметра, а при аналогичном контроле отклонения в вертикальной плоскости – многооборотный индикатор ИИГМ?
10. Поясните, как можно измерить на приборе УИМ-23 расстояние между центрами двух отверстий в плате, одно из которых круглое, а другое имеет форму равностороннего треугольника.

11. Литература

1. Данилевич Ф.М., Никитин В.А., Смирнова Е.П. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов/ Справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1976. 256 с.
2. Эрвайс А.В. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов. – М.: Машгиз, 1958. 460 с.
3. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие.- СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 95 с.
4. Петров В.П. Контроль качества и испытание оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1985. 222 с.

Лабораторная работа №8

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ УСТАНОВКИ ПЛОСКИХ ЗЕРКАЛ И ПРИЗМ В СХОДЯЩЕМСЯ ПУЧКЕ ЛУЧЕЙ

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться со способами и средствами контроля установки плоских зеркал в сходящемся пучке лучей, а также сведениями о точности центрирования компонентов оптической системы, обеспечиваемой описанными (в оттиске прилагаемой статьи [1]) способами.
2. Ознакомиться с конструкцией предложенного для юстировки узла, а также средствами контроля.
3. Установить в посадочные (базовые) отверстия узла диоптровые центрировочные трубки и произвести установку (юстировку) плоского зеркала.
4. После завершения юстировки снять с узла диоптровые трубки и выполнить контроль угловой точности произведенного центрирования системы (децентрировки 1-го рода) с помощью торцевой автоколлимационной трубки (ТАКТ).
5. Сравнить достигнутую при юстировке точность с точностью данного способа контроля, указанной в оттиске статьи [1].

Для зачета предъявить преподавателю, ведущему занятие, узел автоколлимационного устройства прибора ИКВ-3, содержащий зеркало, и отъюстированный с помощью диоптровых трубок.

Отчет о работе должен содержать:

1. Условное изображение юстируемого узла с указанием действенных регулировочных подвижек зеркала, предусмотренных конструкцией.
Примечание: Регулировочные подвижки зеркала удобно указать в основной системе координатных осей $X_0Y_0Z_0$, у которой ось Z_0 – перпендикулярна отражающей плоскости зеркала (в его номинальном положении), обозначая подвижки, например, φ_{X_0} , ΔZ_0 , φ_{Y_0} .
2. Результаты контроля установки зеркала с помощью ТАКТ.
3. Эскизы детали «Корпус» и сборочной единицы «Зеркало в оправе», входящих в состав юстируемого узла, с требованиями технических условий к изготовлению (сборке) в виде допусков расположения поверхностей, обусловивших возможность центрирования оптической системы устройства ИКВ-3 исключительно с помощью двух регулировочных подвижек зеркала без какой-либо пригонки. Конструкция юстируемого узла в составе оптиметра ИКВ-3

представлена в справочном пособии [2] на странице 162, а также на рис. 8.1. методических указаний.

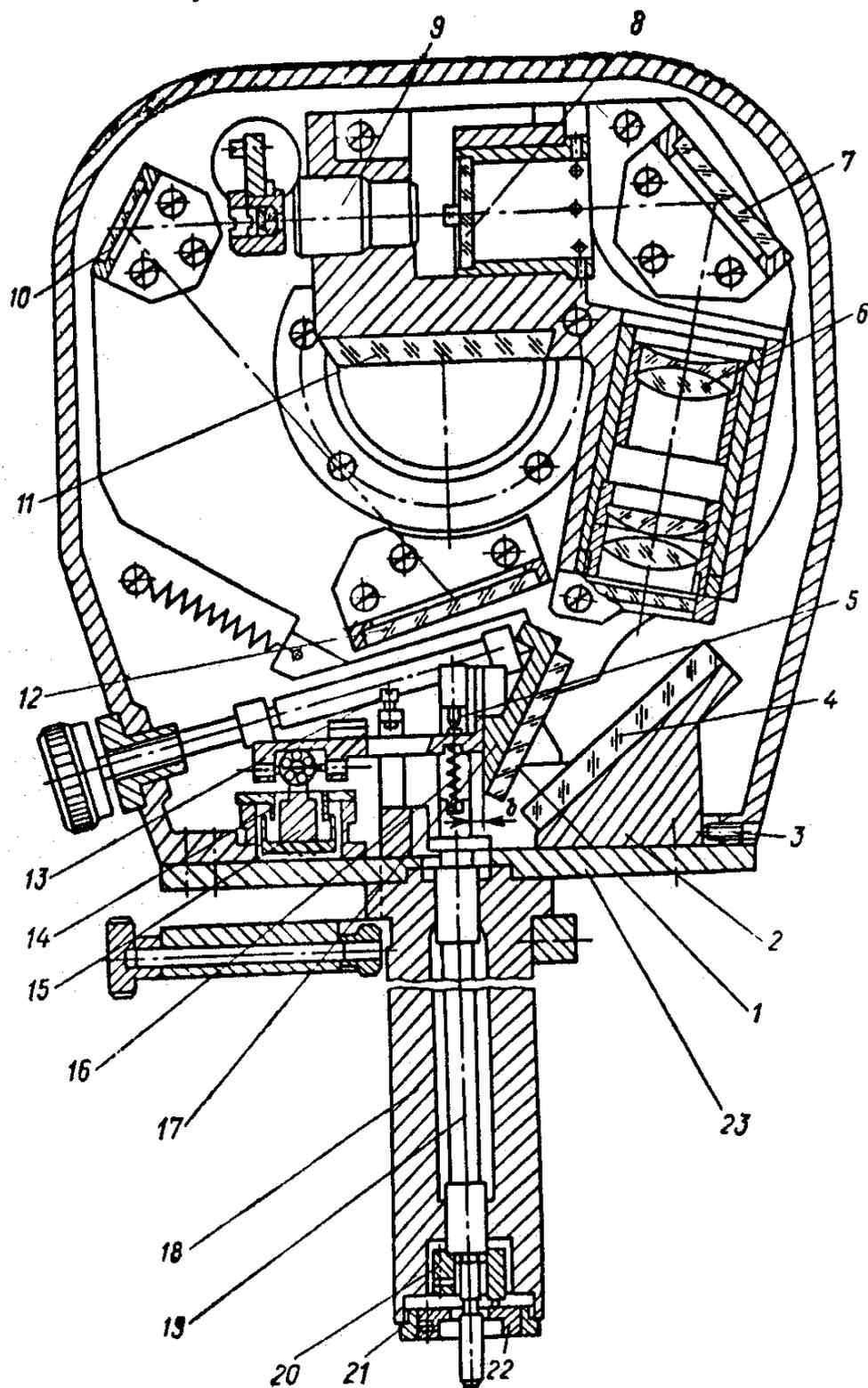


Рис. 8.1. Конструкция измерительной головки оптиметра ИКВ-3, содержащая юстируемый узел, который включает: 6 – автоколлимационный объектив; 7 – плоское зеркало в оправе; 8 – шкала в оправе; 9 – проекционный объектив.

