

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Л.И. КРЫНИН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.02 «ОПТОТЕХНИКА»
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

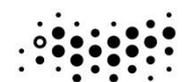
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
Санкт-Петербург
2018

Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 219 с.

Рецензент: Трегуб В.П., к.т.н., начальник конструкторского отделения
оптотехники ЦКБ ОА «ЛОМО»

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части рассмотрены вопросы проектирования объективов постоянного фокусного расстояния на базе использования теоретико-вероятностных методов точностного анализа. Основное внимание уделено методикам вероятностного расчёта модуля и проекции векторов децентрировок оптических элементов объектива, возникающих от технологических погрешностей изготовления и результатов статистического исследования производства объективов и их контроля. На многочисленных примерах показана методика составления уравнений, связывающих децентрировки с параметрами качества изображения, и дан их анализ. Во второй части пособия на основе анализа известных конструктивных решений отечественных и зарубежных фирм сформулированы основные принципы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений приборостроительного профиля, а также инженерно-технических работников промышленности.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

Университет ИТМО.
Крынин Л.И.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТИВОВ
С ПОСТОЯННЫМ ФОКУСНЫМ
РАССТОЯНИЕМ**

ВВЕДЕНИЕ

Современные объективы являются важнейшей частью любого оптического прибора. В зависимости от условий эксплуатации и требований к степени коррекции качества изображения различают десятки типов и сотни вариантов конструктивного исполнения объективов.

И все же, несмотря на столь большое разнообразие выпускаемых объективов, общинженерной методики их проектирования фактически не существует. На каждом отечественном предприятии способы проектирования и подходы к ним базируются главным образом на личном опыте предшественников, чего, к сожалению, бывает недостаточно для разработки новых объективов.

В предлагаемой работе автор пытался восполнить этот пробел.

В первой части пособия основное внимание уделено вопросам, от решения которых зависит успешное освоение серийного и массового производства новых моделей объективов постоянного фокусного расстояния. К таким вопросам относятся в первую очередь вопросы выбора и точностного анализа схем базирования оптических элементов и расчет допусков на технологические погрешности изготовления, вызывающие отклонение линз от расчетных положений.

Все точностные расчеты в работе базируются на положениях теории вероятности.

Применение вероятностных методов расчета предполагает знание законов распределения технологических погрешностей изготовления, значений коэффициентов, связывающих основные характеристики законов распределения с допусками, а также степень коррелированности погрешностей. В связи с этим автором были проведены многочисленные экспериментальные исследования технологических погрешностей изготовления, вызывающих отклонения оптических элементов от расчетных положений и характеристик качества изображения: коэффициентов передачи модуляции (КПМ), функции рассеяния линии (ФРЛ), визуальной оценки дифракционного изображения точки и др.

Практическое внедрение разработанной методики проектирования конструкций объективов выявило определенные трудности при ее освоении. Поэтому в пособии изложение методики проводится последовательно от простых систем объективов к более сложным, и каждый раз на примерах из заводской практики. Автор надеется, что при таком изложении материала предлагаемая методика проектирования не вызовет больших затруднений при ее освоении как студентами, так и инженерно-техническими работниками.

Изложенная методика проектирования может быть применена не только к объективам, но и к любым оптическим приборам, в которых в качестве силовых оптических элементов используются линзы.

Во второй части пособия, на основе анализа и систематизации конструкций отечественных и зарубежных фирм с позиции обеспечения необходимой точности положения и позиционирования оптических компонентов сформулированы основные принципы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния.

ГЛАВА 1. ДЕЦЕНТРИРОВКА – ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Оптические элементы в собранном объективе в зависимости от погрешностей изготовления, сборки и юстировки могут занимать положения, отличные от расчетных.

В общем случае эти отклонения ведут к ухудшению качества изображения, даваемого объективом. Поэтому знание предельно допустимых отклонений на стадии проектирования конструкции объектива имеет большое значение.

Одним из основных факторов, определяющих качество изображения в современных объективах, является децентрировка линз.

1.1 Определение центрировки и децентрировки оптических элементов в конструкции объектива

Необходимость в определении понятий центрировки и децентрировки линз, к сожалению, еще существует. Связана она с тем, что до сих пор многие проектировщики в своей деятельности подходят к этим понятиям с различных, иногда труднообъяснимых позиций. Например, Р.Х. Ноубл [1] под децентрировкой понимает полусумму от децентрировок двух

поверхностей в линзе
$$\Delta C = \frac{(\Delta C_1 + \Delta C_2)}{2}.$$

Такое определение децентрировки трудно поддается логическому объяснению. В этом выражении ее величина является косвенной и непосредственному измерению и контролю не подлежит.

При расчетах допусков на децентрировки пользоваться этим выражением нерационально, т.к. влияние ΔC_1 и ΔC_2 на качество изображения, различное, и, следовательно, в расчетах будет правильным использовать их раздельно.

Известный немецкий оптик С. Хофман [2] считает, что децентрировка линзы должна определяться тремя параметрами: двумя углами ΔV_1 и ΔV_2 между линиями, соединяющими центры кривизны с точками пересечения оси цилиндрического пояска с оптическими поверхностями, и азимутальным углом τ , находящимся между перпендикуляром, опущенным из центра кривизны на ось цилиндрического пояска и заранее выбранной координатной плоскостью (рис.1.1). С таким определением децентрировки также трудно согласиться. Дело в том, что наклон оптической поверхности оценивается не относительно геометрической оси пояска линзы, а относительно оси, задаваемой базировкой линзы на две поверхности: оптическую и цилиндрический поясок. Эта ось в общем виде не совпадает с осью цилиндрического пояска.

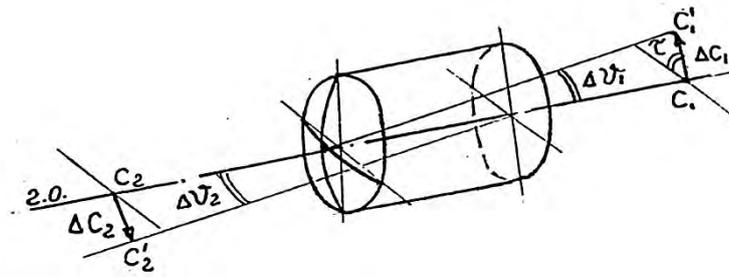


Рис.1.1. Схема децентрировки линзы по С. Хофману

Измерение азимутального угла τ в условиях серийного и массового производства заметно увеличивает трудоемкость контроля децентрировок. Эти измерения могут быть оправданы для уникальных изделий, например, таких как телескопы, для более точной юстировки которых необходимо знание расположения центров кривизны в пространстве.

Для серийного производства угол τ может и должен учитываться при вероятностных расчетах допусков на децентрировки.

Привожу цитату из книги Ф.М. Данилевича и др. [3] «Наиболее употребительной базой при центрировке оптических деталей является оптическая ось». И еще одна цитата из этой книги: «...основные виды центрировочных операций»:

1. Центрировка одиночных линз. В процессе этой операции оптическая ось линзы совмещается с ее геометрической осью.
2. Центрировки линз и блоков линз в оправках. При этой операции оптические оси линзы и блоков совмещаются с геометрическими осями оправ».

Под геометрической осью линзы авторы понимают ось цилиндрического пояса линзы. Такое совмещение является неверным и противоречит требованиям ГОСТ 2.412-81 «Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий».

Согласно этому ГОСТу при центрировке линзы происходит совмещение оптической оси линзы с осью, определяемой базировкой линзы на две поверхности, только одна из которых является цилиндрическим пояском. В общем случае, как было сказано выше, эта ось не совпадает с осью цилиндрического пояса линзы, т.е. с геометрической осью линзы.

Для исключения недопонимания излагаемого материала приведем несколько определений центрировки и децентрировки, которых в дальнейшем будем неукоснительно придерживаться.

Под центрировкой линзы при изготовлении будем понимать совмещение центров кривизны её поверхностей с осью вращения шпинделя центрировочного станка и последующую обработку цилиндрической поверхности линзы до диаметра заданного размера.

Под центрировкой линзы или оптического компонента в конструкции объектива будем понимать совмещение центров кривизны оптических

поверхностей с осью оптической системы объектива, под которой чаще всего понимают геометрическую ось основной базовой оправы объектива.

Поскольку в реальных условиях серийного производства добиться идеальной центрировки практически невозможно, в окончательно собранных объективах всегда имеет место остаточная децентрировка оптических элементов.

Под децентрировкой оптических элементов понимают их поперечное смещение или заклоны относительно оси базовой оправы [4].

Под децентрировкой линзы в оправе будем понимать смещение центров кривизны оптических поверхностей линзы с оси посадочных базовых поверхностей оправы.

Под децентрировкой оптического компонента будем понимать смещение или заклоны оси базовой поверхности оправы компонента относительно оси оптической системы объектива.

Децентрировки приводят к искажению структуры изображения за счет появления аберраций децентрированных систем. Причем на структуру изображения в центре поля зрения и в ближайшей его окрестности влияют по существу две аберрации децентрировки: кома децентрировки и астигматизм [5].

Практика изготовления громадного большинства съёмочных и проекционных объективов показала, что при достигнутых на сегодня величинах децентрировок, основным признаком их появления является кома.

Ее величина пропорциональна децентрировке и квадрату относительного отверстия [6]. Только при значительных величинах децентрировок заметное влияние на структуру изображения приобретает астигматизм. Поэтому в большинстве известных методик расчета допустимых значений децентрировок в оптических системах широкого назначения (профессиональная и любительская фотография, кинематограф), в которых качество изображения определяются на уровне геометрических аберраций, исходят из допустимой величины комы децентрировки на оси системы [7].

Что касается поля зрения, то децентрировки приводят к заклону плоскости изображения, дисторсии, астигматизму, кривизне в сагиттальной плоскости, и при больших величинах – к заметному хроматизму. Наиболее вредным последствием децентрировок является нарушение симметрии качества изображения относительно оси оптической системы объектива.

1.2 Анализ методов расчета децентрировок в конструкции объектива

В современном объективостроении расчет допусков представляет собой одну из сложнейших научно-инженерных задач. Связано это, по-видимому, с полным или частичным несоответствием существующих

методов расчета реальному положению оптических элементов в собранном объективе.

На сегодняшний день известно, по крайней мере, пять проектных методов расчета допусков [8]: метод попыток, метод равного качества, метод пропорционального влияния, метод равных допусков и метод экономического обоснования. Расчеты допусков в конструкциях объективов, проведенные в соответствии с требованиями этих методов, показали, что наиболее удобным и близким к условиям производства является метод попыток.

В этом случае конструктор предварительно устанавливает на технологические погрешности те допустимые величины отклонений, которые еще могут быть получены в заданных условиях производства. Затем производится расчет по соответствующим формулам.

Если в результате такого расчета отклонение выходного параметра окажется больше допустимого, то производится корректировка. На какие-то погрешности допуски ужесточаются, на другие, менее влияющие на качество, расширяются.

Если при повторном расчете окажется, что выходной параметр изменился больше чем требуется, а дальнейшее ужесточение допусков бессмысленно из-за невозможности их достижения в заданных условиях производства, то необходимо пересмотреть выбранное конструктивное решение и произвести новую базировку оптических элементов объектива.

Если и эта мера не поможет, а изменение выходного параметра по-прежнему будет велико, то следует подумать о выборе соответствующей линзы или группы линз в качестве компенсационного элемента. Такова общая схема расчета при применении метода попыток.

Точностной анализ допусков на элементы размерных цепей конструкции объективов производится чаще всего двумя методами: методом максимума-минимума и теоретико-вероятностным. При использовании первого метода допуски на составляющие размеры назначаются так, чтобы допуск замыкающего звена при любой комбинации составляющих звеньев был выдержан в любом случае, то есть при изготовлении деталей размеры имеют либо наименьшие, либо наибольшие предельные значения и погрешности всех размеров арифметически суммируются.

При этом методе расчета не требуется введения таких дополнительных операций при сборке, как подгонка деталей, их дополнительная доработка или подбор новых деталей; не требуется высокая квалификация сборщика; заметно расширяется возможности разделения труда. Но следует отметить и существенный недостаток этого метода. При его использовании требуются более жесткие допуски на составляющие звенья размерных цепей, выполнение которых не всегда возможно.

Вероятностный метод позволяет рассчитывать положения и значения допусков с учетом распределения действительных размеров и вероятности появления различных комбинаций этих размеров при запланированном

проценте выхода значения замыкающего звена за пределы поля его допуска. Но так как, в многозвенных цепях самые неблагоприятные экстремальные значения встречаются практически очень редко, то с учетом законов теории вероятности можно расширить поля допусков, рассчитанных по методу «максимум-минимум» и благодаря этому снизить требования к точности изготовления деталей, сохраняя их взаимозаменяемость. Однако при этом необходимо считаться с относительно небольшой заранее известной долей брака.

Что касается децентрировок, то современные методы их расчета базируются на следующих основных положениях. Считают, что: во-первых, децентрировки являются величинами первого порядка малости по сравнению с размерами световых отверстий и радиусов оптических поверхностей, и что между ними и изменениями поперечных аберраций существует линейная взаимосвязь; во-вторых, децентрировки происходят в одной меридиональной плоскости оптической системы и принимают при этом наибольшие значения.

Первое положение имеет большое прикладное значение. Ежедневная практическая деятельность подтвердила его обоснованность. Второе положение с точки зрения теории вероятности неправомерно, и повседневная инженерная деятельность подтвердила его несостоятельность.

Рассмотрим объектив типа триплет (рис.2.8). В зазорах между корпусом и тремя линзами в оправках при сборке будет происходить поперечное смещение оправ. Известно [9], что направление смещения оправ с линзами с оси системы объектива, установленного вертикально, подчиняется закону равной вероятности. Если допустить, что оправка с одной и той же вероятностью может сместить в 360 направлениях, т.е. через 1° , то, очевидно, вероятность того, что все три оправы сместятся в одном и том же направлении будет равна $(1/360)^3 = 1/47000000$. Даже при годовом выпуске 1500000 штук потребуется не менее 30 лет, чтобы появился объектив с таким расположением оправ.

Проведение расчетов децентрировок в одной плоскости на «максимум-минимум» без учета случайного характера распределения, как величины, так и направления смещения и наклонов линз в собранном объективе, может привести к ошибкам, достигающий 60-100%, а нередко и более, причем, в направлении ужесточения допусков.

В последнее время все большее число конструкторов приходит в мысли о необходимости использования теории вероятностей при расчете допусков. Связано это с тем, что в условиях серийного производства погрешности, вызывающие децентрировки, представляют собой случайные как по модулю, так и по направлению ошибки.

В связи с чем их расчеты должны проводиться по вероятностным характеристикам рассеяния, определяемым или в процессе статистического исследования производства, или по принимаемым законам распределения соответствующий погрешностей. Необходимо подчеркнуть, что без применения теории вероятности любой метод точностного расчета может

дать только приближенные результаты, т.к. во всех этих случаях не будет соответствовать реальным условиям производства.

К одной из первых экспериментальных попыток определить характер децентрировки следует отнести работу Б.М. Корякина, опубликованную в 1935 г. [10].

В этой работе автор показал, что децентрировки линз в объективе и отклонения лучей, вызываемые ими, имеют векторный характер.

Используя это свойство, К. Щух [11] указал на возможность взаимной компенсации влияния децентрировок на качество изображения в объективе.

Впервые расчет модуля суммарного случайного вектора, определяющего положение оптического элемента в приборе относительно его оси, был рассмотрен И.М. Долинским и С.А. Сухопаровым в 1963 г. в работах [12,13] для случая, когда модули составляющих размерную цепь случайных векторов распределены по закону Релея. В этом случае для замыкающего звена будет справедливо выражение

$$P = 1 - \frac{\bar{r}^2}{e^2 \sigma^2},$$

где P – вероятность события, при котором модуль случайного вектора выходит за пределы круга радиуса r ;

σ – среднее квадратическое значение модуля вектора \bar{r} .

В фото- и кинообъективах векторные технологические погрешности, вызывающие отклонение оптических поверхностей от расчетного положения, могут иметь распределения модулей, отличные от распределений, подчиняющихся закону Релея. Вследствие этого применение формулы для результирующего вектора возможно только при условии, что число составляющих векторов в размерной цепи, по крайней мере, не менее шести.

В объективах размерные цепи, определяющие положения поверхностей линз в большинстве своем состоят из 2-4, редко 6 звеньев. Поэтому выражение для расчета интегральной функции распределения в том виде, в котором оно представлено в [12,13], не может быть применено.

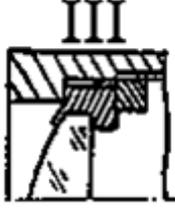
К сожалению, приходится констатировать, что даже те авторы, которые пытаются учесть случайный характер распределения технологических погрешностей, используют в расчетах чаще всего один и тот же закон распределения – нормальный [14,15]. Понять их, в общем-то, нетрудно, так как математический аппарат для вероятностных точностных расчетов разработан наиболее хорошо и полно как раз для погрешностей, имеющих нормальный закон распределения. Но, в реальных условиях производства не все погрешности в объективах подчиняются закону Гаусса. Наконец следует отметить, что все допуски на децентрировки, выдаваемые сегодня на этапе оптического расчета, могут оказаться бесполезными для конструктора объектива.

Дело в том, что допуски на децентрировки очень сильно зависят от способа базировки линз. А поскольку их число очень велико (так, например, для двух соседних линз количество конструктивных вариантов крепления

может достигать 88) и выбор наилучшего способа происходит только при наличии и после обработки оптического выпуска, то совершенно ясно, что оптик-расчетчик никак не может знать, какой вариант базировки будет в конце концов выбран. В то же время в оптическом выпуске он уже дает допуски на децентровки отдельных поверхностей, а иногда и на развороты линз вокруг вершин оптических поверхностей. К чему это может привести?

Обратимся к таблице 1.1, в которой представлены три варианта крепления одной и той же линзы объектива Т-43 (фотоаппарат «Смена»). Для каждого варианта рассмотрим децентровки, возникающие от технологических погрешностей изготовления.

Таблица 1.1

Тип децентровки	 $r_1 = 12 \text{ мм}$	 $r_2 = 460 \text{ мм}$	
Заклон от торцевого биения	$\gamma_{\Delta T}$	$\gamma_{\Delta T}$	$\gamma_{\Delta T}$
Разворот в зазоре	$\gamma_1 = \frac{z}{r_1}$	$\gamma_2 = \frac{z}{r_2}$	$\Delta C_{\perp z}$
Собственная децентровка поверхностей	ΔC_2	ΔC_1	$\Delta C_1, \Delta C_2$
Поперечные смещения от эксцентриситетов посадочных и опорных мест	Δe	Δe	Δe

Из таблицы 1.1 следует, что во всех вариантах число децентровок одинаково – четыре. Во всех вариантах есть децентровки от торцевого биения, а все остальные – различны как по природе, так и по величине. Так, разворот линзы в одном и том же зазоре z в первом варианте приблизительно равен $\gamma_1 = \frac{z}{12}$, что примерно в 40 раз больше, чем во втором, где $\gamma_2 = \frac{z}{460}$.

А в третьем варианте этого разворота вообще нет. В нем имеет место поперечное перемещение оправы с линзой в зазоре z .

Влияние указанных выше децентровок на качество изображения тоже различно. Так, если коэффициент влияния разворота линзы относительно вершины ее второй поверхности равен 0,0001 мм/мин, то коэффициент влияния разворота той же линзы, но вокруг центра кривизны второй поверхности (*II вариант*), имеет величину в 540 раз большую – 0,054 мм/мин.

В тоже время, коэффициент влияния разворота линзы вокруг центра кривизны первой поверхности (*I вариант*) в 41 раз меньше, чем при развороте вокруг центра кривизны второй поверхности. Следовательно, влияние погрешностей на качество изображения очень сильно зависит от

выбора схемы базировки линз. Конечно же, оптик-расчетчик не может знать какую схему базировки выберет конструктор объектива. Поэтому допуски, которые он рассчитывает заранее, могут оказаться неверными.

Кроме того, задавая допуски на развороты линз и целых оптических компонентов, расчетчик не знает, какие линзы или группы линз будут в действительности разворачиваться и где будет находиться точка их разворота.

Отсюда следует, что расчет допусков на децентрировки необходимо проводить только для конкретной конструкции объектива.

В сложившейся ситуации возникла потребность в создании методики инженерного расчета допусков, которая базировалась бы на теории вероятностей, фактических законах распределения технологических погрешностей, вызывающих децентрировки, и учитывала бы конкретные схемы базировки линз.

Такая методика должна позволять вести расчеты децентрировок, по крайней мере, для двух случаев:

- в первом, наиболее известном и распространенном, децентрировки от всех видов технологических погрешностей сводятся только к поперечным смещениям центров кривизны оптических поверхностей;
- во втором – к поперечным смещениям и наклонам.

Первый случай, когда рассчитываются только поперечные смещения центров кривизны, в расчетном плане более трудоемок, но лучше поддается автоматизации. Им также пользуются, когда применяют программы оптических расчетов, позволяющие определить влияние поперечных смещений оптических поверхностей, а расчет влияния наклонов относительно произвольных точек разворота по каким-либо причинам произвести не удастся.

Второй вариант расчета децентрировок наиболее близок к реальному положению линз в конструкции объективов и позволяет использовать более простую схему расчетов, поэтому может представлять для проектировщика больший интерес.

Расчеты допустимых значений децентрировок, вызываемых технологическими погрешностями изготовления, могут быть проведены двумя способами. При первом способе величины смещений и наклонов оптических элементов определяется вне какого-либо определенного направления и, следовательно, при этом оценивается модуль вектора результирующего изменения поперечных аберраций в произвольном направлении. При использовании второго способа все смещения и наклоны линз проектируются в заданную меридиональную плоскость объектива с учетом наклонов распределения их модулей и направлений.

Такой подход к расчету результирующей децентрировки охватывает почти все возможные случаи, встречающиеся при проектировании оптических систем различного назначения.

ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЪЕКТИВОВ

Современные объективы, применяемые в кино-, фото- и телеаппаратуре относятся к классу точных оптических приборов. Основными ошибками конструкций этих объективов являются ошибки положения оптических компонентов. К причинам, вызывающим появление этих ошибок, относятся, главным образом, ошибки выбора схемы конструкции, технологические и эксплуатационные погрешности [16].

К первым относятся отклонения, вызванные приближенным выполнением требуемой функции выбранным устройством. Ко вторым – погрешности формы, размеров и положения деталей; к третьим – погрешности, связанные с деформацией деталей (силовой или температурной), износом, смещением в зазорах, проскальзыванием и т.д. В объективах наибольшее значение имеют технологические погрешности.

При точностном анализе конструкций объективов следует различать два типа погрешностей. К первому относятся погрешности, вызывающие продольные отклонения оптических компонентов (смещение вдоль оси объектива), ко второму – погрешности, вызывающие децентрировки оптических элементов (заклоны и поперечные смещения).

К числу технологических погрешностей, приводящих в общем случае к отклонениям оптических элементов вдоль оси, относятся:

- погрешности базовых вершинных отрезков Δh_B и воздушных промежутков Δd_B ;
- погрешности толщин линз Δd_L ;
- погрешности промежуточных оправ и прокладных колец, расположенных вдоль оси объектива Δl ;
- погрешности продольной юстировки воздушных промежутков $\Delta d_{ВП}$;
- погрешности продольной юстировки дистанционного компонента $\Delta S_{Ю}$.

Основными эксплуатационными погрешностями, вызывающими продольные отклонения оптических элементов от расчетных положений, являются:

- осевые смещения дистанционного компонента в люфте резьбового соединения ΔS_P ;
- осевые смещения кулачка в зазоре между упорами ΔS_K ;
- продольное смещение в зазоре между пальцем и пазом цилиндрического кулачка $\Delta S_{В-П}$.

К числу основных технологических погрешностей, вызывающих децентрировки оптических элементов, следует отнести:

- торцевое биение оправ ΔT ;
- эксцентриситет оправ Δe ;

- погрешность центрировки линзы ΔC_C ;
- конусность направляющих подвижных компонентов ΔK ;
- погрешность центрировки при склейке ΔC_K ;
- погрешность центрировки, возникающая при завальцовке линзы ΔC_3 ;
- погрешность центрировки, возникающая при автоколлимационном центрировании поверхностей линзы в оправе ΔC_A ;
- поперечное смещение и развороты в зазорах между оправами $\Delta C_{\perp Z}$ и γ_Z .

Основной эксплуатационной погрешностью, вызывающей децентрировки оптических элементов в объективах переменного фокусного расстояния, является заклон $\Delta \gamma_{NZ}$ подвижного компонента в зазоре направляющих.

Характер проявления выше перечисленных технологических и эксплуатационных погрешностей в основном случайный. Случайные погрешности являются неизбежными и неустранимыми. Повышая требования к отдельным факторам технологических процессов, можно лишь уменьшить их величину. Поэтому случайные погрешности изготовления учитываются путем назначения допусков на неточность изготовления. Но сделать это возможно только в том случае, если известен характер их проявления (ошибка векторная или скалярная), законы распределения плотности вероятности, параметры этих законов и коэффициенты относительного рассеивания и асимметрии k, α [17].

Поскольку, каких-либо работ, дающих по данному вопросу достоверный, близкий к реальным условиям материал, обнаружить не удалось, автором были проведены исследования, позволяющие определить фактические законы распределения большинства технологических погрешностей, вызывающих отклонения оптических элементов от расчетных положений, а в случаях, где это сделать не удавалось, оценить величины коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии по выборкам, объем которым обязательно оговаривался.

2.1 Эксцентриситеты, торцевые биения опорных торцов и овальности оправ.

Известно [18], что закон распределения эксцентриситета (закон Релея) определяется функцией плотности, математическое выражение которой имеет вид:

$$f(\Delta e) = \frac{\Delta e}{\sigma_0^2} \cdot e^{-\frac{\Delta e^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (0 \leq \Delta e \leq \infty),$$

где $\Delta e = \sqrt{\Delta e_x^2 + \Delta e_y^2}$ - модуль случайного вектора $\bar{\Delta e}$, $\bar{\Delta e}_x$ и $\bar{\Delta e}_y$ - координаты проекции конца вектора $\bar{\Delta e}$ на оси абсцисс и ординат, математические ожидания которых равны между собой $M(\Delta e_x) = M(\Delta e_y)$, а для среднеквадратических значений справедливо $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$.

Ввиду того, что в настоящее время при изготовлении современных объективов отсутствуют какие-либо конкретные данные по параметрам, характеризующим вероятностные законы распределения эксцентриситетов, а опыт работы конструкторов показывает, что величины их находятся в пределах, заданных чертежом, примем за практические границы зоны рассеяния вектора $\bar{\Delta e}$ значения, равные $\Delta e=0$ и $\Delta e=3,44\sigma$. Вероятность того, что случайная величина Δe попадает в интервал $(0; 3,44\sigma)$, равна 0,997.

Измерения эксцентриситета внутреннего посадочного диаметра $\varnothing 14H7$ корпуса киньсъемочного объектива Т-51 относительно его наружного диаметра $\varnothing 20h7$ в 99 деталях показали (рис.2.1.), что эмпирическая кривая (1) действительно достаточно близка к кривой, описываемой законом Релея (2).

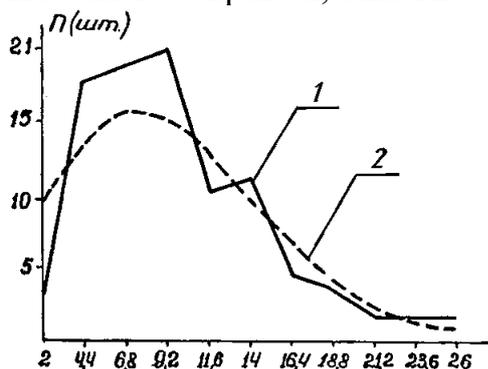


Рис. 2.1. Кривые распределения эксцентриситета; 1 – эмпирическая, 2 – теоретическая

При практических расчетах предлагается брать $k=1,14$, $\alpha=-0,27$.

Что касается торцевого биения оправ Δ_T , то и здесь можно считать, что дифференциальный закон распределения $f(\Delta_T)$ полностью описывается законом Релея [18].

Сопряженные вал и отверстие могут иметь погрешности не только размеров, но и формы. Погрешности формы вала и отверстия можно не учитывать лишь при прикидочных расчетах, а также в тех случаях, когда влияние погрешности формы по сравнению с влиянием погрешности других звеньев мало.

На практике при расчете размерных цепей можно ограничиться учетом только овальности.

В табл.2.1 представлены результаты измерений и расчетов параметров k_ϕ , α_ϕ для овальности более чем 600 оправ любительских объективов Т-51, Т-54, ОП-1,8, ПФ – 3.

Таблица 2.1

Номинальный диаметр оправы	δ , мкм	k	α
До \varnothing 30 мм	0÷2	1,60	-0,25
	3÷4	1,24	-0,20
	5÷7	1,16	-0,20
\varnothing 40 мм	10	1,7	-0,20

2.2 Направления и модули векторных технологических погрешностей

Очевидно, что в процессе сборки объективов направления всех векторных технологических погрешностей имеют произвольный характер. Поэтому для проведения экспериментов были изготовлены прозрачный полистироловый стакан и двадцать дисков из того же материала. На наружной поверхности стакана вдоль его образующих через 1 мм были нанесены продольные риски. Угловое расстояние между двумя соседними рисками соответствовало трем градусам. Высота стакана была выбрана такой, чтобы в него могло поместиться пять дисков. Выбор указанного количества дисков основывался на том, что в собранном объективе величина суммарной децентрировки оптического элемента определяется, как правило, не одной, а несколькими технологическими погрешностями. Так, децентрировка неподвижных оптических компонентов обычно определяется двух-, трехзвенной векторной размерной цепью; децентрировка подвижных компонентов – размерной цепью, состоящей из 5-6 звеньев и значительно реже - из большего числа звеньев.

На наружной поверхности каждого диска вдоль его образующей нанесена риска и заполнена непрозрачным запуском. В процессе проведения эксперимента все двадцать дисков смешивались в темноте и высыпались в технологическую тару. Затем также, произвольно, диски брались из технологической тары и вслепую устанавливались в прозрачный стакан. По угловой шкале, нанесенной на стакане, против рисок на дисках производились отсчеты углов. После снятия отсчетов диски высыпались из стакана, а на их место устанавливались новые из числа оставшихся. Измерения проводились до тех пор, пока 20 дисков не были использованы в работе. Затем все диски перемешивались, снова высыпались в технологическую тару. Последующая работа протекала аналогично описанной выше.

При определении характера ориентации векторных технологических погрешностей в полистироловый стакан по описанной методике устанавливались 5 дисков по сто раз каждый.

В процессе проведения эксперимента были измерены модули эксцентриситетов в пяти оправках $|\bar{r}_1| \div |\bar{r}_5|$, применяемых при сборке любительских объективов и углы $\varphi_1 \div \varphi_5$, задающие их направления. Затем

были построены 100 векторных размерных цепей, образец одной из которых представлен на рис.2.2.

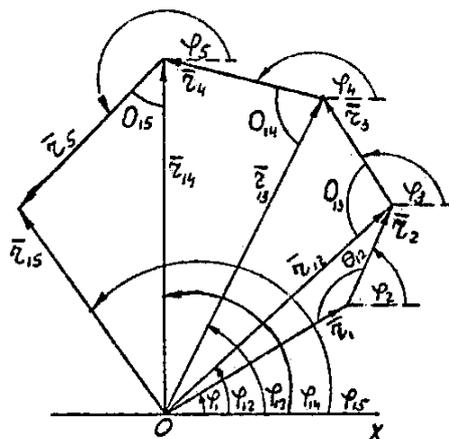


Рис.2.2. Размерная цепочка, состоящая из пяти векторов

Из построенных таким образом размерных цепей находились модули суммарных векторов эксцентриситетов $|\bar{r}_{12}|, |\bar{r}_{13}|, |\bar{r}_{14}|, |\bar{r}_{15}|$, углы $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{15}$, определяющие их направления, а также углы $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}$ между двумя последовательными складываемыми векторами.

С учетом полученных данных были построены полигоны распределений всех измеренных углов: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, определяющих направления складываемых векторов и углов $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{15}$, определяющих направления суммарных векторов.

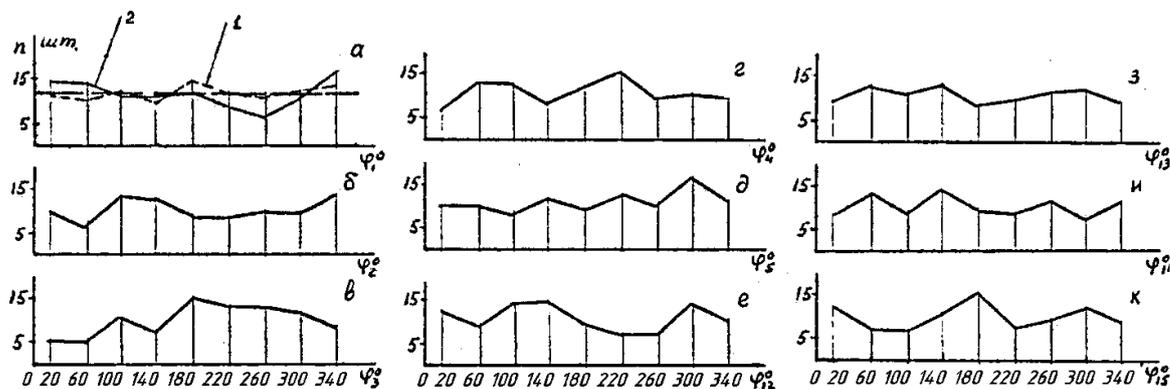


Рис.2.3. Полигоны распределений углов

Из рис.2.3 следует, что характер изменения эмпирических кривых распределений углов $\varphi_1 \div \varphi_5$ примерно одинаков. Сравнение этих кривых с теоретическим законом равномерного распределения позволяет предположить, что они вполне могут быть им описаны.

Для уточнения характера распределения углов объем выборки при определении угла φ_1 , был увеличен до 200. Из рис.2.3 видно, что случайные

выбросы при этом уменьшились, и эмпирическое распределение 1 стало значительно ближе к теоретическому 2.

Оценка по критерию Пирсона позволяет с надежностью 98% утверждать, что эмпирическое распределение угла φ_1 в диапазоне от 0° до 360° полностью описывается законом равномерного распределения.

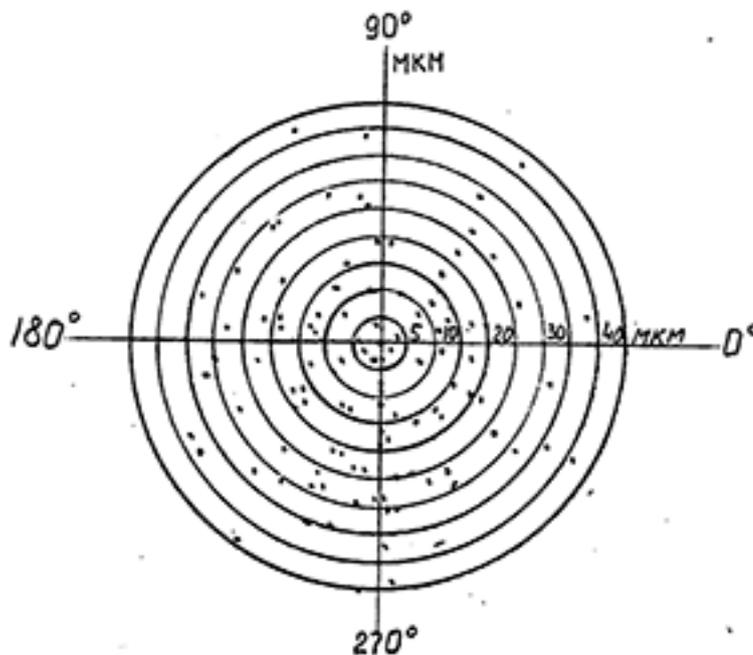


Рис.2.4. Диаграмма распределения концов векторов, определяющих децентровки первой поверхности объектива Т-51

На рис.2.4 представлена диаграмма распределения концов векторов децентровок первой поверхности в 150 любительских объективах Т-51, измеренных на приборе СТ-41 по схеме, приведенной на рис.2.5. Из диаграммы следует, что направление смещений центров кривизны C_1 с оси объектива может быть принято равномерным в диапазоне от 0° до 360° .

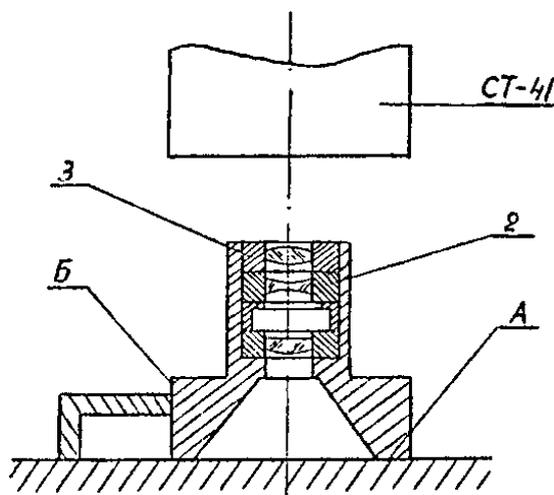


Рис.2.5. Схема определения децентровок на приборе СТ-41

На рис.2.6 приведены полигоны распределения углов $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}$ между складываемыми векторами \bar{r}_1 и \bar{r}_2, \bar{r}_{12} и \bar{r}_3, \bar{r}_{13} и \bar{r}_4, \bar{r}_{14} и $\bar{r}_5,$ соответственно, и теоретическая прямая равномерного распределения 2 (рис.2.6а). Как видно из рис.2.6 эмпирические распределения имеют одинаковый характер изменения и вполне могут быть описаны законом равномерного распределения. Для уточнения характера распределения угла θ объем выборок, по которым исследовались направления, задаваемые углами, $\varphi_1, \varphi_2,$ был доведен до 196 (рис.2.6а, кривая 1). Оценка по критерию Пирсона с надежностью 98% позволяет утверждать, что распределение угла θ_{12} векторами подчиняется закону равномерного распределения.

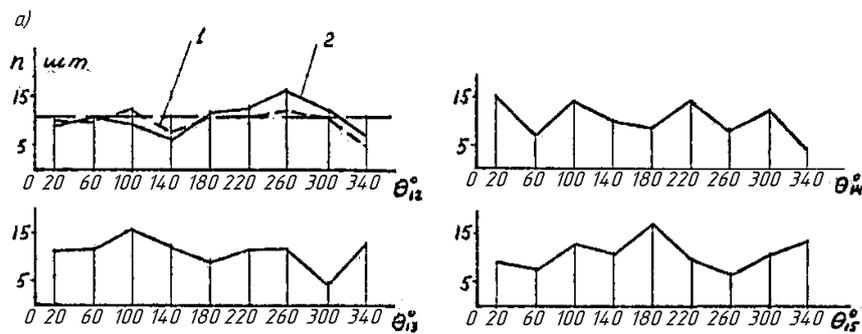


Рис. 2.6. Распределение углов, определяющих направления суммарных векторов (ошибки децентрировки)

Выше было показано, что распределение модуля эксцентриситета описывается законом Релея. Из рис.2.7, на котором в качестве примера представлены эмпирические распределения модулей эксцентриситетов \bar{r}_1 (рис.2.7а) и \bar{r}_2 (рис.2.7б), видно, что характер их распределения действительно близок к кривой Релея. Распределение модуля вектора $\bar{r}_{12},$ являющегося суммой векторов \bar{r}_1 и $\bar{r}_2,$ представлено на рис.2.7с, кривая 1.



Рис. 2.7. Распределение модулей эксцентриситетов

На этом же рисунке построена выравнивающая кривая распределения Релея (рис.2.7с, кривая 2). Оценка близости эмпирического распределения к закону Релея была проведена по критерию Пирсона. Сравнение расчетного коэффициента Пирсона $\chi^2 = 8,812$ с приведенным в [19] значением

$\chi_0^2 = 15,09$ показывает, что разница между эмпирической и теоретической кривой незначительна. Следовательно, распределение модуля суммарного вектора $\overline{r_{12}}$ с надежностью 98% можно описать законом Релея.

По экспериментальным данным были также построены эмпирические распределения модулей векторов $\overline{r_{12}}$ и $\overline{r_3}$, $\overline{r_{13}}$ и $\overline{r_4}$, $\overline{r_{14}}$ и $\overline{r_5}$, и модулей их сумм: $\overline{r_{13}}$, $\overline{r_{14}}$, $\overline{r_{15}}$. Для распределения модулей сумм $\overline{r_{13}}$, $\overline{r_{14}}$, $\overline{r_{15}}$ построены выравнивающие кривые. Оценка их по критерию χ^2 показала, что с надежностью 98% можно считать, что распределения модулей суммарных векторов $\overline{r_{13}}$, $\overline{r_{14}}$, $\overline{r_{15}}$ подчиняются закону Релея.

Таким образом, в процессе эксперимента было выявлено, что если векторная размерная цепь состоит из звеньев, модули которых распределены по закону Релея, то и распределения модулей суммарных векторов будет также подчиняться закону Релея.

Для оценки связи между суммируемыми векторными погрешностями были построены 48 пятизвенных векторных размерных цепей, состоящих из одних эксцентриситетов (первый вариант), и 48 пятизвенных цепей, в которых первые два звена представляли собой эксцентриситеты, следующие два – торцевые биения, а пятое звено – собственную децентрировку линзы, закрепленной в оправе и отцентрированной в ней методом авто коллимации (второй вариант).

Модули эксцентриситетов и торцевых биений измерялись в оправках любительских серийно выпускаемых объективов Т-51, Т-54, Т-55, а углы, задающие направление векторным ошибкам, оценивались в экспериментальном стакане. По результатам построения векторных цепей и соответствующих измерений были рассчитаны полные коэффициенты корреляции между суммируемыми векторами $\overline{r_1}$ и $\overline{r_2}$, $\overline{r_{12}}$ и $\overline{r_3}$, $\overline{r_{13}}$ и $\overline{r_4}$, $\overline{r_{14}}$ и $\overline{r_5}$. Результаты измерений приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

№ варианта	Коэффициенты корреляции			
	ρ_{12}	$\rho_{12,3}$	$\rho_{12,4}$	$\rho_{12,5}$
1	0,13	0,32	0,07	0,19
2	0,001	0,10	0,05	0,05

Из табл. 2.2 следует, что величины коэффициентов корреляции малы. Расчет значимости коэффициентов корреляции подтвердил, что с надежностью 99% можно считать их незначительно отличающимися от нуля. Следовательно, можно утверждать, что суммируемые вектора являются независимыми.

2.3 Децентрировки линз

Для определения фактических законов распределения плотности вероятности децентрировок при центрировке линз в оправках методом

автоколлимации были исследованы линзы объективов массового производства Т-43. Принципиальная схема конструкции объектива представлена на рис.2.8.

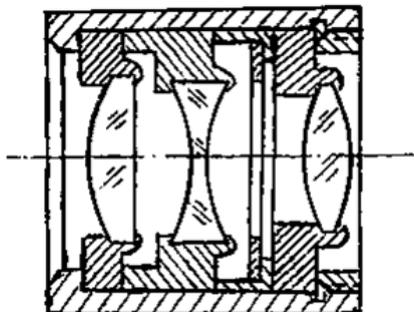


Рис.2.8. Конструкция объектива Т-43

Линзы объектива центрировались на токарно-арматурных станках типа «Кергер» с помощью автоколлимационной трубки ЮС-13.

Закон распределения децентрировок линз в оправках был определен по результатам измерений 700 поверхностей линз. Как видно из рис.2.9 полигон распределения (сплошная линия) и выравнивающая его кривая распределения Релея (пунктирная линия) отличаются друг от друга незначительно. По критерию Пирсона с надежностью 99% можно считать их отличие несущественным.

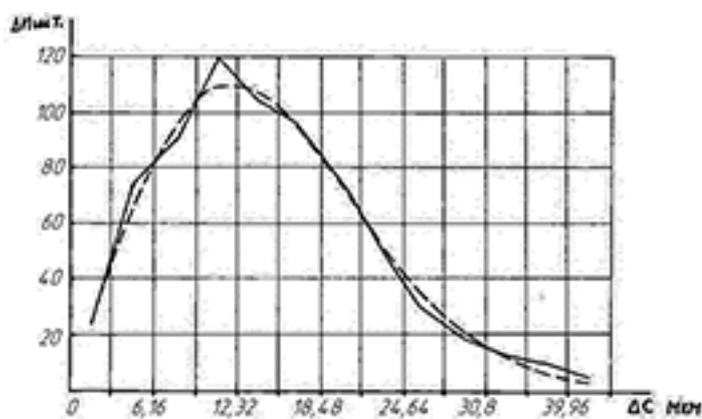


Рис. 2.9. Распределение децентрировок линз, закрепленных в оправках и центрированных методом автоколлимации

Теоретически этого следовало ожидать. Появление децентрировок поверхностей линз является результатом суммирования действий значительного количества (более двух десятков) независимых, случайных и некоторого числа систематических погрешностей станка. Причем число случайных факторов (эксцентриситеты посадочных мест, торцевые биения, смещения в зазорах, жесткость станка и т.д.) не изменялись во времени, и по своему влиянию на величины децентрировок были одного порядка.

Схема центрировки линз в оправках, закрепленных в плавающем патроне при автоколлимационном способе центрировки, когда биение блика от каждой из поверхностей контролируется и определяется по сетке окуляра, полностью совпадает со схемой, рассмотренной Н.А. Бородачевым [20] для выборки эксцентриситета. В этом случае, как показал автор, имеет место рассеяние на плоскости по закону Гаусса, а распределение модуля вектора по закону Релея.

Опытные значения коэффициентов k и α для распределения децентрировок, имеющих место при центрировке линз в оправках методом автоколлимации соответственно равны $k=1,17$, $\alpha=-0,3$.

Для линз, центрируемых в патронах сжатия на станках типа ЦС-10 и ЦС-50, коэффициенты k и α были соответственно равны 1,21 и -0,24.

Таким образом, при выполнении практических расчетов следует считать, что распределение плотности вероятности децентрировок линз подчиняется закону Релея.

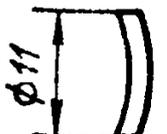
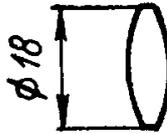
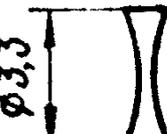
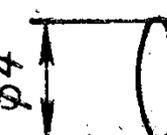
2.4 Толщины линз и базовые вершинные отрезки

Закрепление линзы в оправе должно обеспечивать получение требуемого от объектива качества изображения. При хорошей центрировке линз и отсутствия недопустимых пережатий нарушение качества изображения обычно связано с изменением величины сферической аберрации. Главнейшими причинами этого изменения являются погрешности толщин линз и воздушных промежутков.

Знание фактических законов распределения погрешностей толщин линз и воздушных промежутков, а также коэффициентов, обуславливающих характер распределения погрешностей в заданных условиях производства, приобретает особое значение на этапах проектирования и анализа конструкций объективов, так как позволяет применять теоретико-вероятностные методы расчета допустимых отклонений этих погрешностей и правильно решать вопросы селективной сборки при комплектации линз.

Для установления характера распределения отклонения толщин деталей были исследованы партии линз, применяемые в производстве некоторых отечественных объективов для любительских кино- и фото съемочных аппаратов. Измерению были подвергнуты линзы, комплектуемые по толщине с последующей склейкой (объективы ПФ-2, «Индустар-70», афокальная насадка НА-2^x), и линзы, не склеиваемые в ходе дальнейшего технологического процесса (объектив Т-51). Толщины измерялись с помощью индикатора типа 2МКМ (ГОСТ 6934-62) с ценой деления 2 мкм. По результатам измерений составлена табл.2.3.

Таблица 2.3

Линза	Параметры линз	Коэффициенты		Объем выборки шт.
		k	a	
	ПФ-2 $r_1 = -23,99$; $d = 1$; $r_2 = -23,99$ Стекло Ф1	1,17	0,04	297
	НА-2 $r_1 = -101,86$; $d = 0,6$; $r_2 = -4,45$ Стекло БК10	1,13	-0,03	535
	«Индустар-71» $r_1 = -59,43$; $d = 5,4$; $r_2 = -21,53$ Стекло ЛФ10	1,20	0,02	83
	«Индустар-71» $r_1 = -155,6$; $d = 1,5$; $r_2 = -59,42$ Стекло ЛФ10	1,18	0,00	122
	Т-51 $r_1 = -5,97$; $d = 0,4$; $r_2 = -4,875$ Стекло ТФ8	1,07 1,03	0,18 0,18	259 854
	Т-51 $r_1 = -4,875$; $d = 1,2$; $r_2 = -19,95$ Стекло СТК9	1,00	-0,05	830

Из данных, приведенных в табл.2.3, следует, что коэффициенты относительного рассеяния линз, предназначенных для склейки, колеблются в пределах от 1,13 до 1,20, т.е. на 13÷20% превышают коэффициент относительного рассеяния нормального закона. В то же время, коэффициенты относительного рассеяния линз, непосредственно идущих на сборку, более близки к единице (1,00÷1,07), причем с ростом объема исследуемой выборки значение коэффициента относительного рассеяния приближается к единице. Что касается коэффициента относительной асимметрии, то его значения колеблются от 0,18 до - 0,05. Причиной, по-видимому, следует считать различную настройку оборудования на заданных размер толщин линз.

В качестве примера для одной из линз объектива Т-51 построен полигон распределения 1 и выравнивающая его теоретическая кривая 2 нормального распределения (рис.2.10). Выбор нормального распределения в

качестве теоретического был сделан на основе практического опыта и предположения, высказанного в работе [21].

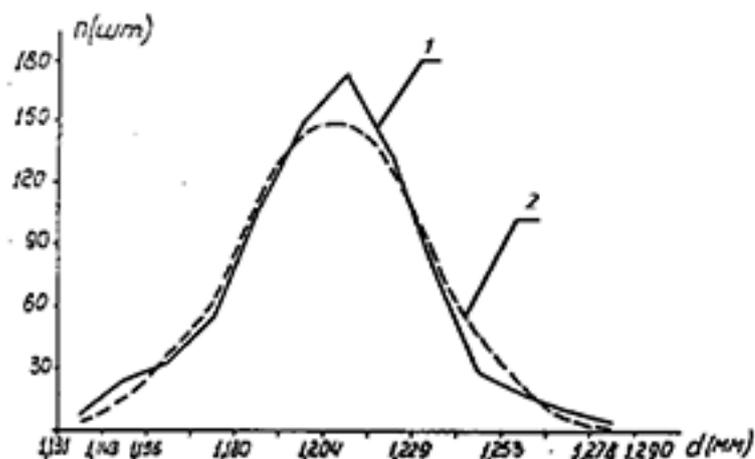


Рис.2.10. Эмпирическая 1 и теоретическая 2 кривые распределения толщины линзы

Сравнивая эмпирическую и теоретическую кривые распределения нетрудно заметить, что разница между ними незначительна. Расчет критерия согласия по В.И. Романовскому [19]

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}},$$

где χ^2 - критерий согласия Пирсона, k – число степеней свободы, подтвердил, что нет оснований отвергать гипотезу о нормальном распределении толщин линз:

$$\frac{\chi^2 - k}{\sqrt{2k}} = 1,85 \leq 3.$$

Здесь χ^2 - критерий вычислен по таблице [19] при уровне существенности $P=0,05$.

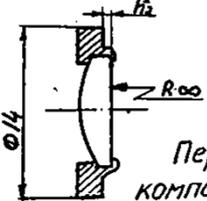
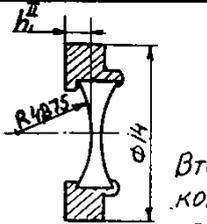
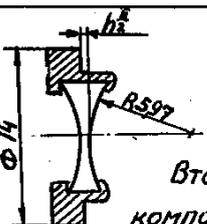
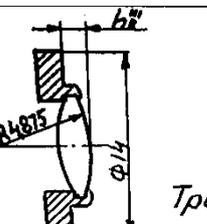
Распределение погрешностей при расчетах толщин линз следует считать подчиняющимся закону Гаусса, а значения коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии – соответственно равными: $k=1,00$ и $\alpha=0$ для не склеиваемых линз и $k=1,17$ и $\alpha=0$ для линз, комплектуемых по толщинам с последующей склейкой.

Точность заданных постоянных воздушных промежутков определяется точностью исполнения базовых вершин отрезков, т.е. расстояниями от вершин линз до опорных торцов оправ.

Для определения характера распределения базовых вершинных отрезков h они были измерены в трех компонентах объектива Т-51. Измерения проводились несколько сот раз в каждой выборке. Оправы крепились в плавающих патронах с радиусом чашки 70 мм по технологической резьбе СПМ19х0,35 кл.2а. Рабочий контроль базовых вершин отрезков осуществлялся индикаторами часового типа (по ГОСТ 577-

68) с ценой деления 0,01 мм. Исследование базовых вершин отрезков проводились индикаторами типа 2 МКМ с ценой деления 2 мкм (ГОСТ 6934-62). Результаты измерений приведены в табл.2.4.

Таблица 2.4

Компоненты	Параметры		
	k	α	Объем выборки шт.
 <p>Первый компонент</p>	1,24	-0,08	369
 <p>Второй компонент</p>	1,08	-0,05	726
 <p>Второй компонент</p>	1,10	0,18	666
 <p>Третий компонент</p>	1,19	-0,17	817

Из таблицы следует, что значение коэффициента относительного рассеяния колеблется в пределах от 1,10 до 1,24. При этом значение коэффициента α изменяется от 0,18 до -0,17. При расчетах предлагается брать: $k=1,20$ и $\alpha=0$.

В качестве примера для одного из компонентов на рис.2.11 построен полигон распределения 1 и выравнивающая его кривая 2 нормального распределения. Из графиков видно, что эмпирические результаты достаточно близко описываются кривой, построенной по закону Гаусса. Расчет критерия согласно В.И.Романовского составил $1,82 < 3$, что подтверждает не существенность расхождения эмпирического и теоретического распределений.

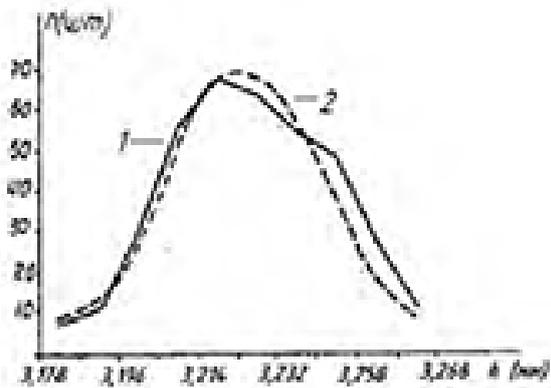


Рис.2.11. Эмпирическая 1 и теоретическая 2 кривые распределения вершинных отрезков

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- погрешности обработки толщин линз и базовых вершинных отрезков носят чисто случайный характер, обусловленный действием большого числа независимых факторов;
- распределение погрешностей при этом описывается нормальным законом.

И, наконец, небольшое замечание к этому разделу. Многолетний опыт автора по изготовлению и контролю объективов показал, что в условиях крупносерийного и массового производства получение воздушных промежутков и толщин линз с допусками $\pm 0,01$ мм или $\pm 0,02$ мм представляет серьезные технологические трудности. Брак при этом может достигать 60-80%. В качестве примера на рис.2.12 приведены полигоны распределения толщины линзы $2,5 \pm 0,01$ мм и вершинного отрезка $0,5 \pm 0,02$ мм фотообъектива «Минитар-1Л». Заштрихованные области под кривыми соответствуют браку. Как видно из рисунка, величина брака составляет соответственно 60% и 75%. Несмотря на столь большой выход деталей за пределы допусков, объективы по качеству изображения соответствовали требованиям технических условий. Следовательно, та методика расчета допусков на воздушные промежутки и толщины линз, которой пользуются сегодня наши уважаемые оптики-расчетчики, дает ужесточенные значения допусков. Поэтому он нуждается в корректировке.

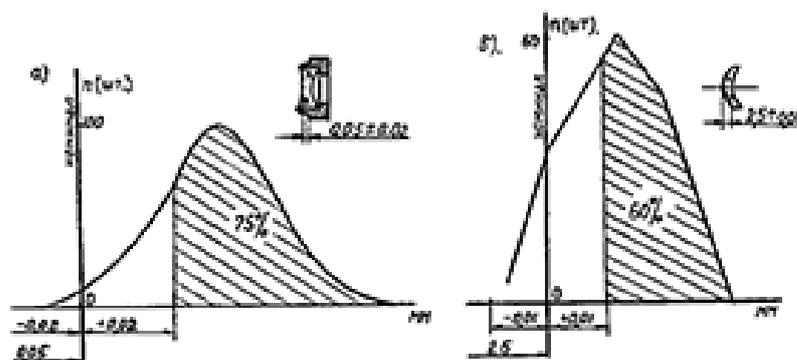


Рис 2.12. Полигоны распределения верхнего отрезка и толщины линзы объектива «Миниатар – 1А»

2.5 Переменные воздушные промежутки

Объективы переменного фокусного расстояния, применяемые в телевизионной и киносъемочной аппаратуре, имеют от трех (объективы с механической компенсацией) до четырех (объективы с оптической компенсацией) переменных воздушных промежутков.

Ниже будут рассмотрены только объективы с механической компенсацией.

Первый воздушный переменный промежуток объектива – это промежуток между дистанционным и вторым компонентом. Определяется он в процессе юстировки при установке дистанционной шкалы. В первом приближении можно считать, что распределение ошибок установки дистанционного компонента, а значит и первого промежутка, подчиняется трапецеидальному закону распределения, для которого можно взять $k=1,3$; $\alpha=0$.

Второй и третий переменные воздушные промежутки определяются размерными цепями, состоящими соответственно из 12-16 и 6-8 размеров. В размерные цепи входят как скалярные, так и векторные погрешности.

В соответствии с предельной теоремой [22] распределение погрешностей установки второго и третьего переменных промежутков в собранном объективе может быть описано законом Гаусса, для которого $k=1,3$; $\alpha=0$.

Если один из воздушных промежутков (чаще второй или третий) выставляется на окончательной сборке после предварительного замера и последующей его корректировки до расчетной величины, то коэффициенты k и α примут иные значения. В качестве примера на рис.2.13 приведены результаты измерений юстируемого в процессе сборки третьего воздушного промежутка в 47 объективах «Агат-14».



Рис.2.13. Распределение погрешности юстируемого воздушного промежутка

Измерения проводились микрометрическим глубиномером. Погрешность измерения ± 5 мкм. Расчет коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии дал следующие значения коэффициентов: $k=1,16$; $\alpha=0$.

Из рис.2.13 видно, что распределение погрешности третьего воздушного промежутка заметно отличается от нормального и имеет явно выраженную асимметрию. Такое отличие объясняется тем, что при неавтоматическом способе получения размеров (в нашем случае размер получается методом последовательных проб) рабочий вносит существенный изменения в условия возникновения нормального закона. Имея возможность влиять на ход технологического процесса, рабочий стремится сделать так, чтобы полученный размер был близок к номиналу со стороны исправимого брака. Этим и объясняется асимметрия полученного распределения.

2.6 Линейные координаты кулачка

Кулачок является важным элементов конструкции объектива. От того, настолько точно изготовлены профили его рабочих поверхностей, будут зависеть основные свойства объектива.

Поскольку в технической литературе не удалось обнаружить данных по статическому исследованию цилиндрических кулачков, применяемых в объективах, ниже приведены результаты исследования выборки кулачков 43 объективов ПФ-3 (1:1,7/8-32).

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах размерных цепей, составными частями которых являются линейные координаты точек пазов цилиндрических кулачков.

Измерены были координаты четырех точек 0° , 20° , 40° , 60° , расположенных вдоль образующих криволинейного и прямолинейного пазов кулачка. Измерения производились на микроскопе УИМ-21 по методике, изложенной в [23].

Полученные в результате измерений и расчетов значения основных параметров распределений приведены в табл.2.5.

Таблица 2.5

Параметры распределения	Формы паза						
	Криволинейный паз				Прямолинейный паз		
	0°	20°	40°	60°	0°	20°	40°
k	1,19	1,19	1,03	1,15	1,17	1,45	1,45
α	0,39	0,28	0,24	0,32	-0,29	-0,07	-0,18

Из данных, приведенных в таблице, следует, что у подавляющей части кулачков центра группирования погрешностей изготовления точек криволинейного паза смещены в сторону увеличения расчетных координат паза ($\alpha > 0$), а у прямолинейного паза – в сторону уменьшения расчетных координат паза ($\alpha < 0$).

Смещение центров группирования может быть объяснено предварительной настройкой установки для нарезания пазов, ходом технологического процесса, жесткостью установки и др.

Для выполнения расчетов предлагается использовать для криволинейного паза значения $k=1,15$; $\alpha=0,3$, а для прямолинейного паза – $k=1,35$; $\alpha=-0,18$.

2.7 Поперечные смещения оправ с линзой в зазоре между оправой и корпусом

Поперечное смещение оправы в зазоре определяется не только величиной радиального зазора z , но и, что самое главное, характером распределения этого смещения, т.е. технологией сборки объектива. Пусть объектив собирается таким образом, что в процессе сборки ось внутреннего посадочного диаметра корпуса располагается горизонтально. В этом случае, при установке в него оправ с линзами, последние под действием своего веса всегда будут стремиться выбрать зазор в направлении силы тяжести. Понятно, что в этом случае закон распределения смещения оправы в зазоре z будет определяться законом изменения радиального зазора. Такой случай возникает чаще всего при сборке больших, тяжелых объективов.

При сборке более легких объективов, таких как фото-, кино- и телеобъективы на малый формат изображения $\{1/2", 1/3"\}$ и т.д. характер распределения смещений может быть другим. Обратимся к результатам экспериментальных исследований. Одна и та же оправка с линзой фотообъектива «Минитар – 1Л» 200 раз устанавливалась в опытный корпус, изготовленный с одной установкой. Причем в одном случае она устанавливалась сразу за гайкой, а в другом – через два имитационных кольца на внутренний торец корпуса. Такой эксперимент позволял выяснить влияние гайки, если таковое имело место, на характер распределения смещения оправы в постоянном по величине зазоре между корпусом и

оправой. Результаты экспериментов представлены на рис.2.14 и 2.15, соответственно.

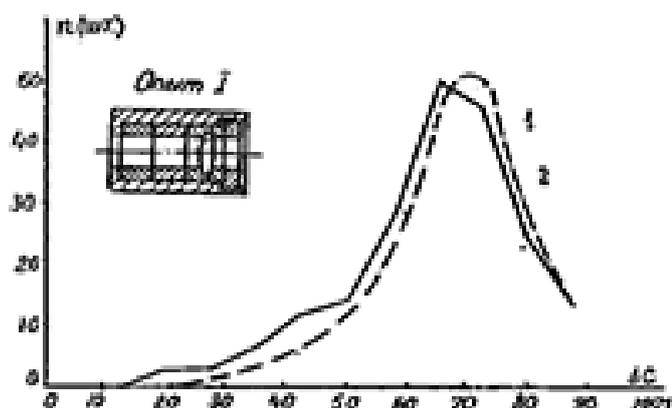


Рис.2.14. Кривые распределения смещения оправы с линзой в постоянном по величине зазоре: 1 – эмпирическая; 2 – теоретическая, построенная по

$$\text{выражению } f(\Delta c) = -\frac{\Delta c - b}{\sigma_{\perp}^2} e^{-\frac{(\Delta c - b)^2}{2\sigma_{\perp}^2}}$$

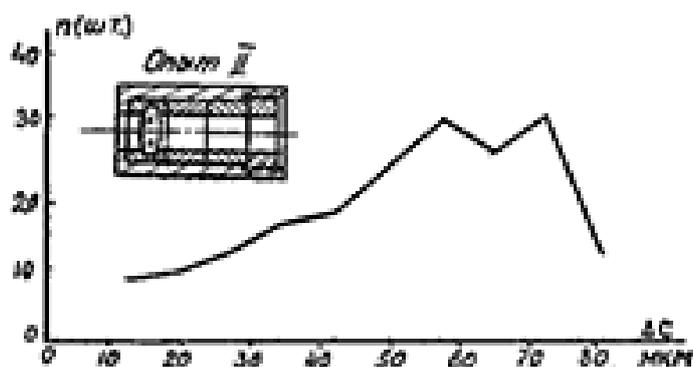


Рис.2.15. Эмпирическое распределение смещений оправы с линзой в постоянном по величине зазоре

На рис.2.14 видно, что эмпирическая и теоретическая кривые весьма близки друг к другу. Для этого случая опытные коэффициенты относительного рассеяния и асимметрии равнялись $k=1,20$ и $\alpha=0,29$. Для второго случая, представленного на рис.2.15, $k=1,23$ и $\alpha=0,33$.

Сравнивая эмпирические кривые рис.2.14 и рис.2.15, следует отметить общий характер их изменения в поле рассеяния. Но различие между ними, все же, есть. Оно заключается в том, что рассеяние экспериментальных данных во втором опыте заметно больше ($S_2=18,9 > S_1=14,2$), чем в первом. То есть, в первом опыте, когда оправа с линзой находится в непосредственной близости к гайке, большая часть оправ смещается к стенке корпуса объектива. Во втором опыте число оправ с линзой, находящейся ближе к оси внутреннего посадочного диаметра, возросло в 2-3 раза, следовательно, возросло количество объективов с более высокой точностью расположения оправ с линзами относительно оси объектива.

Более распространенным в условиях серийного и массового производства является другой тип сборки, когда ось внутреннего посадочного диаметра корпуса объектива устанавливается вертикально. Как показала практика, и в этом случае характер распределения смещения оправ с линзами описывается законами, отличными от нормального. Для более ясного представления о характере смещения оправ был проведен следующий эксперимент. Как и в предыдущем случае, в опытный корпус, ось которого располагалась вертикально, 200 раз устанавливалась одна и та же оправа с линзой объектива «Минитар – 1Л». Результаты измерения смещения оправы, представленные на рис.2.16, позволяют утверждать, что экспериментальная и выравнивающая ее теоретическая кривая достаточно близки друг к другу.

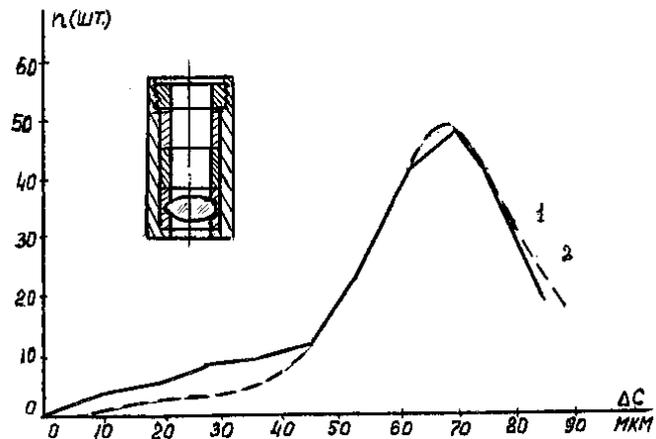


Рис.2.16. Кривые поперечных смещений оправы с линзой: 1 – эмпирическая; 2 – теоретическая, построенная по формуле $f(\Delta C_1) = -\frac{(\Delta c - b)}{\sigma_{\perp}^2} e^{-\frac{(\Delta c - b)^2}{2\sigma_{\perp}^2}}$

Рассчитанные по результатам измерений опытные значения коэффициентов относительного рассеивания и асимметрии соответственно равны $k=1,07$ и $\alpha=0,39$. Во всех перечисленных экспериментах собственная децентрировка оптической поверхности линзы не превышала 5 мкм. Контроль смещений осуществлялся на автоколлимационном микроскопе СТ - 4.

Таким образом, при установке оправы с линзой в корпус закон ее смещения в постоянном поперечном зазоре, существующем между корпусом и оправой, вполне может быть описан функцией вида

$$f(\Delta C_{\perp}) = -\frac{\Delta c - b}{\sigma_{\perp}^2} e^{-\frac{(\Delta c - b)^2}{2\sigma_{\perp}^2}}; (0 \leq \Delta C \leq b)$$

Но поскольку в реальных объективах зазор – величина переменная, и, как уже было установлено, характер его распределения описывается законом Гаусса, то, очевидно, следует ожидать, что и распределения смещений оправы с линзой в этом зазоре будут иным, чем для постоянного зазора (см. стр.123).

2.8 Оценка связи между децентрировками поверхностей в линзах, центрированных автоколлимационным способом

Большое значение для точностных расчетов и построения рационального технологического процесса изготовления линз в оправках имеет вопрос тесноты и формы связи между децентрировками поверхностей в линзе.

Рассмотрим принципиальную схему центрировки оправы с линзой в плавающем патроне с помощью автоколлимационного микроскопа ЮС-13 (рис.2.17).

После закрепления оправы с линзой в плавающем патроне центры кривизны поверхностей устанавливаются произвольно относительно оси шпинделя станка.

Пусть центр кривизны первой поверхности займет положение C'_1 , а центр кривизны второй поверхности положение C'_2 . При этом расстояние их от оси шпинделя в общем случае превышает допустимые значения.

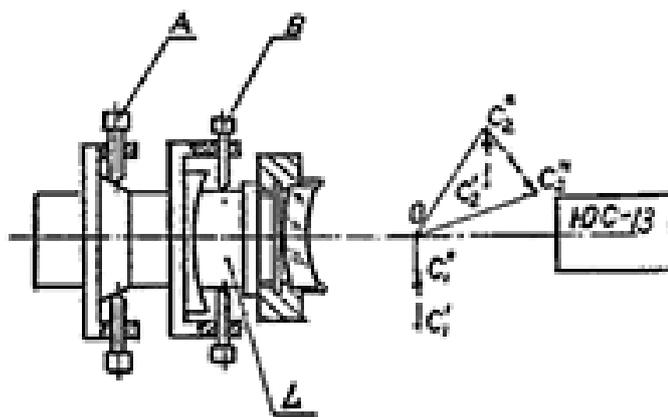


Рис.2.17. Принципиальная схема центрировки оправы с линзой в плавающем патроне

На первом этапе центрировки рабочий совмещает винтами A центр кривизны первой поверхности с осью шпинделя до величины, не превышающей допустимую. Пусть это положение будет C''_1 . При этом центр кривизны второй поверхности C'_2 сместится в направлении смещения центра кривизны первой поверхности на величину, равную $C'_1 C''_1$ и займет положение C''_2 .

На втором этапе центрировки рабочий винтами B разворачивает корпус L вокруг центра кривизны O на величину, при которой центр кривизны второй поверхности займет положение C_2''' . Причем расстояние от C_2''' до оси шпинделя не будет превышать допустимое по чертежу значение.

На третьем этапе производится обработка базовых поверхностей.

Из рассмотренной схемы центровки следует, что величины децентрировок $C_1''O$ и $C_2'''O$ поверхностей линз, как и направление смещений

центров кривизны относительно оси шпинделя, по всей видимости, носят независимый случайный характер и в основном определяются точностью оборудования и тем, в какую зону поля допуска рабочий поместит центры кривизны каждой из центрируемых поверхностей линзы.

Для проверки высказанных предположений были исследованы четыре выборки линз по 50 шт. Использовались кинообъективы Т-51М и Т-54, центрированные методом автоколлимации.

По данным измерений были вычислены величины коэффициентов корреляции (табл.2.6), а для двух линз каждого объектива построены эмпирические и теоретические линии регрессии (рис.2.18, 2.19).

Таблица 2.6

Номер линзы	Коэффициент корреляции		Уравнение линейной регрессии	
	Т-51М	Т-54	Т-51М	Т-54
Линза-1	0,065	0,062	$\Delta C_1 = 0,19\Delta C_2 + 12,90$	$\Delta C_1 = 0,06\Delta C_2 + 13,30$
			$\Delta C_2 = 0,02\Delta C_1 + 6,50$	$\Delta C_2 = 0,06\Delta C_1 + 15$
Линза-2	0,350	0,120	$\Delta C_1 = 0,006\Delta C_2 + 11,05$	$\Delta C_1 = 0,09\Delta C_2 + 15,12$
			$\Delta C_2 = 0,19\Delta C_1 + 90,61$	$\Delta C_2 = 0,16\Delta C_1 + 22,62$

Из таблицы 2.6 следует, что значения коэффициентов корреляции весьма малы. Это указывает на отсутствие или весьма слабую линейную корреляцию между децентрировками поверхностей линз.

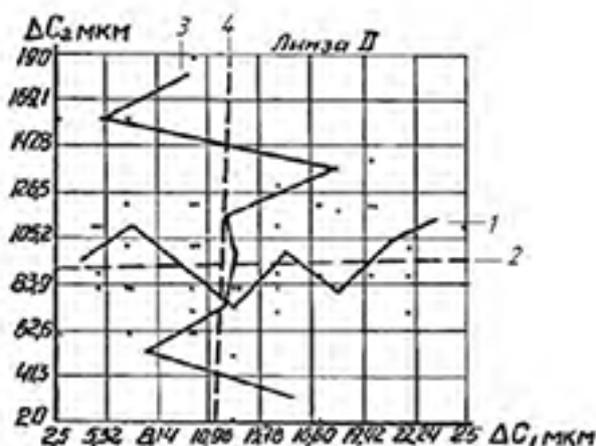


Рис.2.18. Линии регрессии децентрировок первой поверхности на вторую (1,2) и второй на первую (3,4) в объективе Т-51М. Эмпирическая зависимость – сплошная линия; теоретическая – пунктирная линия

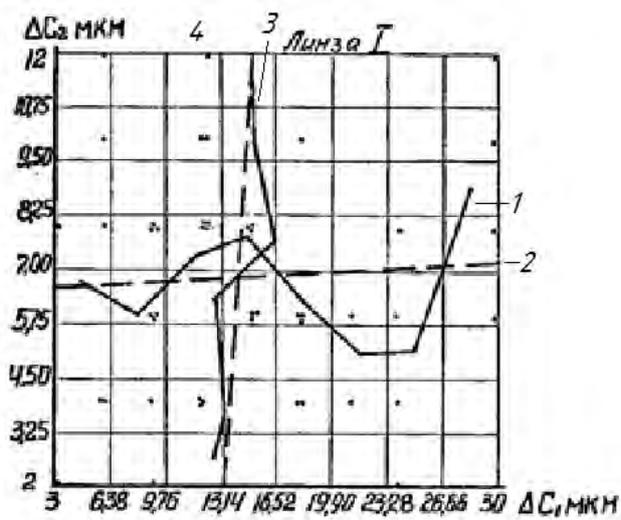


Рис.2.19. Линии регрессии децентрировок первой поверхности на вторую (1,2) и второй на первую (3,4) в объективе Т-54. Эмпирическая зависимость – сплошная линия; теоретическая – пунктирная линия

На рис.2.18, 2.19 видно, что регрессия децентрировок первой поверхности на вторую и второй на первую незначительно отклоняются от направлений соответствующих координатных осей, что указывает на весьма слабую линейную зависимость между децентрировками поверхностей в линзах.

Таким образом, для практических целей можно считать, что линейные корреляционные связи между децентрировками отсутствуют.

2.9 Оценка взаимосвязи между децентрировками поверхностей линз и отклонениями от параллельности торцов оправ

Для точностных расчетов децентрировок поверхностей линз, центрируемых автоколлимационным способом в собранном объективе важно знать, имеется ли связь между отклонением от параллельности опорных торцов оправы и децентрировками поверхностей линзы, закрепленной в этой оправе, так как при существовании такой связи она должна быть учтена в формулах для точностных расчетов.

Ниже этот вопрос исследован для случая, когда торцы оправы обработаны с двух установок: обработка одной торцевой поверхности производится на центрировочном станке, а второй – на любом другом станке.

Для решения поставленной задачи были исследованы две выборки по 50 штук оправ с линзами объектива Т-51М, центрируемых автоколлимационным способом.

По данным измерений были вычислены значения коэффициентов корреляции (см. табл.2.7), а для первых поверхностей линз построены эмпирические и теоретические линии регрессии отклонений от

параллельности Δ_T торцов оправ децентровки Δ_C рассмотренных поверхностей (рис.2.20 и 2.21).

Таблица 2.7

	Номер поверхности	Коэффициент корреляции	Уравнения линий регрессии (рис.2.20, 2.21)
Первая линза	1	0,18	$\Delta_T=0,03 \Delta_C + 5,56$
	2	0,13	$\Delta_T=0,04 \Delta_C + 6,06$
Вторая линза	1	-0,17	$\Delta_T=-0,04 \Delta_C + 2,46$
	2	-0,11	$\Delta_T=-0,05 \Delta_C + 3,42$

Из таблицы 2.7 следует, что величины коэффициентов корреляции малы.

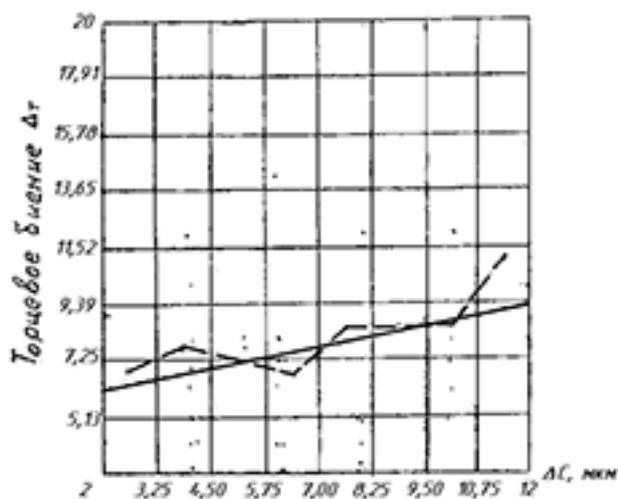


Рис.2.20. Линии регрессии децентровки первой поверхности линзы на отклонение от параллельности торцов оправы в первой партии. Эмпирическая зависимость – пунктирная линия, теоретическая – сплошная линия.

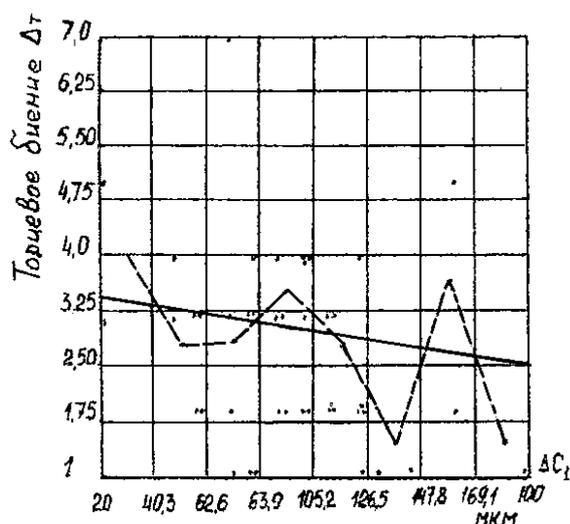


Рис.2.21. Линии регрессии децентрировки первой поверхности линзы на отклонение от параллельности торцов оправы во второй партии. Эмпирическая зависимость – пунктирная линия, теоретическая – сплошная линия.

Линии регрессии, как это видно из рис.2.20 и рис.2.21, имеют малый угловой коэффициент, что указывает на весьма слабую связь между децентрировками и отклонениями от параллельности опорных оправ. При проведении точностных расчетов можно считать, что линейные корреляционные связи между децентрировками и отступлениями от параллельности опорных торцевых оправ отсутствуют.

2.10 Оценка комплектации линз по толщине

В настоящее время большинство любительских фотообъективов с хорошим качеством изображения комплектуются по толщинам линз. Суть такой комплектации состоит в том, что на основе расчета устанавливаются определенные соотношения между отклонениями толщин линз и вызываемыми ими аберрациями, в соответствии с которыми подбираются комплекты оптических элементов объективов. Выполнение этих соотношений позволяет компенсировать влияние погрешностей изготовления толщин линз на качество изображения.

Практически комплектация осуществляется следующим образом. Исходя из допустимых полей рассеяния на толщины линз, идущих в комплектацию, составляются таблицы. Эти таблицы представляют собой систему горизонтальных строк, каждая из которых соответствует количеству интервалов, на которые разбиты поля допусков комплектуемых линз. В каждый интервал записываются линзы, имеющие толщины, попадающие в границы интервала. По мере заполнения таблицы по формуле комплектации с требуемой точностью подбираются комплекты для отправки в сборочный цех.

Заполнение интервалов таблицы происходит неравномерно. Эта неравномерность заполнения определяется характером закона распределения погрешностей изготовления толщин линз и объемом изготавливаемых партий. На рис.2.22 (а, б) соответственно представлены полигоны распределения детали №001 (объем выборки 1050 штук) и детали №002 (объем выборки 394 штуки) объектива И-70. Условие комплектации линз №001 и №002 имеет вид $\Delta d_{001} = -\Delta d_{002}$. Нетрудно видеть, что почти все линзы №002 будут скомплектованы, а большинство линз №001 останутся не скомплектованными из-за отличий в характере распределений и объеме комплектуемых партий. На рис.2.22 (в, г) приведены полигоны распределений тех же, но оставшихся не скомплектованными линз №001 и №002 при наблюдении в течение 10 месяцев. Из графиков следует, что 3325 штук линз №002 и 1443 штук линз №001 остались не скомплектованными. На рис.2.22 (д, е) представлены полигоны распределения двух других линз объектива И-70: №404 (объем выборки 903 штуки) и линзы №402 (объем выборки 828 штук). Анализ кривых показывает, что распределения погрешностей линз №404 и №402 достаточно сильно отличаются друг от друга. Так, если центр группирования, определяемый средним арифметическим, в линзе №402 смещен от номинала \bar{d}_H в сторону меньших значений на 0,01 мм, то в линзе №404 это смещение произошло в сторону больших значений на 0,04 мм. В силу этого даже при равных объемах выборок комплектация согласно уравнения $\Delta d_{402} = -\Delta d_{404}$ приведет к большому количеству не скомплектованных линз. Действительно из рис.2.22 (ж, з), на которых построены полигоны распределений, не скомплектованных линз №404 и №402 за 10 месяцев, следует, что 5244 штук линз №404 и 1654 штук линз №402 остались в оптическом цехе не скомплектованными. Всего за год было не скомплектовано 10555 штук всех линз объектива И-70, что составляет примерно 10% от всех линз, изготовленных оптическим цехом за год.

Таким образом, анализ статических данных показывает, что при изготовлении линз, идущих в комплектацию, должен вестись более строгий учет характера распределений погрешностей изготовления толщины линз.

Периодически, в зависимости от объема не скомплектованных линз в той или иной области поля допуска изменением настройки станка необходимо смещать центр группирования толщины линз, идущих в комплектацию, в требуемую сторону на необходимые величины.

Если комплектация линз выполняется в соответствии с уравнением вида $\Delta d_1 = -\Delta d_2$, то распределение толщины комплектуемых линз относительно номиналов должны иметь зеркальный характер. В этом случае будет иметь место максимальный выход скомплектованных линз. Если уравнение комплектации имеет вид $\Delta d_1 = -k\Delta d_2$, то смещение центра группирования детали 2 относительно ее номинала должно быть в k раз больше, чем у детали 1.

Если распределения толщины комплектующих деталей имеют различные среднеквадратические отклонения ($\sigma_1 \neq \sigma_2$), то разделение на интервалы лучше проводить в соответствии с соотношением [24]:

$$\frac{\Delta d_1}{\sigma_1} = \frac{\Delta d_2}{\sigma_2}$$

Применение этих несложных рекомендаций позволит сократить задел не скомплектованных линз в оптическом цехе.

В настоящее время определение математических условий комплектации производится на основе метода разделения переменных.

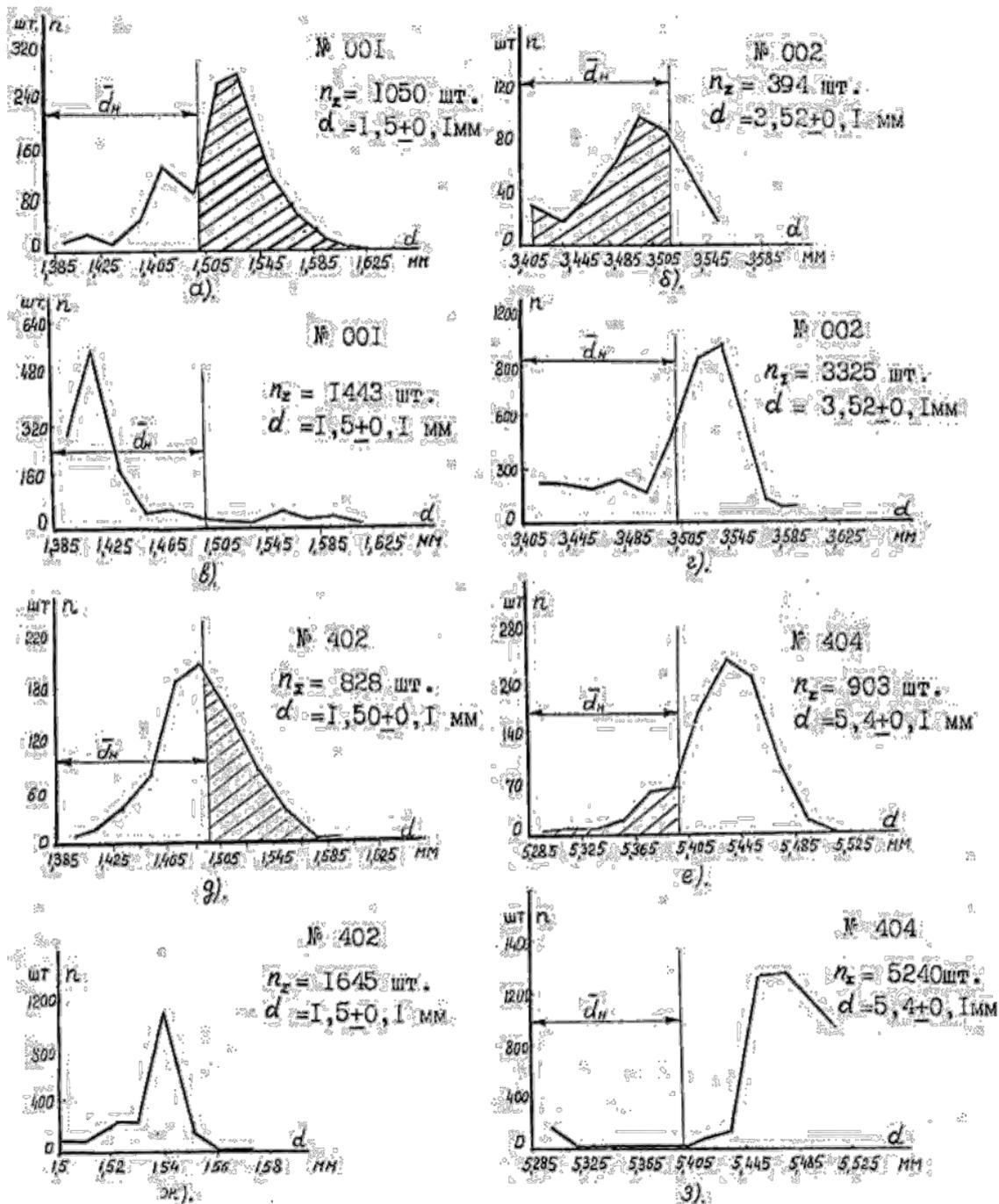


Рис. 2.22

В основе метода заложено условие, заключающееся в том, что качество изображения объектива оценивается при изменении одного из его параметров, при фиксированном значении остальных. Зависимость же между измеряемыми характеристиками объектива и изменяемым параметром, определяющим качество изображения, полагают линейной. В реальных объективах на качество изображения одновременно влияет множество факторов. Эффект совместного и действия не всегда может быть равен простой сумме. Поэтому путь разделения переменных при определении условий комплектации может оказаться недостаточным, особенно при условии, когда выходной характеристикой объектива является не изменение поперечных аберраций, а ЧКХ, ФРЛ и др.

Обратимся к известному методу планирования эксперимента по методу Бокса-Уильсона [25]. Этот метод позволяет получить статические математические модели, используя факторное планирование.

Планирование эксперимента с технической точки зрения не представляет особых трудностей, но позволяет значительно повысить производительность труда инженера и надежность выводов. Конечным итогом планирования эксперимента и его проведения является математическая модель, которая представляет собой уравнение, связывающее параметр оптимизации (в нашем случае – параметр, определяющий качество изображения объектива) и фактора, влияющие на его изменение (технологические погрешности изготовления объектива).

В качестве примера обратимся к фотообъективу крупносерийного производства И-73 состоящему из четырех линз и получим уравнение, связывающие изменения толщины линз с изменением поперечной аберрации.

Пусть толщину линз изменяются на $+0,1$ и $-0,1$ мм, т.е. толщина каждой линзы, участвующей в эксперименте может принимать только два значения $d_i+0,1$ и $d_i-0,1$. Условно обозначим верхнее значение толщины линзы знаком «+», а нижнее – знаком «-».

В этом случае при полном факторном эксперименте должно быть проведено 2^4 опытов. В табл.2.8 приведена матрица планирования эксперимента. Она обладает следующими свойствами:

- она симметрична относительно центра эксперимента. Это означает, что алгебраическая сумма элементов вектор столбца каждого из четырех факторов равна 0.
- сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов.
- сумма по членным произведений любых двух вектор столбцов равна нулю.

Такая матрица планирования называется ортогональной и позволяет получить модель, обладающую некоторыми оптимальными свойствами. Это означает, что оценки коэффициентов математической модели получаются наилучшими из возможных и точность предсказания параметра оптимизации не зависит от направления измерений в факторном пространстве [26].

Планируя эксперимент, стремятся получить линейную модель. Однако у нас нет гарантий, что в выбранных интервалах варьирования факторов процесс описывается линейной моделью. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с эффектами взаимодействия факторов. Полный факторный эксперимент позволяет качественно оценить эффекты взаимодействия, возникающие тогда, когда эффект одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор или несколько факторов.

В этом случае говорят, что имеет место эффект взаимодействия двух ($\Delta d_1 \Delta d_2$, $\Delta d_2 \Delta d_3$) и т.д., трех ($\Delta d_1 \Delta d_2 \Delta d_3$, $\Delta d_1 \Delta d_2 \Delta d_4$) и т.д., четырех ($\Delta d_1 \Delta d_2 \Delta d_3 \Delta d_4$) и т.д. факторов. После проведения эксперимента в соответствии с табл.2.8 для каждого из 16 опытов были получены изменения поперечных aberrаций $\Delta \delta G'$ в центре поля зрения ($y'=0$) и в зоне ($y'=16,6$ мм). Так как изменения aberrаций $\Delta \delta G'$ в зоне поля зрения оказались выше, чем в центре, то они и были заложены в последующие расчеты.

Задача определения математической модели планирования эксперимента сводится к нахождению по результатам эксперимента коэффициентов регрессии b_i .

$$\Delta(\delta G') = b_0 + b_1 \Delta d_1 + b_2 \Delta d_2 + b_3 \Delta d_3 + b_4 \Delta d_4 + b_5 \Delta d_1 d_2 + b_6 \Delta d_1 d_3 + b_7 \Delta d_1 d_4 + b_8 \Delta d_2 d_3 + b_9 \Delta d_2 d_4 + b_{10} \Delta d_3 d_4 + b_{11} \Delta d_1 d_2 d_3 + b_{12} \Delta d_1 d_2 d_4 + b_{13} \Delta d_1 d_3 d_4 + b_{14} \Delta d_2 d_3 d_4 + b_{15} \Delta d_1 d_2 d_3 d_4, \quad (2.1)$$

здесь $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4$ – значения изменяемых факторов;

b_0 – свободный член, равный поперечной aberrации при $\Delta d_i = 0$;

b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии соответствующих факторов, указывающие на влияние того или иного фактора на изучаемый процесс;

$b_5 \div b_{10}$ – коэффициенты регрессии при произведениях факторов, свидетельствующие о наличии двойного взаимодействия между факторами;

$b_{11} \div b_{14}$ – коэффициенты регрессии, указывающие на тройное взаимодействие;

b_{15} – коэффициент регрессии, указывающий на четверное взаимодействие.

Так как матрица планирования обладает свойством ортогональности, то это позволяет резко упростить вычисления, что является одним из преимуществ планирования эксперимента. Можно сказать, что

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta(\delta G)_i \cdot \Delta d_i}{N}, \quad (2.2)$$

где $N=2^4$ – число вариантов в матрице планирования.

Формула (2.2) справедлива для определения коэффициентов регрессии при различных взаимодействиях факторов.

Величина b_0 – есть среднее арифметическое по aberrациям всех четырех вариантов и соответствует положению, когда все факторы находятся на нулевом уровне, т.е. технологические погрешности изготовления линз отсутствуют.

Расчеты коэффициентов регрессии, приведенные по формуле (2.2), позволили записать уравнение (2.1) в виде:

$$\begin{aligned} \Delta(\delta G') = & 7,96 \times 10^{-4} \Delta d_1 + 4,81 \times 10^{-4} \Delta d_2 + 11,38 \times 10^{-4} \Delta d_3 + 19,10 \times 10^{-4} \Delta d_4 - \\ & - 0,18 \times 10^{-4} \Delta d_1 d_2 - 0,02 \times 10^{-4} \Delta d_2 d_3 + 0,1 \times 10^{-4} \Delta d_1 d_3 - 0,03 \times 10^{-4} \Delta d_1 d_4 - \\ & - 0,06 \times 10^{-4} \Delta d_2 d_4 - 0,03 \times 10^{-4} \Delta d_3 d_4 - 0,01 \times 10^{-4} \Delta d_1 d_2 d_3 - 0,02 \times 10^{-4} \Delta d_2 d_3 d_4 - \\ & - 0,01 \times 10^{-4} \Delta d_1 d_2 d_3 d_4. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Анализ этого уравнения показывает, что коэффициенты регрессии при произведениях факторов в 50-80 раз меньше, чем при самих факторах. Поэтому, не делая большой ошибки, можно значительно упростить уравнение (2.3), записав его в виде:

$$\Delta(\delta G') = 7,96 \times 10^{-4} \Delta d_1 + 4,81 \times 10^{-4} \Delta d_2 + 11,38 \times 10^{-4} \Delta d_3 + 19,10 \times 10^{-4} \Delta d_4 \quad (2.4)$$

Выражение (2.4) представляет собой линейную модель зависимости изменения поперечное аберрации от изменений толщин линз. Из чего следует, что влияние Δd_1 на величину сферической аберрации в два раза больше, чем влияние Δd_2 , а влияние Δd_3 в два раза меньше, чем Δd_4 . Следовательно, уравнения комплектации с достаточной для практических целей точностью могут быть представлены в виде: $\Delta d_2 = -2 \Delta d_1$ и $\Delta d_3 = -2 \Delta d_4$.

Зависимость изменения величины контраста $K_{y'}$ от изменения всех оптических толщин в этом же объективе при наводке на резкость на частоте 25 мм в центре поля зрения ($y' = 0$) и по краю ($y' = 16,6$ мм) после проведения аналогичных расчетов может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} K_{y'=0} &= 0,208 - 0,065 \Delta d_1 - 0,035 \Delta d_{1B} - 0,067 \Delta d_2 - 0,011 \Delta d_{2B} - 0,005 \Delta d_3 - 0,015 \Delta d_4, \\ K_{y'=16,6} &= 0,253 - 0,042 \Delta d_1 - 0,012 \Delta d_{1B} - 0,035 \Delta d_2 - 0,075 \Delta d_{2B} - 0,01 \Delta d_3 - 0,002 \Delta d_4, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где Δd_{1B} и Δd_{2B} - изменения воздушных промежутков.