Отдельно (в более крупном масштабе) конструкция узла показана на рис. 8.2. На обоих рисунках АК-объектив обозначен как поз.6. Базируется он в корпусе поз.5 литейной формы расточкой $\varnothing D_2$. Проекционный объектив поз.1 (рис. 8.2.) – расточкой $\varnothing D_3$ и резьбой, а шкала 2 в оправе поз.3 – расточкой $\varnothing D_1$. Зеркало в оправе, имеющей вид угольника, поз.4 (рис. 8.2.) базируется в корпусе обработанной площадкой, плоскостью «В». Нижнюю опорную поверхность узла, представленную тремя платиками, и обозначаемую буквой «Б», целесообразно принять за **основную конструкторскую, технологическую и измерительную базу**.

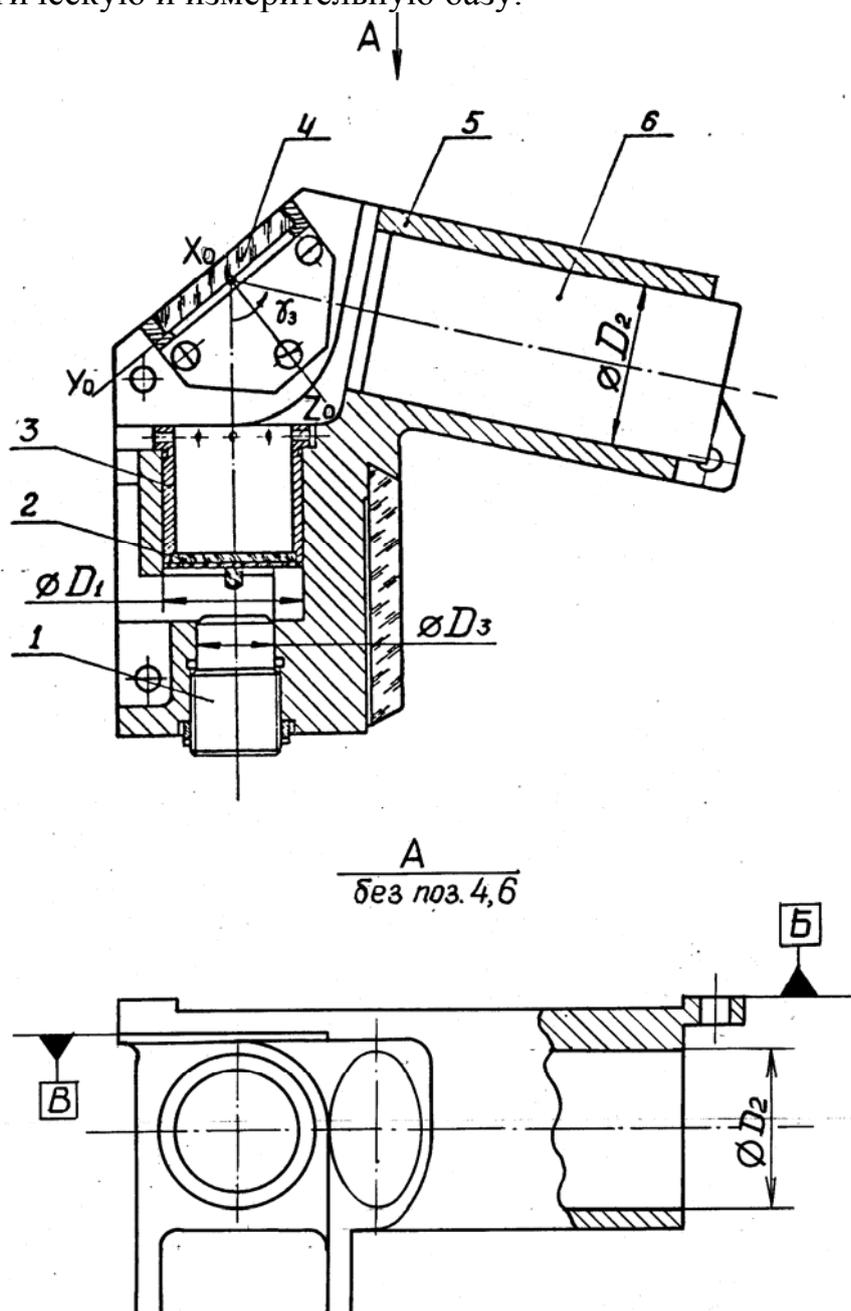


Рис. 8.2. Юстируемый узел автоколлимационного устройства оптиметра ИКВ-3

2. Комплект установки

1. Узел автоколлимационного устройства прибора ИКВ-3 без проекционного и автоколлимационного объективов, закрепленный с помощью трех стоек на массивном основании в виде швеллера.....1 шт.
2. Пара диоптровых центрировочных трубок.....1 компл.
3. Торцовая автоколлимационная трубка (ТАКТ), с автоколлимационной ценой одного деления 1' (угл. мин.).....1 шт.
4. Осветитель типа ОИ-31 с матовым стеклом.....1 шт.
5. Провод подсветки с лампой 6В для ТАКТ.....1 шт.
6. Отвертка.....1 шт.
7. Вспомогательное зеркало.....1 шт.
8. Салфетка1 шт.