Анализ уравнений (2.5) показывает, что характер зависимости контраста от изменений толщин линз, как по центру поля зрения, так и по краю, примерно одинаков. Поэтому при проведении комплектации можно использовать следующие зависимости: $\Delta d_2 = -2 \Delta d_1$ и $\Delta d_3 = -2 \Delta d_4$.

Поскольку контраст является более объективной и всеобъемлющей оценкой качества изображения, то окончательно при проведении комплектации следует ориентироваться на последние уравнения.

ГЛАВА 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТИВОВ

Главным требованием, которое предъявляется к большинству оптических приборов, в том числе и к объективам, является получение изображения высокого качества.

В настоящее время суждение о качестве изготовления объективов в цеховых условиях основывается либо на визуальной оценке дифракционного изображения светящейся точки, либо на анализе изображений штриховых или радиальных миш. При этом любой объектив, направляемый в цех сборки, должен иметь такую комую децентрировки в центре поля зрения, величина которой не превышает комую эталонного образца.

Было бы неправильным не замечать существование целого ряда других способов оценки качества изображения объективов, таких как частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), функция рассеяния точки (ФРТ) и линии (ФРЛ), пограничная кривая, концентрация энергии и т.п. Но настойчивые попытки их внедрения в условиях крупносерийного и массового производства до сих пор успеха не имели. Они остались инструментом лабораторных исследований.

Поскольку основными критериями оценки качества являются кома децентрировки в центре поля зрения объектива, а в лабораторных условиях – ЧКХ, то при проектировании перед конструктором и исследователем всегда стоит задача определения тех ожидаемых предельных отклонений комы и ЧКХ, которые в дальнейшем должны служить ориентиром при изготовлении и испытаниях опытных и серийных образцов.

На этапе конструирования чаще всего стоит обратная задача, когда по допустимым отклонениям комы или контраста оцениваются величины допусков на технологические погрешности, вызывающие отклонения оптических элементов от их расчетного положения. Эта инженерная задача на сегодня является самой сложной. Но поскольку для производства обе эти задачи имеют большое значение, то попытаемся рассмотреть их более подробно на примере исследований различных объективов.

3.1 Визуальные методы оценки качества изображения объективов в производственных условиях

Визуальные методы оценки качества изображения, как наиболее производительные, широко применяются в условиях крупносерийного и массового производства объективов. Сущность методов заключается в том, что качество изображения изготавливаемых объективов оценивается по изображению, создаваемому эталонным объективом. Контроль качества изображения в этом случае осуществляется либо по штриховой мише, либо по дифракционному изображению точки.

Многолетняя практика визуального контроля, проводимого на ЛОМО по штриховым мирам, показала, что не всегда и не все объективы могут быть подвергнуты этому способу контроля.

Визуальная оценка разрешающей способности объективов только по изображению штриховой миры не может служить критерием соответствия объективов требованиям ТУ по качеству изображения. Визуальная оценка разрешающей способности может дать положительные результаты только в том случае, когда наряду с ней оценивается контраст изображения мир.

3.1.1 Вероятностный характер распределения комы децентрировки

Визуальный анализ дифракционного изображения точки сегодня является наиболее распространенным критерием оценки качества сборки объективов в цеховых условиях. Опытному глазу рабочего достаточно одного взгляда на дифракционное изображение точки в центре поля зрения, чтобы дать исчерпывающую оценку качества сборки объектива. Например, если в изображении точки наблюдается избыток сферической аберрации, то причину ее появления следует искать в недопустимых отклонениях толщин линз, воздушных промежутков, радиусов оптических поверхностей или, как говорят в цехах, отклонений «цвета» на поверхностях и показателях преломления стекол от требований чертежа. Если же изображение точки искажено астигматизмом, то в большинстве случаев причинами его появления являются пережатия в линзах, возникающие при их склейке, завальцовке, креплении гайкой, и, значительно реже при наличии недопустимо большой центрировки линз или группы линз в объективе. Но, пожалуй, к самым главным достоинствам визуального способа контроля для условий серийного и массового производства следует отнести доступность наблюдения и оценки комы децентрировки.

Дело в том, что при изготовлении объективов в 70-80% случаев главной причиной ухудшения качества изображения является кома децентрировки. Оснований для ее появления более чем достаточно. Это всегда имеющая место собственная децентрировка оптических поверхностей в линзе, заклоны линз в поперечных зазорах, заклоны линз от торцевых биений оправ, поперечные смещения линз от эксцентриситетов и в радиальных зазорах и т.п. Поэтому большая часть времени, затрачиваемая на сборку объективов, расходуется на борьбу с комой децентрировки. Это привело к тому, что до сих пор величина комы децентрировки является главным критерием как при поиске оптимального конструктивного решения объектива, так и при расчете допусков на технологические погрешности, вызывающие отклонения линз от номинального положения. Но для правильного проведения таких расчетов надо иметь, по крайней мере, представление о характере распределения комы децентрировки или же знать величины коэффициентов относительного рассеяния k и асимметрии α .

Большой опыт измерений параметров объективов различного назначения, у которых коррекция aberrаций находилась на геометрическом уровне, показал, что для описания плотности вероятности комы децентрировки вполне можно использовать закон Релея.

В качестве примера на рис.3.1 приведен полигон распределения величины дифракционного пятна для центра поля зрения, полученный при исследовании 50 кинообъективов Т-51 в худшем сечении, т.е. в той меридиональной плоскости, в которой находился вектор комы децентрировки.

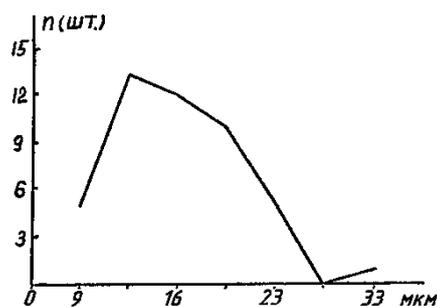


Рис.3.1. Полигон распределения величины дифракционного пятна в центре поля зрения объектива Т-51

Изменение сферической aberrации в этой партии не превышало 3-5% и практически не сказывалось на результатах измерений. Все измерения проводились на оптической скамье «Аскания» с помощью микроскопа, имеющего микрообъектив с увеличением 20 крат, $A=0,4$ и окуляр-микрометр МОВ-1-15^x с ценой деления 0,5 мкм. Расчеты дали следующие значения коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии: $k=1,16$; $\alpha= - 0,28$.

На рис.3.2 представлен полигон распределения 30 шт. объективов Т-54, а на рис.3.3 – полигон распределения ширины ФРЛ 50 объективов Т-51 в сечении, в котором ширина ФРЛ наиболее сильно коррелирует с ФРС ($k=1,17$; $\alpha= - 0,3$).

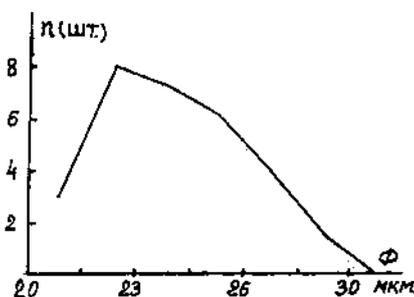


Рис.3.2. Полигон распределения величины дифракционного пятна в центре поля зрения объектива Т-54

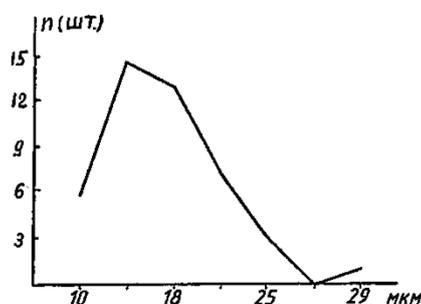


Рис.3.3. Полигон распределения ширины ФРЛ в объективе Т-51

Визуальная оценка всех экспериментальных кривых говорит о том, что характер распределения комы децентрировки вполне может быть описан законом Релея, а полученные опытным путем значения коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии только подтверждают этот вывод.

3.1.2 Статистическая оценка связи между децентрировками и комой децентрировки

В настоящее время существует целый ряд теоретических работ по исследованию вопросов влияния децентрировок на изменения поперечных aberrаций. При определении этого влияния авторы исходили из предположения, что децентрировки являются величинами первого порядка малости и между ними и изменением поперечных aberrаций существует линейная взаимосвязь [27]. Это условие имеет большое значение при проектировании и изготовлении объективов, представляющих собой крупносерийное и массовое производство, и поэтому требующих особо тщательной расчетной и технологической подготовки.

Известные экспериментальные работы по выявлению этой линейной зависимости проводились классическим способом [28] – по методу разделения переменных. Применение указанного метода предполагает изменение одного фактора при фиксированных значениях других. В реальных объективах действует одновременно множество факторов. Эффект совместного действия нескольких факторов не всегда может быть равен их простой сумме. Поэтому путь разделения переменных может оказаться недостаточным.

В настоящее время разработаны эффективные методы исследования совокупности совместно действующих факторов и учета особенностей форм из взаимной зависимости [26].

Для уточнения связи между действующими одновременно факторами, вызывающими децентрировку оптических элементов, и изменением поперечной aberrации (что имеет место в реальных объективах) обратимся к известному методу статистического анализа – методу множественной корреляции. Этот метод позволяет количественно оценить наличие и силу

связи между факторными и результирующими признаками в случаях, когда нельзя изолировать влияние посторонних факторов.

Определим совокупный коэффициент корреляции R как показатель тесноты связи между факторами, определяющими величину децентрировок и поперечной аберрацией в центре поля зрения. Для проведения эксперимента было взято 46 серийно выпускаемых объективов Т-51 (рис.2.5), в которых были измерены углы $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$, определяющие направления смещений центров кривизны поверхностей линз с оси объектива, величины децентрировок $\Delta C_1 \div \Delta C_6$ поверхностей линз относительно базовых поверхностей оправ, в которых они закреплены, и зазоры Z_1, Z_2, Z_3 , между оправами объектива.

На оптической скамье «Аскания» были измерены величины поперечных аберраций. Измерения аберраций проводились в направлении вектора комы.

Определение направлений смещений центров кривизны поверхностей линз в собранном объективе оценивалось на приборе СТ-41М по сетке окуляра, отградуированной в градусах. За ось объектива принималась ось вращения объектива, базированного по поверхностям A и B (рис.2.5). Установка оси объектива в центр сетки окуляра осуществлялась подвижкой объектива по поверхности A с одновременным вращением до того момента, когда центр окружности вращения изображения центра кривизны оптической поверхности совпадал с центром сетки окуляра.

Погрешность установки оси объектива в центре сетки окуляра не превышала 3-4,5 мкм. Торцевая поверхность A , наружный диаметр B и внутренняя посадочная поверхность корпуса объектива обрабатывались с одной установки.

Измерение величины децентрировки оптических поверхностей линз в оправках осуществлялось также на приборе СТ-41М. Погрешность измерения не превышала 1,5-2 мкм.

Зазор между корпусом и оправами определялся как разность между максимальным значением диаметра корпуса и минимальным значением диаметра оправы.

Наружный диаметр оправы измерялся рычажным микрометром (ГОСТ 11098-64) с ценой деления 2 мкм. Внутренний диаметр корпуса измерялся с помощью индикаторного нутромера (ГОСТ 9244-59) с ценой деления 2 мкм.

Таким образом, в 46 отобранных объективах были измерены четырнадцать основных факторов, определяющих децентрировки поверхностей линз, и выходной признак y (поперечная аберрация в центре поля зрения). По измеренным данным были рассчитаны парные коэффициенты корреляции r между результативным признаком y и каждым фактором (см. табл.3.1)

Таблица 3.1.

$r_{y\Delta c_1}$	$r_{y\Delta c_2}$	$r_{y\Delta c_3}$	$r_{y\Delta c_4}$	$r_{y\Delta c_5}$	$r_{y\Delta c_6}$
0,263	0,063	0,202	0,340	0,113	-0,056

Продолжение таблицы 3.1

r_{yz_1}	r_{yz_2}	r_{yz_3}	$r_{y\theta_1}$	r_{yz_4}	r_{yz_5}	r_{yz_6}
0,252	0,143	0,0117	0,026	0,189	-0,071	-0,337

Как показано в работе [29], совокупный коэффициент корреляции R между результативным и факторными признаками выражается формулой:

$$R = \sqrt{\frac{\Delta^*}{\Delta}}$$

где Δ^* и Δ – квадратичные матрицы, построенные на парных коэффициентах корреляции.

Если вставить в это формулу данные табл.3.1, то получим $R=0,77$. Это свидетельствует о достаточно тесной линейной связи между факторными и результативными признаками.

Достоверность этого вывода можно оценить величиной

$$t = \frac{R}{\sigma_R}, \text{ где} \quad \sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{N-n-1}} \quad (3.1)$$

где $N=46$ – число наблюдений, $n=14$ – число факторов.

Подставив в выражение (3.1) численные значения R , N и n , получим $\sigma_R=0,073$, $t=10,6$. Так как величина t получилась значительно больше трех, то это означает, что соответствие между фактическим и «истинным» коэффициентом корреляции достоверно с вероятностью, превышающей 99,7%, т.е. достоверно утверждение о линейной связи между всеми учтенными факторами и поперечной аберрацией, найденной с помощью множественного коэффициента корреляции.

3.2 Вероятностный характер распределения частотно-контрастной характеристики и выбор оптимальных частот для оценки контраста объективов в условиях серийного производства

Одним из основных способов, позволяющих получать объективные данные о качестве изображения, обеспечиваемого объективом, является измерение его частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) [30]. Известно, что степень несоответствия распределения освещенности в изображении распределения яркости по поверхности предмета может служить мерой качества разрешающей системы. Для оценки этого несоответствия

пользуются коэффициентом передачи контраста или модуляции (КПМ), который часто называют частотно-контрастной характеристикой

$$T(N) = \frac{K_{из}}{K_{об}},$$

где N – пространственная частота в штр./мм., $K_{об}$ – коэффициент контраста предмета, $K_{из}$ – коэффициент контраста изображения.

О качестве испытуемой системы судят по кривой зависимости отношения контраста изображения к контрасту предмета от пространственной частоты. Этот критерий оценки качества изображения дает более полную информацию об оптической системе и позволяет определить влияние отдельных элементов оптической системы на качество изображения. ЧКХ позволяет автоматизировать измерительный процесс, зная ЧКХ, можно с некоторой степенью точности вычислить разрешающую способность объектива. Несмотря на все эти достоинства, ЧКХ пока не может быть выражена одним числом, как, скажем, разрешающая способность, и требует довольно сложного дорогостоящего оборудования. Поэтому метод определения ЧКХ в основном остается лабораторным методом.

Для использования коэффициента передачи модуляции в точностных расчетах необходимы соответствующие статистические исследования, которые позволили бы оценить характер вероятностного распределения КПМ по частотам, определить коэффициенты относительного рассеяния и асимметрии.

Для решения поставленных задач были исследованы фотографические и киносъёмочные объективы крупносерийного производства. В частности, при исследовании фотографического объектива Т-57, объем выборки составил 38 шт.

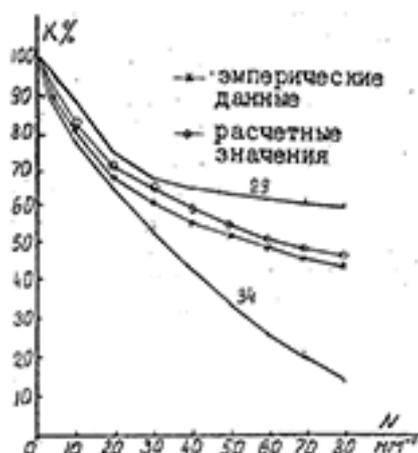


Рис.3.4. ЧКХ объектива Т-57 в меридиональной плоскости

На рис.3.4 представлены КПМ в меридиональной плоскости для самого лучшего объектива (№29) из исследуемой партии и самого худшего (№34). КПМ всех остальных 36 объективов находятся между этими двумя кривыми. Здесь же приведены кривые, одна из которых проходит через средние

арифметические значения контраста на всех частотах, а вторая – расчетная кривая.

На рис.3.5 построены полигоны распределений значений коэффициента передачи контраста K на четырех частотах: 50, 60, 70 и 80 мм^{-1} . Из представленных графических материалов следует, что, во-первых, поле рассеяния контраста возрастает с ростом частоты, на которой измеряется K , во-вторых, средние арифметические значения коэффициента передачи контраста очень близки к расчетным значениям, приведенным в оптическом выпуске, в-третьих, эмпирические кривые распределения коэффициента передачи контраста являются несимметричными. Подбор аппроксимирующих функций, которые могли бы наиболее близко описать кривые, полученные опытным путем, показал, что для такого описания более всего подходят степенные функции типа $y = Ax^n$. Так, для полигона, построенного на частоте 50 мм^{-1} , теоретическая сглаживающая кривая имеет вид: $n = 2,58 \times 10^{-9} \times K^{5,53}$, для частоты 60 мм^{-1} - $n = 4,13 \times 10^{-6} \times K^{3,75}$, для частоты 70 мм^{-1} - $n = 1,25 \times 10^{-4} \times K^{2,94}$, для частоты 80 мм^{-1} - $n = 1,57 \times 10^{-3} \times K^{2,3}$. В этих формулах n – распределение объективов по интервалам, K – коэффициент передачи контраста в процентах.

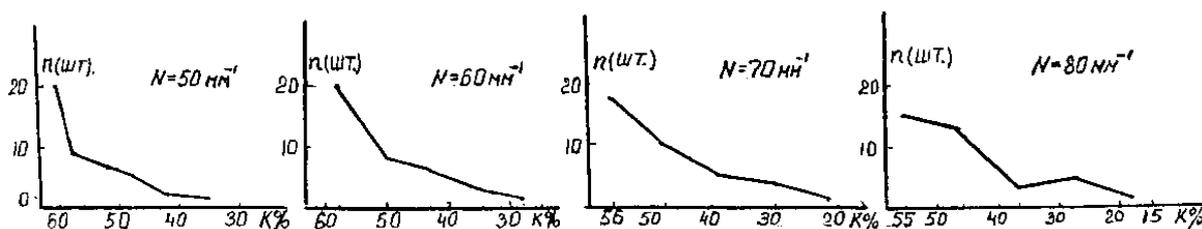


Рис.3.5. Полигоны распределения коэффициентов передачи контраста на частотах 50, 60, 70 и 80 мм^{-1}

Из-за малости выборки исследуемых объективов (38 штук) достоверность выбранных функций распределения для генеральной совокупности не высока. Это обусловлено, прежде всего, тем, что аппроксимация были применена для конкретной выборки.

Поэтому для вероятностных расчетов, которые мы в дальнейшем будем проводить, нас будут интересовать не столько сами законы распределения, сколько числовые характеристики этих законов (\bar{x} , σ), коэффициенты относительного рассеяния k и асимметрии α .

В табл. 3.2 приведены значения коэффициентов k и α , рассчитанные по данным измерений для $y'=0$ и $y'=19$ мм.

Таблица 3.2

Характеристики	$y'=0$				$y'=19$		
	50	60	70	80	20	30	40
$N, \text{мм}^{-1}$	50	60	70	80	20	30	40
k	1,26	1,35	1,42	1,43	1,63	1,72	1,66
α	0,47	0,45	0,43	0,43	0,1	-0,07	0,03
\bar{x}	56	50	48,7	45,3	23,2	16,2	11,8
s	6,7	8,3	9,9	11,2	9	6,9	4,7
2δ	32	32	42	47	43	24	17

На рис.3.6 представлены КПМ для объективов №24, №29 (рис.3.6а) и №34 и №8 (рис.3.6б) в меридиональном сечении. Объективы №29 и №34 – самые лучшие, т.е. фактически на рис.3.6а и 3.6б представлены поля рассеяния КПМ всех объективов. Внутри полей рассеяния КПМ проведены кривые, одна из которых представляет собой расчетную КПМ, заданную в оптическом выпуске, вторая – усредненную КПМ построенную по всем исследуемым объективам. Из этих рисунков следует, что, во-первых, наиболее заметное изменение КПМ от технологических погрешностей изготовления происходит в области частот от 10 до 30 мм^{-1} ; во-вторых, расчетное и усредненное значения КПМ весьма близки друг к другу, особенно на $y'=19 \text{ мм}$. Практическая ценность этих выводов заключается в том, что для оценки качества изображения серийных объективов достаточно проводить измерение контраста на одной частоте, скажем $N=20 \text{ мм}^{-1}$. Это позволит значительно упростить измерительное оборудование, предназначенное для этих целей. И, наконец, для проведения дальнейших точностных расчетов будем считать, что расчетная ЧКХ, приводимая обычно в оптическом выпуске, совпадает со средним арифметическим ЧКХ серийно выпускаемых объективов.

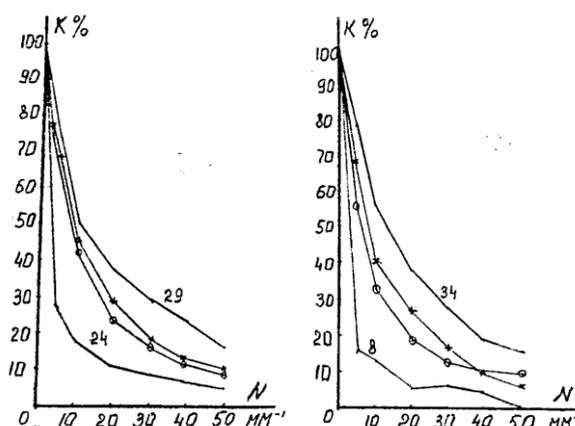


Рис.3.6. КПМ измеренные на краю поля зрения ($y'=-19 \text{ мм}$ и $y'=+19 \text{ мм}$). КПМ усредненная по всем исследуемым объективам; КПМ заданная в оптическом выпуске

На рис.3.7 представлены эмпирические кривые распределения КПМ на частотах $N=10, 20, 30$ и 40 мм^{-1} . Из графиков видно, что кривые заметно меняются, от резкой асимметрии на частоте $N=10 \text{ мм}^{-1}$ через более или менее равномерное распределение на частотах $N=20$ и 30 мм^{-1} до кривой, близкой к распределению арксинуса. Поскольку ФРС на $y' = -19 \text{ мм}$ и $y' = +19 \text{ мм}$ в среднем колеблется от 28 мм^{-1} до $35,6 \text{ мм}^{-1}$, то нас в дальнейшем будет интересовать распределение на частоте $N=30 \text{ мм}^{-1}$. Конечно, трудно с уверенностью утверждать, что распределение на этой частоте подчиняется равномерному закону, т.к. исследуемая выборка объективов не столь уж велика. Однако сам характер кривой и результаты расчетов коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии ($k_s=1,725$; $\alpha_s=-0,07$) позволяют с достаточной для практических расчетов уверенностью говорить о том, что распределение на частоте $N=30 \text{ мм}^{-1}$ может быть принято за равновероятное, для которого характерны следующие значения коэффициентов $k_p=1,73$; $\alpha_p=0$.

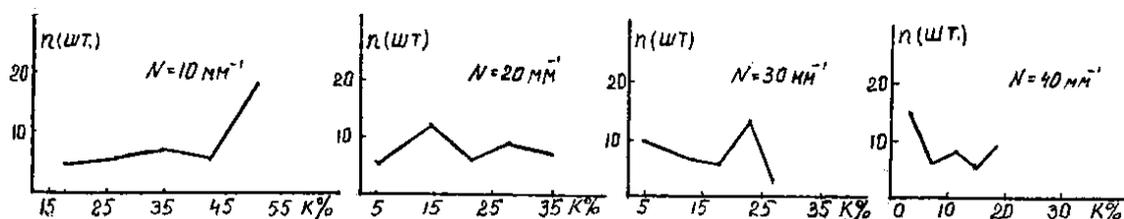


Рис. 3.7. Эмпирические кривые распределения КПМ на краю поля зрения для различных частот

Характер изменения КПМ был проанализирован для нескольких кинообъективов Т-51 из партии в 50 штук. Результаты исследований показали, что характер изменения контраста в них такой же, как и в фотообъективе Т-57. Результаты расчета коэффициентов k, α, \bar{x}, s для центра поля зрения ($y'=0$) на различных участках приведены в табл.3.3, а для края поля зрения ($y'=3,2 \text{ мм}$) - в табл. 3.4.

Таблица 3.3

$N \text{ мм}^{-1}$	20	40	60	80
k	1,10	1,17	1,27	1,2
α	0,48	0,39	0,31	0,18
\bar{x}	86	72	5,87	47
s	2,96	8,48	12	13,15
2δ	17	44	29	56

Таблица 3.4

$N \text{ мм}^{-1}$	20	40	60
k	1,67	1,67	1,7
α	0,26	0,06	-0,06
\bar{x}	68,6	46	80,6
s	16,18	18	17,48
2δ	58	64	61

Данных приведенных в таблицах 3.3 и 3.4 вполне достаточно для проведения расчетов изменения контраста от технологических погрешностей, вызывающих децентрировки.

Использование ЧКХ в производственных условиях связано с необходимостью выбора частот, на которых должны измеряться и оцениваться значения коэффициентов передачи контрастов. С прикладной точки зрения этот вопрос приобретает важное значение, т.к. от его правильного решения будут зависеть не только материальные затраты на оборудование, необходимое для проведения измерения, но и быстрота оценки качества изготовления испытуемых объектов.

Для выявления частот, на которых в серийно изготавливаемых объективах происходит наиболее сильное изменение КПМ из-за погрешностей изготовления и сборки, были исследованы различные по объему выборки любительских объективов. В качестве примера на рис.3.8 представлены КПМ девяти объективов Т-51 для центра поля зрения ($y'=0$) и трех – для края поля зрения ($y'=3,2$ мм), пронумерованных по величине комы, обусловленной децентрировками линз на оси системы. Измерения КПМ производились на установке «Асоfam» французской фирмы «Eng. Matra». Из анализа графиков, представленных на рис.3.8, следует, что чем больше величина комы в объективе, тем ниже опускается кривая КПМ, причем это понижение больше всего на частотах, близких к предельной частоте (частоте, определяющей ФРС). В частности, для $y'=0$ на частоте близкой к 80 мм^{-1} , и для $y'=3,2$ мм на частоте около 40 мм^{-1} изменение КПМ значительно больше, чем на остальных частотах. При наличии сильной децентрировки (объективы 8 и 9, рис. 3.8) скорость изменения КПМ увеличивается на частоте, вдвое меньшей предельной – 80 мм^{-1} . Случаи появления таких децентрировок в кинолюбительских объективах и фотообъективах среднего и высокого качества встречаются довольно редко: не более чем в 3% случаев, поэтому в окончательных выводах их действие не учитывалось.

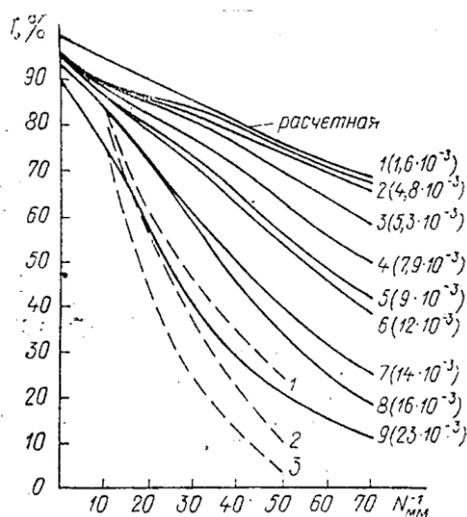


Рис.3.8. КПМ в кинообъективе Т-51 в центре (сплошные линии) и на краю поля зрения (пунктирные линии)

При отсутствии децентрировок и пережатий изменение КПМ на средних и высоких частотах примерно одинаково. Поэтому в таких случаях для объективов достаточно измерить КПМ на одной предельной частоте.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что сравнительную оценку качества сборки любительских кинообъективов в условиях серийного производства по величине КПМ достаточно производить на одной частоте – предельной или близкой к ней.

3.3 Оценка качества изображения объектива по функции рассеяния линии

Первичным критерием качества изображения объектива является распределение освещенность в изображении точки или линии. На основе этих распределений могут быть определены другие известные критерии оценки качества изображения: пограничная кривая, частотно-контрастная характеристика, разрешающая способность и т.д. Практика наших работ показала, что функция рассеяния линии (ФРЛ), получаемая путем анализа изображения освещаемой щели, является по сравнению с функцией рассеяния точки более удобным критерием для заводских исследований. Это связано с тем, что способ получения ФРЛ дает существенный выигрыш в энергии, проходящей через систему, и не требует строгой локализации положения линии сканирования по высоте изображения щели.

Применяемый обычно в этом случае для измерения ФРЛ метод сканирования на микрофотометре имеет ряд недостатков. Часть из них связана со сложностью и высокой стоимостью аппаратуры, ее чувствительностью к вибрациям и необходимостью калибровки перед измерениями. Кроме того, последовательный характер изменения точек кривой ФРЛ усложняет исследование мгновенных состояний качества изображения при наличии искажающих воздействий и пр.

Герриот [31] описал фотоэлектрический способ измерения кривых распределения освещенности в изображении штриха. Поперек изображения прозрачного штриха перемещается тонкая щель. Регистрирующее устройство с фотоэлементом, находящееся за щелью, дает ток, который вызывает перемещение луча осциллографа по оси координат, причем перемещение луча по оси абсцисс синхронизировано с перемещением щели. Таким образом, осциллограф непосредственно дает кривую распределения освещенности в изображении светящейся линии. Основными недостатками способа являются малые световые потоки в схеме, а также требования высокой прецизионности изготовления прозрачного штриха и механизмов перемещения щели, большой точности и стабильности электрических узлов и, кроме того, ограничение диапазона измеряемых освещенностей из-за ограниченности световой характеристики фотоприемника. Все это затрудняет получение требуемой точности многократных оценок ФРЛ в условиях производства. Другие исследователи фактически применяли те же способы, вводя изменения только в технику измерений.

В числе предшествующих работ по исследованию ФРЛ следовало бы упомянуть интересный способ Джонса и Вольфа [32]. Они предложили фиксировать распределение освещенности поперек изображения щели путем фотографирования через серый клин, благодаря чему получалась логарифмическая кривая ФРЛ.

Недостатками фотографического метода являются: высокая трудоемкость получения количественных результатов исследования, что связано с получением фотонегативов и фотоснимков, а также дискретность во времени получаемых измерительных данных. Например, при юстировке исследуемой системе даже при многократном выполнении трудоемкого цикла измерений могут быть получены лишь данные о структуре изображения линии в отдельных положениях юстировочных подвижек объектива. При этом положение, соответствующее действительно наилучшей установке, может быть пропущено.

Эти обстоятельства снижают точность и достоверность измерений и юстировок, достигаемых указанным способом.

Таким образом, из рассмотренных работ видно, что оценка качества изображения по измерению освещенности в изображении линии вызывает интерес исследователей, и такой подход может явиться (при условии устранения отмеченных трудностей) перспективным для условия массового производства. Поэтому нами была поставлена задача создания устройства, позволяющего, во-первых, визуально наблюдать ФРЛ испытуемого объектива в виде графика непосредственного в процессе измерения; во-вторых, непрерывно измерять характеристики качества изображения при юстировках, фокусировках и других перестройках исследуемой системы и, в-третьих, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ до необходимых величин.

Задача эта решена благодаря использованию средств телевизионной техники. Собранная нами установка для визуального наблюдения ФРЛ представлена на рис.3.9. В фокальной плоскости коллиматора 5 этой установки ($f'=600$ мм) установлена щелевая диафрагма 4 (УФ-11), перекрытая непрерывным фотометрическим клином 3. Плотность D этого клина изменяется в направлении длины щели X в соответствии с функцией $D=KX$, где X – протяженность вдоль клина, K – постоянная клина, равная $0,2 \text{ мм}^{-1}$.

Для освещения щели использовался осветитель 1, состоящий из конденсора и ленточной лампы. Перед коллиматором установлен исследуемый объектив 6, формирующий изображение щели 4 в своей фокальной плоскости.

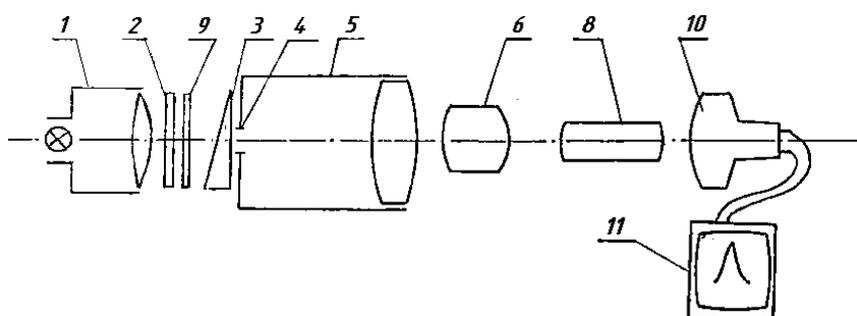


Рис.3.9. Принципиальная схема установки для измерения ФРЛ

Изображение, увеличенное микроскопом 8, переносится на фотокатод телевизионной передающей трубки 10, а затем по телевизионному каналу воспроизводится на экране телевизионного приемника 11.

Распределение освещенности вдоль изображения щели обусловлено характером изменения плотности в клине 3, а поперек – функцией рассеяния исследуемого объектива. В процессе максимального повышения контраста изображения в телевизионном канале происходит выделение линии ровного уровня освещенности – изофоты, которая образует кривую, являющуюся графиком ФРЛ исследуемого объектива. Изофота выявляется как граница черного и белого на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ).

Известно, что основными факторами, ухудшающими качество изображения, создаваемого объективом, являются избыточная сферическая aberrация, возникающая из-за погрешностей воздушных промежутков, толщин линз, радиусов и т.д., а также кома, возникающая при децентрировках оптических элементов

На первом этапе была поставлена задача выявления возможностей визуальной оценки изменения сферической aberrации и комы на оси системы по кривой ФРЛ. Попутно решалась задача оценки точности определения плоскости наилучшей наводки. На втором этапе находили уровень относительной освещенности, при котором между шириной графика ФРЛ и значением ФРС наблюдается хорошая корреляция.

На рис.3.10 приведены снимки увеличенных изображений щели с наложенным клином, полученные тремя центрированными объективами Т-51 с разными уровнями сферической aberrации. Величина поперечной сферической aberrации в плоскости наилучшей наводки объектива №1 (рис.3.10а) равна 0,01 мм, объектива №2 (рис.3.10б) – 0,014 мм, а объектива №3 (рис.3.10в) – 0,017 мм. Слева и справа от кривой для плоскости наилучшей наводки представлены графики ФРЛ, полученные при сдвиге измерительного микроскопа на $\pm 0,01$ и $\pm 0,02$ мм относительно плоскости наилучшей наводки всех объективов. Сравнивая графики ФРЛ в плоскости наилучшей наводки, нетрудно заметить разницу в величинах их поперечных сечений, т.е. в расстояниях между ветвями кривых на заданном уровне относительной освещенности. Так, при уровнях относительной освещенности ниже 0,25, расстояние между ветвями графика для объектива №2 значительно больше, чем для объектива №3.

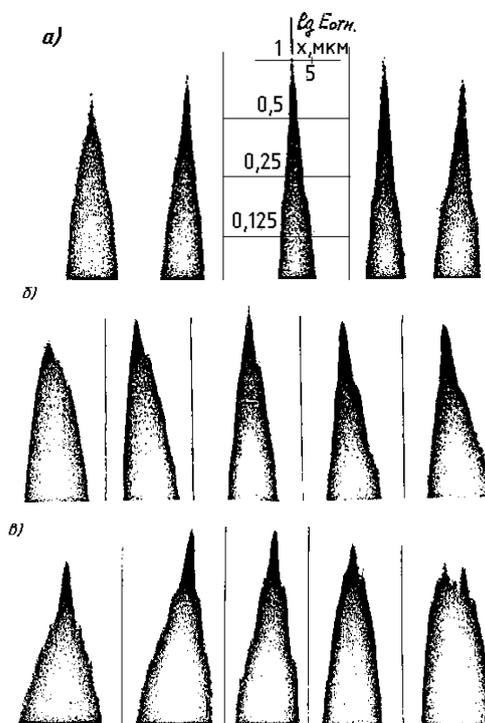


Рис.3.10. ФРЛ для трех объективов с разными уровнями сферической aberrации

Из сказанного следует, что изменение сферической aberrации на величину 0,003 мм легко обнаруживается по изменению ширины графика ФРЛ. Уменьшить эту величину в 2-3 раза удастся при наложениях кривых ФРЛ.

Перефокусировки микроскопа на 0,01 мм хорошо заметны по изменению графика ФРЛ. Поэтому определение плоскости наилучшей наводки, в которой анализируется качество изображения, создаваемого объективом, вполне возможно с погрешностью, не превышающей 0,01 мм.

На рис.3.11 представлены графики ФРЛ четырех объективов Т-51 с разной величиной комы на оси: 0,005 мм (рис.3.11а), 0,009 мм (рис.3.11б), 0,012 мм (рис.3.11в) и 0,002 мм (рис.3.11г). С помощью графиков легко обнаруживается кома в 0,005 мм, а при их наложении – и меньшая величина (2-3 мкм).

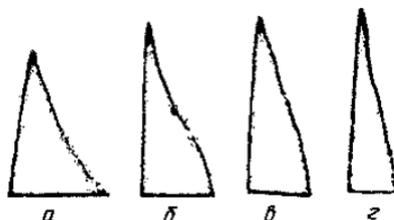


Рис.3.11. Графики функции рассеяния линии четырех объективов Т-51

На следующем этапе работы был найден уровень относительной освещенности ФРЛ, который согласуется с ФРС испытуемого объектива. Исследованы три объектива Т-51. Известно соотношение, связывающее ФРС и его физическую разрешающую способность [33]:

$$\frac{1}{R_{\phi}} = \frac{1}{R_{об}} + \frac{1}{R_{пл}}, \quad (3.2)$$

где R_{ϕ} - ФРС объектива, $R_{об}$ - физическая разрешающая способность объектива, $R_{пл}$ – разрешающая способность фотопленки.

Значение R_{ϕ} исследованных образцов объективов приведены в табл.3.5. Разрешающая способность кинопленки КН-11, использованной при испытаниях, составляет 130 мм^{-1} . Величина $R_{об}$ определялась по формуле (3.2). Результаты вычислений представлены в табл.3.5.

Таблица 3.5

Номер объектива	$R_{\phi}, \text{ мм}^{-1}$	$R_{об}, \text{ мм}^{-1}$
1	82,3	224,20
2	69,0	150,40
3	65,6	132,45

По данным, приведенным на графиках ФРЛ (рис.3.10), были выбраны уровни относительной освещенности E_{ϕ} . Величины сечений ФРЛ на этих уровнях освещенности равнялись вычисленным значениям $\frac{1}{R_{об}}$. Построенные таким образом уровни относительной освещенности для объективов Т-51 колебались от 0,31 до 0,36. Площадь под графиком ФРЛ над сечением E_{ϕ} составляет 25-30% площади под всем графиком. Для уточнения положения уровня E_{ϕ} проведено статистическое исследование выборки объективов Т-51 в количестве 42 штук. Для каждого из них получены ФРС и ФРЛ, а также определены форма и сила связи между ФРС и шириной сечения ФРЛ на

восьми уровнях относительной освещенности. По экспериментальным данным рассчитаны коэффициенты корреляции r и регрессии ρ .

Анализ результатов показывает, что наибольшее значение коэффициент корреляции принимает при относительной освещенности равной $E_{\phi 3}=0,360$. Проверка значимости коэффициента корреляции позволила с надежностью 99% [19] сделать заключение о наличии линейной корреляционной зависимости между ФРС и размером сечения графика ФРЛ при $E_{\phi 3}=0,360$. О влиянии величины сечения графика ФРЛ на ФРС при разных уровнях освещенности можно судить по величине коэффициента линейно регрессии ρ . Из табл.3.6 видно, что наибольшее значение коэффициента регрессии приходится на $E_{\phi 3}$, т.е. для этого уровня (по сравнению с другими) характерна наиболее существенная зависимость ФРС от ширины сечения графика ФРЛ.

По данным испытаний 42 объективов построена среднестатистическая кривая ФРЛ (рис.3.12), с помощью которой произведена оценка площади под графиком ФРЛ для сечения $E_{\phi 3}$. Расчет показал, что количество энергии, согласующееся с ФРС, составляет около 30% всей энергии, содержащейся в изображении. Этот результат соответствует экспериментальным данным других исследователей [34].

Таблица 3.6

$E_{\phi i}$	Коэффициент корреляции r	Коэффициент регрессии ρ
0,750	-0,232	-1,000
0,500	-0,472	-2,257
0,360	-0,555	-2,730
0,220	-0,465	-1,988
0,155	-0,480	-1,930
0,105	-0,464	-1,533
0,07	-0,451	-1,155
0,03	-0,432	-1,021

Таким образом с помощью функции рассеяния линии можно дать качественную (по форме и характеру графика ФРЛ) и количественную (по величине ширины сечения ФРЛ на заданном уровне относительной освещенности) оценку качества объектива. Заданный уровень освещенности определяется на основании статистической обработки результатов измерения ФРЛ опытных образцов, либо, исходя из положения, что ФРС определяется тем уровнем освещенности кривой ФРЛ, над которым лежит 30% энергии.

Эффективность описанного метода и аппаратуры для оценки качества изображения, создаваемого серийными объективами, проверена в цеховых условиях при контроле опытной партии объективов «Агат-14» в количестве 50 штук. Параллельно с контролем по ФРЛ проводилась съемка предельных

штриховых мир абсолютного контраста. Расстояние между штрихами мира соответствовало требованиям технических условий.

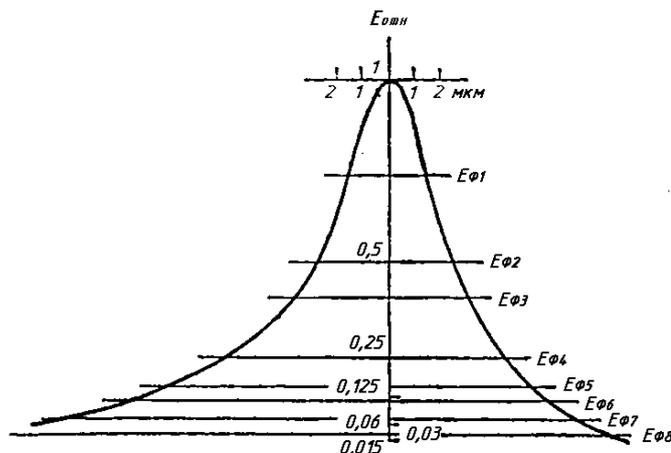


Рис.3.12. Среднестатистическая кривая ФРЛ полученная по результатам испытаний 42 объективов Т-51

При оценке качества объективов опытной партии с помощью ФРЛ были забракованы три объектива. Контроль этой же партии объективов путем фотографирования мира и определения ФРС подтвердил полученный результат - были признаны негодными те же три объектива. Остальные объективы данной партии, признанные годными при контроле по ФРЛ, полностью соответствовали требованиям ТУ в отношении ФРС.

Кроме того, при контроле по ФРЛ у одного из забракованных объективов было обнаружено недопустимое смещение плоскости изображения. Визуальная оценка на оптической скамье подтвердила, что это смещение действительно в 3 раза больше допустимого.

Произведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Разработанная телевизионная оптико-измерительная схема визуализации графика ФРЛ оптической системы обеспечивает ряд существенных преимуществ: оперативность и наглядность контроля, возможность непрерывного наблюдения изменений формы графика ФРЛ при перестройках системы, возможность однозначного определения в процессе контроля плоскости наилучшей наводки.
2. Телевизионная установка для исследования ФРЛ позволяет проводить массовый оперативный контроль качества объективов, обнаруживать дефекты изготовления и сборки в условиях крупносерийного и массового производства.
3. Критерий, связывающий ширину графика ФРЛ и ФРС, позволяет судить о ее величине непосредственно в момент контроля без трудоемких операций фотосъемки мира и обработки фотоматериала.

3.4 Вероятностный характер распределения величины заднего фокального отрезка и фокусного расстояния

Для оценки характера распределений отклонения заднего фокального отрезка от расчетного значения $\Delta S'_F$ были исследованы выборки из ежедневных партий объективов массового производства Минитар – 1Л (2,8/35), годовой объем выпуска которого составлял 190000 шт.

Измерение отклонений $\Delta S'_F$ осуществлялось на оптической скамье типа ОСК-2 по схеме, представленной на рис.3.13.

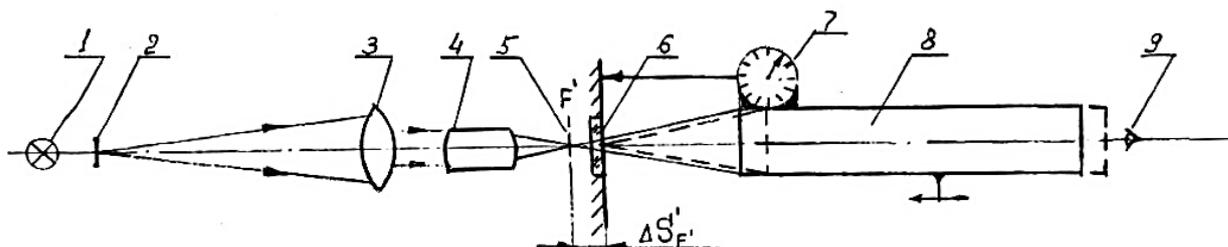


Рис.3.13. Принципиальная схема измерения заднего фокального отрезка: 1-источник света; 2-мира №5; 3-объектив коллиматора; 4-исследуемый объектив; 5-плоскость с изображением мира; 6-сетка; 7-индикатор часового типа (ГОСТ 577-68); 8- микроскоп с видимым увеличением $\Gamma=150\times$; 9-глаз наблюдателя.

Результаты измерений представлены в табл.3.7.

В качестве примера на рис.3.14 представлены полигоны распределения отклонений заднего фокального отрезка в выборке из 311 шт.

Таблица 3.7

№ выб.	Объем выборки (шт.)	Поле рассеяния $2\delta(\Delta S'_F)$, мм	$\frac{\delta(\Delta S'_F)}{S'_{F'}}$ %	Коэффициент относительного рассеяния k_i	Коэффициент относительной асимметрии α_i
1	130	0,90	1,9	1,12	0,05
2	104	0,90	1,9	1,00	0,00
3	130	0,81	1,7	1,20	-0,16
4	130	0,81	1,7	1,14	-0,20
5	311	0,78	1,6	1,08	-0,10
6	120	0,81	1,7	1,19	-0,16

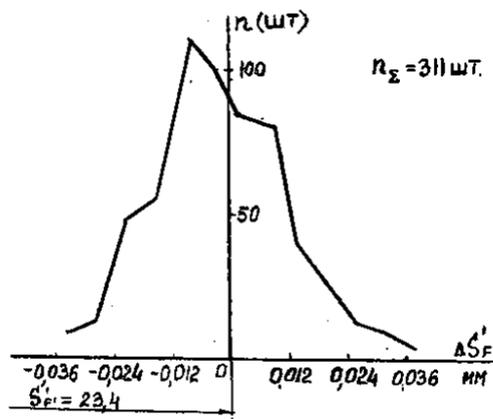


Рис.3.14. Полигон распределения заднего фокального отрезка объектива Минитар - 1Л

Из табл.3.7 следует, что, во-первых, отклонения значений $\Delta S'_F$ от расчетного значения даже в худшем случае не превышают 1,9%, практически же их можно принять равными $\pm 2\%$. Во-вторых, для вероятностных расчетов можно брать средние значения коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии по шести выборкам, равные соответственно $k=1,12$ и $\alpha=-0,1$.

Характер распределения $\Delta S'_F$, представленного на рис.3.14, вполне можно оценить как распределение, подчиняющееся закону Гаусса.

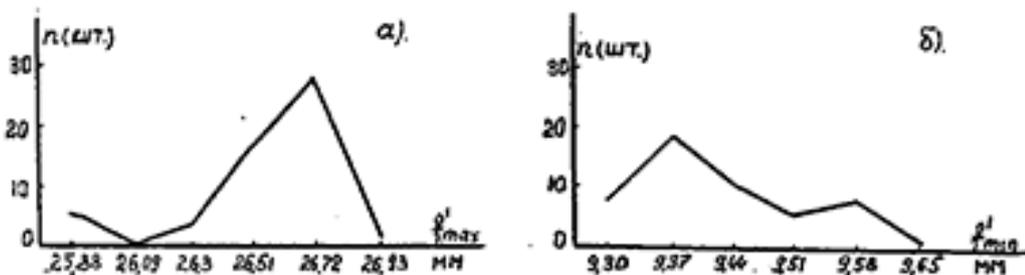


Рис.3.15. Полигон распределения фокусного расстояния объектива переменного фокусного расстояния Агат-14: а) f'_{max} ; б) f'_{min}

На рис.3.15а и 3.15б представлены полигоны распределений граничных значений диапазона измерений фокусного расстояния $f' = 27$ мм и $f' = 9$ мм в объективе переменного фокусного расстояния Агат-14 (2,8-9-27), выпускаемого серийно (40000 шт./год). Установка контрольных воздушных промежутков в объективе осуществлялась на фокусе $f' = 27$ мм. Объем исследуемой выборки равнялся 55 шт.

Расчеты показали, что отклонения граничных значений фокусных расстояний не превышали 3% относительно их средних значений, а коэффициенты относительного рассеяния и асимметрии соответственно равны $k_{27}=1,2$; $\alpha_{27}=0,22$; $k_9=1,4$; $\alpha_9= - 0,26$.

На рис.3.16 приведен полигон распределения погрешности установки светоделительной призмы в том же объективе Агат-14. Задача призмы –

отводить около 15% света из объектива в визирное устройство кинокамеры. Объем выборки – 51 шт. Коэффициенты относительного рассеяния и асимметрии равны: $k=1,4$; $\alpha=-0,1$.

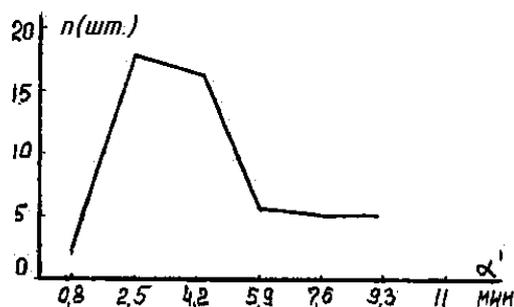


Рис.3.16. Полигон распределения

3.5 Статистические исследования погрешности визуального наведения с помощью микроскопа.

При юстировке и контроле объективов, например, при измерениях фокусных расстояний, задних фокальных и рабочих отрезков, при оценке величины осевого сдвига плоскости изображения в объективах переменного фокусного расстояния и т.д. очень часто приходится осевыми перемещениями микроскопа наводиться на резкое изображение мир, сеток, разного рода штрихов и щелей.

Во всех этих случаях возникает проблема точности фокусировки на резкое изображение, создаваемое испытываемым объективом.

Существует немало способов определения плоскости наилучшей наводки:

- обычный визуальный (погрешность наведения 0,02-0,03 мм) [35];
- электронный (погрешность наведения в лучшем случае 0,005-0,02 мм) [35];
- метод двойной автоколлимации (погрешность наведения примерно в два раза выше чем при обычной визуальной фокусировке) [36];
- фотографический (погрешность наведения 0,01-0,02 мм) и др.

Величины погрешностей взяты из соответствующих литературных источников. Но, к сожалению, ни в одном из этих источников не говорится о количестве измерений, по которым получены эти результаты, о том с какой надежностью они сделаны и каков был характер распределения погрешностей измерений. Известно, что в условиях серийного производства самым производительным способом, требующим минимума дорогостоящей оснастки и весьма среднего уровня квалификации рабочих, является обычный визуальный способ, когда для нахождения резкого изображения используется микроскоп. Поэтому проведем статистический анализ погрешности наведения именно для этого способа фокусировки.

При использовании визуального способа наведения приходится всегда решать две основные проблемы:

- выбор параметров микрообъектива, тип сетки окуляра и его увеличение;
- выбор миры, сетки или размера щели, которые бы позволили получить лучшую фокусировку на их изображении, создаваемым испытываемым объективом.

Понятно, что решение первой из этих проблем в первую очередь связано с глубиной резкости микроскопа. Но, как показали исследования, этого оказывается недостаточно. В решение этой проблемы включаются другие, не менее важные элементы. Поясним это на примере.

Микроскоп с микрообъективом, имеющим апертуру $A=0,3$, увеличение $V=10$, и окуляр с сеткой, имеющий увеличение $\Gamma=15$, наводился 60 раз с одной стороны на изображение сетки с перекрытием. Каждый раз снимался отсчет, соответствующий резкому изображению сетки. Все измерения проводились на оптической скамье ОСК-2, в фокальной плоскости объектива которой устанавливалась вышеупомянутая сетка. Изображение сетки образовывалось прекрасным фотографическим объективом Волна (1:1,8/50), имеющим в центре поля зрения фотографическую разрешающую способность не менее 60 мм^{-1} и контраст на частоте 60 мм^{-1} не менее 40%.

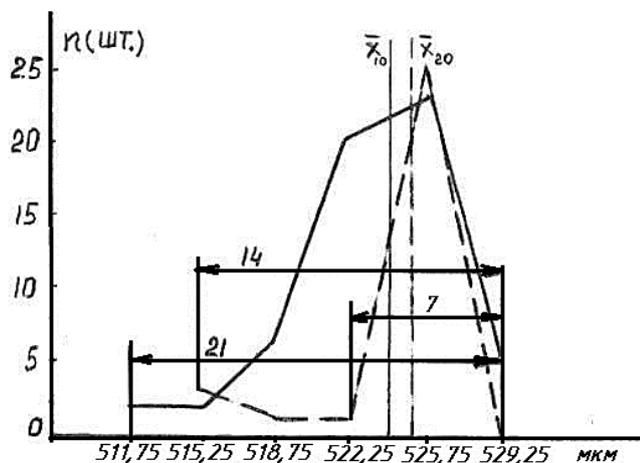


Рис.3.17. Полигоны распределения погрешности наведения микроскопом с объективом $10\times$, $A=0,3$ и окуляром $15\times$ (сплошная линия) и с объективом $20\times$, $A=0,4$ (пунктирная линия)

Рассчитаем глубину резкости микроскопа по известной формуле [37].

$$T = T_{\Gamma} + T_{\text{в}}, \text{ где } T_{\Gamma} = \frac{250 \cdot \varepsilon}{\Delta \Gamma}; \quad T_{\text{в}} = \frac{\lambda}{2A^2}. \quad (4.5)$$

При значении параметров $\varepsilon=3'$; $A=0,3$, $\Gamma=150\times$; $\lambda=0,55 \text{ мкм}$, получим $T_{\Gamma} = 4,96 \text{ мкм}$; $T_{\text{в}} = 3,05 \text{ мкм}$.

Тогда по формуле (4.5) $T=8,01 \text{ мкм}$.

Таким образом, мы получили величину глубины резкости, соизмеримую с половиной поля рассеяния погрешности наводки.

Для повышения точности наведения был взят еще один микрообъектив, но с увеличением $20\times$ и апертурой $A=0,4$. Результаты измерений с этим объективом приведены на том же рис.3.17 (пунктирная линия). Нетрудно видеть, что все поле рассеяния уменьшилось до 14 мкм. Основная же масса измерений (около 90%) находится в пределах 7 мкм. Расчет глубины резкости дал следующие значения:

$$T = T_r + T_v = 0,94 + 1,7 = 2,64 \text{ мкм.}$$

Полученная величина T , также, как и в предыдущем случае, соизмерима с половиной поля рассеяния измерения.

Из этих двух экспериментов можно сделать, по крайней мере, следующие два вывода.

- При изменении увеличения микрообъектива в два раза, поле рассеяния наводок также изменилось в два раза.
- Поле рассеяния наводок в два раза больше расчетной глубины резкости микроскопа.

Рассмотрим еще один пример. Микроскоп фокусируется не на сетку, а на изображение светящейся щели конечного размера, создаваемое фотообъективом «Волна». При этом наведение на резкость вначале осуществляется из красного фона, а затем из зеленого до получения наилучшего контраста изображения щели. Измерения проводились 60 раз при применении микрообъектива с параметрами $10\times$ и $A=0,3$, и 40 раз при использовании микрообъектива с параметрами $20\times$ и $A=0,4$. Полигоны распределений приведены на рис.3.18. По поводу этих распределения можно сказать следующее:

Во-первых, резкое изображение щели при наведении из зеленого фона не совпадает по глубине с резким изображением щели при наведении из красного фона. Отличие средних арифметических составляет 17,4 мкм. Анализ aberrаций показал, что только одним хроматизмом невозможно объяснить такую разницу.

Во-вторых, поле рассеяния измерений при наведении из красного фона примерно на 25% больше, чем при наведении из зеленого фона. Это справедливо как при использовании микрообъектива $10\times$, так и при использовании микрообъектива $20\times$.

В-третьих, поле рассеяния измерений при применении микрообъектива $20\times$ заметно меньше, чем при применении микрообъектива $10\times$. Понятно, что объяснить такое отличие только разницей апертур нельзя.

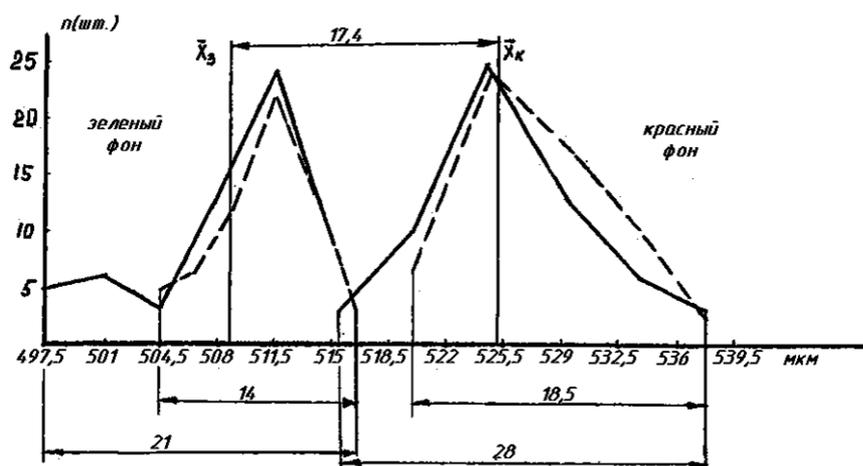


Рис.3.18. Полигоны распределения погрешности наведения микроскопом с микрообъективом m параметрами: $V=10^x$, $A=0,3$ и окуляром 15^x (сплошная линия); $V=20^x$, $A=0,4$ (пунктирная линия)

Конечно, чтобы дать исчерпывающий ответ на все возникающие вопросы, объем исследования не так уж велик. Поэтому автор надеется, что исследования в этой области будут продолжены. Однако на некоторые вопросы мы все же попытаемся ответить.

В качестве наиболее правдоподобного объяснения несовпадения центров группирования измерений на величину в 17,4 мм можно предложить следующую версию. При наблюдении оператор перемещает микроскоп вдоль его оси, наблюдая при этом за изображением щели, которая постепенно становится все резче и резче. И когда, с его точки зрения, резкость становится вполне приемлемой, он останавливает микроскоп. В результате проведения этой операции предметная плоскость микроскопа располагается около ближайшей границы глубины резкости испытуемого объектива. Учитывая то, что сама глубина резкости имеет некоторую протяженность (по расчетам она составляет около 18 мкм), то можно считать, что именно эта величина и определяет расстояние между центрами группирования отдельных наводок из зеленой и красной областей.

Величину разброса измерений относительно центра группирования можно объяснить тем, что за счет наличия глубины резкости микроскопа оператор остановит его перемещение тогда, когда изображение щели окажется на границе глубины резкости микроскопа, то есть, станет достаточно резким. В результате предметная плоскость микроскопа не дойдет до передней границы глубины резкости объектива на величину глубины резкости микроскопа. Эти соображения неплохо согласуются с экспериментальными данными, представленными на рис.3.18.

При наведении из зеленого фона микроскопом с объективом 10^x центр группирования будет находиться на отметке 508,7 мкм. Так как глубина резкости микроскопа в данном случае равна 8 мкм, то микроскоп может остановиться на расстоянии $508,7-8=500,7$ мкм или $508,7+8=516,7$ мкм. Из рис.3.18 видно, что эти границы практически совпадают с результатами

измерений. При наведении из красного фона предметная плоскость остановится на отметках $525+8=533$ мкм и $525-8=517$ мкм, что также практически совпадает с границами поля рассеяния. Конечно, предложенное объяснение позволяет оценить экспериментальные результаты лишь в среднем. В действительности же рассеяние результатов наведения определяется не столько детерминированными значениями границ глубин резкости, сколько способностью глаза оператора оценивать эти границы по изменению контраста в цеховых условиях производства. Эту задачу еще предстоит решить.

Какие же практические выводы можно сделать из приведенных исследований? Обратимся к примеру. При изготовлении зеркальных фотоаппаратов рабочий отрезок объектива и расстояние от опорного торца в корпусе фотоаппарата до плоскости фильмового канала (плоскость направляющих полозков) должны совпадать по своей величине с достаточно высокой точностью (до $0,01 - 0,015$ мм). Пусть в аппарате выставляют номинальное значение отрезка, которое соответствует середине глубины резкости объектива. Тогда для такого объектива, как «Волна», возможность отклонения плоскости изображения от плоскости фильмового канала может составить $17,4/2+8=16,7$ мкм. Это величина хоть и допустимая, но уже предельная.

Если в аппарате будет выставляться отрезок, соответствующий наведению из зеленого фона, а рабочий отрезок объектива будет соответствовать наведению из красного фона, то плоскость изображения может не совпасть с плоскостью фильмового канала на величину $17,4+8=25,4$ мкм. Это уже большое отступление от требований чертежа (± 15 мкм), и оно может привести к большим недоразумениям между цехами, собирающими объективы и аппараты.

Теперь обратимся к результатам исследований точности фокусировки по штриховой mire. Необходимость такой работы диктовалась просьбами цеховых работников ответить на вопрос: по каким элементам мires лучше наводиться на резкость – по мелким или по крупным. На рис.3.19 представлены эмпирические кривые распределения наводок на изображение различных элементов мires, создаваемого объективом «Волна», как из зеленого, так и из красного фонов. Анализ кривых показывает, что при переходе элементов с мелкой структурой (толщины штриха $p=33,6$ мкм) наблюдается, во-первых, заметная тенденция к увеличению расстояния между центрами группирования для зеленого и красного фонов; во-вторых, увеличение поля рассеяния наводок; и в-третьих, изменение характера распределения. То есть, если для шага $p=33,6$ мкм основная масса измерений сосредоточена ближе к середине расстояния между центрами группирования, то для шага $p=160$ мкм, наоборот, к удаленным границам полей рассеяния.

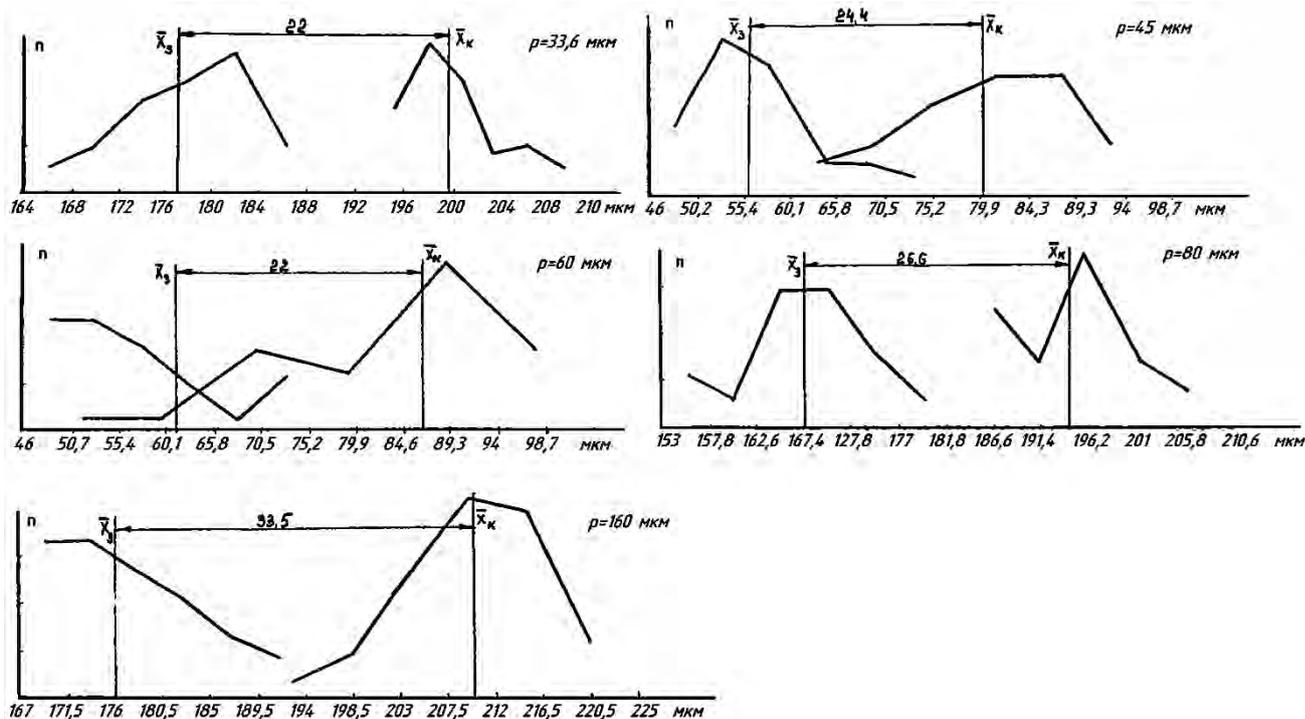


Рис.3.19

Отсюда следует, что для более высокой точности наведения следует выбирать более мелкие элементы миры.

Не менее часто, чем продольные фокусировки микроскопом, приходится совершать и его поперечные перемещения, при которых производится совмещение одной из линий перекрестия сетки окуляра с изображением перекрестия сетки, установленным в фокальной плоскости объектива коллиматора.

Часто при оптических измерениях встречаются случаи, когда величина изображения штриха миры или сетки в несколько раз меньше ширины штриха сетки окуляра измерительного микроскопа, или наоборот. Вследствие этого при поперечных совмещениях этих изображений возникает погрешность наведения, величина которой может быть весьма значительной.

В качестве примера приведем результаты статистических наблюдения поперечного совмещения штриха сетки стандартного окуляра 15^x с изображением сетки, создаваемым объективом Т-51 ($F' = 10$ мм), которое по ширине примерно в три раза меньше сетки окуляра. Поперечное совмещение осуществлялось при подведении вертикального штриха сетки окуляра к изображению штриха сетки коллиматора слева (заштрихованная область), а затем справа. В обоих случаях совмещение осуществлялось по 50 раз. Результаты измерений приведены на рис.3.20.

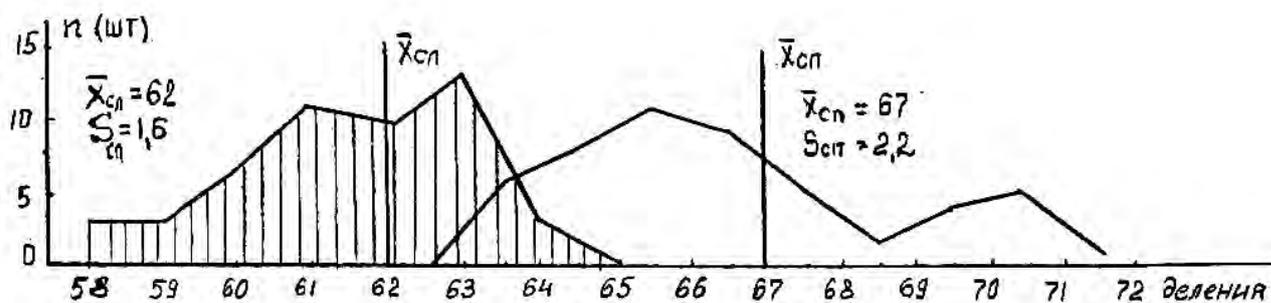


Рис.3.20. Полигон распределения поперечного совмещения штриха сетки микроскопа с изображением штриха сетки коллиматора

Из приведенных данных следует, что погрешность совмещения зависит от того, с какой стороны подводить штрих сетки окуляра к изображению сетки коллиматора. Если за истинное совмещение принять среднее арифметическое значение, то оно при наведении слева ($\bar{x}_{сл} = 62$) на 8% меньше, чем при наведении справа ($\bar{x}_{сп} = 67$). Если же за меру рассеяния взять среднеквадратическое, то оно при наведении слева ($S_{сл} = 1,6$) на 27% меньше, чем при наведении справа ($S_{сл} = 2,2$).

В ряде случаев такие отклонения нельзя признать допустимыми. Поэтому для повышения точности совмещения необходимо либо подбором увеличения микроскопа добиться равенства ширины совмещенных штрихов, либо, если этого нельзя сделать, добиться большей разности яркостей совмещенных штрихов, а если и это сделать трудно, то все совмещения штрихов пытаться проводить, с одной стороны.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДЕЦЕНТРИРОВОК

Рассмотрим некоторые основные положения теории вероятности применительно к расчету допусков в объективах.

Известно, что рассеивание случайной величины x полностью описывается функцией плотности вероятности этой величины $y=f(x)$, которую еще называют законом распределения случайной величины. График плотности вероятности (рис.4.1) называют также кривой распределения.

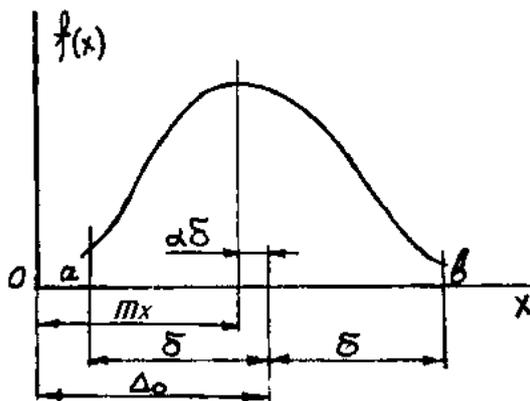


Рис.4.1. Распределение плотности вероятности случайной величины x

Площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой распределения, определяет вероятность попадания случайной величины x в интервал (a, b) . Функцией распределения случайной величины X называется функция $F(x)$, выражающая вероятность того, что X примет значение, меньшее, чем x

$$F(x) = P(X < x)$$

Функция $F(x)$ есть неубывающая функция $F(-\infty)=0$, $F(+\infty)=1$. Она выражается через плотность распределения формулой

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx$$

Вероятность попадания непрерывной случайной величины X на участок от a до b выражается формулой $P(a \leq X < b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x)dx$

Начальным моментом k -го порядка случайной величины называется математическое ожидание k -ой степени этой случайной величины [38]:

$$\alpha_k[X] = m[X^k].$$

Для непрерывной случайной величины $\alpha_k[X]$ вычисляется по формуле

$$\alpha_k[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x)dx$$

Центральным моментом k -го порядка случайной величины называется математическое ожидание k -ой степени центрированной случайной величины \dot{X} .

$$\mu_k[X] = m[\dot{X}^k]$$

и вычисляется по формуле $\mu_k[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_k)^k f(x) dx$

Математическое ожидание случайной величины X есть ее первый начальный момент, а дисперсия – второй центральный:

$$m[X] = \alpha_1[X]; D[X] = \mu_2[X]$$

Второй и третий центральные моменты выражаются через начальные, формулами

$$\begin{aligned} \mu_2[X] &= \alpha_2[X] - m_x^2 \\ \mu_3[X] &= \alpha_3[X] - 3m_x \alpha_2[X] + 2m_x^3 \end{aligned}$$

На рис.4.2 приведена децентрированная линза.

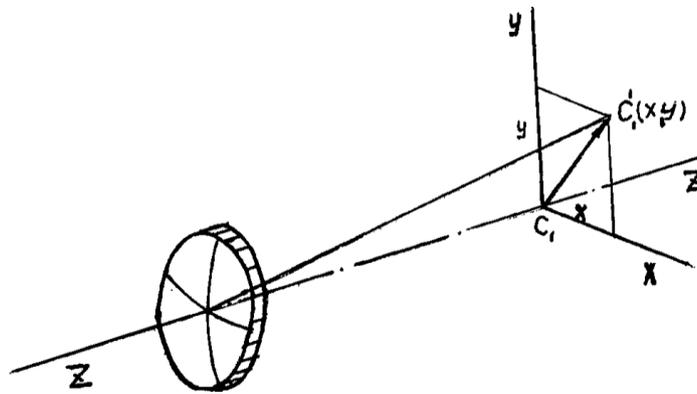


Рис.4.2

Центр кривизны C_1 первой поверхности линзы смещен с оси z - z системы объектива в новое положение $C'_1(x, y)$. Практика изготовления объективов показала, что это смещение можно интерпретировать как случайный вектор, направленный из начала координат C_1 в точку $C'_1(x, y)$, в которой совокупность двух случайных величин (x, y) представляет собой систему случайных величин x и y .

Функцией распределения $F(x, y)$ системы двух случайных величин (x, y) называется вероятность совместного выполнения двух неравенств $X < x; Y < y$.

$$F(x, y) = P(X < x; Y < y)$$

Геометрически $F(x, y)$ интерпретируется, как вероятность попадания случайной точки (X, Y) в квадрант с вершиной (x, y) , заштрихованный на рис.4.3.

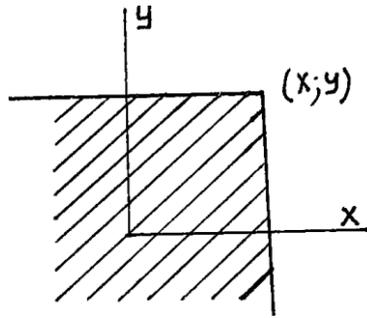


Рис.4.3

Плотность распределения $f(x; y)$ системы двух случайных величин $(x; y)$ называется отношение вероятности попадания случайной точки в элементарный участок плоскости, примыкающий к точке $(x; y)$ к площади этого участка, когда его размер стремится к нулю. Плотность распределения выражается через функцию распределения формулой

$$f(x; y) = \frac{\partial^2 F(x; y)}{\partial x \partial y}$$

Вероятность попадания случайной точки $(X; Y)$ в произвольную область D определяется выражением:

$$P((X; Y) \in D) = \iint_D f(x; y) dx dy$$

Функция распределения системы выражается через плотность распределения формулой

$$F(x; y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f(x; y) dx dy$$

Для оценки случайных величин применяют так называемые числовые характеристики, которые в сжатой форме выражают существенные особенности распределения. Рассмотрим те числовые характеристики, которыми в дальнейшем будем пользоваться.

Математическое ожидание m_x случайной величины x характеризует ее положение на числовой оси, т.е. указывает некоторое среднее значение x , около которого группируются все возможные ее значения, и вычисляется по формуле

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx .$$

Дисперсия D случайно величины x или ее среднеквадратическое отклонение σ являются характеристиками рассеяния случайной величины около ее математического ожидания и определяются выражением

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx , \quad \sigma = \sqrt{D} .$$

Одним из главных достоинств дисперсии является определение дисперсии суммы независимых величин как $D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i$, вне зависимости от законов распределения, которым подчиняются случайные величины.

Для связи допусков на размеры, указываемые в чертежах, с характеристиками рассеяния m_x и σ этих погрешностей профессором Н.А. Бородачевым были введены коэффициенты относительного рассеяния $K = \frac{3\sigma}{\delta}$ и относительной асимметрии $\alpha = \frac{m_x - \Delta_0}{\delta}$ [20],

где δ – половина поля допуска;

Δ_0 – координата середины поля допуска;

σ – среднее квадратическое отклонение.

Величина коэффициента относительного рассеяния определяется законом распределения погрешности и процентом брака, выбираемым конструктором.

Величина α характеризует смещение центра группирования реального распределения погрешности относительно центра поля допуска. На основе сказанного можно записать для погрешности

$$D_n = \frac{1}{9} K^2 \delta^2, \quad m_n = \Delta_0 + \alpha \delta.$$

Поскольку погрешность связана с абберациями или параметрами, определяющими качество изображения через коэффициент влияния A , то для дисперсии и среднего арифметического значения абберации или параметров качества изображения можно записать

$$D_{\alpha} = A^2 D_n, \quad m_{\alpha} = A m_n$$

При решении практических задач конструирования объективов инженеру-конструктору предоставляется «оптический выпуск» с приложением таблиц влияния децентрировок на изменение поперечных абберация, рассчитанных на компьютере.

По этим таблицам определяют степень влияния децентрировок на изменение поперечных аббераций через коэффициенты влияния по формулам

$$A_{\perp} = \frac{\delta(\Delta Y_{\perp})}{\Delta C_{\perp}}, \quad A_y = \frac{\delta(\Delta Y_y)}{\gamma}$$

где A_{\perp} , A_y – соответственно, коэффициенты влияния поперечных смещений и заклонов поверхностей и линз на изменение поперечных аббераций;

ΔC_{\perp} , γ – соответственно, величины поперечных смещений и заклонов поверхностей и линз;

$\delta(\Delta Y_{\perp})$, $\delta(\Delta Y_y)$ – соответственно, кома децентрировки или другие необходимые конструктору абберации при поперечных смещениях и заклонах поверхностей и линз.

Рассмотрим случай, когда децентрировка ΔC происходит в меридиональной плоскости, и может принимать значения от 0 до «а» (рис.4.28) с одинаковой вероятностью.

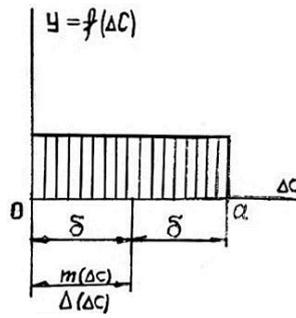


Рис.4.28

В пределах изменения ΔC от 0 до «a» площадь под графиком равновероятного распределения равна 1. Следовательно

$$a \cdot y = 1 \text{ и } y = \frac{1}{a}.$$

Математическое ожидание

$$m(\Delta C) = \int_0^a \Delta C \frac{1}{a} d(\Delta C) = \frac{(\Delta C)^2}{2a} \Big|_0^a = \frac{a}{2}.$$

Дисперсия

$$D(\Delta C) = \int_0^a \left(\Delta C - \frac{a}{2}\right)^2 \frac{1}{a} d(\Delta C) = \frac{a^2}{12}.$$

Отсюда $\sigma = \sqrt{D(\Delta C)} = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

Коэффициент относительного рассеяния $k = \frac{3\sigma}{\delta}$

Так как $\delta = \frac{a}{2}$, то $k = \frac{3}{\sqrt{3}} \approx 1,73$.

Коэффициент относительной асимметрии $\alpha = \frac{m(\Delta C) - \Delta_0(\Delta C)}{\delta}$.

Но так как равновероятное распределение симметрично относительно середины поля рассеивания, то $m(\Delta C) = \Delta_0(\Delta C)$ и $\alpha = 0$.

Рассмотрим второй случай, когда случайная по величине и направлению децентрировка ΔC подчиняется закону равной вероятности по площади круга с радиусом «a» и с центром распределения на оси Z оптической системы объектива. Вне этого круга плотность распределения равна нулю.

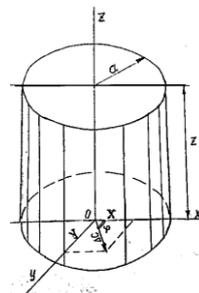


Рис.4.29

На рис.4.29 в графическом виде представлена децентрировка ΔC , как расстояние от точки (X, Y) до центра рассеивания O . Поверхность распределения случайной величины ΔC представляет собой прямой круговой цилиндр, центр основания которого совпадает с началом координат, а высота равна Z . Из условия равенства объема цилиндра единице, находим Z

$$1 = \pi a^2 z.$$

Отсюда плотность вероятности распределения Z случайной величины ΔC будет равна

$$Z = \frac{1}{\pi a^2}$$

Найдем математическое ожидание и дисперсию величины $\Delta C = \sqrt{x^2 + y^2}$

Математическое ожидание

$$m(\Delta C) = \iint_S \sqrt{x^2 + y^2} z dx dy,$$

где S – площадь круга радиуса « a ».

Перейдем к полярным координатам $(\Delta C, \varphi)$:

$$m(\Delta C) = \int_0^a \Delta C^2 \frac{1}{\pi a^2} d(\Delta C) \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{2\pi}{\pi a^2} \cdot \frac{a^3}{3} = \frac{2}{3} a$$

Дисперсия будет равна

$$D(\Delta C) = \alpha_2(\Delta C) - m^2(\Delta C)$$

где $\alpha_2(\Delta C) = \int_0^a \Delta C^2 f(\Delta C) d(\Delta C)$ - начальный момент второго порядка случайно величины ΔC .

Следовательно

$$D(\Delta C) = \iint_S \left(\sqrt{x^2 + y^2} \right)^2 \frac{1}{\pi a^2} dx dy - m^2(\Delta C).$$

И здесь перейдем к полярным координатам $(\Delta C, \varphi)$:

$$D(\Delta C) = \int_0^a \Delta C^3 \frac{1}{\pi a^2} d(\Delta C) \int_0^{2\pi} d\varphi - \left(\frac{2}{3} a \right)^2 = \frac{a^4 2\pi}{4\pi a^2} - \frac{4a^2}{3} = \frac{a^2}{18}$$

Коэффициент относительного рассеивания k будет равен

$$k = \frac{3\sigma}{\delta} = \frac{3\sqrt{D(\Delta C)}}{0,5a} = \frac{3a}{0,5a\sqrt{18}} = 1,414$$

А коэффициент относительной асимметрии примет следующее значение

$$\alpha = \frac{m(\Delta C) - \Delta_0(\Delta C)}{\delta} = \frac{2a}{0,5a^3} - \frac{0,5a}{0,5a} = +0,33$$

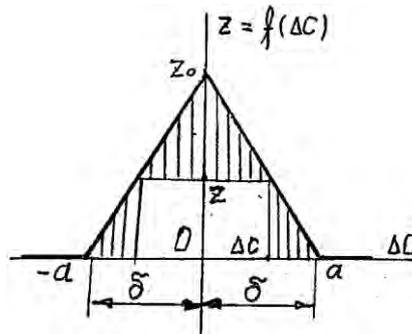


Рис.4.30

Определим выражение для плотности распределения $z = f(\Delta C)$ погрешности ΔC . Из рис.4.30 следует

$$\frac{z_0 - z}{z_0} = \frac{\Delta C}{a}.$$

Отсюда $z = z_0 \left(1 - \frac{\Delta C}{a}\right)$

Наибольшее значение плотности распределения z_0 определяется из условия равенства площади под графиком $f(\Delta C)$ единице:

$$\frac{1}{2} z_0 2a = 1$$

Отсюда $z_0 = \frac{1}{a}$

Подставим полученное значение z_0 в выражение для z :

$$z = f(\Delta C) = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{|\Delta C|}{a}\right) \text{ при } \Delta C \in (-a; a)$$

Определим математическое ожидание для прямоугольника, в котором ΔC изменяется от 0 до a :

$$m_n(\Delta C) = \int_0^a \Delta C f(\Delta C) d(\Delta C) = \int_0^a \frac{\Delta C}{a} \left(1 - \frac{\Delta C}{a}\right) d(\Delta C) = \int_0^a \frac{\Delta C}{a} d(\Delta C) - \int_0^a \frac{\Delta C^2}{a^2} d(\Delta C) = \frac{1}{6} a$$

В силу симметрии левого и правого прямоугольников, математическое ожидание для левого прямоугольника будет равно по абсолютной величине правому, но противоположно ему по знаку $m_n(\Delta C) = -\frac{1}{6} a$. Очевидно, для равнобедренного треугольника, состоящего из этих двух прямоугольников $m(\Delta C) = 0$.

Дисперсия (ΔC) определится следующим образом:

$$\begin{aligned} D(\Delta C) &= 2 \int_0^a \Delta C^2 f(\Delta C) d(\Delta C) - m^2(\Delta C) = 2 \frac{1}{a} \int_0^a \Delta C^2 \left(1 - \frac{|\Delta C|}{a}\right) d(\Delta C) - 0 = \\ &= \frac{2 \Delta C^3}{3a} \Big|_0^a - \frac{2 \Delta C^4}{4a^2} \Big|_0^a = \frac{a^2}{6} \end{aligned}$$

Коэффициенты относительного рассеивания k и асимметрии α будут равны

$$k = \frac{3\sqrt{D(\Delta C)}}{a} = 1,22; \quad \alpha = \frac{m(\Delta C) - \Delta_0(\Delta C)}{a} = 0$$

Пусть распределение децентрировки представляет собой прямой круговой конус, основанием которого служит круг с центром в начале координат с радиусом a . Определим распределение плотности вероятности децентрировки ΔC_{\perp} в круге радиуса a .

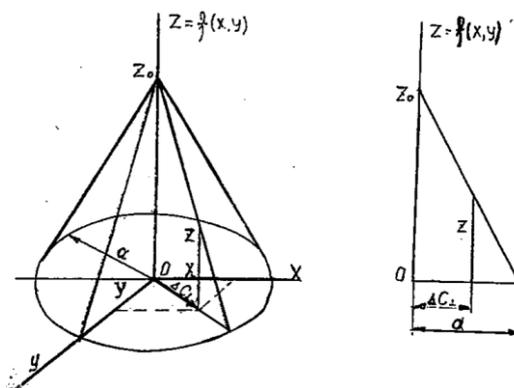


Рис.4.31

Так как, объем под поверхностью распределения должен быть равен единице, то можно записать (см. рис.4.31):

$$V = \frac{1}{3} \pi \alpha^2 z_0 = 1$$

Из этого выражения следует

$$z_0 = \frac{3}{\pi \alpha^2}$$

Определим текущее значение $f(x, y) = z$ через параметры z и ΔC_{\perp} . Из подобия треугольников, опирающихся на a следует:

$$\frac{z_0}{z} = \frac{a}{a - \Delta C_{\perp}}. \quad \text{Отсюда } z = \frac{z_0}{a} (a - \Delta C_{\perp}) = \frac{3}{\pi \alpha^3} (a - \Delta C_{\perp})$$

Определим математическое ожидание $m(\Delta C_{\perp})$ и дисперсию $D(x, y)$ децентрировки $\Delta C_{\perp} = \sqrt{x^2 + y^2}$.

$$m(x, y) = \iint_S \sqrt{x^2 + y^2} f(x, y) dx dy$$

При переходе к полярным координатам $(\Delta C, \varphi)$ получим:

$$m(\Delta C_{\perp}) = \int_0^a \frac{3 \Delta C_{\perp}^2}{\pi \alpha^3} (a - \Delta C_{\perp}) d(\Delta C_{\perp}) \int_0^{2\pi} d\varphi = \int_0^a \frac{6\pi \Delta C_{\perp}^2}{\pi \alpha^3} (a - \Delta C_{\perp}) d(\Delta C_{\perp}) = \frac{a}{2}$$

$$D(x, y) = \iint_S (\sqrt{x^2 + y^2})^2 f(x, y) dx dy - m^2(x, y)$$

Перейдем к полярным координатам ΔC_{\perp} и φ .

$$D(\Delta C_{\perp}) = \int_0^a \Delta C_{\perp}^2 \frac{3}{\pi a} (a - \Delta C_{\perp}) \Delta C_{\perp} d(\Delta C_{\perp}) \int_0^{2\pi} d\varphi - m^2(\Delta C_{\perp}) =$$

$$= \frac{6}{a^3} \int_0^a \Delta C_{\perp}^2 (a - \Delta C_{\perp}) d(\Delta C_{\perp}) - \frac{a^2}{4} = \frac{a^2}{20}$$

Определим коэффициент относительного рассеивания k и асимметрии α .

$$k = \frac{3\sqrt{D(\Delta C_{\perp})}}{0,5\alpha} = 1,34; \quad \alpha = \frac{0,5a - 0,5a}{0,5a} = 0$$

Наиболее распространенной в конструкциях объективов является децентрировка, распределение которой подчиняется закону Релея:

$$f(\Delta C) = \frac{\Delta C}{\sigma} e^{-\frac{\Delta C^2}{2\sigma^2}} \text{ при } \Delta C \geq 0$$

Она возникает от эксцентриситетов посадочных мест оправ, торцевых биений, заклонов оправ, юстировочных подвижек при автоколлимационной центрировке и т.д. Поэтому в последующих разделах пособия нами будет более подробно рассмотрено влияние этих погрешностей на децентрировки при различных конструктивных решениях объективов.

4.1 Оценка децентрировок, возникающих при креплении линз завальцовкой

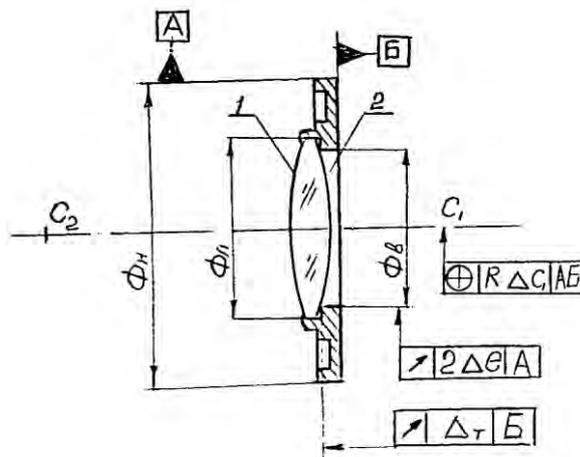


Рис.4.4. Технологические погрешности, возникающие при креплении линз завальцовкой

Крепление линз завальцовкой (рис.4.4) достаточно известный и широко применяемый способ крепления. Особенно большое распространение он получил при использовании автоколлимационной центрировки линз. Достоинства такого способа крепления хорошо известны. Перечислим только те из них, которые для нас наиболее интересны.

При правильной завальцовке линзы, как на фаску, так и на оптическую поверхность (рис.4.5) вследствие упругости тонкого края оправы (усика), давление на нее сравнительно невелико. При этом деформация оптических поверхностей или полностью отсутствует, или настолько мала, что в большинстве случаев ею можно пренебречь. Когда тонкие линзы крепят

завальцовкой, то нельзя забывать о необходимости проведения отжига оправ для снятия внутренних напряжений и повышения эластичности усика оправы.

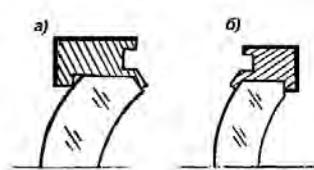


Рис.4.5. Разновидности крепления линз: а) завальцовка на фаску; б) завальцовка на оптическую поверхность

При перепадах температуры окружающей среды и возникающих при этом изменениях размеров линзы и оправы эластичный усик не создает больших напряжений, деформирующих оптические поверхности линзы и этим самым снижающих качество изображения объективов. Постоянство контакта усика с линзой обеспечивает неизменность ее положения в оправе.

В процессе завальцовки поверхность линзы, контактирующая с оправой по внутреннему диаметру \varnothing_6 , автоматически центрируется относительно его оси. Изменяя усилие завальцовки на различных участках усика можно влиять на величину разворота линзы вокруг центра кривизны C_2 опорной поверхности. Этим самым мы добиваемся требуемой величины децентрировки второй поверхности линзы.

При завальцовке линзы в оправе на ее положение относительно базовых поверхностей A и B (рис.4.4) могут влиять различные технологические погрешности. Число их не так уж и велико. Это:

- торцевое биение, Δ_T , поверхности оправы, на которую устанавливается линза;
- биение внутреннего посадочного отверстия \varnothing_6 относительно наружного диаметра \varnothing_H оправы;
- зазор Z в посадке линза – оправы, в котором при завальцовке разворачивается линза вокруг центра кривизны C_2 опорной поверхности.

Если опорная поверхность линзы плоская, то при завальцовке линза может перемещаться поперек оси оправы на величину $\Delta C_{\perp L}$, равную радиальному зазору Z между линзой и оправой.

Рассмотрим влияние каждой из этих технологических погрешностей на величину децентрировки линзы.

4.1.1 Децентрировка от торцевого биения

Возникновение торцевого биения в оправе обычно связывают с обработкой поверхностей оправы C и B (рис.4.6а) с двух установок. Происходит это следующим образом. При первоначальной установке

заготовку закрепляют в патроне по поверхности A и протачивают поверхности A , M , C , N . Затем отрезают деталь по поверхности B . Полученную оправу переворачивают и устанавливают по поверхностям M и C в цанговый патрон, который крепится на шпинделе, имеющем заклон $\gamma_{\Delta T}$ (вторая установка) (рис.4.6б).

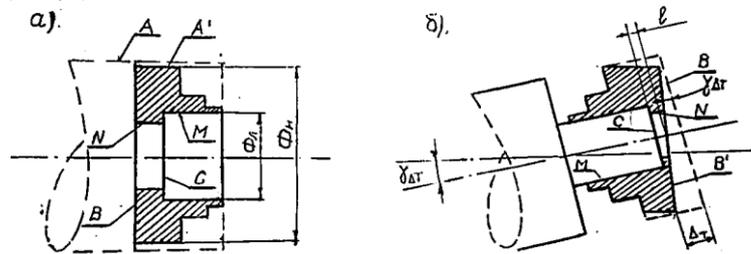


Рис.4.6. Обработка поверхностей оправы с двух установок: а) первоначальная установка, б) вторичная установка

Пропыляют поверхность B' , придавая ей необходимую чистоту обработки и выдерживая требуемое расстояние « l » от поверхности B' до поверхности C . Величина возникающего при этом торцевого биения полностью определяется заклоном торца цангового патрона.

Обработанная подобным образом оправка с завальцованной в ней линзой и установленная в корпусе объектива будет заклонена на угол $\gamma_{\Delta T} = \frac{\Delta T}{\phi_T}$ относительно его оси (рис.4.7). При этом произойдет смещение центров кривизны линзы на величины:

$$\left. \begin{aligned} \Delta C_1 &= TC'_1 \cdot \gamma_{\Delta T} = (r_1 - d_1 + h_2) \cdot \gamma_{\Delta T} \\ \Delta C_2 &= TC'_2 \cdot \gamma_{\Delta T} = (r_2 - h_2) \cdot \gamma_{\Delta T} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где r_1 и r_2 – радиусы первой и второй оптических поверхностей линзы, d_1 – толщина линзы.

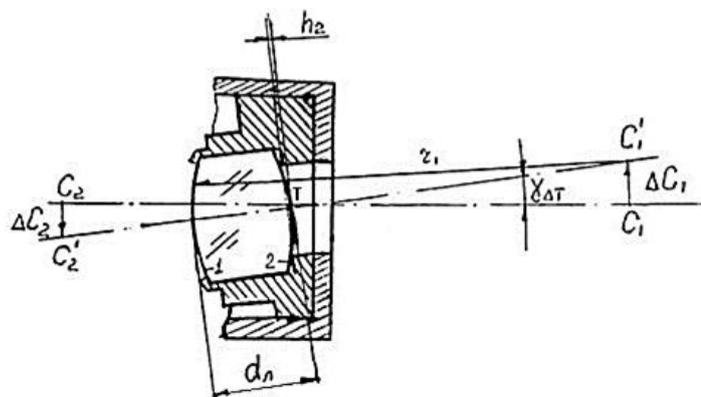


Рис.4.7. Положение линзы при установке оправы в корпус

Существует еще один вариант обработки торцевых поверхностей оправы. Он связан с автоколлимационной центровкой линзы. В этом случае линза сначала завальцовывается в оправу. Затем ее по резьбе закрепляют в плавающем патроне. Выставляют автоколлимационные изображения центров кривизны поверхностей линзы на ось вращения шпинделя станка. Протачивают базовые поверхности оправы D и A и отрезают по сечению $B-B'$ (рис.4.8а). После чего оправа с центрированной линзой закрепляется по поверхностям D и A в патроне другого станка, имеющего заклон $\gamma_{\Delta T}$, и протачивается в размер « b » (рис.4.8б). Возникающее при этом биение торца B полностью определяется биением патрона станка.