3. Исходные положения и принципы, положенные в основу методов контроля

Установка плоских зеркал, а также и призм в сходящихся пучках лучей, выполняющих в оптической системе функции оборачивания изображения, а также обеспечения компактности и требуемой компоновки, может быть отнесена к типовым операциям юстировки оптических приборов, вызывающим, пожалуй, наибольшие трудности. Суть этих операций состоит в отыскании того единственно правильного пространственного расположения зеркал (или призм), при котором линзовые компоненты единой системы, волею конструктора разделенные этими зеркалами, благодаря достигнутому оптическому сопряжению оказались бы на общей оси подобно компонентам объектива насыпной конструкции.

Трудность операции центрирования линзовых компонентов оптической системы, разделенной зеркалами и призмами, заключается в том, что эти компоненты лишены преимуществ упомянутого выше традиционного базирования насыпным методом (как, например, в трубе перископа), легко обеспечивающим их надлежащее центрирование. Такое базирование характеризуется кратчайшей размерной цепью с немногими, легко контролируемыми, параметрами. В рассматриваемых же случаях базирование линзовых компонентов характеризуется неопределенностью, которую можно выразить уравнениями размерных цепей со многими неизвестными, как, например, показано в работе [3].

При разработке методик центрирования линзовых компонентов оптической системы, разделенных зеркально-призменными элементами, целесообразно руководствоваться следующими положениями:

1. Каждый центрируемый компонент оптической системы рассматривается как твердое тело, обладающее шестью степенями свободы перемещения относительно неподвижного корпуса (платформы), если на эти перемещения не наложены ограничения.
2. Разъюстировка оптического элемента рассматривается как совокупность малых отклонений – сдвигов и наклонов его вдоль и вокруг осей прямоугольной системы координат XYZ , связанной с базовым элементом конструкции. В общем случае разъюстировка характеризуется шестью составляющими: ΔX , ΔY , ΔZ , φX , φY , φZ .
3. Взаимную деюстировку двух линзовых компонентов системы, разделенных зеркально-призменной системой (ЗПС), рассматривают при выпрямленном ходе лучей. Для этого один из компонентов системы выбирают в качестве базового и связывают с ним систему координатных осей XYZ , располагая ось Z вдоль оптической оси, а другой компонент изображают в ЗПС (в прямом или обратном ходе лучей) и рассматривают составляющие децентрировки ΔX , ΔY , φX , φY , вызванные не только погрешностями базирования этого линзового компонента, но и погрешностями установки зеркальной системы, изображающей этот компонент. В данном случае (когда оба компонента – линзовые) взаимный разворот компонентов φZ является для них инвариантным, а расфокусировку ΔZ почти всегда устраняют осевой подвижкой одного из линзовых компонентов после устранения децентрировки.
4. Юстировочные подвижки зеркал и призм рассматривают в системе координатных осей, связанных с плоскостью базирования этих узлов и плоскостью падения осевого луча, либо – для зеркал – в системе основных координатных осей $X_0Y_0Z_0$, ось Z_0 которой направлена по нормали к отражающей плоскости зеркала, а ось X_0 – перпендикулярно плоскости падения осевого луча.
5. С помощью плоского зеркала, имеющего в сходящемся пучке лучей три действенные подвижки ΔZ_0 , φX_0 , φY_0 , можно устранить и три составляющие децентрировки ΔY , φX , φY . И лишь одну из них – ΔX (сдвиг перпендикулярно плоскости падения осевого луча) – нельзя устранить подвижкой одиночного плоского зеркала.
6. Уменьшение числа юстировочных подвижек при одновременном обеспечении центрирования компонентов упрощает сборку, увеличивая производительность труда. При этом центр тяжести в затратах трудовых и материальных ресурсов смещается на стадию механической обработки деталей из-за ужесточения допусков на взаимное расположение базовых поверхностей, определяющих положение компонентов оптической системы.
7. Необходимый для выполнения юстировки диапазон регулировочных подвижек обеспечен конструктивно – рациональной простановкой

размеров и заданием соответствующих допусков на составляющие звенья размерных цепей, отсутствием грубых ошибок.

подавляющее большинство известных способов юстировки и контроля центрирования линзовых компонентов оптической системы по своей сути представляют собой контроль и установление связей между оптическими конструкторскими базами (КБ) центрируемых компонентов, разделенных ЗПС, а также между КБ механических деталей и сборочных единиц, определяющими положение центрируемых линзовых компонентов.

Поэтому арсенал применяемых средств контроля и вспомогательного оснащения огромен – от автоколлимационных (АК) микроскопов, торцовых АК трубок и визирной трубы типа ППС-11 до диоптровых центрировочных трубок, центрированных точечных диафрагм, перекрестий и зеркал в оправках, центрировочных валиков, шаблонов, концевых мер длины, нитяных отвесов и уровней [4].

Погрешности установки зеркал и призм в сходящемся ходе лучей вызывают многочисленные дефекты оптической системы [5], среди которых расфокусировка изображения на краю поля, сдвиги и наклоны изображения, децентрировка зрачков и снижение освещенности поля, разномасштабность изображения и др. Приведенные в монографии [5] формулы позволяют рассчитать допуски на эти погрешности.

4. Порядок выполнения работы

1. С помощью настоящих методических указаний к лабораторной работе и оттиска статьи [1] ознакомиться с основными исходными положениями и принципами, положенными в основу решения задачи центрирования компонентов оптической системы, разделенных ЗПС.
2. Ознакомиться с конструкцией узла, предложенного для юстировки, и назначением автоколлимационного устройства (откуда заимствован этот узел) с помощью справочного пособия [2], а также средствами контроля.
3. Установить с помощью переходной оправы в расточку корпуса узла под АК объектив диоптровую трубку №1 (с точечной диафрагмой).
4. Установить в резьбовое отверстие корпуса – на место проекционного объектива – диоптровую трубку №2 (с диоптрами в виде колец).
5. Включить осветитель ОИ-31 и выставить его по оси диоптровой трубки №2. Удалить из корпуса узла шкалу в оправе.
6. Произвести установку узла зеркала, добившись, наблюдая в диоптровую трубку №1, концентричного расположения диоптров – точки и двух колец. Зафиксировать найденное положение зеркала с помощью винтов, крепящих оправу зеркала к площадке «В» корпуса. **Примечание:** Для удобства завинчивания винтов, расположенных снизу корпуса следует воспользоваться вспомогательным зеркалом.

7. Показать результаты выполненной операции преподавателю. При необходимости юстировку следует уточнить.
8. Выключить осветитель ОИ-31, удалить из узла обе диоптровые трубки, оставив переходную оправу, и установить в соответствующую расточку корпуса оправу со шкалой.
9. Установить на фланец переходной оправы торцовую автоколлимационную трубку (предварительно включив ее подсветку), обеспечив плотное прилегание торца трубки к фланцу переходной оправы.
10. Наблюдая автоколлимационное изображение перекрестия от плоскости шкалы, измерить неперпендикулярность ее к геометрической оси отверстия под АК объектив в двух направлениях – горизонтальном ϕX и вертикальном ϕY .
11. Сравнить полученные результаты с данными по точности примененного при юстировке способа контроля, указанными в оттиске статьи [1].
12. Снять с контролируемого узла ТАКТ и выключить ее подсветку.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Поясните, каким образом (с помощью каких конструктивных решений) устранена необходимость пригонки опорной плоскости оправы зеркала в процессе его юстировки в узле.
2. Какое условие должно быть выполнено для корректной оценки угловой точности контроля центрирования компонентов, производимого с помощью диоптровых трубок, при использовании автоколлимации от плоскости шкалы?
3. Какую картину наблюдают в диоптровую трубку при наличии лишь одной из составляющих децентрировки – ΔY ?
4. Какие функции в технологическом процессе выполняет переходная втулка с фланцем? Каковы требования к ее изготовлению?
5. Подвижкой какого элемента оптической системы автоколлимационного устройства прибора ИКВ-3 может быть устранена составляющая децентрировки – ΔX ?
6. Каковы преимущества способа контроля с применением диоптровых центрировочных трубок перед другими способами контроля?
7. Что представляет собой оптическая система контрольно-юстировочного устройства АКТМ [1], обеспечивающего наиболее высокую точность контроля и приемлемую производительность?
8. Почему юстировочные подвижки плоского зеркала рекомендуется рассматривать и осуществлять в основной системе координатных осей?
9. Какие оптические базы центрируемых компонентов могут быть использованы в процессе юстировки?

10. Перечислите основные и вспомогательные средства контроля, примененные для центрирования компонентов оптической системы колленчатого визира в примерах приведенных в работе [1].

6. Литература

1. Бурбаев А.М. Способы контроля центрирования плоского зеркала в сходящемся ходе лучей. // Оптико-механическая промышленность. 1975. №4. С.47-50.
2. Данилевич Ф.М. и др. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Спр. пособие. Л.: Машиностроение, 1976. 256с.
3. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 95с.
4. Бурбаев А.М. Методы и средства цехового контроля установки плоских зеркал и призм в сходящихся пучках лучей. // Оптико-механическая промышленность. 1977. №5. С.52-63.
5. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2- изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, 1982. 237с.

Лабораторная работа №9

ПРИМЕНЕНИЕ ПОНЯТИЙ БАЗИРОВАНИЕ И БАЗЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА ЦЕНТРИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИБОРА НА ПРИМЕРЕ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА СИСТЕМЫ МАКСУТОВА-КАССЕГРЕНА ШКОЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА

1. Задание и зачет по работе

1. Ознакомиться с оптической схемой, конструкцией и техническими характеристиками школьного телескопа ТМШ по чертежу (рис.9.1) и описанию конструкции, приведенному в монографии Г.В. Погарева [1].
2. Проанализировать предложенный конструкцией метод обеспечения необходимой точности взаимной установки оптических компонентов объектива, опираясь на понятия центрированной оптической системы и базовой оси [1,2], для чего:
 - a. определить базовую деталь конструкции и, выполнив ее эскиз, обозначить в ней базы, ответственные за центрирование компонентов объектива;
 - b. задать технические требования к изготовлению базовой детали, указав примерные допуски (чтобы не прибегать к трудоемким расчетам – не строже производственного уровня точности) на размеры и взаимное расположение баз;
 - c. выполнить упрощенные эскизы оправ мениска и главного зеркала, обозначив в них базы, ответственные за центрирование компонентов объектива, и указав примерные допуски;
 - d. выполнить эскизы мениска и главного зеркала, задав децентрировку одним из допусков: позиционным, формы заданной поверхности или перпендикулярности [3], - исходя из представленной (или предложенной самим студентом к модернизации) конструкции и принимаемого метода центрирования компонентов;
 - e. дать определение понятию «оптическая ось главного сферического зеркала», которое соответствовало бы выбранному методу центрирования компонентов.
3. Предложить методику юстировки объектива, выделив операции центрирования и фокусирования компонентов.
4. Под руководством преподавателя разобрать объектив и на основании дополнительной информации о конструкции уточнить (подтвердить или скорректировать) сделанные ранее выводы (или принятые решения)

относительно назначенных допусков и методики центрирования компонентов.