Установка оправы с линзой в корпус объектива происходит по схеме рис.4.7, а возникающее при этом смещение центров кривизны можно определить по формуле (4.1).

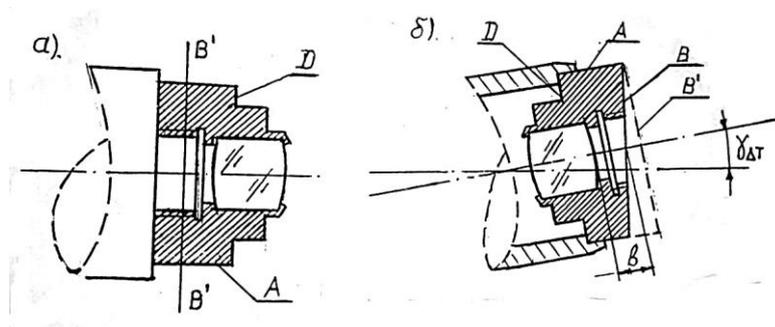


Рис.4.8. Обработка торцевых поверхностей оправы при автоколлимационной центровке линзы:

- а) крепление оправы с линзой в плавающем патроне,
 б) вторичная установка оправы с линзой в патроне

Для расчета дисперсии модуля торцевого биения воспользуемся формулой

$$D_{\Delta T} = \frac{1}{9} k_{\Delta T}^2 \delta_{\Delta T}^2, \quad (4.2)$$

где $\delta_{\Delta T}$ - половина поля допуска на торцевое биение.

Если $\delta_{\Delta T}$ легко определяется из чертежа, то для оценки величины коэффициента относительного рассеяния $k_{\Delta T}$ необходимо знать либо законы вероятностного распределения торцевого биения, либо фактические значения коэффициентов, рассчитанных по результатам выборочного анализа серийно выпускаемых оправ.

Исследования, проведенные нами в цеховых условиях, показали (см.п.2.1), что наиболее близким для описания эмпирического распределения торцевого биения оправ объективов (рис.2.1) является закон Релея. Для этого закона в табл.4.1 представлены значения величины $k_{\Delta T}$ в зависимости от процента выхода значений ΔT за пределы поля допуска.

Таблица 4.1

% брака	0,27	1	2	3	4	5	10
$k_{\Delta T}$	1,14	1,3	1,42	1,48	1,55	1,6	1,84

Воспользовавшись формулой (4.2) получим выражение для дисперсии заклона линзы

$$D(\gamma_{\Delta T}) = \frac{1}{9} k_{\Delta T}^2 \left(\frac{\Delta T}{2\varnothing} \right)^2 = \frac{1}{9} k_{\Delta T}^2 \left(\frac{\gamma_{\Delta T}}{2} \right)^2 \quad (4.3)$$

Дисперсия комы децентрировки от заклона определится выражением

$$D(K_Y) = A_Y^2 \cdot D(\gamma_{\Delta T}) \quad (4.4)$$

здесь A_Y - коэффициент влияния заклона линзы, который вычисляется следующим образом.

Так как при заклоне линзы происходит одновременное смещение центров кривизны в одной меридиональной плоскости (рис.4.9), то вначале рассчитывают суммарную кому от этих смещений, как алгебраическую сумму $K_{C1,C2} = A_1 \Delta C_1 + A_2 \Delta C_2$, в которой коэффициенты A_1 , A_2 и децентрировки ΔC_1 , ΔC_2 берутся со своими знаками, и затем определяют коэффициенты влияния заклона A_Y как отношение:

$$A_Y = \frac{K_{C1,C2}}{\gamma_{\Delta T}} \quad (4.5)$$

Зная его величину, по формуле (4.4) легко рассчитывается дисперсия комы от торцевого заклона.

Если для расчета используют поперечные смещения центров кривизны, то вначале рассчитывают дисперсии децентрировок

$$\left. \begin{aligned} D(\Delta C_1) &= (r_1 + b)^2 \cdot D(\gamma_{\Delta T}), \\ D(\Delta C_2) &= (r_2 - d + b)^2 \cdot D(\gamma_{\Delta T}), \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

а затем дисперсии комы децентрировок

$$D(K_1) = A_1^2 D(\Delta C_1); D(K_2) = A_2^2 D(\Delta C_2) \text{ с учетом знаков } \Delta C_1, \Delta C_2, A_1 \text{ и } A_2.$$

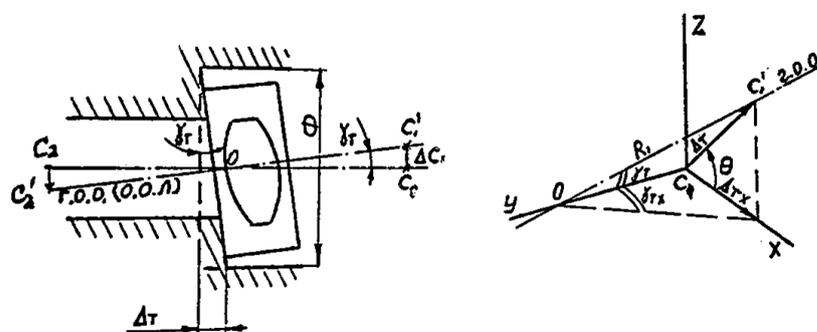


Рис.4.9. Схема расположения центра кривизны линзы при торцевом биении оправы

Расчет проекций децентрировок линзы на заданную меридиональную плоскость можно провести следующим образом. Из рис.4.9 видно, что проекция торцевого биения оправы на координатную плоскость YOX будет равна

$$\Delta_{TX} = \Delta_T \cdot \cos\theta.$$

Это выражение представляет собой произведение двух независимых случайных величин Δ_T и $\cos\theta$. Направление плоскости, в которой происходит заклон торца оправы на угол $\gamma_{\Delta T}$ задано углом θ . Этот угол в собранных объективах является случайной величиной, а его распределение подчиняется закону равной вероятности.

Распределение случайно величины Δ_T , как мы выяснили ранее, описывается законом Релея, т.е. имеет вид

$$f(\Delta_T) = \frac{\Delta_T}{\sigma_{TO}^2} \exp\left(-\frac{\Delta_T^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \text{ при } \Delta_T \geq 0.$$

Для него математическое ожидание и дисперсия равны соответственно

$$\left. \begin{aligned} M(\Delta_T) &= \sigma_{TO} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \\ \sigma_T^2 &= 0,429 \sigma_{TO}^2 \end{aligned} \right\}.$$

Функция $u = \cos\theta$ подчиняется закону арксинуса

$$f(u) = \frac{1}{\pi\sqrt{1-u^2}} \text{ при } -1 \leq u \leq 1$$

На основании известной формулы теории вероятностей закон распределения произведения двух независимых случайных величин определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} f(\Delta_{TX}) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta_T) \cdot f\left(\frac{\Delta_{TX}}{\Delta_T}\right) \cdot \frac{d(\Delta_T)}{\Delta_T} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_T}{\sigma_{TO}^2} \exp\left(-\frac{\Delta_T^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot \frac{\Delta_T}{\sqrt{\Delta_T^2 - \Delta_{TX}^2}} \cdot \frac{d(\Delta_T)}{\Delta_T} = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_T}{\sigma_{TO}^2 \sqrt{\Delta_T^2 - \Delta_{TX}^2}} \exp\left(-\frac{\Delta_T^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot d(\Delta_T). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Производя замену переменной $\Delta_T^2 - \Delta_{TX}^2 = t^2$, равенство (4.7) можно записать в виде

$$f(\Delta_{TX}) = \frac{1}{\pi \sigma_{TO}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2 + \Delta_{TX}^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot \frac{\Delta_T \cdot d(\Delta_T)}{\sqrt{t^2}} = \frac{1}{\pi \sigma_{TO}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{\Delta_T^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot \frac{\Delta_T \cdot d(\Delta_T)}{t}$$

Подставив вместо $d(\Delta_T)$ его значения через t $d(\Delta_T) = \frac{t \cdot dt}{\sqrt{\Delta_T^2 + t^2}}$, получим

$$f(\Delta_{TX}) = \frac{1}{\pi \sigma_{TO}^2} \exp\left(-\frac{\Delta_{TX}^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot \frac{\Delta_T \cdot t \cdot dt}{t \cdot \sqrt{\Delta_{TX}^2 + t^2}} =$$

$$\frac{1}{\pi \sigma_{TO}^2} \exp\left(-\frac{\Delta_{TX}^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot dt.$$

Но поскольку $\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) \cdot dt = \frac{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{TO}}{2}$, то окончательное выражение закона распределения проекции торцевого биения в заданную меридиональную плоскость будет иметь вид

$$f(\Delta_{TX}) = \frac{1 \cdot \sqrt{2\pi} \sigma_{TO}}{2\pi \sigma_{TO}^2} \exp\left(-\frac{\Delta_{TX}^2}{2\sigma_{TO}^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{TO}} \exp\left(-\frac{\Delta_{TX}^2}{2\sigma_{TO}^2}\right). \quad (4.8)$$

Отсюда следует, что распределение (4.8) является гауссовым с дисперсией $\sigma_{TO}^2 = 2,33\sigma_T^2$. Следовательно, и проекция угла заклона линзы от торцевых биений оправы подчиняется тому же самому закону Гаусса с дисперсией

$$D(\gamma_{\Delta TO}) = \frac{1}{\varnothing^2} \cdot D(\Delta_{TO}) = \frac{2,33}{\varnothing^2} \sigma_T^2 = \frac{2,33}{\varnothing^2} \cdot D(\Delta_T) = 2,33 \cdot \frac{1}{9} K_{\Delta T}^2 \left(\frac{\Delta_T}{2\varnothing}\right)^2 \quad (4.9)$$

Если объектив или оптический компонент состоит из нескольких линз, каждая из которых завальцована в свою оправу, то, очевидно, заклены каждой последующей оправы с линзой будут зависеть от величины и направления торцевых биений опорных торцов предыдущих оправ. На рис.4.10 схематично представлен объектив, состоящий из трех линз.

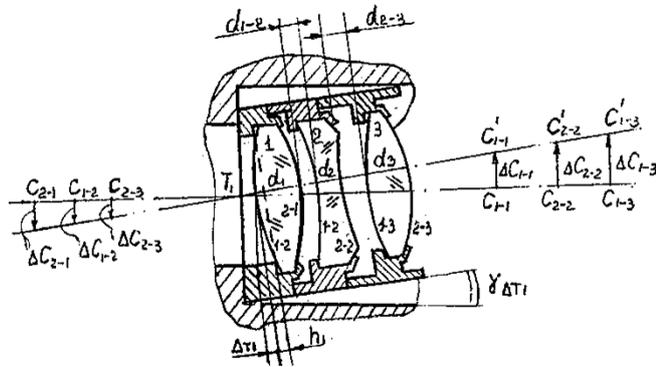


Рис.4.10. Схема влияния торцевого биения первой оправы на смещение центров кривизны последующих линз объектива

Пусть допустимая величина торцевого биения на первой оправе равна Δ_{T1} . Это биение вызовет одновременный заклон всех трех линз в одной меридиональной плоскости на один и тот же угол $\gamma_{\Delta T1} = \frac{\Delta_{T1}}{\varnothing_H}$.

Дисперсия этого заклона находится по формуле (4.3). Если известен коэффициент влияния трех линз относительно точки разворота T на кому

децентрировки, то дисперсия комы децентрировки может быть определена как

$$D(K) = A_{\Delta T_1}^2 \cdot D(\gamma_{\Delta T_1}) \quad (4.10)$$

Если величина $A_{\Delta T_1}$ не известна, но могут быть определены коэффициенты влияния поперечных смещений отдельных оптических поверхностей, то $A_{\Delta T_1}$ можно определить следующим образом.

Вначале находят смещения центров кривизны всех поверхностей от величины заклона $\gamma_{\Delta T_1}$ (см.рис.4.10):

$$\begin{aligned} \Delta C_{1-1} &= (r_{1-1} - h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}; \\ \Delta C_{2-1} &= -(r_{2-1} - d_1 + h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}; \\ \Delta C_{1-2} &= -(r_{1-2} - d_{1-2} - d_1 + h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}; \\ \Delta C_{2-2} &= (r_{2-2} + d_2 + d_{1-2} + d_1 - h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}; \\ \Delta C_{1-3} &= (r_{1-3} + d_{2-3} + d_2 + d_{1-2} + d_1 - h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}; \\ \Delta C_{2-3} &= -(r_{2-3} - d_3 - d_{2-3} - d_2 - d_{1-2} - d_1 + h_1) \cdot \gamma_{\Delta T_1}. \end{aligned}$$

Затем, используя коэффициенты влияния децентрировок отдельных поверхностей, определяют суммарную кому децентрировки

$$K_{\Sigma \Delta T_1} = A_{1-1} \Delta C_{1-1} + A_{2-1} (-\Delta C_{2-1}) + A_{1-2} (-\Delta C_{1-2}) + A_{2-2} (\Delta C_{2-2}) + A_{1-3} (\Delta C_{1-3}) + A_{2-3} (-\Delta C_{2-3}).$$

В данной формуле как децентрировки, так и коэффициенты влияния берутся со своими знаками. Далее находят коэффициент влияния заклона $\gamma_{\Delta T_1}$ на кому $K_{\Sigma \Delta T_1}$:

$$A_{\Delta T_1} = \frac{K_{\Sigma \Delta T_1}}{\gamma_{\Delta T_1}} \quad (4.11)$$

Обратимся к случаю, когда вторая оправа объектива имеет торцевое биение ΔT_2 (рис.4.11). В этой ситуации вторая и третья линзы объектива дополнительно разворачиваются на угол $\gamma_{\Delta T_1} = \frac{\Delta T_2}{\phi}$.

Зная, что величина торцевого биения ΔT_2 величина не только случайная, но и независимая от ΔT_1 , то разворот на угол $\gamma_{\Delta T_2}$ может произойти в любом направлении относительно плоскости, в которой имел место разворот на угол $\gamma_{\Delta T_1}$. При этом угол θ между плоскостями, в которых лежат углы $\gamma_{\Delta T_1}$ и $\gamma_{\Delta T_2}$, случаен по величине и подчинен равномерностному закону распределения в диапазоне от 0 до 360°. Очевидно, что и кома децентрировки $K_{\Sigma \Delta T_2}$, возникающая от заклона второй и третьей линз и лежащая в плоскости этого заклона, будет случайной как по величине, так и по направлению относительно вектора комы $K_{\Sigma \Delta T_1}$, находящегося в плоскости первой, второй и третьей линз.

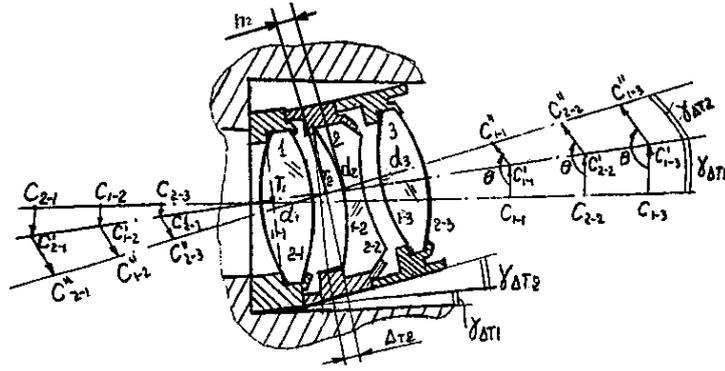


Рис.4.11. Схема влияния торцевого биения второй оправы на смещение центров кривизны линз

Определим значение комы децентрировки $K_{\Sigma\Delta T_2}$. Для этого надо знать величину угла $\gamma_{\Delta T_2}$ или величины децентрировок всех оптических поверхностей объектива в плоскости, содержащей $\gamma_{\Delta T_2}$. Все формулы для таких расчетов приведены ниже:

$$\gamma_{\Delta T_2} = \frac{\Delta_{T_2}}{\varnothing_{л.}}$$

$$\Delta C_{1-2} = -(r_{1-2} - h_2) \cdot \gamma_{\Delta T_2};$$

$$\Delta C_{2-2} = (r_{2-2} + d_2 + h_2) \cdot \gamma_{\Delta T_2};$$

$$\Delta C_{1-3} = (r_{1-3} + d_{1-3} + d_2 + h_2) \cdot \gamma_{\Delta T_2};$$

$$\Delta C_{2-3} = -(r_{2-3} - d_3 - d_{2-3} - d_2 - h_2) \cdot \gamma_{\Delta T_2}$$

Зная значения коэффициентов влияния разворота второй линзы относительно точки T_2 и поперечных смещений центров кривизны, нетрудно найти дисперсию комы децентрировки $K_{\Sigma\Delta T_2}$:

$$D(K_{\Sigma\Delta T_2}) = A_{\gamma_2}^2 \cdot D(\gamma_{\Delta T_2}), \quad (4.12)$$

где $A_{\gamma_2} = \frac{K_{\Sigma\Delta T_2}}{\gamma_{\Delta T_2}}$, а $K_{\Sigma\Delta T_2} = A_{1-1}(-\Delta C_{1-1}) + A_{2-2}\Delta C_{2-2} + A_{1-3}\Delta C_{1-3} + A_{2-3}(-\Delta C_{2-3})$.

В силу независимости случайных векторов комы $K_{\Sigma\Delta T_1}$ и $K_{\Sigma\Delta T_2}$, выражение для дисперсии комы при одновременном действии заклонов Δ_{T_1} и Δ_{T_2} будет иметь вид (рис.4.12):

$$D(K_{\Sigma T, T_2}) = D(K_{\Sigma\Delta T_1}) + D(K_{\Sigma\Delta T_2}) \quad [39]. \quad (4.13)$$

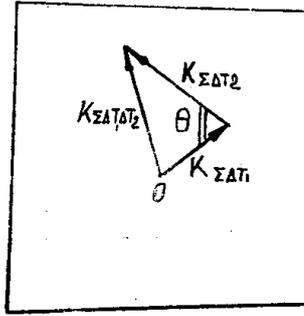


Рис.4.12. Схема расположения векторов комы децентрировок

Рассуждая аналогично, мы сможем определить кому децентрировки от торцевого биения в оправе третьей линзы $K_{\Sigma\Delta T_3}$.

Вначале оценим величину угла заклона третьей линзы относительно точки T_3 , а затем определим децентрировки ее поверхностей ΔC_{1-3} и ΔC_{2-3} .

$$\begin{aligned} \gamma_{\Delta T_3} &= \frac{\Delta_{T_3}}{\varnothing_L}; \\ \Delta C_{1-3} &= (r_{1-3} - b_3) \cdot \gamma_{\Delta T_3}; \\ -\Delta C_{2-3} &= (r_{2-3} - d_3 + b_3) \cdot \gamma_{\Delta T_3}; \\ K_{\Sigma\Delta T_2} &= A_{1-3} \Delta C_{1-3} + A_{2-3} (-\Delta C_{2-3}); \\ A_{\gamma_{\Delta T_3}} &= \frac{K_{\Sigma\Delta T_2}}{\gamma_{\Delta T_3}} \end{aligned}$$

Наконец, для дисперсии модуля комы суммарной децентрировки от одновременного действия трех случайных векторов $\overline{\Delta_{T_1}}$, $\overline{\Delta_{T_2}}$ и $\overline{\Delta_{T_3}}$ можно записать:

$$D(K_{\Sigma T_1, T_2, T_3, X}) = D(K_{\Sigma\Delta T_1, X}) + D(K_{\Sigma\Delta T_2, X}) + D(K_{\Sigma\Delta T_3, X}) \quad (4.14)$$

где дисперсии проекций комы от торцевых биений оправ определяются по формуле (4.10).

4.1.2 Децентрировка от разворота линзы в поперечном зазоре между оправой и линзой

При креплении линз в оправе завальцовкой (рис.4.13) из-за наличия зазора Z между цилиндрическим пояском линзы и посадочным диаметром оправы возникает разворот линзы на угол γ_Z вокруг центра кривизны C_1 опорной поверхности. При этом величина угла γ_Z равна

$$\gamma_Z = \frac{AB}{r_1}, \quad (4.15)$$

$$\text{где } AB = \frac{z}{\cos\theta} = \frac{zr_1}{KC_1} = \frac{z}{\sqrt{1 - \frac{\varnothing_L^2}{4r_1^2}}} \quad (4.16)$$

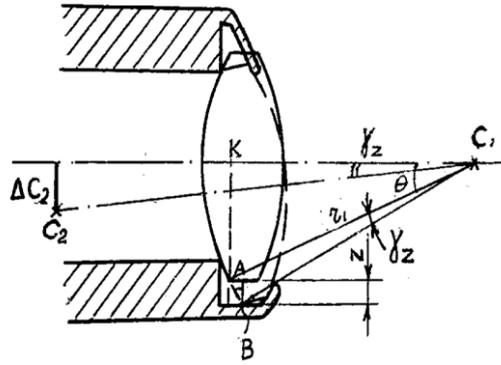


Рис.4.13. Разворот линзы в зазоре при ее креплении в оправе завальцовкой

Подставив значение AB в выражение 4.15, получим:

$$\gamma = \frac{Z}{r_1 \sqrt{1 - \frac{\varnothing_{л}^2}{4r_1^2}}} = \frac{Z}{KC_1} \quad (4.17)$$

Представим выражение (4.17) в виде ряда до второго члена

$$\frac{Z}{r_1 \sqrt{1 - \frac{\varnothing_{л}^2}{4r_1^2}}} \approx \left(1 + 0,125 \frac{Z}{r_1 \sqrt{1 - \frac{\varnothing_{л}^2}{4r_1^2}}} \right) \cdot \frac{Z}{r_1} \quad (4.18)$$

При этом ошибка приближения (при $\varnothing_{л} \leq R_1$) не превышает 2,6%, а величины поперечных смещений центров кривизны линзы будут равны

$$\Delta C_1 = 0, \quad \Delta C_2 = (r_2 - d + r_1) \gamma_z, \quad (4.19)$$

где r_1 и r_2 - радиусы кривизны оптических поверхностей линзы.

При этом выражения для дисперсии заклона линзы и децентровки ее второй поверхности будут иметь вид

$$D(\gamma_z) = \frac{1}{9} k_{\gamma_z}^2 \left(\frac{\gamma_z}{2} \right)^2; \quad D(\Delta C_2) = (r_2 - d + r_1)^2 \cdot D(\gamma_z)$$

Расчет величины дисперсии по этим формулам можно провести только в том случае, если известно значение параметра γ_z , которое легко рассчитывается по формуле (4.17), а также значение коэффициента относительного рассеяния k_{γ_1} .

Практика изготовления объективов показала, что при завальцовке вручную и на полуавтоматах, линза почти всегда выбирает поперечный зазор Z и упирается своей цилиндрической фаской во внутреннюю поверхность посадочного отверстия оправы. А поскольку погрешности изготовления наружного диаметра оправы подчиняются закону нормального распределения, то естественно, заклон линзы и децентровка ее второй поверхности должны подчиняться этому же закону. Для проверки высказанного предположения была исследована выборка оправ с

завальцованной первой линзой серийно выпускаемого объектива Т-43, в количестве 900 шт. По результатам измерения на приборе СТ-41 децентрировки второй небазовой поверхности построен полигон распределения (рис.4.14). Нетрудно видеть, что характер распределения модуля децентрировки может быть описан кривой нормального распределения, для которого коэффициенты относительного рассеивания и асимметрии равны: $k=1$; $\alpha=0$,



Рис.4.14. Эмпирическое распределение децентрировки линзы после завальцовки

Если конструктор предпочитает проводить расчет децентрировок для некоторой заданной меридиональной плоскости, то в этом случае проекция децентрировки, модель которой подчиняется нормальному закону, будет равна

$$\Delta C_x = \Delta C \cdot \cos \theta = \Delta C \cdot u .$$

Здесь ΔC - модуль децентрировки, плотность вероятности которого имеет вид [39]:

$$f(\Delta C) = \frac{0,4}{\sigma_c} \exp \left\{ -\frac{(\Delta C - \alpha - 3\sigma_c)^2}{2\sigma_c^2} \right\} \text{ при } (\alpha \leq \Delta C \leq \alpha + 6\sigma_c).$$

В нашем случае $\alpha=0$.

Плотность распределения случайно величины ΔC_x равна

$$f(\Delta C_x) = \frac{0,762}{\beta} \cdot \int_{\Delta C_x}^{\beta} \frac{\exp \left\{ -4,5 \left\{ \frac{2t - \beta}{\beta} \right\}^2 \right\}}{\sqrt{t^2 - \Delta C_x^2}} dt \text{ при } (0 \leq \Delta C_x \leq \beta).$$

График плотности распределения случайных величин ΔC_x представлен на рис.4.15.

Величина коэффициента относительного рассеивания $k_{\Delta C_x}$ для ΔC_x равна 2,33. А для дисперсии $D(\Delta C_x)$ можно записать

$$D(\Delta C_x) = \frac{1}{9} k_{\Delta C_x} \left(\frac{\Delta C}{2} \right)^2,$$

где ΔC - допустимая величина модуля вектора децентрировки.

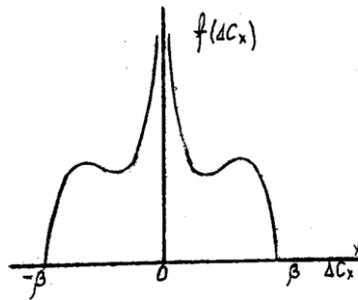


Рис.4.15. Распределение проекции децентрировки на направление X

Все сказанное выше будет справедливо, если за операцией завальцовки не следует автоколлимационная центрировка, при наличии которой характер закона распределения децентрировки заметно меняется.

4.1.3 Децентрировка, возникающая при автоколлимационной центрировке

Экспериментально установлено (см. рис.2.4), что распределение смещений центров кривизны при автоколлимационной центрировке может быть описано нормальным законом на плоскости [12]

$$f(x; y) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} \right]}$$

здесь m_x и m_y - математические ожидания случайных величин X , Y ;
 σ_x , σ_y - их средние квадратические отклонения

Вершина этого распределения совпадает с осью, определяемой базировкой оправы с линзой на плоскую и цилиндрическую поверхности оправы. Отсюда $m_x=m_y=0$ и нормальный закон на плоскости примет канонический вид:

$$f(x; y) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}}$$

Измерения децентрировок показали, что для них на плоскости $\sigma_x=\sigma_y$. В этом случае рассеяние на плоскости по нормальному закону называют круговым, а расстояние ΔC от точки (x,y) до начала координат – подчиняющимся закону Релея

$$f(r) = \frac{\Delta C}{\sigma} e^{-\frac{\Delta C^2}{2\sigma^2}} \text{ при } \Delta C \geq 0,$$

Для которого при проектных расчетах берут коэффициент относительного рассеивания $k=1,14$, а коэффициент относительной асимметрии $\alpha=-0,28$.

На рис.2.9 представлены полигоны распределения и выравнивающая его кривая распределения Релея для центровки линз объектива Т-43, завальцованных и отцентрированных в оправе методом автоколлимации (объем выборки составил 700 штук).

Оценка результатов эксперимента по критерию Пирсона показала, что с надежностью 99% можно считать, что теоретическая кривая, построенная по закону Релея, практически не отличается от экспериментальной.

4.1.4 Децентрировка от радиального биения посадочного места под линзу в оправе

При изготовлении оправы под завальцовку всегда будет иметь место радиальное биение внутреннего посадочного диаметра под линзу относительно наружного диаметра оправы. Это биение приводит к поперечному смещению всей линзы ΔC_{\perp} относительно ее расчетного положения на величину эксцентриситета Δe_l , равного половине радиального биения, т.е. $\Delta C_l = \Delta e_{\perp}$ (рис.4.16).

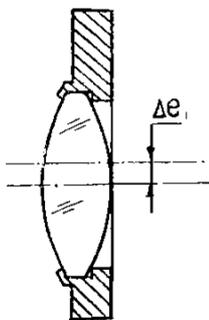


Рис.4.16. Децентрировка линзы от эксцентриситета

Дисперсия модуля этого смещения будет равна

$$D(\Delta C_{\perp \Delta e}) = \frac{1}{9} k_{\Delta e}^2 \left(\frac{\Delta e}{2} \right)^2 \quad (4.20)$$

Так как распределение эксцентриситета подчиняется закону Релея (см.п.2.1), то для $k_{\Delta C}$ можно брать значения, приведенные в табл.4.1. При расчете проекции эксцентриситета воспользуемся формулой

$$\Delta e_x = \Delta e \cdot \cos \theta,$$

где θ – угол определяющий направление эксцентриситета, в диапазоне углов от 0 до 360° подчиняется закону равной вероятности.

Выражение для дисперсии проекций эксцентриситета получим, используя формулу (4.9)

$$D(\Delta e_x) = \frac{2,33}{9} k_{\Delta e}^2 \left(\frac{\Delta e}{2} \right)^2. \quad (4.21)$$

4.2 Оценка децентрировок, возникающих при креплении линз гайкой

Итак, мы рассмотрели один из распространенных способов крепления линзы в оправе – завальцовкой. Несмотря на ряд преимуществ, этот способ крепления имеет весьма заметный недостаток: неразъемность соединения линзы и оправы. Этому недостатка лишен другой способ крепления – гайкой, рассмотрим его более подробно.

При креплении линзы гайкой (рис.4.17) положение ее в оправе определяется:

- биением Δ_{T0} опорного торца оправы B относительно ее базового торца A ;
- величиной поперечного зазора Z , в котором может развернуться линза;
- эксцентриситетом Δe_1 внутреннего посадочного диаметра оправы Φ_0 относительно ее наружного диаметра Φ_H , эксцентриситетом Δe_2 внутреннего отверстия гайки Φ_{b2} относительно оси резьбы D ;
- эксцентриситетом Δe_3 резьбы D в оправе относительно наружного базового отверстия Φ_H ;
- биением Δ_{T2} опорного торца гайки относительно оси резьбы D .

Погрешности Δe_2 , Δ_{T2} , Δe_3 , действуя одновременно, вызовут разворот линзы в зазоре Z .

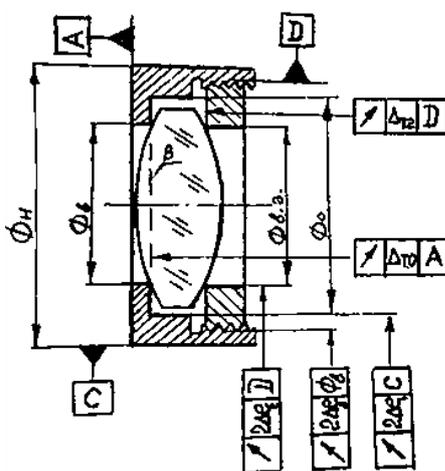


Рис.4.17. Крепление линзы гайкой

Как и в предыдущем случае (при завальцовке) рассмотрим влияние всех вышеперечисленных технологических погрешностей на децентрировку линзы.

4.2.1 Децентрировка от торцевого биения в оправе

Определение величины угла заклона $\gamma_{\Delta T}$ торца оправы B относительно торца A (рис.4.18) довольно подробно было рассмотрено в параграфе 4.1.1.

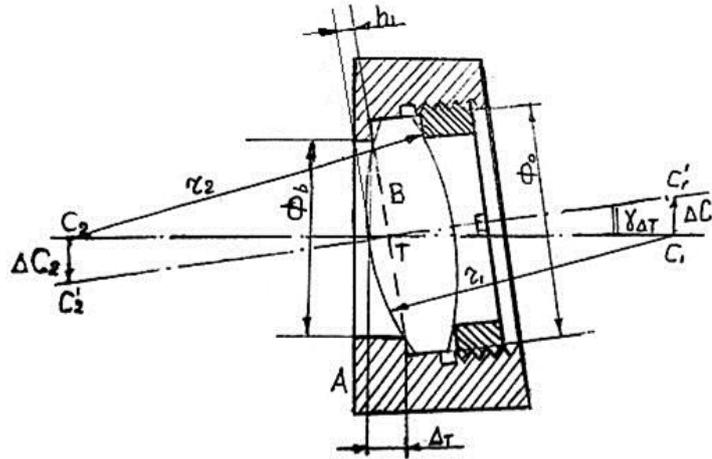


Рис.4.18. Оправа с торцевым биением

Нетрудно видеть, что схема расположения линзы в этом случае совершенно аналогична расположению линзы при завальцовке. Поэтому для децентрировок оптических поверхностей в этом случае можно сразу записать:

$$\begin{aligned} \Delta C_1 &= \gamma_{\Delta T} (r_1 - h_1) = \frac{\Delta T}{\Phi_0} \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{\Phi_b}{2}\right)^2} \\ \Delta C_2 &= \gamma_{\Delta T} (r_2 - d + h_1) = \frac{\Delta T}{\Phi_0} \left(r_2 - d + r_1 - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{\Phi_b}{2}\right)^2} \right). \end{aligned} \quad (4.22)$$

Дисперсия заклона будет определяться выражением

$$D(\gamma_{\Delta T}) = \frac{1}{9} k_{\Delta T}^2 \left(\frac{\gamma_{\Delta T}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} k_{\Delta T}^2 \left(\frac{\Delta T}{2\Phi_0} \right)^2,$$

А дисперсия комы децентрировки будет равна

$$D(K_{\Delta T}) = A_{\gamma}^2 D(\gamma_{\Delta T}). \quad (4.23)$$

Если при расчетах отталкиваться не от величины заклона линз, а от поперечных смещений центров кривизны, то вначале необходимо рассчитать суммарную кому $K_{C_1 C_2} = A_{C_1} \Delta C_1 + A_{C_2} \Delta C_2$, затем коэффициент влияния

$$A = \frac{K_{C_1 C_2}}{\gamma_{\Delta T}}.$$

И только после этого дисперсию комы

$$D(K_{C_1 C_2}) = A^2 D(\gamma_{\Delta T}) \quad (4.24)$$

Если ведется расчет проекций модуля децентрировки на ось X , то получим

$$\begin{aligned}
 D(\gamma_{\Delta T, X}) &= \frac{1}{9} 2,33 k_{\Delta T}^2 \left(\frac{\Delta T}{2\varnothing_0} \right)^2, \\
 D(K_{\gamma, X}) &= A_{\gamma}^2 D(\gamma_{\Delta T, X}), \\
 D(K_{C_1, C_2, X}) &= \frac{1}{9} 2,33 k_K^2 \left(\frac{K_{C_1, C_2}}{2} \right)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.25}$$

где $k_{\Delta T}$ - коэффициент относительного рассеяния модуля торцевого биения;

k_K - коэффициент относительного рассеяния модуля комы децентрировки.

4.2.2 Децентрировка линзы в зазоре от торцевого биения гайки

На рис.4.19 представлена оправа с линзой, закрепленная гайкой с торцевым биением $\Delta_{ТГ}$. При заворачивании гайки, когда ее выступающая часть, обозначена точкой B , касается оптической поверхности, возникает давление сил на линзу, под действием которых она разворачивается вокруг центра кривизны C_1 своей опорной поверхности. Понятно, что этот разворот на угол $\gamma_{\Delta TГ}$ будет происходить до тех пор, пока поверхность линзы не упрется либо в точке P в гайку, либо в оправу. В первом случае это произойдет тогда, когда точка D пройдя половину отрезка DP , остановится в положении D' .

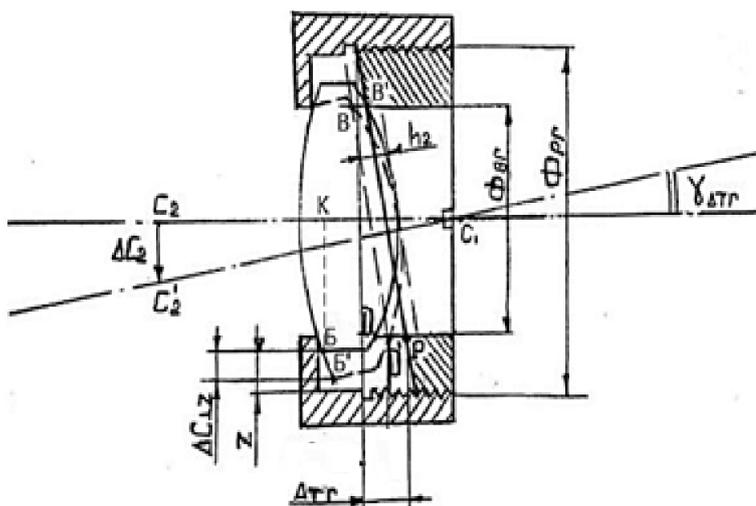


Рис.4.19. Крепление линзы гайкой с торцевым биением

К этому моменту времени точка B пройдет пусть BB' , равный $D'D$, а вторая поверхность линзы будет касаться гайки по всему ее внутреннему диаметру \varnothing_{BG} . Совершенно ясно, что когда гайка прижмет линзу к оправе, то центр кривизны C_2 второй поверхности линзы будет лежать на перпендикуляре к опорному торцу гайки, восстановленному из центра кривизны C_1 , а децентрировки ΔC_1 , ΔC_2 будут равны $\Delta C_1=0$, $\Delta C_2 = C_2 C_1 \cdot \gamma_{\Delta T} = (r_1 - d + r_2) \cdot \frac{\Delta T}{\varnothing_{PG}}$.

Зная допустимую величину ΔC_2 нетрудно оценить величину допустимого торцевого биения ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta C_2 \cdot \varnothing_{PG}}{r_1 - d + r_2} \quad (4.26)$$

Рассмотренный случай на практике встречается довольно часто. Для него характерно: поперечное смещение линзы $\Delta C_{\perp Z}$ (рис.4.19) меньше радиального зазора Z , в котором оно происходит:

$$\Delta C_{\perp Z} = \gamma_{TG} \cdot C_1 K < Z,$$

где $C_1 K$ - расстояние от центра кривизны C_1 линзы до основания перпендикуляра, опущенного на оптическую ось из ребра B линзы;

$\gamma_{\Delta T}$ - допустимая величина заклона торца гайки.

В этом случае закон распределения смещения $\Delta C_{\perp Z}$ линзы в зазоре полностью определяется законом распределения биения гайки, т.е. законом Релея:

$$f(\Delta C_{\perp Z}) = \frac{\Delta C_{\perp Z}}{\sigma_{\perp}^2} e^{-\frac{\Delta C_{\perp Z}^2}{2\sigma_{\perp}^2}}, \quad 0 \leq \Delta C_{\perp Z} \leq \delta_z.$$

Определим функцию $f(\Delta C_{\perp Z})$ плотности условной вероятности положения линзы в отверстии оправы:

$$f(\Delta C_{\perp Z}) = f(\Delta C_{\perp Z}) \cdot \int_{\Delta C_{\perp Z}}^{\delta_z} f(z) dz$$

где $f(z)$ является плотностью вероятности радиального зазора и описывается законом нормального распределения

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z-m_z)^2}{2\sigma_z^2}}, \quad 0 \leq z \leq \delta_z$$

Если принять, что зазор Z изменяется в пределах от $-3\sigma_z$ до $+3\sigma_z$, учесть, что при этом $m_z = 0,5\delta_z$, а $\Delta C_{\perp Z} = \gamma_{\Delta T} \cdot C_1 K = \frac{\Delta T}{\varnothing_{\Gamma}} \cdot C_1 K = \Delta T \cdot \alpha$, где $\alpha = \frac{C_1 K}{\varnothing}$, то

$$f(\Delta C_{\perp Z}) = \frac{\Delta T \cdot \alpha}{\sigma_{\Delta T}^2} e^{-\frac{(\Delta T \cdot \alpha)^2}{2\sigma_{\Delta T}^2}} \cdot \int_{\Delta C_{\perp Z}}^{\delta_z} \frac{6}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_z} e^{-\frac{36(Z-0,5\delta_z)^2}{2\delta_z^2}} dz \quad (4.27)$$

Проведем замену:

$$\frac{6(z - 0,5\delta_z)}{\delta_z} = t$$

Тогда $dz = \frac{1}{6}\delta_z dt$ и выражение (4.27) примет вид:

$$f(\Delta C_{\perp z}) = \frac{\Delta_T \cdot \alpha}{\sigma_{\Delta T}^2} e^{-\frac{(\Delta_T \cdot \alpha)^2}{2 \cdot \sigma_{\Delta T}^2}} \cdot \int_{t=3 \cdot \left(\frac{2\Delta_T \cdot \alpha}{\delta_z} - 1\right)}^{t=3} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt =$$

$$= A \cdot \Delta_T \cdot e^{-h^2 \cdot \Delta_T^2} \left[\Phi(3) - \Phi\left(3 \left(\frac{2\Delta_T \cdot \alpha}{\delta_z} - 1\right)\right) \right], \quad (4.28)$$

здесь $A = \frac{\alpha}{\sigma_{\Delta T}^2}$; $h = \frac{\alpha}{\sqrt{2}\sigma_{\Delta T}}$; Φ - функция Лапласа.

Рассмотрим второй случай крепления линзы гайкой с торцевым биением Δ_T . Суть его заключается в том, что торцевое биение гайки может быть настолько велико, что при креплении линзы, возникающий разворот полностью выбирает радиальный зазор Z (рис.4.20).

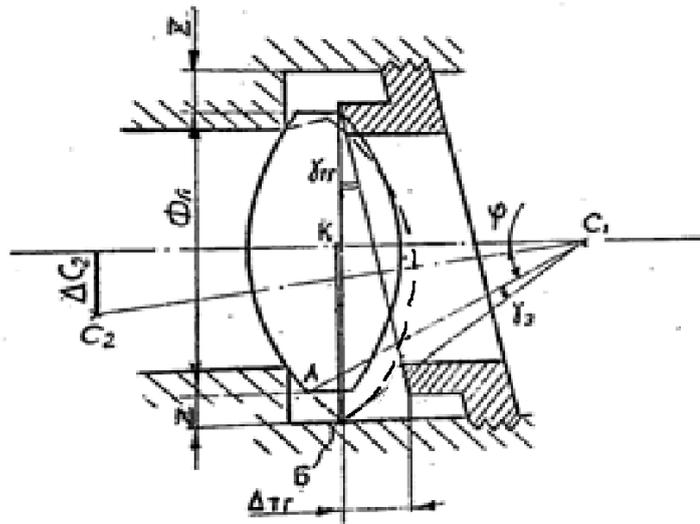


Рис.4.20

Это приводит к тому, что линза своим ребром B всегда касается цилиндрического пояса в оправе.

Обратимся к статистическим исследованиям влияния торцевого биения гайки и величины радиального зазора между оправой и линзой на характер распределения децентрировки в реальном объективе Т-57, оптическая схема которого представлена на рис.4.21а, а конструкция на рис.4.21б.

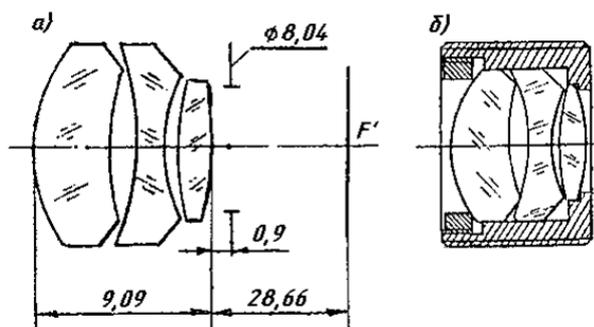


Рис.4.21. Объектив Т-57: а) оптическая схема, б) конструкция

Для упрощения задачи исследования собственная децентрировка оптических поверхностей линз и торцевых биений в корпусе объектива и в имитационных кольцах были уменьшены до таких значений, при которых они не могли оказать заметного влияния на результаты измерений.

Все поверхности латунного корпуса объектива, использованного в экспериментах, были обработаны с одной установки. При проведении экспериментов кольца всегда устанавливались в одно и то же положение по меткам на корпусе объектива и кольца. Измерение децентрировок отдельных линз и линз в корпусе производилось на автоколлимационном микроскопе СТ-41. При этом, измерение непараллельности торцов *A* и *B* (рис.4.22) дало $\Delta T_K = 0,002$ мм, а непараллельность опорных торцов колец, имитирующих толщины первой и второй линз и отдельно первой линзы, составляло не более $\Delta T_K = 0,003$ мм.

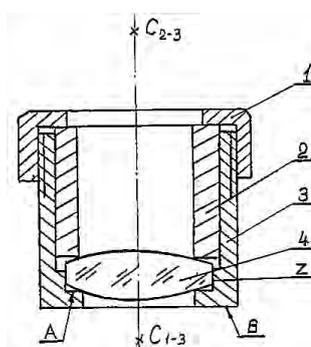


Рис.4.22. Экспериментальный корпус объектива: 1 – гайка (Д16); 2 – кольцо (ЛС-59); 3 – корпус (ЛС-59); 4 – линза №30

Начнем эксперимент с установки в корпус объектива 3 одиночной линзы 4 (рис.4.22). Для исследования была взята третья линза с фактическим отклонением посадочного диаметра $\Delta \phi_{30} = -0,012$ мм и собственной децентрировкой поверхности 1-3 близкой к нулю ($\Delta C_{1-3} = 0$ мм).

В процессе измерений линза 4 и кольцо 2, имитирующие первую и вторую линзы, устанавливались относительно корпуса объектива 3 всегда в одно и то же положение. В процессе эксперимента измерялись

децентрировки (ΔC_{1-3} ; ΔC_{2-3}) первой и второй оптических поверхностей третьей линзы, возникающие при установке гаек, взятых из одной партии.

Результаты измерений децентрировки приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Номер гайки	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
1	21	4
2	4	4
3	21	4
4	24	4
5	15	4
6	9	4
7	24	4
8	18	4
9	24	4
10	15	4
11	24	4
12	9	4
13	9	4
14	9	4
15	12	4
16	21	4
17	21	4
18	27	4
19	12	4
20	15	4
21	16,5	4
22	9	4
23	6	4

$$\bar{x} = 16,43$$

$$\sigma_n = 6,24$$

Эксперимент показал, что децентрировка ΔC_{2-3} опорной поверхности 2 третьей линзы постоянна при смене всех 23 гаек и равна 4 мкм, а величина децентрировки (ΔC_{1-3}) первой поверхности третьей линзы колеблется от 6 до 27 мкм, и в среднем составляет 16,43 мкм. Неизменность децентрировки ΔC_{2-3} в общем-то понятна, т.к. ее величина определялась только непараллельностью торцов *A* и *B* корпуса объектива и не зависела от погрешностей изготовления гаек.

Действительно, если $\Delta T_K = 0,002$ мм, то по формуле (4.22) определяем величину децентрировки.

$$\Delta C_{2-3} = \frac{\Delta_{TK}}{\varnothing_{noc}} \cdot \sqrt{r_{2-3}^2 - \left(\frac{\varnothing_{св}}{2}\right)^2} - \frac{0,002}{11} \sqrt{20,5^2 - \left(\frac{9}{2}\right)^2} = 3,64 \text{ мм} \quad (4.22)$$

Эта величина децентрировки очень близка к результатам, полученным в ходе эксперимента (4 мкм).

Величина децентрировки ΔC_{1-3} зависит от погрешностей изготовления гаек, но на результаты ее измерений может повлиять остаточная непараллельность торцов $\Delta T_K = 0,003 \text{ мм}$ имитационного кольца 2. Это надо иметь в виду при оценке результатов измерения, приведенных в табл.4.2.

Результаты эксперимента позволяют утверждать, что не весь зазор между линзой и корпусом выбирается при креплении линзы гайками. Объяснить это явление можно тем, что торцевые биения гаек не так уж велики, чтобы линза при своем развороте смогла выбрать весь поперечный зазор Z_3 . Похоже, только гайка №18 сумела развернуть линзу так, что она выбрала весь зазор. Зная для нее величину децентрировки ΔC_{1-3} , можно без особого труда найти выбранный зазор и сравнить его с величиной, полученной в результате измерений посадочных диаметров линзы и корпуса объектива. Из формул 4.17 и 4.19 получим:

$$\Delta C_{1-3} = \frac{Z_3 (r_{1-3} + r_{2-3} - d_3)}{r_{2-3} \sqrt{1 - \left(\frac{\varnothing_{noc}}{2r_{2-3}}\right)^2}}$$

Тогда поперечный зазор будет равен

$$Z_3 = \frac{r_{2-3} \sqrt{1 - \left(\frac{\varnothing_{noc}}{2r_{2-3}}\right)^2}}{(r_{1-3} + r_{2-3} - d_3)} \Delta C_{1-3}$$

После подстановки значений $r_{2-3} = r_{1-3} = 20,5 \text{ мм}$; $d_3 = 2,5 \text{ мм}$; $\varnothing_{noc} = 11 \text{ мм}$ получим $Z_3 = 0,513 \Delta C_{1-3}$.

Для восемнадцатой гайки децентрировка составляет $\Delta C_{1-3} = 0,027 \text{ мм}$. Следовательно, поперечный зазор Z_3 должен равняться $0,0138 \text{ мм}$. Фактическое отклонение диаметра линзы составляет $\varnothing_{noc} = 0,015 \text{ мм}$, а отклонение диаметра корпуса $\Delta \varnothing_K = 0,014 \text{ мм}$. Отсюда фактический радиальный зазор между линзой и корпусом равен $\frac{0,012 + 0,014}{2} = 0,013 \text{ мм}$, что

отличается от расчетной величины на $0,8 \text{ мкм}$. Такое незначительное отклонение можно объяснить погрешностью измерения диаметров ($\pm 1 \text{ мкм}$).

Для уточнения картины влияния погрешностей гайки децентрировки была изготовлена вторая партия гаек в количестве 14 штук. Точность их изготовления была заведомо хуже.

Анализ измеренных децентрировок ΔC_{1-3} в этом случае показал, что средняя ее величина выросла на 26% (см. табл.4.3), а для четырех гаек даже произошла полная выборка зазора.

Таблица 4.3

Номер гайки	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
1	18	4
2	24	4
3	22,5	4
4	10,5	4
5	27	4
6	13,5	4
7	27	4
8	27	4
9	12	4
10	24	4
11	24	4
12	13,5	4
13	27	4
14	21	4

$$\bar{x} = 20,78$$

$$\sigma_n = 5,9$$

Таким образом, величина погрешности изготовления гайки определяет, как величину децентрировки первой поверхности линзы, так и степень выборки поперечного зазора Z_3 между линзой и корпусом объектива.

В следующем эксперименте в один и тот же корпус поочередно устанавливали 105 третьих линз объектива, которые через имитационное кольцо закреплялись одной и той же гайкой.

Для эксперимента была выбрана гайка, торцевое биение которой вызывало разворот линзы с полной выборкой самого большого радиального зазора ($Z_3=14$ мкм), имевшего место между корпусом и линзами в исследуемой выборке. Очевидно, зазоры меньшей величины выбирались полностью.

По результатам эксперимента были построены полигоны распределения величины поперечного зазора (рис.4.23а) и децентрировки первой поверхности (рис.4.23б) третьей линзы, возникающие в результате разворота линзы в зазоре Z .

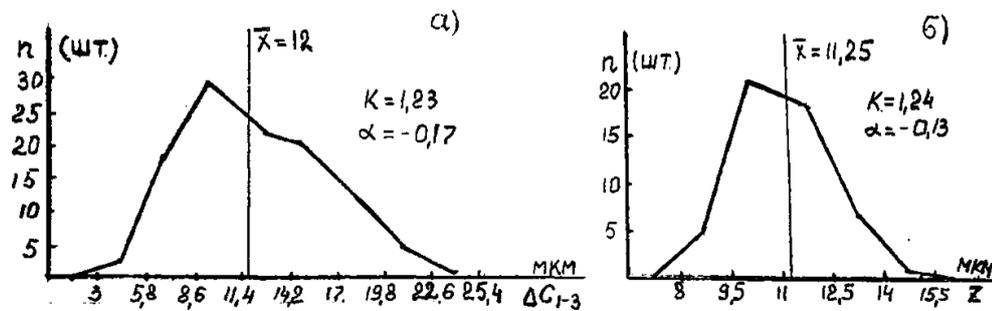


Рис.4.23. Эмпирическое распределение: а) поперечного зазора Z , б) децентрировки

Даже внешнее сравнение кривых на рис.4.23а и 4.23б позволяет утверждать, что они по своему характеру очень близки друг к другу. Расчет коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии как для зазора ($k=1,24$; $\alpha=-0,13$), так и для децентрировки ($k=1,23$; $\alpha=-0,17$) подтверждает этот факт.

Таким образом, с достаточно большой уверенностью можно утверждать, что в этом случае вероятностные распределения децентрировки и поперечного зазора могут быть описаны одним и тем же законом распределение.

Рассмотрим второй случай, когда изменение торцевого биения в пределах поля допуска таково, что заклон линзы, вызываемый им, может не только полностью выбирать зазор, но и находиться в пределах его изменения.

Сразу отметим, что в экспериментах, результаты которых представлены ниже, нас больше всего интересовали значения коэффициентов относительного рассеяния и асимметрии. И это понятно, т.к. проведение точностных расчетов невозможно без знания величин этих коэффициентов.

Для повышения точности расчетов и приближения их к заданным условиям производства, лучше всего иметь значения k и α , полученные опытным путем. С этой целью нами была проведена следующая экспериментальная работа.

В опытный корпус объектива случайным образом устанавливались 45 третьих линз объектива и закреплялись 45 гайками из одной партии. Это означало, что совместное влияние торцевых биений гаек и поперечных зазоров между линзами и корпусом на децентрировку оптических поверхностей линз носили случайный характер.

При обработке измерений децентрировок небазовой первой поверхности третьей линзы были получены такие значения коэффициентов ($k=1,6$; $\alpha=-0,04$), которые значительно отличаются от аналогичных, характерных для закона Релея ($k=1,14$; $\alpha=-0,27$). Следовательно, действие торцевого биения гаек на децентрировку линзы при одновременно изменяющемся поперечном зазоре Z_3 заметно отличается от действия торцевого биения тех же гаек при постоянном и достаточно большом зазоре. Этот факт необходимо учитывать при расчетах.

Для оценки силы связи между технологическими погрешностями и децентрировкой были рассчитаны коэффициенты корреляции между величиной децентрировки первой поверхности третьей линзы ΔC_{1-3} и погрешностью посадочного диаметра $\Delta \varnothing_3$.

Сделаем небольшое отступление и поясним, почему мы ввели в наши рассуждения понятие коэффициента корреляции.

Известно, что к изучению связи между параметрами методом корреляции обращаются в том случае, когда нельзя изолировать влияние посторонних факторов, либо потому что они не известны.

Корреляционный анализ количественно оценивает связь между двумя или несколькими взаимодействующими явлениями. Его применение позволяет определить наличие и силу связи между ними.

Связь между явлениями обнаруживается статистически, когда результативный признак определяется факторными признаками. Это влияние проявляется в среднем, а в отдельных случаях могут быть получены результаты, даже противоречащие установленной связи. Теснота или сила связи между двумя величинами x и y характеризуется коэффициентом корреляции r_{xy} .

Расчет коэффициента корреляции будем вести по следующей формуле [29]:

$$r_{xy} = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \cdot \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)(y_i - m_y),$$

где σ_x , σ_y - эмпирические значения среднего квадратического отклонения каждого из двух исследуемых факторов;

m_x , m_y - средние арифметические значения исследуемых факторов x и y ;
 x_i , y_i - текущие случайные значения исследуемых факторов.

Если $r_{xy}=0$, то между двумя факторами x и y линейной зависимости нет и случайные величины x , y называются некоррелированными.

Если между факторами x и y существует жесткая линейная функциональная зависимость вида $y=ax+b$, то $r_{xy}=1$ при $\alpha>0$ и $r_{xy}=-1$ при $\alpha<0$, случайные факторы x и y называются коррелированными.

Если r_{xy} представляет собой дробь близкую к единице, то говорят о тесной связи между x и y . Если эта дробь мала (близка к нулю), то говорят о слабой связи между факторами.

Расчет коэффициентов корреляции для случая, когда на децентрировку одновременно влияли зазор и торцевое биение (см. табл.4.4) показал, что изменение величины поперечного зазора $\Delta \varnothing_3$ не может являться основной причиной изменения децентрировки ΔC_{1-3} третьей линзы. А поскольку других заметных причин, кроме торцевого биения гайки в нашем случае не было, оставалось предположить, что именно она явилась главным источником и главной причиной разворотов третьей линзы в зазоре корпуса объектива.

Таблица 4.4

Количество объективов	Линзы	3	2+3			
	Погрешность	$\Delta\varnothing_3$	$\Delta\varnothing_2$	$\Delta\varnothing_3$	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}
44	ΔC_{1-3}	0,30	0,09	-0,02	-	0,91
14	ΔC_{1-3}	0,32	0,30	0,28	0,10	0,95

Продолжение табл.4.4

Линзы	1+2+3						
Погрешность	$\Delta\varnothing_1$	$\Delta\varnothing_2$	$\Delta\varnothing_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}
ΔC_{1-3}	0,73	0,22	-0,28	0,60	-0,26	-0,41	0,83
ΔC_{1-3}	0,22	-0,29	0,016	-0,42	0,30	-0,13	0,95

Сравнивая среднеарифметические значения децентрировок для случая с постоянным зазором (табл.4.3) ($\overline{\Delta C}_{1-3} = 16,43$ мкм) и для случая, когда измерения проводились в партии из 44 объективов, при одновременном действии, как торцевого биения, так и зазоров ($\overline{\Delta C}_{1-3} = 15,38$ мкм) можно с надежностью не менее 99% утверждать, что существенной разницы между ними нет. То же самое можно сказать и о среднеквадратических отклонениях. Эти результаты позволили уже более уверенно утверждать, что основной причиной возникновения и изменения децентрировок третьей линзы является торцевое биение гаек, а не зазор.

Но полностью отрицать влияние зазора на децентрировку третьей линзы мы не можем. Практический опыт и здравый смысл подсказывают, что величина зазора должна каким-то образом влиять на величину децентрировок.

Действительно, если торцевое биение гаек мало, то как бы сильно не увеличивался зазор, децентрировка не увеличится больше некоторого значения, определяемого наибольшей величиной торцевого биения гаек.

С другой стороны, если торцевое биение велико, а зазор недостаточен для того, чтобы линза развернулась на угол, определяемый торцевым биением гайки, то ясно, что в этом случае величина децентрировки действительно будет сверху ограничиваться величиной зазора и никогда не будет превышать определенного значения.

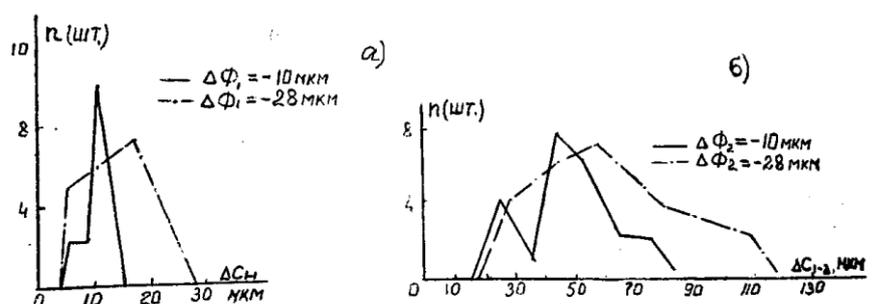


Рис.4.24. Полигоны распределений децентровок при отклонениях диаметров оправ -10 и -28 мкм: а) для ΔC_{1-1} , б) для ΔC_{1-2}

В качестве примера рассмотрим полигон распределения децентровок первой поверхности первой линзы (ΔC_{1-1}) (рис.4.24а) и первой поверхности второй линзы (ΔC_{1-2}) (рис.4.24б).

В первом случае отклонения диаметров оправ равны $\Delta \varnothing_1 = \Delta \varnothing_2 = -28$ мкм, а во втором $\Delta \varnothing_1 = \Delta \varnothing_2 = -10$ мкм.

Из представленных эмпирических распределений совершенно четко видно, что при увеличении поперечного зазора нижняя граница значений децентровок практически не изменяется, а вот верхняя граница увеличивается и, причем, значительно. Так для ΔC_{1-1} она увеличивается на 80%, а для ΔC_{1-2} - более чем на 40%. Все измерения проводились при использовании одних и тех же гаек.

Однако, если децентровка первой поверхности третьей линзы ΔC_{1-3} определяется в основном торцевым биением гайки, то почему при использовании одной и той же гайки №18, но при разных линзах, а значит и при разных поперечных зазорах (см. табл.4.5) децентровка линз меняется? Объяснить это можно, по крайней мере, двумя причинами: деформациями гайки и корпуса, возникающими при зажатии линзы гайкой и дополнительными разворотах гайки, связанными с изменениями толщин линз.

Для проверки первой причины одна и та же линза №30 несколько раз поджималась одним и тем же резьбовым кольцом №23. В результате проведения такого эксперимента децентровка первой поверхности третьей линзы принимала различные значения (см. табл.4.6), среднее арифметическое которых равнялось $\Delta C_{1-3} = 7,6$ мкм, а среднее квадратическое отклонение $\sigma_{1-3} = 2,6$ мкм. Это составило, примерно, половину от результатов измерений ΔC_{1-3} при зажатии одной и той же гайкой №15 54 различных по диаметру линз (табл.4.5).

Таблица 4.5

Линзы	Гайки	
	15	18
	Децентрировка	
	ΔC_{1-3}	
1	21	15
2	18	6
3	12	7,5
4	7,5	9
5	21	15
6	18	6
7	9	6
8	9	21
9	18	6
10	4,5	9
11	9	12
12	21	15
13	15	9
14	9	9
15	6	6
16	10,5	6
17	15	6
18	16,5	9
19	9	15
20	15	15
21	18	18
22	10,5	12
23	15	9
24	13,5	9
25	6	15
26	6	6
27	16,5	9
28	3	6
29	21	18
30	9	18
31	21	12
32	12	13,5
33	15	13,5
34	15	12
35	9	9
36	12	15
37	9	6
38	9	12

39	21	24
40	18	18
41	6	7,5
42	10,5	12
43	15	12
44	24	9
45	13,5	9
46	18	9
47	9	9
48	18	18
49	12	15
50	3	12
51	9	7,5
52	10,5	15
53	9	15
54	12	15
$\bar{x} =$	12,64	11,29
$\sigma_n =$	5,03	4,06
$\sigma_{n-1} =$	5,47	4,10

Таблица 4.6

№ гайк	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
23	6	4
23	6	-
23	12	-
23	6	-
23	8	-

Во всех этих линзах отклонения их толщин колебались от $\Delta d_3 = +25$ мкм до $\Delta d_3 = -50$ мкм, что естественно привело к дополнительным разворотам гайки. Поскольку шаг резьбы гайки равен 0,5 мм, то весь разворот от изменений толщины линз будет равен

$$\varphi_{\text{отн}} = 360^\circ \frac{(0,025 + 0,05)}{0,5} = 54^\circ.$$

Это достаточно большой угол. Из ранее изложенного материала следует, что $\Delta C_{1-3} = \gamma_3 (r_{1-3} + r_{2-3} - d_3)$, а так как в нашем случае $\bar{\Delta C}_{1-3} = 12,64$ мкм, то величина среднего угла разворота будет равна

$$\bar{\gamma}_3 = \frac{0,01264}{38,45} = 0,00034$$

Поскольку развороты линзы, как мы это уже установили, определяется торцевым биением гайки, то можно считать, что $\bar{\gamma}_3 = \gamma_{\Delta TG}$, где $\gamma_{\Delta TG}$ - угол торцевого биения гайки.

Отсюда истинное значение торцевого биения гайки №15 должно равняться $\Delta_{ТГ} = \phi_2 \cdot \gamma_{ТГ} = 12,5 \cdot 0,00034 = 0,00425$ мкм. Если учесть, что непараллельность торцов имитационного кольца равна $\Delta_{ТГ} = 0,003$ мкм, то при дополнительном развороте гайки на 54° , связанном с изменением толщины линз, вполне может оказаться, что $\Delta_{Т\Sigma} = \Delta_{ТГ} + \Delta_{ТК}$. После подстановки значений $\Delta_{ТК}$ и $\Delta_{ТГ}$ получим $\Delta_{Т\Sigma} = 0,00425 + 0,003 = 0,00725$ мкм.

Эта величина торцевого биения вызывает максимально возможный разворот третьей линзы на угол

$$\gamma_{\max 3} = \frac{\Delta_{Т\Sigma}}{\phi} = \frac{0,00725}{12,5} = 0,00058.$$

Отчего в свою очередь возникает децентрировка $\Delta C_{1-3} = \gamma_{\max 3} \cdot (r_{1-3} + r_{2-3} - d_3) = 0,022$ мм.

Обратившись к табл.4.6 мы увидим, что при использовании гайки №15 максимальная величина децентрировки составит $\Delta C_{1-3} = 0,024$ мм.

Таким образом, имеет место существенное совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Следовательно, в реальной конструкции объектива при зажатии линзы гайкой одновременно возникает как деформация гайки и посадочного места корпуса под линзу, так и дополнительный разворот гайки, зависящий от погрешностей изготовления линзы при использовании одной и той же гайки.

Отсюда также следует, что крепить линзу на острые кромки торца оправы нежелательно, т.к. это вызывает непредсказуемые по величине отклонения линзы от расчетного положения. Причем, как показали опыты, эти отклонения могут быть очень большими. Для уменьшения заклонов линз, связанных с деформацией оправы, предпочтительно крепить линзу не на прямой (рис.4.25а), а на тупой (рис.4.25б) или плоский (рис.4.25в) угол опорной кромки торца оправы.



Рис.4.25. Базировка линз на: а) прямой, б) плоский и в) тупой угол опорной кромки торца оправы

4.2.3 Децентрировка от эксцентриситета оси внутреннего опорного отверстия гайки относительно оси ее резьбы

При наличии радиального биения внутреннего отверстия гайки относительно резьбы $\phi_{ВГ}$ появляется эксцентриситет Δe_2 (рис.4.26). Этот эксцентриситет при заворачивании гайки приведет к развороту линзы вокруг

ее центра кривизны C_1 на угол $\gamma_{Z,\Delta e}$. Причем, в начальный момент гайка коснется линзы в точке K , а при дальнейшем заворачивании она будет разворачивать линзу до тех пор, пока вторая поверхность линзы не упрется в гайку в точке D' , которая соответствует перемещению гайки на величину $D'P = \frac{1}{2}D''P$. При этом точка K займет новое положение K' и линза будет касаться гайки по всему внутреннему диаметру $\Phi_{вг}$, причем $KK' = D''D'$.

Практически перемещение гайки на величину PD' соответствует поперечному смещению второй поверхности на $0,5\Delta e_2$.

При этом угол разворота линзы в зазоре Z будет равен

$$\gamma_{Z,\Delta e} = \frac{0,5\Delta e_2}{C_1M} \quad (4.30)$$

Поскольку распределение Δe_2 подчиняется закону Релея, то и распределение $\gamma_{Z,\Delta e}$, как линейная функция от Δe_2 будет подчиняться этому же закону с $k=1,14$ и $\alpha=-0,28$.

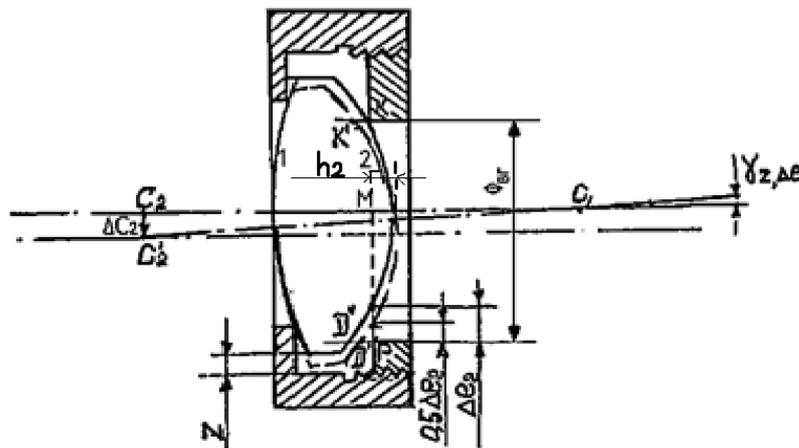


Рис.4.26. Крепление линзы гайкой с эксцентриситетом

4.2.4 Децентрировка от эксцентриситета оси внутреннего опорного отверстия оправы относительно оси резьбы этой оправы

Вывод формул для расчетов децентрировки ΔC_2 и угла разворота линзы в зазоре $\gamma_{Z,\Delta e}$, возникающих от эксцентриситета Δe_3 оси внутреннего опорного отверстия оправы относительно оси резьбы этой оправы, выполняется аналогично предыдущему варианту (см.п.4.2.3). Поэтому сразу запишем

$$\gamma_{Z,\Delta e} = \frac{0,5\Delta e_3}{C_1M}, \quad (4.31)$$

где $C_1M = r_1 - d + h_2$

4.2.5 Определение погрешностей в гайке, наиболее сильно влияющих на величину децентрировки линзы

Итак, мы познакомились с основными технологическими погрешностями, которые вызывают децентрировки линзы при ее креплении в оправе гайкой. Теперь естественно возникает вопрос, какие из них оказывают наиболее сильное влияние на величину децентрировки, а какие нет. Очевидно, ответ может быть получен только в процессе проведения соответствующего эксперимента.

С этой целью нами был спланирован и проведен многофакторный эксперимент, который, конечно, не мог полностью ответить на поставленный вопрос, но все же позволил получить дополнительную информацию по интересующей нас проблеме.

В качестве основных факторов, влияющих на величину децентрировки, нами были выбраны:

X_1 – зазор в резьбовом соединении гайки;

X_2 – торцевое биение;

X_3 – несоосность опорного отверстия гайки и резьбы;

X_4 – угол, определяющий направление максимальной величины торцевого биения гайки;

X_5 – угол, определяющий направление поперечного смещения гайки в резьбе.

Уравнение, связывающее перечисленные технологические погрешности X_i с децентрировкой, может быть представлено в виде

$$\Delta C = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5.$$

Величины коэффициентов b_i соответствуют вкладу фактора x_i в величину децентрировки ΔC при переходе фактора с нулевого уровня на верхний $x_i + \Delta x_i$ или нижний $x_i - \Delta x_i$.

Для определения коэффициентов $b_1 \div b_5$ была составлена матрица планирования вида 2^{5-2} (табл.4.7) [26]

Таблица 4.7

№ Опыт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	ΔC
1	+	+	-	+	-	+	
2	+	+	+	-	+	-	
3	+	-	-	-	+	+	
4	+	-	+	-	-	+	
5	+	+	-	-	-	-	
6	+	-	+	+	-	-	
7	+	-	-	+	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	

В этой матрице для фактора x_1 знак «+» соответствовал отклонению $+30$ мкм, а знак «-» - отклонению -30 мкм, аналогично, для фактора x_2 отклонения составляли ± 50 мкм; для фактора x_3 - ± 60 мкм; для факторов x_4 и x_5 - $\pm 90^\circ$.

Эксперимент проводился на двух линзах. В первой линзе радиусы оптических поверхностей имели значения $r_1=460$ мм и $r_2=12$ мм.

Каждая из этих линз устанавливалась в корпус 1 и закреплялась корпусной гайкой, состоящей из резьбового кольца 2 и, обниженного по диаметру стакана 3 (рис.4.27). Несоосность внутреннего диаметра стакана по отношению к оси резьбы гайки достигалась перемещением стакана 3 в зазоре x_3 относительно резьбового кольца 2 с помощью винта 4. Соответствующие величины остальных погрешностей достигались в процессе изготовления и взаимного разворота деталей друг относительно друга.

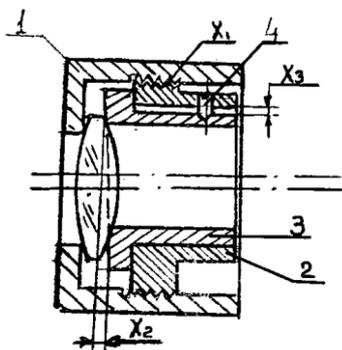


Рис.4.27. Оправа для проведения эксперимента: 1- корпус; 2 – резьбовое кольцо; 3 – стакан; 4 – винт

Измерения децентрировок небазовой поверхности линзы производились на автоколлимационном микроскопе СТ-41.

Не будем проводить здесь таблицы измерений децентрировок и расчет величин коэффициентов $b_1 \div b_5$. Рассмотрим сразу полученные уравнения, связывающие децентрировки небазовых поверхностей ΔC_K , где r – радиус небазовой поверхности линзы, с технологическими факторами:

$$\Delta C_{12} = 88 + 5,6x_1 + 45x_2 - 4x_3 - 6,8x_4 + 6,8x_5;$$

База – поверхность с $r=469$ мм.

$$\Delta C_{20} = 132 + 3,6x_1 + 62x_2 - 7,7x_3 - 17,4x_4 + 16x_5;$$

База – поверхность с $r=72$ мм.

$$\Delta C_{72} = 547 + 15x_1 + 87x_2 - 30x_3 - 105x_4 + 34x_5;$$

База – поверхность с $r=20$ мм.

$$\Delta C_{460} = 2496 + 51,2x_1 + 188x_2 - 28x_3 - 163x_4 + 46x_5;$$

База – поверхность с $r=12$ мм.

Из приведенных уравнений следует, что вне зависимости от величины радиуса кривизны базовой поверхности наиболее сильное влияние на

децентрировку небазовой поверхности оказывает величина торцевого биения гайки (x_2) и направления (x_4, x_5), вдоль которых происходят смещения линз в зазоре.

И второе, чем меньше радиус кривизны опорной поверхности линзы, тем сильнее сказываются все вышеперечисленные технологические погрешности на величину децентрировки небазовой поверхности линзы.

4.2.6 Децентрировка, возникающая при поперечном смещении оправы с линзой в радиальном зазоре

Рассмотрим случай, когда установка оправы с линзой в корпусе объектива происходит при горизонтальном расположении оси объектива. В этом случае под действием веса оправы с линзой будет смещаться в направлении силы тяжести \vec{F} до тех пор, пока не выберет радиальный зазор z вдоль оси y (см. рис.4.32) и не упрется в стенку посадочного диаметра Φ_k корпуса объектива.

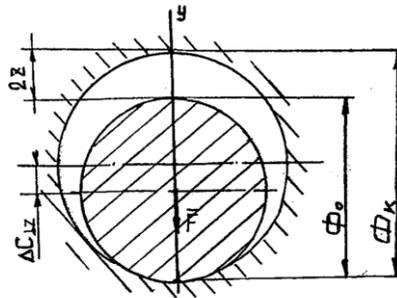


Рис.4.32

Очевидно, смещение $\Delta C_{\perp Z}$ оси оправы O' относительно оси O корпуса объектива будет равна $\Delta C_{\perp Z} = Z = 0,5(\Phi_k - \Phi_0)$, где Φ_k, Φ_0 - случайные величины диаметров соответственно отверстия в корпусе и оправы с линзой.

Среднее арифметическое смещение оси оправы будет равно

$m(\Delta C_{\perp Z}) = 0,5(m_k - m_0)$, где m_k, m_0 - соответственно математические ожидания размеров отверстий корпуса и оправы.

Дисперсия смещения $D(\Delta C_{\perp Z}) = \frac{1}{4}(D_k - D_0)$.

Выразив дисперсии через коэффициенты относительного рассеивания и половины полей допуска получим:

$$D(\Delta C_{\perp Z}) = \frac{1}{36}(k_k^2 \delta_k^2 - k_0^2 \delta_0^2).$$

Распределение плотности вероятности смещения, очевидно будет описываться законом нормального распределения с $k=1,0$ и $\alpha=0$.

Рассмотрим второй способ сборки объектива, когда ось корпуса расположена вертикально.

На рис.4.33 показано одно из возможных положений оправы с линзой внутри посадочного отверстия корпуса объектива. $\Delta C_{\perp Z}$ - смещение оправы с линзой с оси отверстия корпуса объектива; φ – угол, определяющий направление смещения оправы с линзой. Как показали эксперименты, направление этих смещений в партии объективов может произойти равновероятно в диапазоне углов от 0 до 360°, а величина этих смещений будет колебаться в пределах от 0 до δ_z , где δ_z - половина поля рассеяния диаметрального зазора.

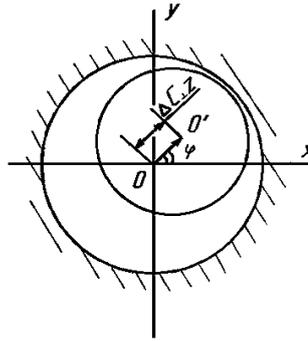


Рис. 4.33

Также экспериментально установлено (см.п.2.7), что для конкретного значения зазора z функция плотности распределения смещений в этом зазоре может быть описана выражением:

$$f\left(\frac{\Delta C_{\perp Z}}{z}\right) = \frac{(\Delta C_{\perp Z} - \delta_z)}{\sigma_{\perp}^2} e^{-\frac{(\Delta C_{\perp Z} - \delta_z)^2}{2\sigma_{\perp}^2}}$$

Сам же зазор, как известно, подчиняется закону нормального распределения:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} e^{-\frac{(z - m_z)^2}{2\sigma_z^2}}$$

Поэтому для плотности распределения смещения в зазоре, который будем считать изменяется в пределах от $-3\sigma_z$ до $+3\sigma_z$, можно записать

$$\begin{aligned} f(\Delta C_{\perp Z}) &= f\left(\frac{\Delta C_{\perp Z}}{Z}\right) \cdot \int_{\Delta C_{\perp Z}}^{\delta_z} f(z) dz = \\ &= f\left(\frac{\Delta C_{\perp Z}}{Z}\right) \cdot \int_{\Delta C_{\perp Z}}^{\delta_z} \frac{6}{\sqrt{2\pi} \delta_z} \cdot e^{-\frac{36(z - 0,5\delta_z)^2}{2\sigma_z^2}} dz \end{aligned}$$

После преобразований, окончательно получим:

$$f(\Delta C_{\perp Z}) = \frac{(\Delta C_{\perp Z} - \delta_z)}{\sigma_{\perp Z}} e^{-\frac{(\Delta C_{\perp Z} - \delta_z)^2}{2\sigma_{\perp Z}^2}} \left[0,5 - \Phi\left(6 \frac{\Delta C_{\perp Z}}{\delta_z} - 3\right) \right]$$

Экспериментальные исследования показали, что для выведенного закона распределения коэффициенты относительного рассеяния и асимметрии могут быть взяты равными $k=1,2$, $\alpha = -0,33$.

4.3 Расчет децентрировок в двух линзовом объективе

4.3.1. Пример 1

Обратимся к уже известному нам объективу Т-57 (рис.4.21) и определим величины децентрировок двух последних линз, возникающие от их разворотов в радиальных зазорах, при креплении гайкой. При расчетах будем исходить из предположения, что собственные децентрировки оптических поверхностей линз равны нулю, а опорная фаска третьей линзы не имеет биения.

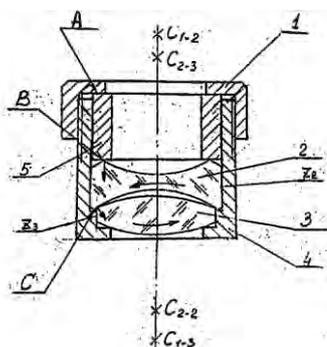


Рис.4.34. Схема базирования второй и третьей линз в объективе Т-57:
1 – гайка; 2,3 – линзы; 4 – корпус, 5 – имитационное кольцо

Под действием сил, развиваемых гайкой 1, линзы 2 и 3 в определенный момент времени начнут разворачиваться в своих поперечных зазорах Z_2 и Z_3 . Произойдет это тогда, когда выступающая часть опорного торца гайки коснется имитационного кольца в точке B . При этом усилие от гайки 1 будет передаваться через точку B на линзу 2 и далее через точку контакта C на линзу 3.

Под действием этого усилия и реакции торца корпуса объектива третья линза будет выдавливаться вверх (см. рис. 4.35), разворачиваясь при этом вокруг центра кривизны опорной поверхности C_{2-3} , и займет новое положение, отмеченное на рисунке штриховой линией.

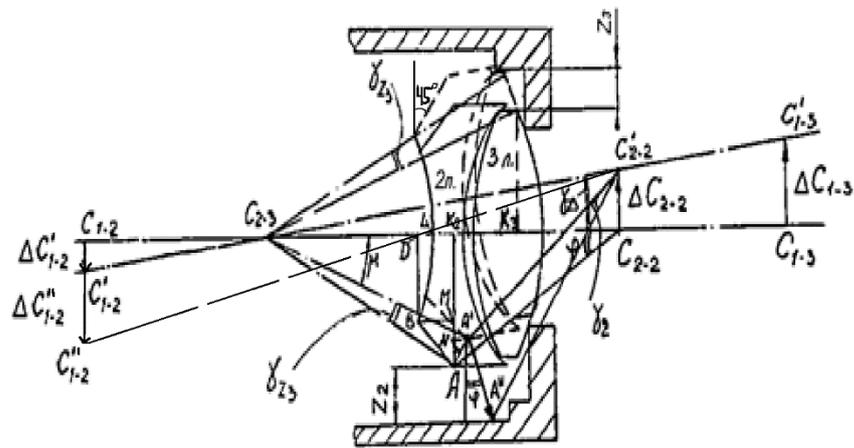


Рис.4.35. Принципиальная схема разворотом второй и третьей линз в объективе Т-57

Вторая линза, непосредственно опирающаяся на первую оптическую поверхность третьей линзы, должна естественно, развернуться с третьей линзой на тот же самый угол γ_{z3} . Очевидно, что как бы потом не разворачивалась вторая линза, центр кривизны ее второй поверхности C_{2-2} всегда будет лежать на оптической оси третьей линзы, заклоненной в зазоре Z_3 на угол γ_{z3} . Дальнейший разворот второй линзы должен происходить вокруг центра кривизны C'_{2-2} в сторону, противоположную развороту третьей линзы. При этом поперечный зазор $Z_2 + AN$ может выбраться полностью, как это показано на рис.4.35 или частично.

Таким образом, вторая линза развернется дважды. Вначале совместно с третьей линзой вверх на угол γ_{z3} вокруг центра кривизны опорной поверхности третьей линзы C_{2-3} , затем на угол γ_2 вокруг центра кривизны второй поверхности второй линзы C'_{2-2} , определяемый зазором Z_2 и тем перемещением линзы AA' , которой произошло при ее развороте вокруг центра кривизны опорной поверхности C_{2-3} третьей линзы. Следовательно, величина разворота второй линзы определяется углами γ_{z3} (положение I) и γ_2 (положение II) (рис.4.36).

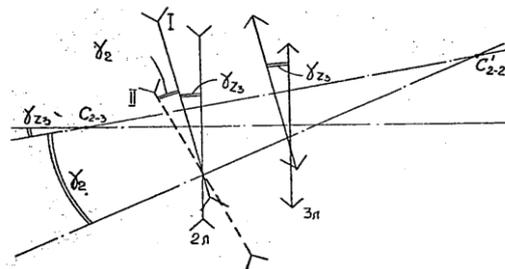


Рис.4.36. Схема полного разворота второй линзы

Однако непосредственное использование величины суммарного разворота в расчетах, связывающих децентрировки с изменением качества изображения, было бы непростительной ошибкой, т.к. учет влияния заклона

на изменение качества изображения напрямую связан с правильным выбором точки, относительно которой этот разворот происходит.

В данном случае развороты происходят относительно разных точек и поэтому влияние каждого из них на качество изображения различное.

Так, коэффициент влияния разворота второй линзы вокруг центра кривизны опорной поверхности третьей линзы C_{2-3} на изменение кривизны на краю поля зрения ($y' = 19$ мм) равен $A=0,02$, а коэффициент влияния разворота этой же линзы на ту же кривизну, но при развороте вокруг центра кривизны опорной поверхности второй линзы C_{2-2} будет в 2,5 раза больше ($A=0,05$).

Решить вопрос о выборе точки, относительно которой следует брать суммарный разворот линз, не просто. Поэтому в дальнейших расчетах мы будем оперировать не суммарным разворотом, а только его составляющими, для которых всегда можно правильно найти точки, относительно которых разворачиваются линзы, а значит, точные значения коэффициентов влияния их разворотов.

В расчетах, при переходе от децентрировок к изменению качества изображения, которое они вызывают, важно учитывать еще один момент: величины заклонов и поперечные смещения линз необходимо отсчитывать относительно исходного (расчетного) положения. Именно эти величины и закладываются в расчеты.

В рассматриваемом случае разворот второй линзы на угол γ_2 происходит не относительно исходного положения, а относительно нового положения, которое она заняла после разворота третьей линзы. Чтобы это учесть, необходимо определить коэффициент влияния совместного разворота второй и третьей линз вокруг центра кривизны опорной поверхности третьей линзы C_{2-3} . Тогда в изменении качества изображения будет учтен разворот второй линзы вверх от исходного положения на величину AN (рис.4.35). Возникшее при этом изменение качества изображения должно в дальнейшем алгебраически складываться с тем изменением качества, которое произойдет при развороте второй линзы вокруг центра кривизны C'_{2-2} .

Найдем выражение для углов разворота γ_{Z3} и γ_2 . Известно, что угол, на который одновременно развернутся вторая и третья линзы в зазоре Z_3 вокруг центра кривизны C_{2-3} определяется выражением

$$\gamma_{Z3} = \frac{Z_3}{\sqrt{r_{2-3}^2 - \left(\frac{\varnothing_{noc}}{2}\right)^2}} = \frac{Z_3}{C_{2-3}K_3},$$

где Z_3 – поперечный радиальный зазор между третьей линзой и корпусом,

r_{2-3} – радиус второй поверхности третьей линзы,

\varnothing_{noc} - наружный (посадочный) диаметр третьей линзы.

В результате разворота на угол γ_{Z3} вторая линза переместится вверх относительно своего исходного положения на величину AN , что, естественно,

увеличит нижний зазор между второй линзой и корпусом объектива на ту же величину, равную $AN = AA' \cdot \cos \mu$, $AA' = A'C_{2-3} \cdot \gamma_{Z3} = \frac{C_{2-3}K_2}{\cos \mu} \cdot \gamma_{Z3}$.

Следовательно,

$$AN = \frac{C_{2-3}K_2}{\cos \mu} \cdot \gamma_{Z3} \cos \mu = C_{2-3}K_2\gamma_{Z3}. \quad (4.32)$$

В образовавшемся зазоре Z_2+AN (рис.4.34) вторая линза развернется вокруг центра кривизны C'_{2-2} на угол

$$\gamma_2 = \frac{A'A''}{C'_{2-2}A'} = \frac{Z_2+AN}{\cos \varphi \cdot C_{2-2}A}, \text{ где } \cos \varphi \approx \frac{K_2C_{2-2}}{AC_{2-2}}.$$

Следовательно,

$$\gamma_2 = \frac{Z_2+AN}{K_2 \cdot C_{2-2}} \quad (4.33)$$

Подставляя в выражение (4.33) значение AN (4.32), получим

$$\gamma_2 = \frac{Z_2+K_2 \cdot C_{2-3} \cdot \gamma_{Z3}}{K_2 \cdot C_{2-2}}. \quad (4.34)$$

Из рис.4.35 следует, что $K_2 \cdot C_{2-2} = (r_{2-2} - d_3 - d_{2-3} + r_{2-3}) - K_2 \cdot C_{2-3}$,

$$K_2 \cdot C_{2-3} = C_{2-3}D + DK_2, \quad (4.35)$$

Но $C_{2-3}D = C_{2-3}L - LD = r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2) - LD$, где

$$LD = r_{1-2} - \sqrt{r_{1-2}^2 - \left(\frac{\varnothing_{c\delta 1-2}}{2}\right)^2}, \quad DK_2 = MA = 0,5\varnothing_{noc2} - 0,5\varnothing_{noc1-2}.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} K_2 \cdot C_{2-3} &= r_{2-3} - r_{1-2} - (d_2 + d_{2-3} + d_3) + \\ &+ \sqrt{r_{1-2}^2 - \left(\frac{\varnothing_{c\delta 1-2}}{2}\right)^2} + 0,5(\varnothing_{noc2} - \varnothing_{noc1-2}) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Подставив (4.36) в выражение (4.35), получим:

$$K_2 \cdot C_{2-2} = r_{2-2} + r_{1-2} + d_2 - \sqrt{r_{1-2}^2 - \left(\frac{\varnothing_{c\delta 1-2}}{2}\right)^2} - 0,5(\varnothing_{noc2} - \varnothing_{noc1-2}) \quad (4.37)$$

Следовательно, угол разворота второй линзы определится выражением

$$\gamma_2 = \frac{Z_2 + \left[r_{2-3} - r_{1-2} - (d_2 + d_{2-3} + d_3) + r_{1-2} \sqrt{1 - \left(\frac{\varnothing_{c\delta 1-2}}{2r_{1-2}}\right)^2} + 0,5(\varnothing_{noc2} - \varnothing_{noc1-2}) \right] \gamma_{Z3}}{r_{2-2} + r_{1-2} + d_2 - r_{1-2} \sqrt{1 - \left(\frac{\varnothing_{c\delta 1-2}}{2r_{1-2}}\right)^2} - 0,5(\varnothing_{noc2} - \varnothing_{noc1-2})} \quad (4.38)$$

В исследуемом объективе Т-57 $\varnothing_{noc2} = 12$ мм, $\varnothing_{noc1-2} = 10$ мм, $r_{1-2} = 30$ мм. Подставив эти значения в (4.36), (4.37) и (4.38) и упростив их, получим

$$K_2 \cdot C_{2-3} = r_{2-3} - (d_2 + d_{2-3} + d_3), \quad (4.39)$$

$$K_2 \cdot C_{2-2} = r_{2-2} + d_2, \quad (4.40)$$

$$\gamma_2 = \frac{Z_2}{r_{2-2} + d_2} + \frac{(r_{2-3} - d_3 - d_{2-3} - d_2)}{r_{2-2} + d_2} \gamma_{Z_3}. \quad (4.41)$$

Используя выражения (4.39), (4.40), (4.41) нетрудно оценить смещения центров кривизна линз, возникающие в результате разворотов линз при креплении их гайкой

$$\begin{aligned} \Delta C_{1-3} &= (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3}) \gamma_{Z_3}, \\ \Delta C'_{1-2} &= C_{1-2} C_{2-3} \gamma_{Z_3} = (r_{1-2} - C_{2-3} L) \gamma_{Z_3} = -(r_{1-2} - r_{2-3} + (d_2 + d_{2-3} + d_3)) \gamma_{Z_3}, \\ \Delta C''_{1-2} &= C'_{2-2} C'_{1-2} \gamma_2 = -(r_{1-2} + d_2 + r_{2-2}) \gamma_2, \\ (\Delta C_{1-2})_{\Sigma} &= \Delta C'_{1-2} + \Delta C''_{1-2} = -(r_{1-2} - K_2 C_{2-3}) \gamma_{Z_3} - (r_{1-2} + K_2 C_{2-2}) \gamma_2, \\ \Delta C_{2-2} &= C_{2-2} C_{2-3} \gamma_{Z_3} = (r_{2-3} - d_3 - d_{2-3} + r_{2-2}) \gamma_{Z_3}. \end{aligned}$$

Таким образом, в рассмотренной схеме базирования двух линз происходит одновременный разворот линз как относительно корпуса объектива, так и относительно друг друга.

Для упрощения понимания картины возникновения децентрировок мы весь процесс разворота разделили на два этапа: одновременный разворот второй и третьей линз в зазоре Z_3 вокруг центра кривизны опорной поверхности C_{2-3} , и разворот второй линзы в радиальном зазоре $Z_2 + AN$ вокруг центра кривизны ее второй опорной поверхности C_{2-2} .

Если расчет угла разворота двух линз γ_{Z_3} не представляет особых трудностей, то расчет угла поворота второй линзы γ_2 оказался более сложным.

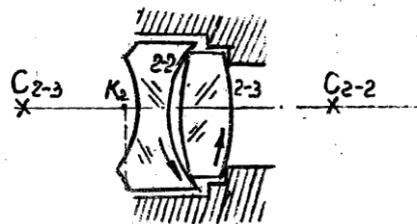


Рис.4.37. К расчету угла разворота γ_2 второй линзы объектива

Величина этого угла, как следует из формулы (4.34) определяется двумя составляющими. Первая из них является разворотом второй линзы в своем радиальном зазоре Z_2 вокруг центра кривизны второй опорной поверхности, а вторая – разворотом в дополнительной части зазора AN , возникшей от разворота второй линзы на угол γ_{Z_3} вокруг центра кривизны второй поверхности третьей линзы.

В формуле (4.40) величина $r_{2-2} + d_2 = C_{2-2}K_2$ является расстоянием от центра вращения второй линзы C_{2-2} до точки, являющейся проекцией на ось системы точки цилиндрической фаски линзы, которой она упирается в корпус объектива, а в формуле (4.39) величина $r_{2-3} - (d_3 - d_{2-3} - d_2) = C_{2-3}K_2$ - расстоянием от центра вращения опорной поверхности третьей линзы C_{2-3} до той же точки (рис.4.37).

А теперь, поскольку схема образования децентрировок определена, получим выражение для дисперсии этих децентрировок:

$$D(\gamma_{z_3}) = \frac{1}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z_3}}{2} \right)^2, \quad (4.42)$$

$$D(\gamma_2) = \frac{0,25}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{Z_2}{C_{2-2}K_2} \right)^2 + \left(\frac{K_2 C_{2-3}}{K_2 C_{2-2}} \right)^2 D(\gamma_{z_3}). \quad (4.43)$$

где k_γ - коэффициент относительного рассеяния угла разворота линзы.

Если ведется расчет смещений центров кривизны оптических поверхностей, то их дисперсии определяются выражениями:

$$D(\Delta C_{1-3}) = (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3})^2 D(\gamma_{z_3}) \quad (4.44)$$

$$D(\Delta C_{1-2}) = (r_{1-2} - K_2 C_{2-3})^2 D(\gamma_{z_3}) + (r_{1-2} + K_2 C_{2-2})^2 D(\gamma_2), \quad (4.45)$$

$$D(\Delta C_{2-2}) = (K_2 C_{2-2} + K_2 C_{2-3})^2 D(\gamma_{z_3}) \quad (4.46)$$

Зная дисперсии погрешностей, ведущих к развороту линз, и коэффициенты их влияния на кому децентрировки, можно подсчитать дисперсии соответствующих величин комы децентрировки.

$$D(K_{\gamma_{z_3}}) = A_{2+3, C_{2-3}}^2 D(\gamma_{z_3}),$$

где $A_{2+3, C_{2-3}}^2$ - коэффициент влияния разворота второй линзы вокруг центра кривизны ее второй поверхности на кому децентрировки.

Выражения для дисперсии комы от поперечных смещений центров кривизны оптических поверхностей будут иметь вид:

$$D(K_{\Delta C, 1-3}) = A_{\Delta C, 1-3}^2 D(\Delta C_{1-3}),$$

$$D(K_{\Delta C, 1-2}) = A_{\Delta C, 1-2}^2 D(\Delta C_{1-2}),$$

$$D(K_{\Delta C, 2-2}) = A_{\Delta C, 2-2}^2 D(\Delta C_{2-2}).$$

Здесь $A_{\Delta C, 1-3}$; $A_{\Delta C, 1-2}$; $A_{\Delta C, 2-2}$ - коэффициенты влияния децентрировок небазовых поверхностей линз на кому в центре поля зрения.

Оценим правильность полученных выражений, сравнивая результаты расчетов с данными измерений, приведенными в (табл.4.8).