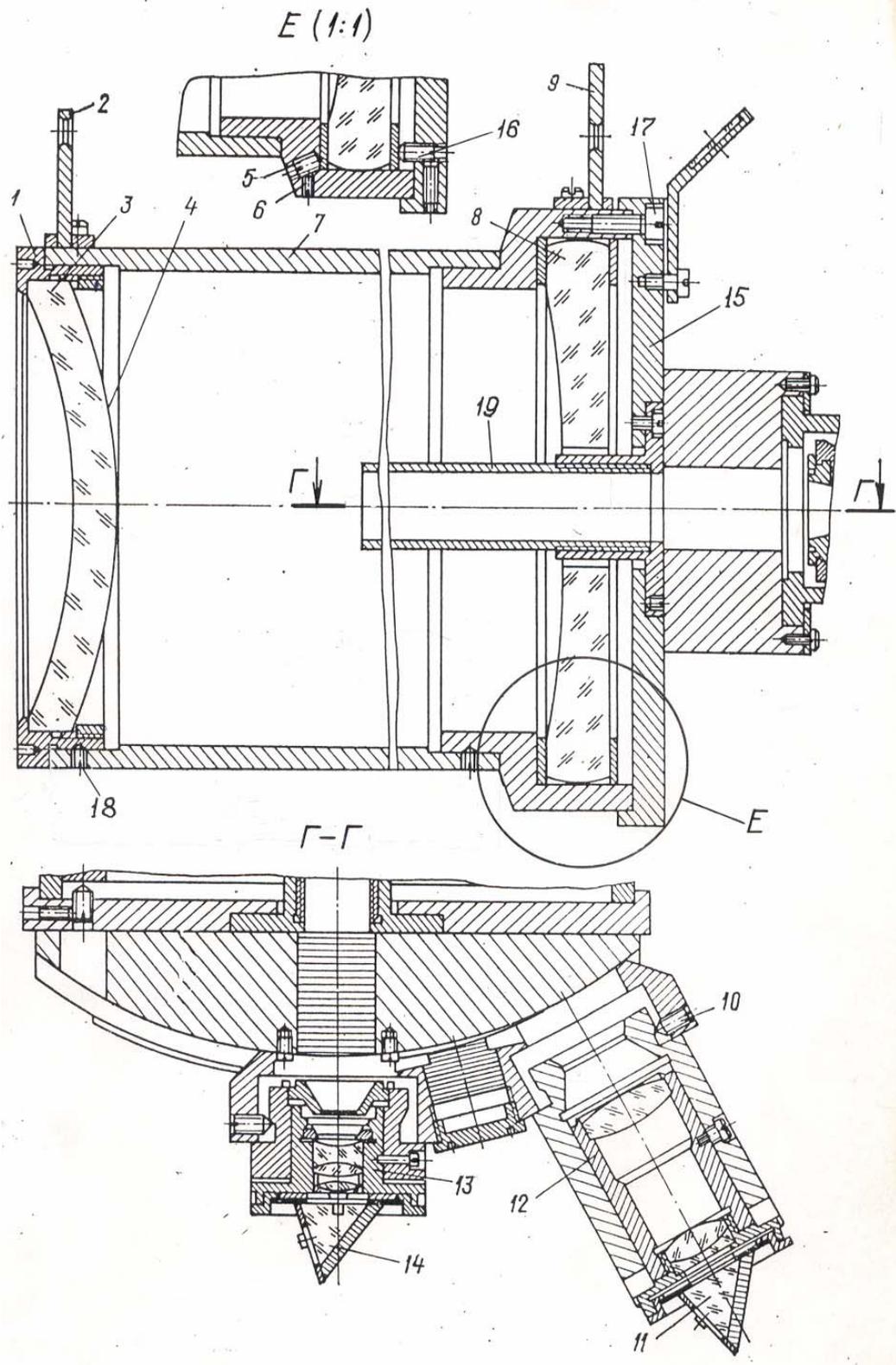


Рис.9.1. Конструкция трубы школьного телескопа ТМШ

5. Выполнить операцию предварительной (геометрической) юстировки главного сферического зеркала, доказав обоснованность предложенного метода центрирования.

6. Собрать объектив и, установив его на оптической скамье, с помощью микроскопа оценить качество центрировки его компонентов по качеству изображения штриховой миры №3 ГОИ и дифракционному изображению точки. Определить предельно разрешаемый элемент миры №2 и по таблице (на стр. 10 [4]) найти угловой предел разрешения объектива. Сравнить найденное значение с величиной теоретического значения разрешающей способности, а также с величиной, указанной в техническом описании.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) эскизы деталей, перечисленных в пункте 2, с техническими требованиями и допусками;
- 2) расчет величины децентрировки вторичного зеркала по отношению к базовой оси, заданной корпусом (базовой деталью);
- 3) схему контроля при выполнении предварительной юстировки;
- 4) схему контроля качества изображения на оптической скамье и результаты контроля;
- 5) выводы по работе.

2. Комплект установки

1. Объектив школьного телескопа ТМШ (без окуляров).....1 шт.
2. Торцовая автоколлимационная трубка ПК-179000 с автоколлимационной ценой одного деления 1' (угл. мин.).....1 шт.
3. Столик стальной круглый с доведенной до зеркального состояния плоскостью (из комплекта ЗИП оптиметра ИКВ-3).....1 шт.
4. Столик с призматическими опорами для установки объектива на оптической скамье.....1 шт.
5. Микроскоп визирный с объективом 3,7×0,11 и сменными окулярами 7[×], 10[×] и 15[×], устанавливаемый на оптической скамье и имеющий три степени подвижности1 шт.
6. Отвертки под винты трех размеров.....1 компл.
7. Чертеж телескопа и техническое описание.....1 компл.
8. Салфетка фланелевая.....1 шт.

3. Исходные положения

В технологии машиностроения понятия базирование и базы без преувеличения могут быть отнесены к фундаментальным. Государственный стандарт [5] в качестве исходного принимает понятие «базирование» и определяет его как «придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат». В оптическом приборостроении именно надлежащим базированием схемных элементов достигают требуемого качества функционирования оптической системы в

соответствии с расчетом оптика-конструктора. При этом способами достижения требуемого базирования оптических элементов являются регулировка и пригонка. Однако наиболее предпочтительным способом базирования схемных элементов является базирование путем ограничения допусков на размеры деталей, на отклонения формы и взаимного расположения поверхностей деталей.

В течение достаточно долгого времени в оптическом приборостроении отсутствовал единый подход к заданию на чертежах допусков на децентрировку линз. Величины C_A , C_B и C , предусмотренные ГОСТ 2.412-68 «Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий» ЕСКД для обозначения децентрировки, могли быть определены только путем сложнейшего анализа и последующего расчета по величинам, полученным при измерении параметров децентрировки существующими методами контроля [2]. Нормативно-техническая документация не охватывала понятия децентрировки для случаев склеенной линзы или линзы (оптической детали), закрепленной в оправе.

В настоящее время под децентрировкой оптической детали следует понимать смещение каждого центра кривизны сферической поверхности с **базовой оси**. Такое понятие децентрировки, предложенное Ю.А. Степиным и Е.А. Васильевым [2], дает возможность просто, надежно и с достаточно высокой точностью (например, автоколлимационным методом) проконтролировать величину децентрировки. При этом под базовой осью понимают ось вращения детали, заданную базовой поверхностью (например, цилиндрической) или совокупностью базовых поверхностей. В этом случае в чертеже оптической детали или сборочной единицы в качестве требований технических условий будет, например, указано: «...децентрировка поверхности А при опоре на поверхности Б и В не более 0,01 мм». Такой подход способствует наиболее рациональному распределению допуска на децентрировку, повышению технологичности конструкций.

Идея использования понятия «базовая ось» может оказаться благотворной для обеспечения центрирования оптической системы, состоящей не только из линзовых компонентов, но также из зеркал и отражательных призм.

При анализе конструкции прибора с точки зрения технологии его сборки и центрирования оптической системы изделие разбивают на составные части (крупные узлы). В каждой такой части (узле) всегда выделяют базовую деталь (или сборочную единицу), которая несет на себе (связывая между собой) детали и содержащие схемные элементы сборочные единицы, образующие функционально законченную сборочную единицу следующего уровня. Своими поверхностями (конструкторскими базами) базовая деталь обеспечивает (нередко в полной мере) требуемое взаимоположение присоединяемых схемных элементов, что является

необходимым условием правильного функционирования оптической системы.

Но, кроме того, базообразующие схемные элементы прибора, такие, например, как шкалы (реплики дифракционных решеток), лимбы, экраны визирных и отсчетных устройств, окуляры, головные призмы, зеркала и объективы устройств наблюдения, измерения и прицеливания, обязаны занимать вполне определенное положение по отношению к основным базам изделия. В зависимости от назначения изделия такими базами могут являться: плоскости оснований и направляющих, геометрические оси труб, стоек, колонок и корпусов, оси вращения валов, планшайб и других подвижных частей конструкции и другие.

Таким образом, базовая деталь (как, впрочем, и любая другая) должна располагать:

а) основной базой – конструкторской базой, используемой для определения ее собственного положения в изделии, и

б) сопряженными базами – конструкторскими базами, используемыми для определения положения присоединяемых к ней деталей и сборочных единиц.

ПРИМЕЧАНИЕ. В ГОСТе 21495-76 дается иное название второй группы баз, а именно – вспомогательные базы. Такое название не отвечает сути базирования и, по мнению автора этих строк, является крайне неудачным.

Именно благодаря сопряжению конструкторских баз, определяющих положение схемных элементов (и не только оптических) с основной конструкторской базой – посредством размеров и допусков взаимного расположения - обеспечивается упомянутое выше заданное положение схемных элементов по отношению к основным базам изделия.

Создавая чертеж ответственной детали и указывая в нем необходимые технические требования, опытный конструктор одновременно обдумывает и технологию ее изготовления, а также метод контроля нормируемых отклонений. Позднее уже другой специалист – технолог – решает задачу изготовления этой детали, опираясь на собственный опыт и реальные производственные условия. При этом он может избрать для базирования заготовки в процессе изготовления детали те поверхности (возможно даже не обозначенные конструктором), которые диктуются выбранной им технологией изготовления и требуемой точностью. Конечно же, на всех этапах изготовления изделия все специалисты – и конструктора и технологи – должны руководствоваться одним из основных принципов – принципом единства и совмещения баз: конструкторских, технологических и измерительных.

Таким образом, реальная деталь, прошедшая цепь технологических операций, нередко приобретает новые свойства, прежде не отраженные на чертеже. Эти свойства заключаются в появлении технологических баз, в ужесточении допусков на отдельные размеры и взаимное расположение

поверхностей, не имевших по замыслу конструктора принципиального значения. Вместе с ранее назначенными базами новые технологические базы могут с успехом использоваться в роли измерительных и проверочных баз в процессе центрирования оптической системы прибора.

4. Порядок выполнения работы

1. Под руководством преподавателя и, действуя сообразно чертежу, разобрать объектив в следующей последовательности:
 - а) снять узел оправы 1 с мениском 3, предварительно вывернув три стопорных винта 18;
 - б) снять заднюю крышку 15 совместно с закрепленной на ней блендой 19, отвернув три винта 17;
 - в) накрыв ладонью отверстие корпуса телескопа и опрокинув его, аккуратно достать зеркало 8.
2. Оценить характер сопряжения деталей и узлов с оправами и корпусом трубы, обратив внимание на величину зазора, форму и шероховатость поверхности.
3. Обратить внимание на выполнение принципа статической определенности в конструкции крепления и регулирования главного зеркала.
4. Выполнить операцию предварительной (геометрической) юстировки главного зеркала. Однако сначала следует установить его в оправу таким образом, чтобы середины трех наклеенных на зеркало (с двух сторон) станиолевых подпятников (тонких стальных пластинок) легли на три регулировочных винта 5, в свою очередь установленных в среднее положение. Контроль установки зеркала выполняют по схеме, приведенной на рис. 9.2.

Здесь в качестве измерительной базы принят передний торец трубы телескопа, перпендикулярный геометрической оси ее цилиндрической поверхности «А», выбранной в качестве базовой оси. Задняя же, нерабочая плоскость зеркала «В», выполнявшая в процессе его изготовления роль технологической базы, используется здесь при юстировке в качестве проверочной конструкторской базы. Именно на эту плоскость установлено средство контроля – торцовая автоколлимационная трубка.
5. Собрать объектив в следующей последовательности:
 - а) сохранив вертикальное расположение корпуса телескопа, установить на корпус заднюю крышку 15, предварительно вывернув до уровня внутренней плоскости крышки три прижимных винта 16;
 - б) закрепить крышку на корпусе тремя винтами 17, осуществляя постепенное их затягивание;

- в) завернуть по резьбе три винта 16 до легкого прикосновения их с зеркалом;
- г) установить в корпус 7 оправу 1 мениска таким образом, чтобы засверленные лунки на оправе оказались напротив резьбовых отверстий под стопорные винты 18, и зафиксировать ими оправу мениска;
- д) проверить качество фиксации деталей по отсутствию соответствующего звучания при легком постукивании по корпусу.