Таблица 4.8

Номера гаек	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
1	45	10,34	25,7	14,1
2	-	-	-	-
3	111	3,45	8,57	12,35
4	30	6,9	25	12,35
5	24	6,9	17,14	7,94
6	90	6,9	25,7	19,4
7	42	10,34	25,7	5,29
8	33	10,34	25,7	10,6
9	48	10,34	25,7	8,82
10	60	3,45	17,14	14,12
11	63	3,45	17,14	14,12
12	51	2,87	25,7	17,64
13	93	1,72	12,86	12,35
14	72	1,72	17,14	17,64
15	60	6,9	17,14	19,4
16	84	3,45	8,57	15,88
17	36	1,72	21,42	10,6
18	108	3,45	17,14	10,6
19	78	3,45	17,14	17,64
20	78	3,45	8,57	10,6
21	78	3,45	8,57	14,12
22	54	2,87	25,7	15,88
23	63	6,9	17,14	17,64
\bar{x}	63,68	5,20	18,41	13,59
σ_n	23,25	2,95	6,46	3,75

Рассчитаем среднеквадратическое отклонение модуля децентрировки первой поверхности второй линзы. Воспользовавшись выражениями (4.43), (4.45) и подставив значения параметров объектива Т-57, получим:

$$\sigma^2(\Delta C_{1-2}) = (r_{1-2} - K_2 C_{2-3})^2 \sigma^2(\gamma_{z3}) + (r_{1-2} + K_2 C_{2-2})^2 \sigma^2(\gamma_2),$$

$$r_{1-2} - K_2 C_{2-3} = r_{1-2} - r_{2-3} + d_3 + d_{2-3} + d_2 = 29,8 - 20,5 + 2,55 + 0,81 + 0,94 = 13,6 \text{ мм}$$

$$r_{1-2} + K_2 C_{2-2} = r_{1-2} + r_{2-2} + d_2 = 29,8 + 10,47 + 0,94 = 41,2 \text{ мм},$$

$$\gamma_{z3} = \frac{Z_{3\text{дон}}}{\sqrt{r_{2-3}^2 - \left(\frac{\varnothing_{3\text{noc}}}{2}\right)^2}}.$$

Но так как $Z_{3\text{дон}} = 0,013 \text{ мм}$, $r_{2-3} = 20,5 \text{ мм}$, $\varnothing_{3\text{noc}} = 11 \text{ мм}$, то $\gamma_{z3} = 0,00066 \text{ рад}$.

Следовательно,

$$\sigma^2(\gamma_{z_3}) = \frac{1}{9} k_y^2 \left(\frac{\gamma_{z_3}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,56^2 \left(\frac{0,00066}{2} \right)^2 = 2,94 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2.$$

Так как $Z_{200n} = 0,021 \text{ мм}$; $C_{2-2}K_2 = 10,5 \text{ мм}$; $C_{2-3}K_2 = 17,2 \text{ мм}$; $k\gamma_2 = 1,34$, то подставив их в выражение (4.43) получим

$$D(\gamma_2) = \frac{1}{9} 0,25 \cdot 1,34^2 \left(\frac{0,021}{10,5} \right)^2 + \left(\frac{17,2}{10,5} \right)^2 \cdot 2,94 \cdot 10^{-8} = 27,9 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2$$

Окончательно, для дисперсии суммарной децентрировки первой поверхности второй линзы имеем

$$\sigma^2(\Delta C_{1-2}) = 13,6^2 \cdot 2,94 \cdot 10^{-8} + 41,2^2 \cdot 27,9 \cdot 10^{-8} = 47903 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^2.$$

Отсюда $\sigma(\Delta C_{1-2}) = 22,0 \text{ мкм}$.

Сравнение этого результата с экспериментальной величиной ($\sigma_{1-2} = 23,25 \text{ мкм}$) показывает на достаточно высокую сходимость опытного и расчетного значений среднеквадратического отклонения децентрировки.

Таким образом, предложенная схема расчета и полученные аналитические зависимости вполне могут считаться достоверными и применяться при проектировании объективов.

4.3.2 Пример 2

В отличие от предыдущей схемы базирования в этом варианте конструкции (рис.4.38) вторая линза опирается не на фаску третьей линзы, а на ее оптическую поверхность.

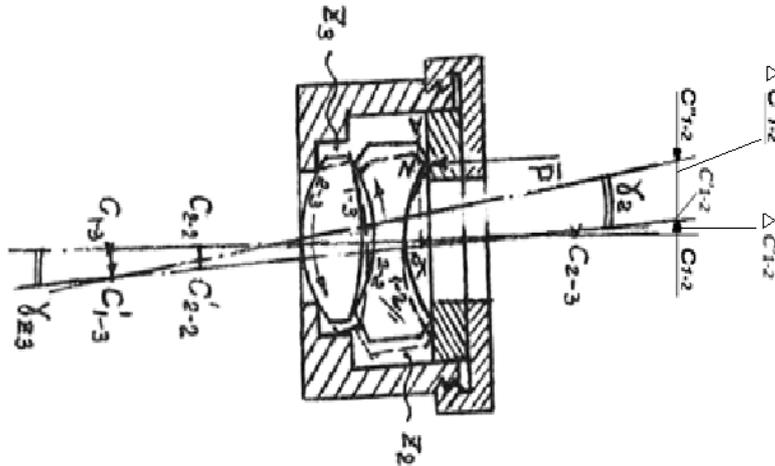


Рис.4.38. Базировка второй линзы на оптическую поверхность третьей линзы

Под действием усилия \bar{P} , развиваемого гайкой, линзы начнут разворачиваться. Причем, вторая линза будет скользить по первой

поверхности линзы (1-3) вниз, а третья – вверх. Рассчитаем дисперсии заклонов и поперечных смещений центров кривизны их оптических поверхностей.

Третья линза и, одновременно с ней, вторая, как и в предыдущем примере, развернутся относительно центра кривизны C_{2-3} опорной поверхности на угол:

$$\gamma_{z3} = \frac{Z_{3доп}}{\sqrt{r_{2-3}^2 - \left(\frac{\varnothing_{3noc}}{2}\right)^2}}$$

Вторая линза развернется в зазоре $Z_2 + AN$ на угол γ_2 , но не вокруг C_{2-2} , а вокруг центра кривизны первой поверхности третьей линзы C'_{1-3} . Поэтому выражение для угла разворота γ_2 примет следующий вид:

$$\gamma_2 = \frac{Z_2}{C_{1-3}K_2} + \frac{C_{2-3}K_2}{C_{1-3}K_2} \gamma_{z3} \quad (4.47)$$

Из рис.4.38 легко определяются расстояния $C_{1-3}K_2$ и $C_{2-3}K_2$:

$$C_{1-3}K_2 = r_{1-3} + d_{2-3} + d_2; \quad C_{2-3}K_2 = r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2).$$

Зная величину углов разворота γ_{z3} , нетрудно оценить значения децентрировок оптических поверхностей линз:

$$\begin{aligned} \Delta C_{1-3} &= (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3}) \gamma_{z3}, \\ \Delta C'_{1-2} &= -C_{1-2} C_{2-3} \gamma_{z3} = -(r_{1-2} - r_{2-3} + d_2 + d_{2-3} + d_3) \gamma_{z3}, \\ \Delta C''_{1-2} &= -C'_{2-2} C''_{1-2} \gamma_2 = -(r_{1-2} + r_{1-3} + d_{2-3} + d_2) \gamma_2, \\ \Delta C'_{2-2} &= C_{2-2} C_{2-3} \gamma_{z3} = (C_{2-2} K_2 + C_{2-3} K_2) \gamma_{z3}, \\ \Delta C''_{2-2} &= -C_{2-2} C_{1-3} \gamma_2 = -(C_{1-3} K_2 - C_{2-2} K_2) \gamma_2. \end{aligned}$$

Расчет дисперсий децентрировок и комы децентрировки ведутся по формулам аналогичным (4.42-4.46)

$$\begin{aligned} D(\gamma_{z3}) &= \frac{1}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z3}}{2} \right)^2, \\ D(\gamma_2) &= \frac{0,25}{9} k_{\gamma_2}^2 \left(\frac{Z_2}{C_{1-3}K_2} \right)^2 + \left(\frac{C_{2-3}K_2}{C_{1-3}K_2} \right)^2 D(\gamma_{z3}), \quad (4.48); \\ D(\Delta C_{1-3}) &= (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3})^2 D(\gamma_{z3}), \\ D(\Delta C_{1-2\Sigma}) &= -(r_{1-2} - C_{2-3}K_2)^2 D(\gamma_{z3}) - (r_{1-2} + C_{1-2}K_2)^2 D(\gamma_2), \\ D(\Delta C_{2-2\Sigma}) &= -(K_2 C_{1-3} - K_2 C_{2-2})^2 D(\gamma_{z3}) + (C_{2-2}K_2 + C_{2-3}K_2)^2 D(\gamma_{z3}) \\ D(K_{\gamma_{z3}}) &= A_{1+2}^2 D(\gamma_{z3}), \end{aligned}$$

где A_{1+2} – коэффициент влияния величины разворота первой и второй линз вокруг центра кривизны $C_{2,3}$ на кому децентрировки.

$$D(K_{\gamma_2}) = A_2^2 D(\gamma_2),$$

A_2 – коэффициент влияния разворота второй линзы вокруг центра кривизны $C_{1,3}$ на кому децентрировки.

$$D(K_{\Delta C_{1-3}}) = A_{\perp 1-3}^2 D(\Delta C_{1-3}); D(K_{\Delta C_{1-2,\Sigma}}) = A_{\perp 1-2}^2 D(\Delta C_{1-2,\Sigma}); D(K_{\Delta C_{2-2}}) = A_{\perp 2-2}^2 D(\Delta C_{2-2}),$$

где $A_{\perp 1-3}$, $A_{\perp 1-2}$, $A_{\perp 2-2}$ - коэффициенты влияния поперечных перемещений центров кривизны 1-3, 1-2, 2-2 поверхностей на кому децентрировки.

4.3.3 Пример 3

В этом примере рассмотрим такой вариант крепления второй и третьей линз объектива Т-57, когда отрицательная линза с взаимно параллельными торцевыми поверхностями прижимается к торцу B корпусной детали 1 с некоторым усилием \bar{P} (рис.4.39).

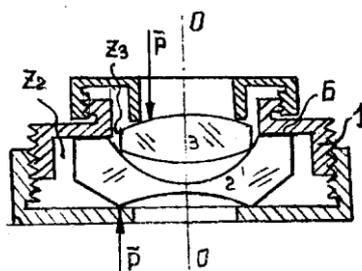


Рис.4.39. Базировка второй линзы на торец корпуса: 1- корпус; 2,3- линзы; Б – торец второй линзы, \bar{P} – усилие

Пусть между второй и третьей линзой и корпусом 1 существуют поперечные зазоры, радиальные значения которых обозначим буквами Z_2 , Z_3 . Причем $Z_2 > Z_3$.

В исходном положении оптические оси совпадают друг с другом и с осью внутреннего посадочного диаметра корпуса объектива $O-O$. Допустим, что линза 2 под действием внешних факторов начала перемещаться влево, по направлению стрелки A (рис.4.40). В какой-то момент этого движения линза 3, находящаяся на линзе 2, упрется в стенку a корпуса объектива. Очевидно, этому моменту будет соответствовать полная выборка зазора Z_3 . При дальнейшем перемещении линзы 2 в том же направлении она сместится на величину оставшегося зазора $Z_2 - Z_3$.

Если бы отсутствовала стенка a , то и третья линза вместе со второй сместилась бы на эту же величину.

Но поскольку боковая стенка a существует, то третья линза при перемещении второй линзы начнет разворачиваться (рис.4.40), опираясь своей нижней поверхностью на линзу 2.

Разворот третьей линзы будет проходить вокруг центра кривизны C'_{2-2} второй поверхности второй линзы, смещенного на величину Z_2 , относительно оси корпуса объектива. Определим величину угла этого разворота $\gamma_{Z_2-Z_3}$.

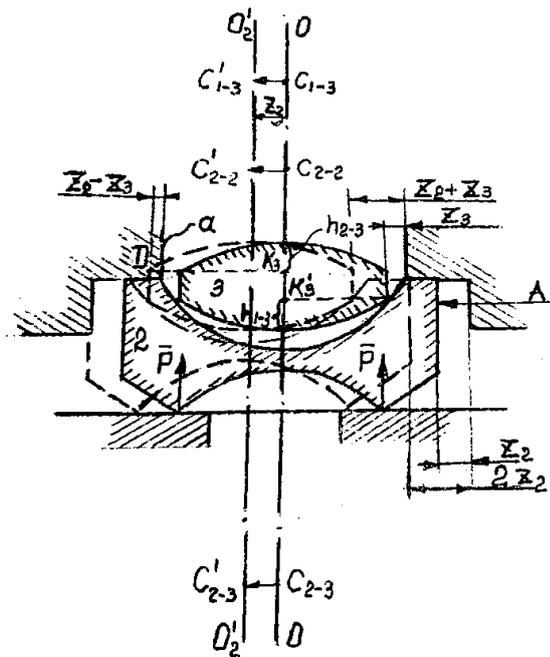


Рис.4.40. Схема разворота линз

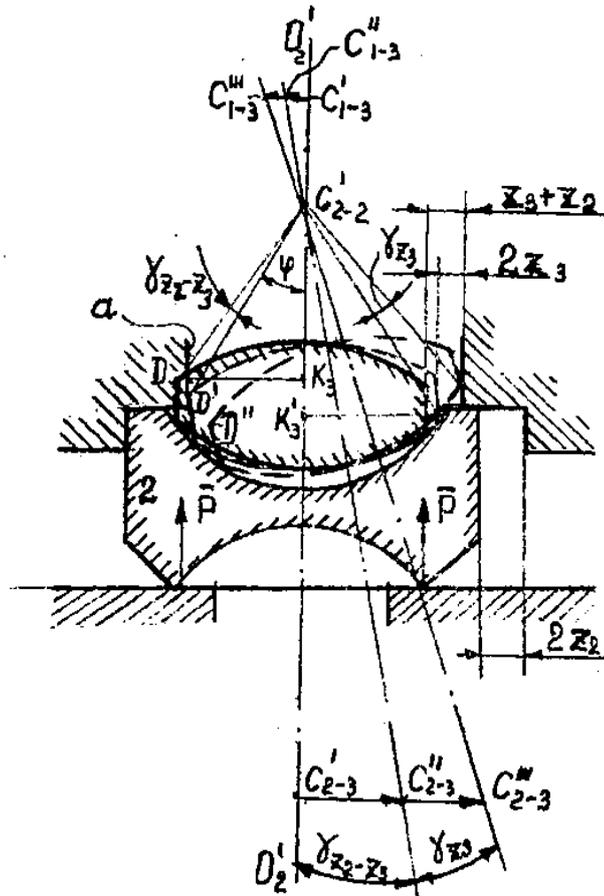


Рис.4.41. Схема положения линзы 3

Из рис.4.41, на котором схематично представлено положение третьей линзы,

следует, что $\gamma_{Z_2-Z_3} = \frac{Z_2-Z_3}{\cos\varphi \cdot DC'_{2-2}}$,
 где $\cos\varphi = \frac{r_{2-2} - (d_{2-3} + d_2) + h_{2-3}}{DC'_{2-2}}$,

но так как

$$r_{2-2} - (d_{2-3} + d_2) + h_{2-3} = C_{2-2}K_3,$$

то можно записать

$$\gamma_{Z_2-Z_3} = \frac{Z_2-Z_3}{C_{2-2}K_3}.$$

Теперь нетрудно оценить величины децентрировок оптических элементов поверхностей третьей линзы относительно нового положения оси $O'_2 - O'_2$ линзы 2:

$$C'_{1-3}C''_{1-3} = \Delta C'_{1-3} = (r_{1-3} + d_{2-3} - r_{2-2})\gamma_{Z_3},$$

$$C'_{2-3}C''_{2-3} = \Delta C'_{2-3} = -(r_{2-3} - d_{2-3} - d_3 + r_{2-2})\gamma_{Z_3}.$$

Таким образом, децентрировки оптических поверхностей относительно исходной оси $O-O$ будут соответственно определяться:

$$C_{1-3}C'_{1-3} = \Delta C_{1-3} = Z_3 \text{ и } \Delta C'_{1-3};$$

$$C_{2-3}C'_{2-3} = \Delta C_{2-3} = Z_2 \text{ и } \Delta C'_{2-3}.$$

При действии гайки на третью линзу эта линза может развернуться в образовавшемся зазоре $2Z_3$ (см. рис.4.41)

$$\gamma_{Z_3} = \frac{2Z_3}{C_{2-2}K'_3}, \text{ где } C_{2-2}K'_3 = r_{2-2} - d_{2-3} + h_{1-3}. \quad (4.50)$$

Этот разворот третьей линзы приведет к дополнительному смещению центров кривизны в образовавшемся зазоре $2Z_3$ (см.рис.4.41)

$$\begin{aligned} C''_{1-3}C'''_{1-3} &= \Delta C''_{1-3} = C''_{1-3}C'_{2-2} \cdot \gamma_{Z_3}, \\ C''_{2-3}C'''_{2-3} &= \Delta C''_{2-3} = -C'_{2-3}C'_{2-2} \cdot \gamma_{Z_3}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} C''_{1-3}C_{2-2} &= r_{1-3} - d_{2-3} - r_{2-2}, \\ C''_{2-3}C_{2-2} &= r_{2-3} - d_{2-3} - d_3 + r_{2-2}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что направление разворота третьей линзы на угол γ_{Z_3} совершенно произвольное по отношению к направлению перемещения второй линзы. Поэтому суммарный разворот третьей линзы будет определяться из выражения

$$D(\gamma_{\Sigma_3}) = D(\gamma_{Z_2-Z_3}) + D(\gamma_{Z_3}), \quad (4.51)$$

$$\text{где } D(\gamma_{Z_2-Z_3}) = \frac{1}{9}k_{Z_2}^2 \left(\frac{\gamma_{Z_2-Z_3}}{2} \right)^2; \quad D(\gamma_{Z_3}) = \frac{1}{9}k_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{Z_3}}{2} \right)^2.$$

Дисперсии суммарных смещений центров кривизны поверхностей $\Delta C_{1-3\Sigma}$ и $\Delta C_{2-3\Sigma}$ будут равны:

$$\begin{aligned} D(\Delta C_{1-3\Sigma}) &= D(\Delta C_{1-3}) + D(\Delta C'_{1-3}) + D(\Delta C''_{1-3}), \\ D(\Delta C_{2-3\Sigma}) &= D(\Delta C_{2-3}) + D(\Delta C'_{2-3}) + D(\Delta C''_{2-3}), \\ D(\Delta C'_{1-3}) &= \frac{1}{9}k_{\perp Z}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2, \quad D(\Delta C'_{1-3}) = (r_{1-3} + d_{1-3} - r_{2-2})^2 D(\gamma_{Z_2-Z_3}), \\ D(\Delta C''_{1-3}) &= (r_{1-3} + d_{2-3} - r_{2-2})^2 D(\gamma_{Z_3}), \\ D(\Delta C_{2-3}) &= \frac{1}{9}k_{\perp Z}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2, \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} D(\Delta C'_{2-3}) &= -(r_{2-3} - d_{2-3} - d_3 + r_{2-2})^2 D(\gamma_{Z_3=Z_3}), \\ D(\Delta C''_{2-3}) &= -(r_{2-3} - d_{2-3} - d_3 + r_{2-2})^2 D(\gamma_{Z_3}). \end{aligned}$$

Рассчитаем теперь дисперсии комы децентрировки в центре поля зрения. Для всех трех вариантов соотношения допусков на зазоры справедливы следующие выражения:

$$\begin{aligned}
D(K_{\gamma_3}) &= A_{3,C2-2}^2 D(\gamma_{\Sigma_3}), \\
D(K_{\Delta C_{1-3}}) &= A_{1-3,\perp}^2 D(\Delta C_{1-3,\Sigma}), \\
D(K_{\Delta C_{2-2}}) &= A_{2-3,\perp}^2 D(\Delta C_{2-3,\Sigma}), \\
D(K_{\Delta C_{\perp 2}}) &= A_{2\perp}^2 D(\Delta C_{\perp 2}).
\end{aligned} \tag{4.55}$$

4.3.4 Пример 4

Рассматриваемый в этом примере вариант базировки первой и второй линз объектива Т-57 представлен на рис.4.42. При анализе децентрировок первой линзы картина по сути своей аналогична случаю, рассмотренному в примере 3.

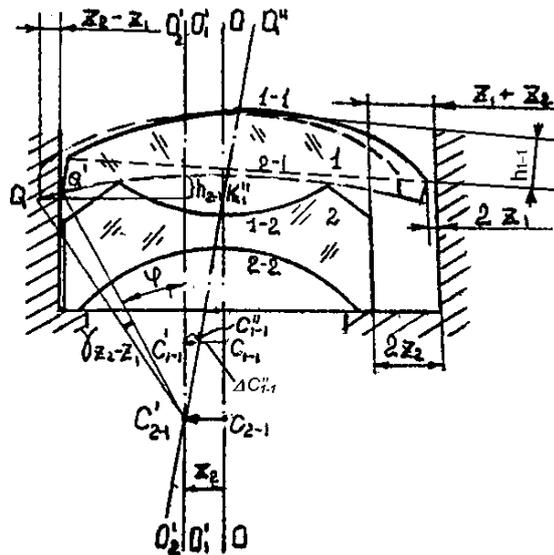


Рис.4.42. Базировка первой и второй линз объектива Т-57

Пусть $Z_2 > Z_1$, тогда $\gamma_{Z_2-Z_1} = \frac{OO'}{r_{2-1}}$, $OO' = \frac{Z_2 - Z_1}{\cos \varphi}$, $\cos \varphi = \frac{r_{2-1} - h_{2-1}}{r_{2-1}}$.

Отсюда

$$\gamma_{Z_2-Z_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{r_{2-1} - h_{2-1}} = \frac{Z_2 - Z_1}{C'_{2-1} K''_1}. \tag{4.54}$$

Децентрировка первой поверхности первой линзы относительно нового положения оси второй линзы $O'_2 - O''_2$ будет равна

$$\Delta C'_{1-1} = C'_{1-1} \cdot C''_{1-1} = (r_{2-1} + d_1 - r_{1-1}) \gamma_{Z_2-Z_1},$$

а относительно оси корпуса объектива будет определяться выражениями

$$\begin{aligned}
\Delta C_{1-1} &= Z_2, \\
\Delta C'_{1-1} &= -(r_{2-1} + d_1 - r_{1-1}) \gamma_{Z_2-Z_1},
\end{aligned}$$

$$\Delta C_{2-1} = Z_2.$$

При поджатии первой линзы гайкой она может развернуться в зазоре $2Z_1$ на угол

$$\gamma_{z_1} = \frac{2Z_1}{r_{2-1} - h_{1-1}}, \quad (4.55)$$

который вызовет смещении линзы на величину

$$\Delta C''_{1-1} = -(r_{2-1} + d_1 - r_{1-1})\gamma_{z_1}.$$

Но этот разворот будет происходить не в плоскости перемещения второй линзы, а в направлении, определяемым торцевым биением гайки. Поэтому схема расчета дисперсий будет той же самой, что и в примере 3:

$$\begin{aligned} D(\gamma_{z_1\Sigma}) &= D(\gamma_{z_2-z_1}) + D(\gamma_{z_1}), & (4.56) \\ D(\Delta C_{\perp,1+2}) &= \frac{1}{9}k_{\perp C}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2, \\ D(\Delta C_{1-1\Sigma}) &= D(\Delta C_{1-1}) + D(\Delta C'_{1-1}) + D(\Delta C''_{1-1}), \\ D(\Delta C_{2-1}) &= D(\Delta C_{\perp Z_2}), \\ D(\gamma_{z_1-z_2}) &= \frac{1}{9}k_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{z_1-z_2}}{2} \right)^2, \quad D(\gamma_{z_1}) = \frac{1}{9}k_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{z_1}}{2} \right)^2, \\ D(\Delta C_{1-1}) &= \frac{1}{9}k_{\perp Z}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2, \quad D(\Delta C'_{1-1}) = -(r_{2-1} + d_1 - r_{1-1}) D(\gamma_{z_2-z_1}), \\ D(\Delta C''_{1-1}) &= -(r_{2-1} + d_1 - r_{1-1}) D(\gamma_{z_1}), \\ D(\Delta C_{2-1}) &= \frac{1}{9}k_{\perp Z}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2, \\ D(K_{\gamma_{z_1\Sigma}}) &= A_{1,C1-2}^2 D(\gamma_{z_2-z_1}), \quad D(K_{\Delta C_{1-1\Sigma}}) = A_{1-1,\perp}^2 D(\Delta C_{1-1,\Sigma}), \\ D(K_{\perp,1+2}) &= A_{1+2}^2 D(\Delta C_{\perp,1+2}), \quad D(K_{\Delta C_{2-1}}) = A_{2-1,\perp}^2 D(\Delta C_{2-1}). \end{aligned}$$

4.3.5 Пример 5

Рассмотрим наиболее общий случай крепления двух линз в объективе (рис.4.43). Из-за наличия торцевого биения, гайка своей выступающей частью коснется второй линзы в точке G .

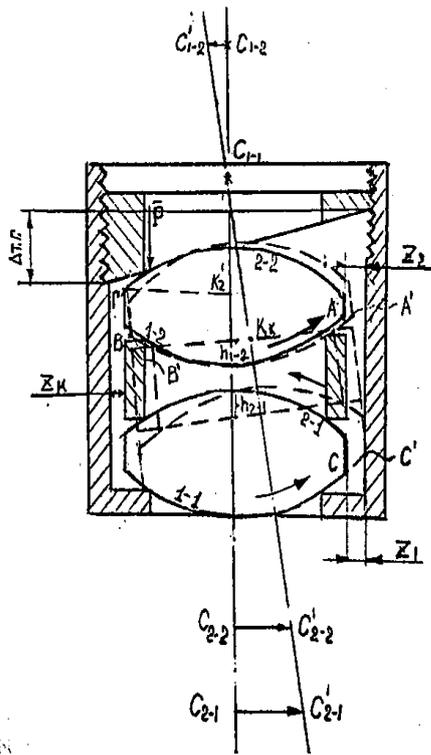


Рис.4.43. Общий случай крепления

Под действием усилия \bar{P} первая и вторая линзы, и промежуточное кольцо начнут разворачиваться, причем каждая в свою сторону. Направление разворота будет зависеть от места приложения усилия \bar{P} , а также от знака радиусов оптических поверхностей. Последовательность разворота, в основном, определяется кривизной поверхностей линз.

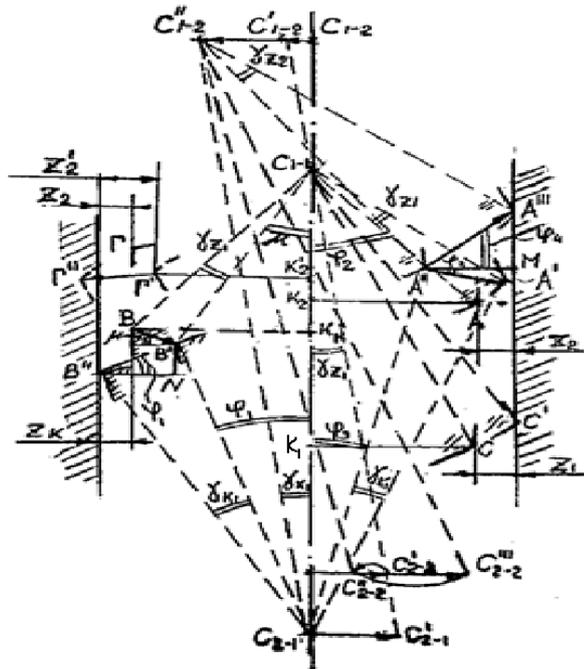


Рис.4.44 Схема разворотов линз

Пусть самой крутой поверхностью является первая поверхность первой линзы 1-1. Тогда под действием усилия \bar{P} , развиваемого гайкой, вначале начнет разворачиваться первая линза вокруг центра кривизны ее опорной поверхности C_{1-1} .

Если величина торцевого биения гайки достаточно велика, что на практике чаще всего и бывает, то первая линза будет разворачиваться вправо до тех пор пока ее ребро C не упрется в корпус объектива в точке C' . Поскольку при креплении линзы давление со стороны гайки не снимается, то прокладное кольцо, опираясь на поверхность 2-1 линзы 1, начнет разворачиваться влево до упора в корпус объектива в точке B'' . При дальнейшем действии давления P свой разворот начнет вторая линза, и происходить он будет до тех пор, пока эта линза не упрется в корпус объектива в точке A''' .

Проведем расчет децентрировок, возникающих в результате всех этих разворотов. Итак, при развороте первой линзы в зазоре Z_1 , одновременно с ней будут разворачиваться опирающиеся на нее кольцо и вторая линза (см.рис.4.43). Угол разворота первой линзы определяется выражением

$$\gamma_{z_1} = \frac{Z_1}{\sqrt{r_{1-1}^2 - \left(\frac{\varnothing_1}{2}\right)^2}} \quad (4.57)$$

При этом центры кривизны поверхностей первой и второй линз сместятся на величины:

$$\begin{aligned} \Delta C_{1-1} &= 0, \\ C_{2-1} \cdot C'_{2-1} &= \Delta C_{2-1} = -(r_{2-1} - d_1 + r_{1-1})\gamma_{z_1}, \\ C_{1-2} \cdot C'_{1-2} &= \Delta C_{1-2} = (r_{1-2} + (d_{1-2} + d_1) - r_{1-1})\gamma_{z_1}, \\ C_{2-2} \cdot C'_{2-2} &= \Delta C_{2-2} = -(r_{2-2} - (d_{1-2} + d_1 + d_2) + r_{1-2})\gamma_{z_1}, \end{aligned}$$

а вершина C ребра первой линзы займет положение C'_1 , вершина B ребра прокладного кольца – положение B'_1 , вершина A ребра второй линзы – положение A' (см.рис.4.43 и 4.44).

Как мы уже отмечали выше, под действием усилия \bar{P} начнет разворачиваться влево промежуточное кольцо. Его разворот происходит вокруг центра кривизны второй поверхности первой линзы C_{2-1} , к которой оно прижимается. Величина угла разворота γ_{K_1} определяется выражением

$$\gamma_{K_1} = \frac{B'B''}{C_{2-1}B'}, \quad (4.58)$$

$$\text{где } B'B'' = \frac{B''N}{\cos \varphi_1}; \quad B''N = Z_K + BB' \cos \mu;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{C_{2-1}K_K}{C_{2-1}B'}; \quad \cos \mu = \frac{C_{1-1}K_K}{C_{1-1}B'}; \quad BB' = C_{1-1}B' \cdot \gamma_{z_1}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} C_{2-1}K_K &= r_{2-1} + d_{2-1} + h_{1-2}, \\ C_{1-1}K_K &= r_{1-1} - d_{2-1} - h_{1-2} - d_1, \end{aligned}$$

h_{1-2} - стрелка прогиба второй поверхности первой линзы, d_k - толщина кольца,

r_{1-1} - радиус первой поверхности первой линзы, r_{2-1} - радиус второй поверхности первой линзы.

Отсюда

$$\begin{aligned} B''N &= Z_K + C_{1-1} \cdot K_K \cdot \gamma_{z1}; \quad B'B'' = \frac{(Z_K + C_{1-1} \cdot K_K \cdot \gamma_{z1})C_{2-1}B'}{C_{2-1} \cdot K_K}; \\ \gamma_{K1} &= \frac{Z_K}{C_{2-1} \cdot K_K} + \frac{C_{1-1} \cdot K_K}{C_{2-1} \cdot K_K} \cdot \gamma_{z1} = \gamma_{Z,K,C_{2-1}} + \frac{C_{1-1} \cdot K_K}{C_{2-1} \cdot K_K} \cdot \gamma_{z1}. \end{aligned} \quad (4.59)$$

В результате разворота промежуточного кольца на угол γ_{K1} произойдет разворот на этот же угол опирающейся на него второй линзы. Но этот разворот будет возможен только в том случае, если зазор между второй линзой и корпусом будет равен или больше, чем величина перемещения ребра Γ линзы 2 от разворота кольца на угол γ_{K1} , т.е. когда выполняется условие

$$Z'_2 = Z_2 + C_{1-1} \cdot K'_2 \cdot \gamma_{z1} \geq C_{2-1} \cdot K'_2 \cdot \gamma_{K1}. \quad (4.60)$$

В этом случае смещения центров кривизны второй линзы определяются выражениями

$$\begin{aligned} C''_{1-2} \cdot C'_{1-2} &= \Delta C''_{1-2K} = (r_{1-2} + d_{1-2} + r_{2-1})\gamma_{K1}, \\ C'''_{2-2} \cdot C'_{2-2} &= \Delta C'''_{2-2,K} = -(r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 - r_{2-1})\gamma_{K1}, \end{aligned}$$

а вершины ребер промежуточного кольца и второй линзы займут новые положения B'' и A'' соответственно.

Если давление со стороны гайки продолжает действовать, то начнет разворачиваться вторая линза. Этот разворот будет происходить вокруг центра кривизны опорной поверхности C''_{1-2} до тех пор, пока ребро линзы не упрется в корпус объектива в точке A''' . Возникшая от такого разворота децентрировка второй поверхности второй линзы будет равна

$$C'''_{2-2} \cdot C'''_{2-2} = \Delta C'_{2-2,Z2} = C''_{1-2} \cdot C'''_{2-2} \cdot \gamma_2,$$

$$\gamma_2 = \frac{A''A'''}{C''_{1-2}A''},$$

где

$$A''A''' = \frac{A''M}{\cos \varphi_4},$$

$$A''M = Z_2 - AA' \cos \varphi_2 + A'A'' \cos \varphi_3;$$

$$AA' = C_{1-1}A \cdot \gamma_{z1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{C_{1-1}K_2}{C_{1-1}A};$$

$$A'A'' = C_{2-1}A' \cdot \gamma_{ZK1}; \cos \varphi_3 = \frac{C_{2-1}K_2}{C_{2-1}A'}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} A''M &= Z_2 + C_{1-1}K_2 \cdot \gamma_{Z1} + C_{2-1}K_2 \cdot \gamma_{ZK1}, \cos \varphi_4 = \frac{C_{1-2}K_2}{C''_{2-1}A''}, \\ A''A''' &= \frac{(Z_2 - C_{1-1}K_2 \cdot \gamma_{Z1} + C_{2-1}K_2 \cdot \gamma_{ZK1})C''_{1-2}A''}{C_{1-2}K_2}, \\ \gamma_2 &= \frac{(Z_2 - C_{1-1}K_2 \cdot \gamma_{Z1} + C_{2-1}K_2 \cdot \gamma_{K1})}{C_{1-2}K_2} = \\ &= \gamma_{Z2} - \frac{C_{1-1}K_2}{C_{1-2}K_2} \cdot \gamma_{Z1} + \frac{C_{2-1}K_2}{C_{1-2}K_2} \cdot \gamma_{K1} \end{aligned} \quad (4.61)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{Z2} &= \frac{Z_2}{C_{1-2}K_2}; C_{1-1}K_2 = r_{1-1} - d_{1-2} - d_1 + h_{1-2}; \\ C_{2-1}K_2 &= r_{2-1} + d_{2-1} + h_{1-2}; C_{1-2}K_2 = r_{1-2} - h_{1-2}. \end{aligned}$$

Если при развороте второй линзы условие (4.60) не выполняется, то есть $Z'_2 = Z_2 + C_{1-1}K'_2 \cdot \gamma_{Z1} < C_{2-1}K'_2 \cdot \gamma_{K1}$, то это означает, что стенка корпуса не позволяет линзе полностью развернуться на угол разворота кольца γ_{K1} .

В этом случае ребро линзы Γ упрется в стенку корпуса значительно раньше в точке Γ'' и при дальнейшем вращении кольца вокруг центра кривизны C_{2-1} , вторая линза будет вращаться уже вокруг центра кривизны C_{1-2} вначале на угол

$$\gamma'_2 = \frac{C_{2-1}K'_2 \cdot \gamma_{K1} - Z'_2}{C_{1-2}K'_2},$$

а затем, под действием усилия P , еще на угол $\gamma''_2 = \frac{2Z_2}{C_{1-2}K_2}$.

В результате суммарный разворот второй линзы вокруг ее центра кривизны C_{1-2} будет равен

$$\gamma_2 = \gamma'_2 + \gamma''_2 = \frac{C_{2-1}K'_2 \cdot \gamma_{K1}}{C_{1-2}K'_2} - \frac{Z_2}{C_{1-2}K'_2} - \frac{C_{1-1}K'_2}{C_{1-2}K'_2} \cdot \gamma_{Z1} + \frac{2Z_2}{C_{1-2}K_2}. \quad (4.62)$$

Без больших потерь для точностных расчетов можно допустить что

$$C_{1-2}K'_2 = C_{1-2}K_2; C_{1-1}K'_2 = C_{1-1}K_2; C_{2-1}K'_2 = C_{2-1}K_2.$$

Тогда выражение (4.62) примет вид

$$\gamma_2 = \gamma_{Z2} + \frac{C_{2-1}K_2 \cdot \gamma_{K1}}{C_{1-2}K_2} - \frac{C_{1-1}K_2}{C_{1-2}K_2} \cdot \gamma_{Z1}. \quad (4.63)$$

Сравнивая выражения (4.61) и (4.63) нетрудно заметить, что они одинаковы.

Итак, если при креплении линз используется гайка с торцевым биением, то произойдет разворот этих линз в радиальных зазорах. Первая линза развернется на угол

$$\gamma_{z1} = \frac{Z_1}{\sqrt{r_{1-1}^2 - \left(\frac{\Delta_{1n}}{2}\right)^2}}$$

Вокруг центра кривизны C_{1-1} , а вторая на угол

$$\gamma_2 = \gamma_{z2} - \frac{C_{1-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{z1}}{C_{1-2} \cdot K_2} + \frac{C_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{k1},$$

где

$$\gamma_{z2} = \frac{Z_2}{C_{1-2} \cdot K_2}; \quad \gamma_{k1} = \gamma_{zk} + \frac{C_{1-1} \cdot K_1}{C_{2-1} \cdot K_1} \cdot \gamma_{z1}; \quad \gamma_{zk} = \frac{Z_{k1}}{C_{2-1} \cdot K_1}.$$

Из приведенных выражений следует, что на разворот второй линзы влияют разворот первой линзы в ее радиальном зазоре Z_1 , разворот промежуточного кольца в зазоре Z_{k1} и разворот второй линзы в своем зазоре Z_2 .

Дисперсия комы децентрировки от разворотов первой и второй линз рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} D(K_{\Sigma}) &= D(K_{1+2,z1}) + D(K_{2,zk,z2}); \quad D(K_{1+2,z1}) = A_{1+2,C1-1}^2 D(\gamma_{z1}); \\ D(K_{2,zk,z2}) &= A_{2,C1-2}^2 D(\gamma_2) = \\ &= A_{2,C1-2}^2 \left[D(\gamma_{z2}) - \left(\frac{C_{1-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2}\right)^2 D(\gamma_{z1}) + \left(\frac{C_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2}\right)^2 D(\gamma_{k1}) \right] \end{aligned}$$

где

$$D(\gamma_{z1}) = \frac{1}{9} k_r^2 \left(\frac{\gamma_{z1}}{2}\right)^2;$$

$A_{1+2,C1-1}$ - коэффициент влияния разворота первой и второй линз относительно центра кривизны первой поверхности первой линзы C_{1-1} на кому децентрировки,

$A_{2,C1-2}$ - коэффициент влияния разворота второй линзы относительно центра кривизны первой поверхности второй линзы C_{1-2} на кому децентрировки.

При расчете смещений центров кривизны оптических поверхностей для дисперсии комы децентрировки можно записать

$$\begin{aligned} D(K_{\Delta C_{2-1}}) &= A_{1+2,C1-1}^2 D(\Delta C_{2-1}), \\ D(\Delta C_{2-1}) &= -\left(\frac{r_{2-1} - d_1 + r_{1-1}}{2}\right)^2 \cdot D(\gamma_{z1}), \\ D(K_{\Delta C_{1-2}}) &= A_{1+2,C1-2}^2 \cdot D(\Delta C_{1-2,\Sigma}), \end{aligned}$$

$$D(\Delta C_{1-2,\Sigma}) = (r_{1-2} + d_{1-2} + d_1 - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{z1}) + (r_{1-2} + d_{1-2} + r_{2-1})^2 \cdot D(\gamma_{zk1})$$

$$D(K_{\Delta C_{2-2}}) = A_{\perp 2-2}^2 \cdot D(\Delta C_{2-2,\Sigma}),$$

где

$$D(\Delta C_{2-2,\Sigma}) = D(\Delta C_{z1,2-2}) + D(\Delta C_{2-2,K1}) + D(\Delta C_{2-2,Z2}) =$$

$$= -(r_{2-2} - d_{1-2} - d_1 - d_2 + r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{z1}) + (r_{2-1} + d_{1-2} + d_1 + d_2 - r_{2-1})^2 \cdot D(\gamma_{zk1}) -$$

$$-(r_{1-2} - d_2 + r_{2-2}) \cdot D(\gamma_2)$$

здесь $A_{\perp 2-1}$, $A_{\perp 1-2}$, $A_{\perp 2-2}$ - коэффициенты влияния поперечных смещений поверхностей (2-1), (1-2) и (2-2) на кому децентрировки.

Рассмотрим еще два примера часто встречающихся при проектировании объективов.

4.3.6 Пример 6

Как видно из рис.4.45 в этом варианте конструкции под действием усилия P , развиваемого гайкой, базовая первая линза будет разворачиваться вправо, а вторая линза влево. В этом, практически, заключается все отличие базировки линз 5 и 6 примеров.

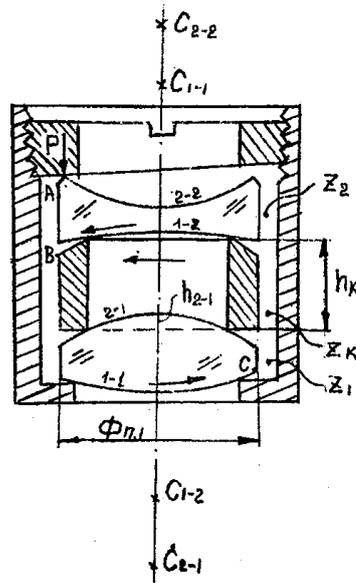


Рис.4.45. Схема базировки двух линзового объектива

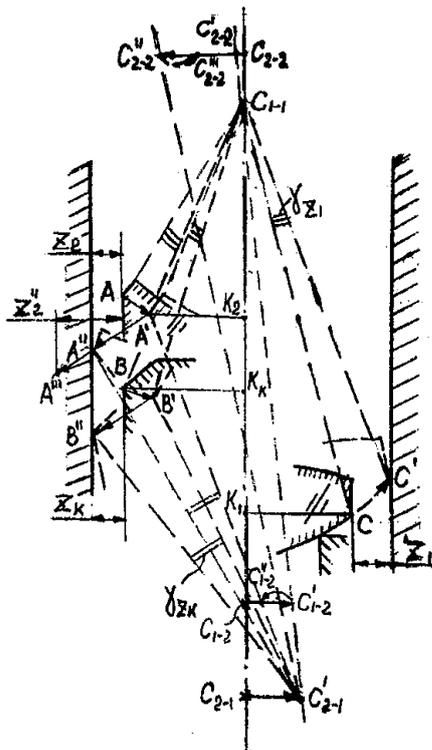


Рис.4.46. Схема расположения линз при разворотах

Вывод формул для расчетов децентрировок и дисперсий смещений аналогичен приведенным в предыдущем примере. Поэтому без особых пояснений запишем выражения для разворота первой и второй линз вокруг центра кривизны опорной поверхности первой линзы C_{1-1} .

$$\gamma_{z_1} = \frac{Z_1}{CK_1} = \frac{Z_1}{\sqrt{r_{1-1}^2 - \left(\frac{\varnothing_{1n}}{2}\right)^2}}$$

$$\Delta C_{2-1} = -C_{2-1} \cdot C'_{2-1} = -(r_{2-1} - d_1 + r_{1-1})\gamma_{z_1},$$

$$\Delta C_{1-2} = -C_{1-2} \cdot C'_{1-2} = -(r_{1-2} - (d_{1-2} + d_1) + r_{1-1})\gamma_{z_1},$$

$$\Delta C_{2-2} = C_{2-2} \cdot C'_{2-2} = -(r_{2-2} + (d_{1-2} + d_1 + d_2) - r_{1-1})\gamma_{z_1}.$$

Направление перемещения кольца в зазоре Z_K будет зависеть от соотношения кривизны поверхностей линз, между которыми оно устанавливается.

Если величины радиусов кривизны линз таковы, что воздушный промежуток между ними увеличивается от центра к краю (рис.4.47а), то при действии усилия \bar{P} кольцо будет скользить по поверхности 2-1 влево, а если промежуток уменьшается (рис.4.47б), то кольцо будет перемещаться по той же поверхности вправо.

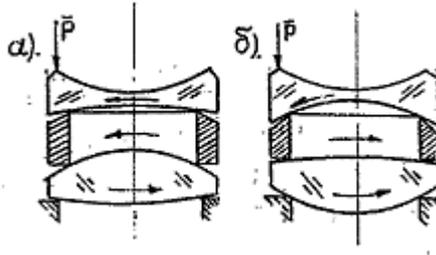


Рис.4.47. Крепление линз различной геометрии через кольца

Рассмотрим первый случай, когда кольцо скользит по второй поверхности первой линзы влево. Тогда угол разворота будет равен

$$\gamma_{ZK} = \frac{Z_K}{C_{2-1}K_K} + \frac{C_{1-1}K_K}{C_{2-1}K_K} \cdot \gamma_{z1}.$$

При этом зазор между корпусом и второй линзой может быть выбран полностью, и тогда ребро A линзы упирается в корпусе в точке A'' . Если зазор выбран частично, то ребро линзы не дойдет до стенки корпуса и в оставшемся зазоре вторая линза получит дополнительный разворот, но уже вокруг центра кривизны первой поверхности второй линзы C_{1-2} .

Возможен и третий случай, когда кольцо разворачивается на угол γ_{ZK} , а линза не может полностью развернуться на этот угол, т.к. упрется в корпус значительно раньше.

Рассмотрим эти случаи более подробно.

В первом случае, когда при развороте кольца полностью выбирается зазор между второй линзой и корпусом, величины децентрировок оптических поверхностей равны:

$$\begin{aligned} C'_{1-2} \cdot C''_{1-2} &= \Delta C''_{1-2} = (r_{2-1} + d_{1-2} - r_{1-1}) \gamma_{ZK}, \\ C'_{2-2} \cdot C''_{2-2} &= \Delta C''_{2-2} = (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 + r_{2-2}) \gamma_{ZK}. \end{aligned}$$

Во втором случае, когда при развороте кольца на угол γ_{ZK} вторая линза не дойдет до корпуса в оставшемся зазоре

$Z''_2 = Z'_2 - C_{2-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{ZK} = Z_2 + C_{1-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{z1} - C_{2-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{ZK}$, вторая линза получит дополнительный разворот, но уже вокруг C_{1-2} на угол

$$\gamma'_2 = \frac{Z''_2}{C_{1-2} \cdot K_2} = \gamma_{Z2} + \frac{C_{1-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{z1} - \frac{C_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{ZK}, \quad (4.64)$$

$$\gamma_{Z2} = \frac{Z_2}{C_{1-2} \cdot K_2}.$$

где

В этом случае величина децентрировки $\Delta C''_{2-2}$ станет равной

$$C''_{2-2} \cdot C'''_{2-2} = \Delta C''_{2-2} = (r_{1-2} + d_2 + r_{2-2}) \gamma'_2.$$

Такой случай возможен, но, как правило, маловероятен. Более характерным следует считать третий вариант, когда вторая линза при развороте на угол γ_{ZK} могла бы сместиться на расстояние $Z''_2 = C_{2-1} \cdot K_2 \cdot$

γ_{ZK} , гораздо больше, чем расстояние $Z_2 + C_{1-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{Z1}$ в точке A''' . В этом случае линза получит дополнительный разворот, но уже вправо на угол

$$\begin{aligned} \gamma''_2 &= \frac{Z''_2 - (Z_2 + C_{1-1} \cdot K_2 \cdot \gamma_{Z1})}{C_{1-2} \cdot K_2} = -\frac{C_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{ZK} - \frac{C_{1-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{Z1} - \gamma_{Z2} = \\ &= -\left(\gamma_{Z2} + \frac{C_{1-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{Z1} - \frac{C_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{ZK} \right) \\ \Delta C''_{2-2} &= -(r_{1-2} + d_2 + r_{2-2}) \gamma''_2. \end{aligned} \quad (4.65)$$

Из сравнения формул (4.64) и (4.65) следует, что значения углов γ'_2 и γ''_2 отличаются только знаком разворота.