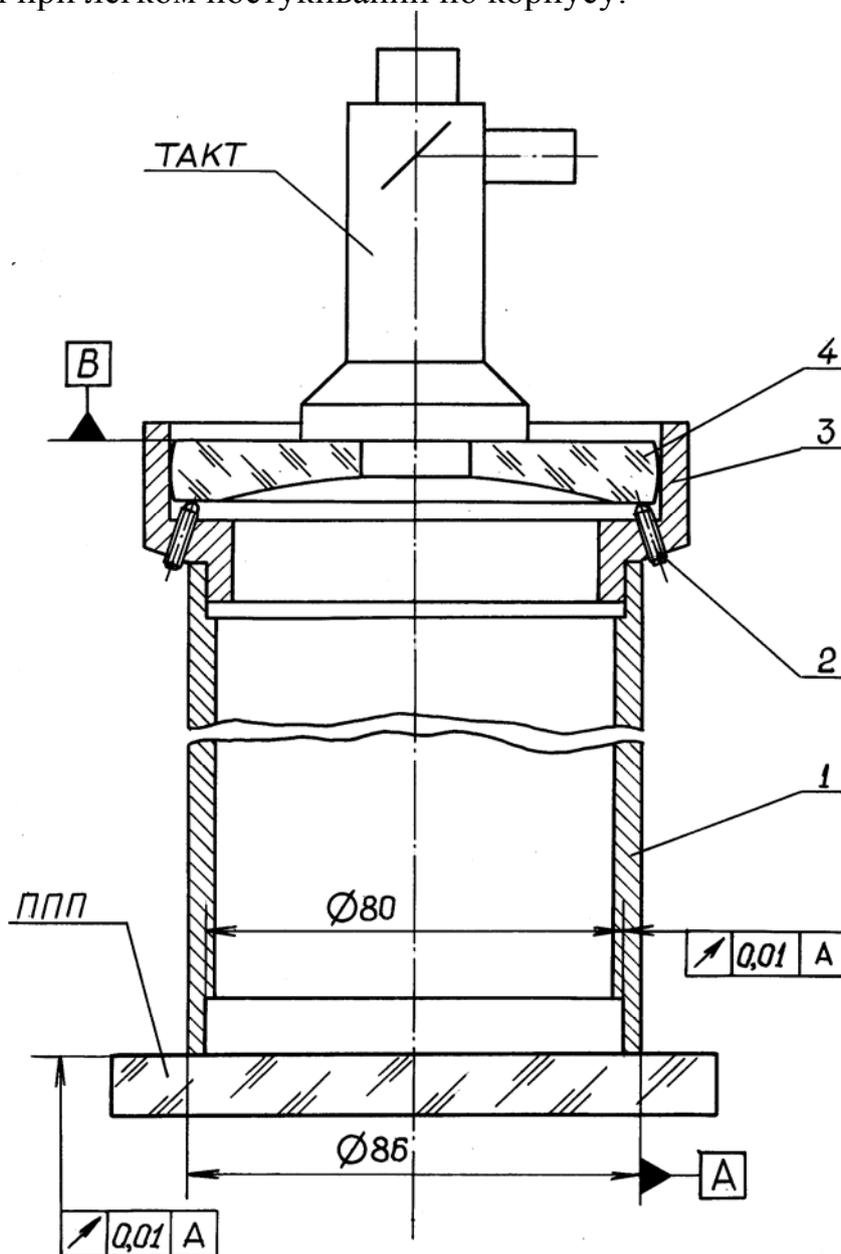


Рис. 9.2. Схема контроля в процессе предварительной юстировки главного сферического зеркала телескопа:
 1- корпус трубы; 2 – три опорных регулируемых винта;
 3 – оправа зеркала; 4 – зеркало;
 ТАКТ – торцовая автоколлимационная трубка;
 ППП – плоскопараллельная пластина.

6. Установить объектив на оптической скамье с помощью столика с призматическими опорами. Предварительно ребро призматических опор должно быть установлено параллельно визирной оси коллиматора.
7. Наблюдать с помощью папиросной бумажки, приложенной к выходному отверстию бленды, светящееся изображение миры №3 ГОИ, установленной в коллиматоре. Если это изображение срезано краями бленды, то, действуя соответствующей парой юстировочных винтов 5 и 16, добиться симметричного расположения изображения миры по отношению к выходному отверстию бленды.
8. Сфокусировать микроскоп на плоскость изображения миры №3 и оценить общее качество изображения по четкости штрихов миры и отсутствию двоения и «хвостов».
9. Установить в коллиматоре миру №2 ГОИ и определить предельно разрешаемый элемент этой миры. По таблице найти угловой предел разрешения объектива и сравнить его с данными, приведенными в техническом описании, а также с величиной теоретического значения этой величины.
10. Установить в коллиматор точку и оценить качество центрировки системы, а также общее качество изображения по дифракционному изображению точки.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Приведите классификацию баз в соответствии с ГОСТ 21495-76 «Базирование и базы в машиностроении» и дайте определения этим понятиям.
2. Что следует понимать под центрированием оптической системы прибора?
3. Почему для оценки децентрировки системы более приемлемо понятие базовой оси, нежели оптической оси?
4. Каким допуском следует задать децентрировку мениска в системе школьного телескопа?
5. Перечислите оптические базы, которые могут использоваться при центрировании оптической системы прибора.
6. В чем преимущество в применении технологических и проверочных баз перед оптическими базами, и могут ли они при юстировке заменить собой оптические базы?
7. Дайте определение понятию оптическая ось сферического зеркала.
8. Как проконтролировать, что при фиксации оправы 1 мениска с помощью стопорных винтов 18 ее торец поджимается к торцу корпуса трубы, без чего выбранный способ соединения не решает задачи базирования?
9. Перечислите достоинства менисковой системы Кассегрена.

10. Как в оптической системе менискового Кассегрена решены проблемы коррекции aberrаций: хроматизма, сферической aberrации, комы?

6. Литература

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Машиностроение, 1982.- 237 с.
2. Степин Ю.А., Васильев Е.А. Децентрировка. Определение и методы измерения // Оптико-мех. пром-сть. 1974. №9. С. 50-56.
3. ГОСТ 2.412-81. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий (СТ СЭВ 139-74).
4. ГОСТ 15114-69. Телескопические системы. Визуальный метод определения предела разрешения.
5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении.
6. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие.-СПб: СПбГУ ИТМО, 2004 – 95с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа №1	
Сборка, юстировка и исследование качества изображения микрообъектива.....	4
Лабораторная работа №2	
Методы и средства юстировки и контроля автоколлимационной зрительной трубы.....	17
Лабораторная работа №3	
Контроль положения ребра прямоугольной призмы БР-180 ⁰	25
Лабораторная работа №4	
Юстировка узла дифракционной решётки монохроматора.....	35
Лабораторная работа №5	
Определение электронно-оптических характеристик миниатюрной телевизионной установки МТУ-1.....	49
Лабораторная работа №6	
Юстировка и контроль оптической угломерной головки.....	55
Лабораторная работа №7	
Методы и средства регулирования и контроля механических устройств двухкоординатных измерительных приборов типа УИМ-21, УИМ-23 и ДИП-6 на примере универсального измерительного микроскопа УИМ-21.....	70
Лабораторная работа №8	
Исследование способов контроля установки плоских зеркал и призм в сходящемся пучке лучей.....	91
Лабораторная работа №9	
Применение понятий базирование и базы для разработки метода центрирования оптической системы прибора на примере зеркально- линзового объектива системы Максудова-Кассегрена школьного телескопа.....	99



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Заведующий кафедрой: *д.т.н, проф. С.М. Латыев.*

Кафедра Компьютеризации и проектирования оптических приборов (первоначальное название «Кафедра военных оптических приборов», позднее - «Специальных оптических приборов») была основана в 1939 году. Она была призвана подготавливать инженеров по проектированию военных оптических приборов.

Как известно, к 1914 году потребности армии и флота удовлетворялись зарождающейся отечественной оптической промышленностью (включая филиалы фирм Цейсс и Герц в Риге) только на 30-40%. Остальные оптические приборы экспортировались. Фирма Карл Цейсс поставляла дальномеры, перископы сухопутные и для подводных лодок, бинокли, светосигнальные приборы. Фирма Герц – полевые артиллерийские панорамы, бинокли, большие стереотрубы, дальномеры, перископы для подводных лодок. Фирма Барр и Струд (Англия) поставляла оптические дальномеры, а фирма Росс - прямые зрительные трубы для морских прицелов. Фирмы Краус, Парра Мантуа (Франция) поставляли призматические бинокли. Фирма Офичино Галилео (Италия) продавала перископы для подводных лодок.

Возглавил кафедру известный специалист в области военных оптико-механических приборов профессор К.Е. Солодилов. На кафедру из Государственного оптического института пришли работать профессора Резунов М.А. и Цуккерман С.Т. Под их руководством на кафедре проводилась также и научно-исследовательская работа. Были разработаны, например, конструкции новых прицелов: пулеметного ПП1, авиационного АСП, ракурсного курсового.

В послевоенный период времени до 1970 года кафедру возглавлял проф. С.Т. Цуккерман, с 1971 по 1984 гг. заведовал кафедрой проф. Сухопаров С.А. (бывший главный инженер ЦКБ фирмы ЛОМО), в 1985 –90 гг. руководил кафедрой заслуженный деятель науки и техники проф. Зверев В.А.. С 1990 кафедрой заведует их ученик проф. Латыев С.М.

Выпускники кафедры всегда славились как хорошие конструктора, благодаря сильной проектно-конструкторской научно- педагогической школе, созданной Солодиловым К.Е., Цуккерманом С.Т., Резуновым М.А., Кулагиним В.В., Сухопаровым С.А.. Сотрудниками школы написано около двадцати монографий, учебных пособий и справочников по проектированию оптических приборов, ставших настольными книгами студентов и инженерно-технических работников оптической промышленности.

Основные научные направления работы кафедры связаны с разработкой теоретических основ конструирования оптических приборов, их точностного расчета и юстировки, автоматизацией функционирования приборов и их проектирования, а также с созданием автоматизированных измерительных фотоэлектрических приборов.

На кафедре были разработаны подобные приборы различного назначения:

- Механокардиограф для медицинских учреждений;
- Прибор для измерения скоростей и давления жидкостей;
- Прибор управления по лучу строительными машинами;
- Кинематомер для контроля точности зубчатых колес и редукторов;
- Стенд для контроля прецизионных муфт;
- Телевизионный дальномер;
- Стенд для контроля надежности биноклей;
- Фотоэлектрический автоколлиматор;
- Цифровой индикатор перемещений.

По результатам научных исследований аспирантами и сотрудниками кафедры были защищены десятки кандидатских и докторских диссертаций.

В настоящее время кафедра отошла от подготовки студентов только по военным оптическим приборам и имеет четыре специализации выпускников:

- «Специальные оптические приборы» – по которой подготавливаются инженеры (магистры) по разработке, юстировке, контролю и обслуживанию оптической техники военного назначения, а также космическим и гражданским приборам, которые эксплуатируются в специальных условиях или имеют особые характеристики;
- «Автоматизация оптических приборов» - по которой подготавливаются инженеры (бакалавры и магистры) широкого профиля, занимающиеся разработкой, исследованием и эксплуатацией приборов различного

назначения: измерительных, геодезических, медицинских, астрономических, связи и передачи информации и т.д.

- «Сборка, юстировка, испытание и контроль оптических приборов» - подготовка инженеров (бакалавров) по производству и эксплуатации оптических приборов.
- «Метрология и сертификация оптико-электронных приборов» - подготовка инженеров (бакалавров) для метрологических служб и организаций осуществляющих сертификацию продукции.

Студенты, обучающиеся на кафедре, имеют усиленную подготовку по использованию средств автоматизированного конструирования, контролю, юстировке и испытанию приборов, вопросам обеспечения точности их функционирования.

На кафедре имеются следующие учебные лаборатории: Компьютерный класс; Конструкторский класс; Приборов технического зрения; Военных приборов; Оптических приборов; Контроля и юстировки приборов, метрологии и сертификации оптико-электронных приборов. Ряд учебных занятий по военным и космическим приборам проводится в лабораториях базовых кафедр при ГОИ и ЛОМО.

По учебной и научной работе кафедра имеет многолетнее сотрудничество с Техническим университетом Ильменау (Германия), благодаря которому наиболее успевающие студенты, аспиранты и сотрудники кафедры стажировались в лабораториях этого университета.

В настоящее время штатное расписание кафедры состоит из 14-ти ставок профессорско-преподавательского состава (четыре профессора и девять доцентов) и трех инженеров. На кафедре обучается пятнадцать аспирантов и магистрантов.

Амир Маруанович Бурбаев

Методы и средства испытаний, контроля и юстировки
оптических приборов

Методические указания к лабораторному практикуму

В авторской редакции

Компьютерная верстка

Л.Д. Филатова

Заведующая РИО

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел СПб ГУ ИТМО

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Отпечатано на ризографе

Тираж 100 экз.

Заказ № 1112