Приведем формулы для расчета дисперсий децентрировок и дисперсий комы децентрировок:

$$\begin{aligned} D(\gamma_{Z1}) &= \frac{1}{9} k_r^2 \left(\frac{\gamma_{Z1}}{2} \right)^2, \\ D(\gamma'_2) &= \frac{0,25}{9} k_r^2 \left(\frac{Z_2}{C_{2-1} K_2} \right)^2 + \left(\frac{C_{1-1} K_2}{C_{2-1} K_2} \right)^2 \cdot D(\gamma_{Z1}) - \left(\frac{C_{2-1} K_2}{C_{1-2} K_2} \right)^2 \cdot D(\gamma_{ZK}), \\ D(\Delta C_{2-1}) &= -(r_{2-1} - d_1 + r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{Z1}), \\ D(\Delta C_{1-2, \Sigma}) &= -(r_{1-2} - d_{1-2} - d_1 + r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{Z1}) + (r_{2-1} + d_{1-2} - r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_{ZK}) \\ D(\Delta C_{2-2, \Sigma}) &= -(r_{2-2} + (d_{1-2} + d_1 + d_2) - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{Z1}) + \\ &+ (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 + r_{2-2})^2 \cdot D(\gamma_{ZK}) - (r_{1-2} + d_2 + r_{2-2}) \cdot D(\gamma_2) \\ D(K_{\Sigma}) &= D(K_{1+2, Z1}) + D(K_{2, ZK, Z2}), D(K_{1+2, Z1}) = A_{1+2, C1-1}^2 \cdot D(\gamma_{Z1}), \\ D(K_{2, ZK, Z2}) &= A_{2, C2-1}^2 \cdot D(\gamma'_2), D(K_{\Delta C_{2-1}}) = A_{2-1}^2 \cdot D(\Delta C_{2-1}), \\ D(K_{1-2}) &= A_{1, 1-2}^2 \cdot D(\Delta C_{1-2, \Sigma}), D(K_{2-2}) = A_{1, 2-2}^2 \cdot D(\Delta C_{2-2, \Sigma}). \end{aligned}$$

4.4 Расчет децентрировок в трехлинзовом объективе

4.4.1 Пример 1

Рассмотрим наиболее общий случай, когда в корпусе объектива через прокладочные кольца устанавливаются три положительные линзы (рис.4.51)

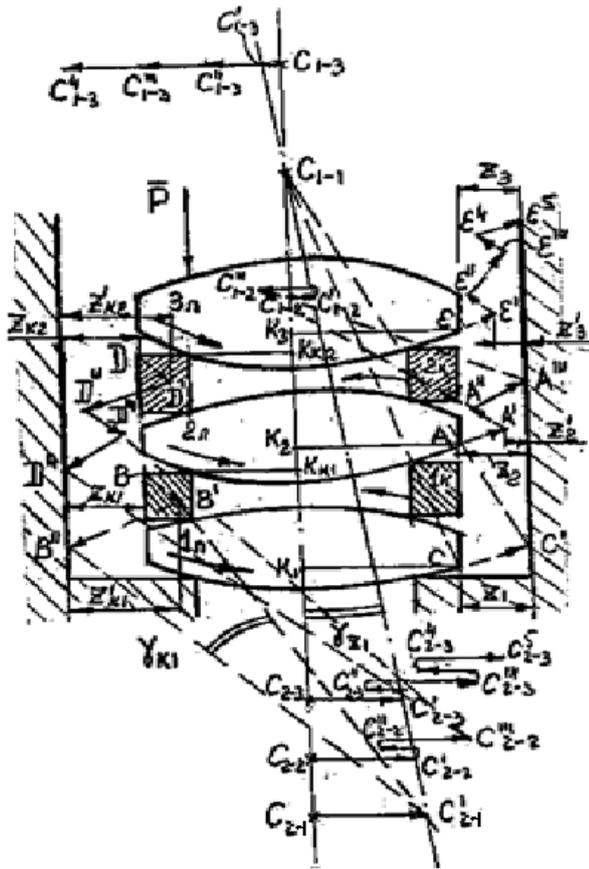


Рис.4.51. Схема базировки трехлинзового объектива. Общий случай

При наличии давления \bar{P} со стороны гайки все линзы и прокладочные кольца начнут разворачиваться в направлениях, указанных стрелками. Определим децентровки, возникающие от этих перемещений.

Первая линза и все опирающиеся на нее элементы развернутся в зазоре

$$Z_1 \text{ на угол } \gamma_{z1} = \frac{Z_1}{C_{1-1} \cdot K_1}.$$

Это приведет к смещению центров кривизны линзы на величины

$$\begin{aligned} C_{2-1} \cdot C'_{2-1} &= \Delta C'_{2-1} = -(r_{1-1} - d_1 + r_{2-1}) \gamma_{z1}, \\ C_{1-2} \cdot C'_{1-2} &= \Delta C'_{1-2} = -(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + r_{1-2})) \gamma_{z1}. \end{aligned} \quad (4.66)$$

В выражении (4.66) величина радиуса r_{1-1} может быть больше по абсолютной величине выражения $(d_1 + d_{1-2} + r_{1-2})$ и тогда центр кривизны C_{1-2} сместится вправо от исходной оси объектива на величину ΔC_{1-2} и будет иметь отрицательный знак. Если же выполняется условие $|r_{1-1}| < |d_1 + d_{1-2} + r_{1-2}|$, то центр кривизны C_{1-2} будет находиться выше C_{1-1} и сместится влево от исходной оси объектива. Это смещение будет иметь знак, противоположный первому.

Пусть $|r_{1-1}| > |d_1 + d_{1-2} + r_{1-2}|$. Тогда $\Delta C_{1-2} < 0$

В этом случае смещения центров кривизны C_{2-2} и C_{1-3} определяются выражениями:

$$\begin{aligned} C_{2-2} \cdot C'_{2-2} &= \Delta C'_{2-2} = -(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_2) + r_{2-2}) \gamma_{z1}, \\ C_{1-3} \cdot C'_{1-3} &= \Delta C'_{1-3} = (r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3}) + r_{1-3}) \gamma_{z1} \end{aligned} \quad (4.67)$$

В выражении (4.67) аналогично (4.66) величина радиуса r_{1-1} может быть больше или меньше выражения $(d_1 + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3} + r_{1-3})$. Если r_{1-1} больше суммы в скобках, то $\Delta C'_{1-3} < 0$, если r_{1-1} меньше – то смещение центра кривизны третьей линзы будет направлено влево и его величина $\Delta C'_{1-3} > 0$.

Смещение центра кривизны C_{2-3} определяется выражением

$$C_{2-3} \cdot C'_{2-3} = \Delta C'_{2-3} = -(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3} + d_3) + r_{2-3}) \gamma_{z1}.$$

При развороте первой линзы на угол γ_{z1} ребро B первого промежуточного кольца переместится вправо на величину $BB' = C_{1-1} \cdot K_{K1} \gamma_{z1}$ и займет новое положение B' ; ребро A второй линзы также переместится вправо на величину $AA' = C_{1-1} \cdot K_{K2} \gamma_{z1}$ и займет положение A' ; ребро D второго кольца переместится на величину $DD' = C_{1-1} \cdot K_{K2} \gamma_{z1}$ в положение D' и, наконец, ребро E третьей линзы переместится на величину $EE' = C_{1-1} \cdot K_{K1} \gamma_{z1}$ в точку E' . Понятно, что все поперечные зазоры с левой стороны между линзами и корпусом, кольцами и корпусом будут иметь новые значения:

$$\begin{aligned} Z'_{K1} &= Z_{K1} + C_{1-1} \cdot K_{K1} \gamma_{z1}, \quad Z'_2 = Z_2 - C_{1-1} \cdot K_2 \gamma_{z1}, \\ Z'_{K2} &= Z_{K2} + C_{1-1} \cdot K_{K2} \gamma_{z1}, \quad Z'_3 = Z_3 - C_{1-1} \cdot K_3 \gamma_{z1} \end{aligned}$$

Далее, под действием усилия \bar{P} первое кольцо со всей оптикой, находящейся выше его, начнет скользить влево по второй поверхности первой линзы пока не упрется в корпус в точке B'' , Угол разворота первого кольца γ_{z1} во вновь образовавшемся зазоре Z'_{K1} будет равен

$$\gamma_{K1} = \frac{Z'_{K1}}{C_{2-1} \cdot K_{K1}} = \gamma_{zK1} + \frac{C_{1-1} \cdot K_{K1}}{C_{2-1} \cdot K_{K1}} \cdot \gamma_{z1}, \quad \text{где } \gamma_{zK1} = \frac{Z_{K1}}{C_{2-1} \cdot K_{K1}}.$$

Ребра A' , D' , E' второй и третьей линз и второго промежуточного кольца переместятся против часовой стрелки и займут новые положения A'' , D'' , E'' .

Определим величины этих перемещений и новых значений поперечных зазоров

$$\begin{aligned} Z''_2 &= Z'_2 + C'_{2-1} \cdot K_2 \gamma_{K1}; \\ Z''_{K2} &= C_{2-1} \cdot K_2 \gamma_{K1} - Z'_{K2}; \\ Z''_3 &= Z'_3 + C_{2-1} \cdot K_3 \gamma_{K1}. \end{aligned}$$

Конечно, такие перемещения возможны только в том случае, если поперечные зазоры слева от линз будут достаточно велики для таких разворотов т.е.

$$Z_2 + C_{1-1} \cdot K_2 \gamma_{z1} > C'_{2-1} \cdot K_2 \gamma_{K1};$$

$$\begin{aligned} Z_{K2} + C_{1-1} \cdot K_{K2} \gamma_{z1} &> C'_{2-1} \cdot K_{K2} \gamma_{K1}; \\ Z_3 + C_{1-1} \cdot K_3 \gamma_{z1} &> C'_{2-1} \cdot K_3 \gamma_{K1} \end{aligned} \quad (4.68)$$

Если даже эти неравенства не выполняются, и вторая, и третья линзы и кольцо между ними развернутся на углы, определяемые величиной зазора между их ребрами и корпусом, то и в этом случае выражения для расчетов углов останутся такими же (см. пример 5). Поэтому для проведения дальнейших расчетов будем исходить из предположения, что неравенства (4.68) выполняются. Тогда для децентрировок оптических поверхностей можно записать

$$\begin{aligned} C'_{1-2} \cdot C''_{1-2} &= \Delta C''_{1-2} = (r_{2-1} + d_{1-2} + r_{1-2}) \gamma_{K1}, \\ C'_{2-2} \cdot C''_{2-2} &= \Delta C''_{2-2} = (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 - r_{2-2}) \gamma_{K1}, \\ C'_{1-3} \cdot C''_{1-3} &= \Delta C''_{1-3} = (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3} + r_{1-2}) \gamma_{K1}, \\ C'_{2-3} \cdot C''_{2-3} &= \Delta C''_{2-3} = (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3} + d_3 - r_{2-3}) \gamma_{K1}. \end{aligned}$$

Под действием усилия гайки вторая линза и вместе с ней второе кольцо и третья линза развернутся против часовой стрелки вокруг центра кривизны C''_{1-2} до упора в корпус в точке A''' на угол

$$\gamma_{2,C1-2} = \frac{Z''_2}{C_{1-2} \cdot K_2} = \gamma_{z2} - \frac{C_{1-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{z1} + \frac{C'_{2-1} \cdot K_2}{C_{1-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{z1}, \text{ где } \gamma_{z2} = \frac{Z_2}{C_{1-2} \cdot K_2}.$$

При этом произойдет изменение положения ребер D'' , E'' . Они займут новые положения D''' , E''' , которым будут соответствовать другие значения поперечных зазоров.

$$\begin{aligned} Z'''_{K2} &= C_{1-2} \cdot K_{K2} \gamma_{2,C1-2} - Z''_{K2}; \\ Z'''_3 &= Z''_3 - C_{1-2} \cdot K_3 \cdot \gamma_{2,C1-2}, \end{aligned}$$

а центра кривизны второй и третьей линз при этом сместятся на величины

$$\begin{aligned} C'''_{2-2} \cdot C''''_{2-2} &= \Delta C''''_{2-2} = -(r_{1-2} - d_2 + r_{2-2}) \gamma_{2,C1-2}, \\ C'''_{1-3} \cdot C''''_{1-3} &= \Delta C''''_{1-3} = (-r_{1-2} + (d_{2-3} + d_3 + r_{1-3})) \gamma_{2,C1-2}, \\ C'''_{2-3} \cdot C''''_{2-3} &= \Delta C''''_{2-3} = -(r_{1-2} + (d_2 + d_{2-3} + d_3 + r_{2-3})) \gamma_{2,C1-2}, \end{aligned}$$

Второе промежуточное кольцо вместе с третьей линзой под действием усилия гайки \bar{P} развернется вокруг центра кривизны C_{2-2} на угол

$$\gamma_{K2} = \frac{Z'''_{K2}}{C_{2-2} \cdot K_{K2}} = \frac{C_{1-1} \cdot K_{K2}}{C_{2-2} \cdot K_{K2}} \cdot \gamma_{z1} - \frac{C_{2-1} \cdot K_{K1}}{C_{2-2} \cdot K_{K2}} \cdot \gamma_{K1} + \frac{C_{1-2} \cdot K_{K2}}{C_{2-2} \cdot K_{K2}} \cdot \gamma_{2,C1-2} + \gamma_{ZK2},$$

где
$$\gamma_{ZK2} = \frac{Z_{K2}}{C_{2-2} \cdot K_{K2}}.$$

В результате этого разворота произойдет смещение центра кривизны третьей линзы:

$$\begin{aligned} C'''_{1-3} \cdot C^4_{1-3} &= \Delta C^4_{1-3} = (r_{2-2} + d_{2-3} + r_{1-3}) \gamma_{K2}, \\ C'''_{2-3} \cdot C^4_{2-3} &= \Delta C^4_{2-3} = (r_{2-2} + d_{2-3} + d_3 - r_{2-3}) \gamma_{K2}. \end{aligned}$$

Ребро E''' переместится в положение E'''' . Поперечный зазор между новым положением ребра и корпусом станет равным $Z''''_3 = Z'''_3 + C_{2-2} \cdot K_3 \gamma_{K2}$. Наконеч, под давлением гайки этот зазор будет полностью выбран при развороте третьей линзы на угол

$$\gamma_{3,C1-3} = \frac{Z''''_3}{C_{1-3} \cdot K_3} = -\frac{C_{1-1} \cdot K_3}{C_{1-3} \cdot K_3} \cdot \gamma_{Z1} + \frac{C_{2-1} \cdot K_3}{C_{1-3} \cdot K_3} \cdot \gamma_{K1} + \frac{C_{2-2} \cdot K_3}{C_{1-3} \cdot K_3} \cdot \gamma_{K2} - \frac{C_{2-1} \cdot K_3}{C_{1-3} \cdot K_3} \cdot \gamma_{2,C1-2} + \gamma_{Z3}, \quad (4.69)$$

где
$$\gamma_{Z3} = \frac{Z_3}{C_{1-3} \cdot K_3}.$$

При этом произойдет смещение центра кривизны второй поверхности третьей линзы на величину

$$C''''_{2-3} \cdot C''''_{2-3} = \Delta C''''_{2-3} = -(r_{2-3} - d_3 + r_{1-3}) \gamma_{3,C1-3}.$$

Получим выражения для оценки дисперсии комы децентрировки.

Если кому децентрировки оценивают через угол поворота линз, то для дисперсии справедливо следующее выражение:

$$D(K) = A_{1+2+3,C1-1}^2 \cdot D(\gamma_{Z1}) + A_{2+3,C2-1}^2 \cdot D(\gamma_{K1}) + A_{2+3,C1-2}^2 \cdot D(\gamma_{2,C1-2}) + A_{3,C2-2}^2 \cdot D(\gamma_{K2}) + A_{3,C1-3}^2 \cdot D(\gamma_3),$$

а если для оценки используется смещения центров кривизны линз, то получим:

$$D(K_{\Delta C2-1}) = A_{2-1}^2 D(\Delta C'_{2-1}) = -A_{2-1}^2 (r_{1-1} - d_1 + r_{2-1})^2 D(\gamma_{Z1}),$$

$$D(K_{\Delta C2-1}) = A_{1-2}^2 D(\Delta C'_{1-2} + \Delta C''_{1-2}) = -A_{1-2}^2 \left[-(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + r_{2-1}))^2 D(\gamma_{Z1}) + (r_{2-1} + d_{1-2} + r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_{K1}) \right];$$

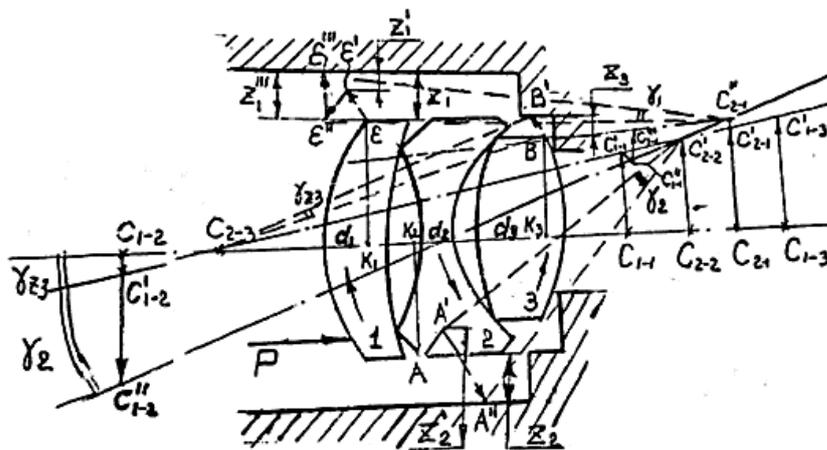
$$D(K_{\Delta C2-2}) = A_{2-2}^2 D(\Delta C'_{2-2} + \Delta C''_{2-2} + \Delta C'''_{2-2}) = A_{2-2}^2 \left[-(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_2) + r_{2-2})^2 D(\gamma_{Z1}) + (r_{2-1} + d_{1-2} + d_2 - r_{2-2})^2 \cdot D(\gamma_{K1}) - (r_{1-2} - d_2 - r_{2-2})^2 \cdot D(\gamma_{2,C1-2}) \right]$$

$$D(K_{\Delta C1-3}) = A_{1-3}^2 D(\Delta C'_{1-3} + \Delta C''_{1-3} + \Delta C'''_{1-3} + \Delta C''''_{1-3}) = A_{1-3}^2 \left[(r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_{2-3} + d_3 + r_{2-3}))^2 D(\gamma_{Z1}) + (-r_{1-2} + (d_{2-3} + d_2 + r_{1-3}))^2 \cdot D(\gamma_{2,C1-2}) + (r_{2-2} + d_{2-3} + r_{1-3})^2 \cdot D(\gamma_{K2}) \right]$$

$$\begin{aligned}
D(K_{\Delta C_{2-3}}) &= A_{2-3}^2 D(\Delta C'_{2-3} + \Delta C''_{2-3} + \Delta C'''_{2-3} + \Delta C''''_{2-3} + \Delta C'''''_{2-3}) = \\
&= A_{2-3}^2 \left[- (r_{1-1} - (d_1 + d_{1-2} + d_2 + d_{2-3} + d_3) + r_{2-3})^2 D(\gamma_{Z1}) + \right. \\
&\quad + (r_{2-1} + d_{1-2} + d_{2-3} + d_2 + d_3 - r_{2-3})^2 \cdot D(\gamma_{K1}) - \\
&\quad - (r_{1-2} - (d_{2-3} + d_2 + d_3) + r_{2-3})^2 \cdot D(\gamma_{2,C1-2}) + \\
&\quad \left. + (r_{2-2} + d_{2-3} + d_3 - r_{2-3})^2 \cdot D(\gamma_{K2}) - (r_{2-3} + d_3 + r_{1-3})^2 \cdot D(\gamma_{3,C1-3}) \right]
\end{aligned}$$

4.4.2 Пример 2

Обратимся к объективу Т-57, схема базировки линз в котором представлена на рис. 4.52, и определим децентрировки, возникающие от разворотов линз в поперечных зазорах.



$\Phi_{\text{пос.з}} = 11$	$C_{2-1}K_1 = 20,2$
$r_{1-1} = 9,8$	$C_{2-2}K_2 = 10,5$
$r_{2-1} = 18,62$	$C_{2-3}K_1 = 14,07$
$r_{1-2} = 29,84$	$C_{2-3}K_2 = 12,5$
$r_{2-2} = 10,47$	$C_{2-3}K_3 = 17,2$
$r_{1-3} = 20,5$	$d_2 = 0,94$
$z_1 = z_2 = 0,021$	$d_3 = 2,55$
$z_3 = 0,041$	$d_{1-2} = 0,98$
$d_1 = 3,81$	$d_{2-3} = 0,81$

Рис.4.52. Схема базировки линз в объективе Т-57

Поскольку первая линза объектива опирается на вторую, а та своей второй поверхностью опирается на третью линзу, то разворот третьей линзы, возникающий в результате действия усилия P , обязательно окажется на положении первой линзы.

Первая линза вместе со второй и третьей линзами развернется на угол γ_{Z3} и ее ребро переместится на величину EE' (рис.4.52). Это смещение должно быть учтено при расчете коэффициента влияния разворота всего трехлинзового объектива вокруг центра кривизны второй поверхности третьей линзы C_{2-3} .

Но поскольку вторая линза под действием усилий, возникающих от давления гайки, развернется вниз вокруг своего центра кривизны C'_{2-2} на угол γ_2 , то и первая линза, опирающаяся на нее, также развернется вниз на угол γ_2 . При этом ребро A' займет положение A'' , а ребро E' - положение E'' . Этот разворот первой линзы совместно со второй должен быть учтен при расчете коэффициента влияния разворота первой и второй линз вокруг

центра кривизны второй поверхности второй линзы C_{2-2} . Далее усилие, с которым гайка давит на первую линзу, заставит ее развернуться вверх вокруг центра кривизны ее опорной поверхности C''_{2-2} на угол γ_1 до упора в корпус в точке E''' .

Определим углы разворотов линз и величины децентрировок их оптических поверхностей. За счет разворота третьей линзы на угол γ_{Z_3} вокруг C_{2-3} (рис.4.52) радиальный зазор Z_2 увеличится на величину $C_{2-3} \cdot K_2 \gamma_{Z_3}$ и станет равным $Z'_2 = Z_2 + C_{2-3} \cdot K_2 \gamma_{Z_3}$, а поперечный зазор Z_1 уменьшится на величину $C_{2-3} \cdot K_1 \gamma_{Z_3}$ и примет значение равное $Z'_1 = Z_1 - C_{2-3} \cdot K_1 \gamma_{Z_3}$. Децентрировки оптических поверхностей определяются выражениями:

$$\begin{aligned} C_{1-3} \cdot C'_{1-3} &= \Delta C'_{1-3} = (r_{2-3} - d_3 + r_{2-3}) \gamma_{Z_3}, \\ C_{2-2} \cdot C'_{2-2} &= \Delta C'_{2-2} = (r_{2-3} - (d_{2-3} + d_3) + r_{2-2}) \gamma_{Z_3}, \\ C_{1-2} \cdot C'_{1-2} &= \Delta C'_{1-2} = -(r_{2-3} - (d_2 + d_{2-3} + d_3) - r_{1-2}) \gamma_{Z_3}, \\ C_{2-1} \cdot C'_{2-1} &= \Delta C'_{2-1} = (r_{2-3} - (d_2 + d_{2-3} + d_3 + d_{1-2}) + r_{2-1}) \gamma_{Z_3}, \\ C_{1-1} \cdot C'_{1-1} &= \Delta C'_{1-1} = (r_{2-3} - (d_2 + d_{2-3} + d_3 + d_{1-2} + d_1) + r_{1-1}) \gamma_{Z_3}. \end{aligned}$$

При развороте второй линзы против часовой стрелки ее ребро A' переместится вниз и займет положение A'' . Угол разворота линзы будет равен

$$\gamma_2 = \frac{Z'_2}{C'_{2-2} \cdot K_2} = \gamma_{Z_2} - \frac{C_{2-3} \cdot K_2}{C'_{2-2} \cdot K_2} \cdot \gamma_{Z_3}, \text{ где } \gamma_{Z_2} = \frac{Z_2}{C'_{2-2} \cdot K_2}. \quad (4.70)$$

Первая линза переместится вниз вместе со второй линзой, и ее ребро E' займет новое положение E'' . Поперечный зазор между корпусом и второй линзой станет равным $Z''_1 = Z'_1 - C_{2-2} \cdot K_1 \gamma_2$. Поперечные смещения центров кривизны примут значения:

$$\begin{aligned} C'_{1-2} \cdot C''_{1-2} &= \Delta C''_{1-2} = -(r_{2-2} + d_2 + r_{1-2}) \gamma_2, \\ C'_{2-1} \cdot C''_{2-1} &= \Delta C''_{2-1} = (r_{2-2} + d_2 + d_{1-2} - r_{2-1}) \gamma_2, \\ C'_{1-1} \cdot C''_{1-1} &= \Delta C''_{1-1} = -(r_{2-3} + d_2 + d_{1-2} + d_1 - r_{1-1}) \gamma_2. \end{aligned}$$

Под давлением гайки первая линза развернется вверх в образовавшемся зазоре Z''_1 на угол γ_1 вокруг центра кривизны своей второй поверхности C''_{2-1} . Величина этого угла определяется выражением

$$\gamma_1 = \frac{Z''_1}{C''_{2-1} \cdot K_1} = \gamma_{Z_1} - \frac{C_{2-3} \cdot K_1}{C''_{2-1} \cdot K_1} \cdot \gamma_{Z_3} + \frac{C_{2-2} \cdot K_1}{C''_{2-1} \cdot K_1} \cdot \gamma_2, \text{ где } \gamma_{Z_1} = \frac{Z_1}{C_{2-1} \cdot K_1}. \quad (4.71)$$

Децентрировка первой поверхности первой линзы будет равна

$$\Delta C''_{1-2} = (r_{2-1} + d_1 - r_{1-1}) \gamma_1.$$

Зная выражения для углов разворота и смещений центров кривизны нетрудно определить их дисперсии, а при известных значениях коэффициентов влияния и дисперсии комы децентрировок.

$$\left. \begin{aligned} D(\gamma_{z_3}) &= \frac{1}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z_3}}{2} \right)^2; \\ D(\gamma_{z_2}) &= \frac{1}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z_2}}{2} \right)^2; \\ D(\gamma_{z_1}) &= \frac{1}{9} k_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z_1}}{2} \right)^2; \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

$$D(\gamma_2) = D(\gamma_{z_2}) + \left(\frac{C_{2-3} K_2}{C'_{2-2} K_2} \right)^2 D(\gamma_{z_3}); \quad (4.73)$$

$$D(\gamma_1) = D(\gamma_{z_1}) - \left(\frac{C_{2-3} K_1}{C_{2-1} K_1} \right)^2 D(\gamma_{z_3}) + \left(\frac{C_{2-2} K_1}{C_{2-1} K_1} \right)^2 D(\gamma_2); \quad (4.74)$$

$$D(\Delta C'_{1-3}) = (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}); \quad (4.75)$$

$$\left. \begin{aligned} D(\Delta C_{2-2, \Sigma}) &= D(\Delta C'_{2-2}) = (r_{2-3} - (d_{2-3} + d_3) + r_{2-2})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) \\ D(\Delta C_{1-2, \Sigma}) &= D(\Delta C'_{1-2}) + D(\Delta C''_{1-2}) = \\ &= -(r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2) - r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) - \\ &\quad - (r_{2-2} + d_2 + r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_2) \\ D(\Delta C_{2-1, \Sigma}) &= D(\Delta C'_{2-1}) + D(\Delta C''_{2-1}) = \\ &= (r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2 + d_{1-2}) + r_{2-1})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) + \\ &\quad + (r_{2-2} + (d_2 + d_{1-2}) - r_{2-1})^2 \cdot D(\gamma_2) \\ D(\Delta C_{1-1, \Sigma}) &= D(\Delta C'_{1-1}) + D(\Delta C''_{1-1}) + D(\Delta C'''_{1-1}) = \\ &= (r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2 + d_{1-2} + d_1) + r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) - \\ &\quad - (r_{2-2} + (d_2 + d_{1-2} + d_1) - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_2) + (r_{2-1} + d_1 - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_1) \\ D(K_{\Sigma 1}) &= D(K_{1+2+3, Z3}) + D(K_{1+2, Z2, Z3}) + D(K_{1, Z1, Z2, Z3}) \end{aligned} \right\} \quad (4.76)$$

$$\left. \begin{aligned} D(K_{1+2+3, Z3}) &= A_{1+2+3, C2-3}^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) \\ D(K_{1+2, Z2, Z3}) &= A_{1+2, C2-2}^2 \cdot D(\gamma_2) \\ D(K_{1, Z1, Z2, Z3}) &= A_{1, C2-1}^2 \cdot D(\gamma_1) \end{aligned} \right\} \quad (4.77)$$

Если исходить из поперечных смещений центров кривизны, то

$$D(K_{\Sigma}) = A_{1-3}^2 \cdot D(\Delta C'_{1-3}) + A_{2-2}^2 \cdot D(\Delta C_{2-2, \Sigma}) + A_{1-2}^2 \cdot D(\Delta C_{1-2, \Sigma}) + A_{2-1}^2 \cdot D(\Delta C_{2-1, \Sigma}) + A_{1-1}^2 \cdot D(\Delta C_{1-1, \Sigma})$$

Поскольку для объектива Т-57 имеются результаты экспериментальных исследований децентрировок его оптических поверхностей, то имеет смысл

рассчитать по формулам (4.76) дисперсии децентрировок и сравнить их с опытными данными.

Дисперсии углов разворотов линз рассчитаем по формулам (4.72-4.74) при $k_{\gamma 3}=1,56$, $k_{\gamma 3}=1,34$, $k_{\gamma 3}=1,3$.

Допустимое значение угла разворота третьей линзы определяется наибольшим поперечным радиальным зазором между линзой и корпусом в экспериментальной выборке

$$Z_3 = \frac{\Delta\varnothing_{\max 3}}{2} + \frac{\Delta\varnothing_K}{2}. \quad (4.78)$$

Наибольшее отклонение посадочного диаметра в исследованной выборке линз равнялось $\Delta\varnothing_{\max 3} = -14$ мкм, а отклонение посадочного диаметра корпуса $\Delta\varnothing_K = 14$ мкм. Следовательно, из (4.78) получим $Z_3 = 14$ мкм.

$$\gamma_{z3} = \frac{Z_3}{\sqrt{r_{2-2}^2 - \left(\frac{\Delta\varnothing_{\text{noc3}}}{2}\right)^2}} = \frac{0,014}{\sqrt{20,5^2 - \left(\frac{11}{2}\right)^2}} = \frac{0,014}{19,75} = 0,00071 \text{ рад}$$

Подставив значения $k_{\gamma 3}$ и γ_{z3} в выражение (4.72) вычислим значение дисперсии угла разворота третьей линзы

$$D(\gamma_{z3}) = \frac{1}{9} 1,56^2 \cdot \left(\frac{7,1}{2} \cdot 10^{-4}\right)^2 = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2.$$

Аналогично, при значениях $Z_2 = Z_1 = 0,021$ мкм, рассчитаем значения $D(\gamma_{z2})$ и $D(\gamma_{z1})$:

$$D(\gamma_{z2}) = \frac{1}{9} k_{\gamma 2}^2 \left(\frac{\gamma_{z2}}{2}\right)^2; \quad k_{\gamma 2} = 1,34;$$

$$\gamma_{z2} = \frac{Z_2}{C_{2-2} K_2} = \frac{0,021}{10,5} = 0,002 \text{ рад}$$

$$D(\gamma_{z2}) = \frac{1}{9} 1,34^2 \cdot \left(\frac{0,002}{2}\right)^2 = 20 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2$$

$$D(\gamma_{z1}) = \frac{1}{9} k_{\gamma 1}^2 \left(\frac{\gamma_{z1}}{2}\right)^2; \quad k_{\gamma 1} = 1,3;$$

$$\gamma_{z1} = \frac{Z_1}{C_{2-1} K_1} = \frac{0,021}{20,2} = 0,00104 \text{ рад}$$

$$D(\gamma_{z1}) = \frac{1}{9} 1,3^2 \cdot \left(\frac{0,00104}{2}\right)^2 = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2.$$

Теперь можно перейти к расчету дисперсий углов разворота линз $D(\gamma_2)$ и $D(\gamma_1)$. Подставив в формулу (4.73) значения $C_{2-3} K_2 = 17,2$ мм, $C'_{2-2} K_2 = 10,5$ мм, получим

$$D(\gamma_2) = 20 \cdot 10^{-8} + \left(\frac{17,2}{10,5}\right)^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-8} = 29,14 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2$$

Аналогично, по формуле (4.74) при значениях $C_{2-3}K_1 = 12,5$ мм, $C_{2-1}K_1 = 20,2$ мм, $C_{2-2}K_1 = 14,07$ мм получим

$$D(\gamma_1) = 3,8 \cdot 10^{-8} - \left(\frac{12,5}{20,2}\right)^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-8} + \left(\frac{14,07}{20,2}\right)^2 \cdot 29,14 \cdot 10^{-8} = \\ = 16,1 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^2$$

Зная дисперсии углов разворота линз, по формулам (4.75-4.76) нетрудно определить дисперсии децентрировок:

$$D(\Delta C_{1-3}) = (r_{2-3} - d_3 + r_{1-3})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) = (20,5 - 2,55 + 20,5)^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-8} = \\ = 5026,6 \cdot 10^{-8} \text{ мм}$$

$$D(\Delta C_{1-2,\Sigma}) = -(r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2) - r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) - \\ - (r_{2-2} + d_2 + r_{1-2})^2 \cdot D(\gamma_2) = -(20,5 - (2,55 + 0,81 + 0,94) - 29,84)^2 \times \\ \times 3,4 \cdot 10^{-8} - (10,47 + 0,94 + 29,84)^2 \cdot 29,14 \cdot 10^{-8} = -49583,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^2;$$

$$D(\Delta C_{1-1,\Sigma}) = (r_{2-3} - (d_3 + d_{2-3} + d_2 + d_{1-2} + d_1) + r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_{z_3}) - \\ - (r_{2-2} + (d_2 + d_{1-2} + d_1) - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_2) + (r_{2-1} + d_1 - r_{1-1})^2 \cdot D(\gamma_1) = \\ = (20,5 - (2,55 + 0,81 + 0,94 + 0,98 + 3,81) + 9,8)^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-8} - \\ - (10,47 + (0,94 + 0,98 + 3,81) - 9,8)^2 \cdot 29,14 \cdot 10^{-8} + \\ + (18,62 + 3,81 - 9,8)^2 \cdot 16,1 \cdot 10^{-8} = 2904,2 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^2;$$

Поскольку в результатах эксперимента были представлены не дисперсии, а средние квадратические отклонения децентрировок, то перейдем от расчетных значений дисперсий децентрировок к их среднеквадратическим отклонениям, рассчитанным по известной формуле $\sigma = \sqrt{D}$.

Итак, расчетные значения среднеквадратических отклонений децентрировок равны: $\sigma(\Delta C_{1-3}) = 7,09$ мкм, $\sigma(\Delta C_{1-2}) = 22,27$ мкм, $\sigma(\Delta C_{1-1}) = 5,40$ мкм, а экспериментальные значения составляют соответственно: $\sigma(\Delta C_{1-3}) = 7,02$ мкм, $\sigma(\Delta C_{1-2}) = 21,56$ мкм, $\sigma(\Delta C_{1-1}) = 5,20$ мкм

Сравнение расчетных и экспериментальных среднеквадратических значений децентрировок позволяет утверждать, что разница между ними невелика и составляет для худшего случая не более 10%. Что говорит о достоверности полученных аналитических выражений.

4.5 Экспериментальные оценки статистической связи между поперечными зазорами и децентрировками

В процессе исследований были измерены значения децентрировок первой поверхности третьей линзы ΔC_{1-3} , когда она устанавливалась в

эталонный корпус одна, совместно с первой и второй линзами. При этом, как гайки, так и линзы выбирались и устанавливались в корпус объектива случайным образом. Это означало, что совместное действие (если оно имело место) торцевого биения гайки и поперечных зазоров между линзами и корпусом на децентрировки оптических поверхностей линз носило случайный характер.

По результатам измерений были рассчитаны коэффициенты корреляции между величиной децентрировки первой поверхности третьей линзы ΔC_{1-3} и погрешностями: $\Delta \emptyset_1$, $\Delta \emptyset_2$, $\Delta \emptyset_3$, ΔC_{1-1} , ΔC_{2-1} , ΔC_{1-2} , ΔC_{2-2} , для партии объективов из 44 и 14 шт (табл.4.10).

Таблица 4.10

Линзы		3		2+3		
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta \emptyset_3$	$\Delta \emptyset_2$	$\Delta \emptyset_3$	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}
44	ΔC_{1-3}	0,30	0,09	-0,02	-	0,91
14	ΔC_{1-3}	0,32	0,30	0,28	0,10	0,95

Продолжение табл.4.10

Линзы		1+2+3						
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta \emptyset_1$	$\Delta \emptyset_2$	$\Delta \emptyset_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}
44	ΔC_{1-3}	0,73	0,22	-0,28	0,60	-0,26	-0,41	0,83
14	ΔC_{1-3}	0,22	-0,29	0,016	-0,42	0,3	-0,126	0,95

Из таблицы 4.10 следует, что между децентрировками первой поверхности третьей линзы ΔC_{1-3} и поперечными зазорами, определяемыми отклонениями диаметров $\Delta \emptyset_2$, $\Delta \emptyset_3$, нет сильной связи – величины коэффициентов корреляции между ними малы и не превышают 0,3. Этого нельзя сказать о зависимости между ΔC_{1-3} и $\Delta \emptyset_1$. Коэффициент корреляции между ними достаточно высок ($r=0,73$), что говорит о тесной связи между этими погрешностями.

Не менее тесная связь обнаружилась между децентрировками ΔC_{1-3} и ΔC_{2-2} ($r=0,83$; $0,95$). Это можно объяснить тем, что при развороте третьей линзы вторая линза, а точнее ее вторая поверхность, обязательно должна развернуться на тот же самый угол, т.к. при зажатии гайкой она всегда опирается на первую поверхность третьей линзы. Поэтому, когда в корпус объектива устанавливаются все три линзы, значение коэффициента корреляции между ΔC_{1-3} и ΔC_{2-2} остается столь же высоким (0,83 и 0,95).

Причина тесной связи между ΔC_{1-3} и $\Delta \emptyset_1$, ΔC_{1-1} не настолько очевидна, чтобы на базе проведенных экспериментов можно было бы дать ей однозначное толкование. Понятно, что в ближайшем будущем эксперименты

должны быть продолжены. Сейчас же ясно одно: гайка, непосредственно опирающаяся на первую поверхность первой линзы, безусловно, определяет ее положение в поперечном зазоре в объективе. Эта же гайка определяет распределение децентрировки первой поверхности третьей линзы. Следовательно, децентрировки ΔC_{1-3} и ΔC_{1-1} должны быть обязательно тесно связаны.

Обратимся к децентрировке второй поверхности второй линзы и выясним ее связь с другими погрешностями по таблице 4.11.

Таблица 4.11

Линзы		2+3			
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta\emptyset_2$	$\Delta\emptyset_3$	ΔC_{1-2}	ΔC_{1-3}
44	ΔC_{2-2}	0,07	0,08	-	0,91
14	ΔC_{2-2}	0,46	0,28	0,05	0,95

Продолжение табл.4.11

Линзы		1+2+3						
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta\emptyset_1$	$\Delta\emptyset_2$	$\Delta\emptyset_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}
44	ΔC_{2-2}	0,79	0,04	-0,2	0,36	0,15	-0,36	0,83
14	ΔC_{2-2}	0,19	0,45	0,2	0,42	0,48	-0,2	0,95

Из таблицы 4.11 следует, что наиболее тесная связь имеет место между децентрировками ΔC_{1-3} и ΔC_{2-2} ($r=0,83;0,95$). Причины столь тесной связи были уже обсуждены выше. Непосредственная связь между децентрировкой ΔC_{2-2} и остальными погрешностями объектива не столь очевидна, кроме случая с $\Delta\emptyset_1$, когда в корпус объектива устанавливались все три линзы одновременно. Эту ситуацию можно объяснить следующим образом. Поскольку существует сильная связь между ΔC_{1-3} и $\Delta\emptyset_1$ (см.табл. 4.11), и между ΔC_{1-3} и ΔC_{2-2} , то, очевидно, что ΔC_{2-2} и $\Delta\emptyset_1$ должны быть также сильно связаны между собой.

В следующей таблице 4.12 приведены значения коэффициентов корреляции между децентрировкой первой поверхности второй линзы ΔC_{1-2} и остальными погрешностями объектива.

Таблица 4.12

Линзы		2+3			
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta\varnothing_2$	$\Delta\varnothing_3$	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}
44	ΔC_{1-2}	-	-	-	-
14	ΔC_{1-2}	0,16	0,3	0,05	0,1

Продолжение табл.4.12

Линзы		1+2+3						
Кол-во об-вов	Погрешность	$\Delta\varnothing_1$	$\Delta\varnothing_2$	$\Delta\varnothing_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}
44	ΔC_{1-2}	-0,5	0,1	0,015	-0,37	0,6	-0,36	-0,41
14	ΔC_{1-2}	-0,24	0,28	0,29	-0,05	0,4	-0,2	-0,13

При установке в корпус объектива второй и третьей линз сколь угодно сильной связи между децентрировкой ΔC_{1-2} и любой другой погрешностью изготовления не наблюдается. Можно предположить, что единственной погрешностью, которая определяет и величину, и характер распределения ΔC_{1-2} является торцевое биение гайки.

При установке в корпус объектива трех линз наиболее тесная связь имеет место между децентрировками ΔC_{1-2} и ΔC_{2-1} ($r=0,6; 0,4$). То же самое значение коэффициента корреляции ($r=0,61$) было получено при эксперименте, когда менялись 23 гайки, использовавшиеся при креплении одних и тех же линз (табл.4.13). Это понятно, т.к. первая поверхность второй линзы является базой для второй поверхности первой линзы. Следует также подчеркнуть, что зазор между корпусом объектива и второй линзой не является определяющим при возникновении децентрировки ее первой поверхности.

Теперь рассмотрим связь между децентрировками оптических поверхностей первой линзы ($\Delta C_{1-2}, \Delta C_{2-1}$) и остальными погрешностями объектива (табл.4.14 и 4.15).

Таблица 4.13

Номера гаек	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
1	21	16,7	72	4	12,86	4,8
2	-	-	-	-	-	-
3	18	13,36	90	6	21,43	9,6
4	21	13,36				
5	18	5,01	124	12	42,86	14,4
6	18	10,02	42	5,3	42,86	12
7	6	20,04	60	14	42,86	14,4
8	7,5	11,7	66	6	21,43	7,2

9	12	18,37	60	6	17,14	24
10	24	5,01	60	14	38,56	19,2
11	12	10,02	36	6	12,86	14,4
12	12	10,02	66	10	30	12
13	6	20,04	72	16	47,14	16,8
14	4,5	33,4	114	14	42,86	7,2
15	12	13,36	48	4	8,57	7,2
16	24	13,36	96	14	42,86	21,6

Продолжение табл.4.13

Номера гаек	ΔC_{1-1}	ΔC_{2-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}	ΔC_{2-3}
17	18	16,7	96	10	30	14,4
18	9	18,37	66	20	51,43	16,8
19	18	16,7	84	6	17,14	9,6
20	18	11,7	78	8	25,71	9,6
21	12	6,68	42	6	17,14	4,8
22	27	15,03	108	10	34,28	16,8
23	15	13,36	84	8	21,43	12
$\bar{x} =$	15,136	14,20	69,82	9,33	29,22	11,78
$\sigma_n =$	6,18	5,97	22,63	4,30	12,64	4,85

Таблица 4.14

Линзы		1+2+3						
Кол-во об-вов	Погрешности	$\Delta \varnothing_1$	$\Delta \varnothing_2$	$\Delta \varnothing_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}
44	ΔC_{2-1}	0,01	-0,18	0,09	-0,22	0,6	0,15	-0,26
14	ΔC_{2-1}	-0,39	-0,40	0,43	-0,39	0,40	0,48	0,3

Таблица 4.15

Линзы		1+2+3						
Кол-во об-вов	Погрешности	$\Delta \varnothing_1$	$\Delta \varnothing_2$	$\Delta \varnothing_3$	ΔC_{1-1}	ΔC_{1-2}	ΔC_{2-2}	ΔC_{1-3}
44	ΔC_{1-1}	0,56	0,003	-0,18	-0,22	-0,37	0,36	0,6
14	ΔC_{1-1}	0,43	0,46	0,20	-0,39	0,05	0,42	0,42

Наличие достаточно сильной связи между ΔC_{2-1} и ΔC_{1-2} ($r=0,6; 0,4$) понятно из рассуждений, приведенных выше. Связь между ΔC_{2-1} и остальными погрешностями распределена более или менее равномерно, т.е. все они в той или иной степени принимают участие в образовании децентрировки ΔC_{2-1} .

Что касается связи децентрировки ΔC_{1-1} с остальными погрешностями, то из табл.4.8 следует, что наиболее сильное влияние на ее величину

оказывают погрешности $\Delta\varnothing_1$ и ΔC_{1-3} ($r=0,56$; $r=0,60$). Это лишний раз подтверждает правильность расчетов, которые мы провели ранее. Напомним, что именно зазор между корпусом и первой линзой явился в конечном итоге тем ограничением, которое предопределило величину угла разворота первой линзы, а значит и величину децентрировки ее первой поверхности ΔC_{1-1} .

Возможные причины тесной связи между децентрировками ΔC_{1-1} и ΔC_{1-3} обсуждались нами выше. Из приведенного анализа значений коэффициентов корреляции можно сделать следующие выводы:

- наиболее тесная корреляционная взаимосвязь наблюдается между децентрировками оптических поверхностей опирающихся друг на друга;
- влияние поперечных зазоров между линзами и корпусом объектива на децентрировки оптических поверхностей значительно слабее, чем влияние на них погрешностей изготовления гаек. Причем, наиболее сильное влияние гайки оказывают на те поверхности линз, на которые они опираются.

ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАСЫПНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ

Основные принципы, в соответствии с которыми строятся конструкции объективов, достаточно просты и могут быть сведены к следующим двум.

Первый принцип, наиболее распространенный в отечественном объективостроении, связан с креплением линз в оправках и последующей их центровкой в «плавающих» патронах с помощью автоколлимационного микроскопа типа ЮС-13. Этот принцип центровки мы рассмотрели в главах 2 и 4. После проведения центровки оправы с линзами устанавливаются в корпус объектива.

Второй принцип построения объективов сводится к установке в корпус объектива линз без оправ через промежуточные кольца. Иногда в этих случаях воздушные промежутки в корпусе объектива выдерживаются не кольцами, а непосредственной опорой линз друг на друга. Этот принцип построения объектива получил широкое распространение на оптических фирмах Японии, Америки и Западной Европы. Часто первый принцип называют автоколлимационным, а второй – насыпным. Встречаются случаи, когда в конструкцию объектива закладываются одновременно оба принципа.

Возникает вопрос, какой из этих вариантов наиболее продуктивен и позволяет получать объективы с наиболее высокими техническими и экономическими характеристиками. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нам придется вкратце рассмотреть сегодняшнее состояние дел в производстве объективов.

5.1 Анализ трудоемкости изготовления объективов

Проанализируем структуру трудовых затрат, имеющих место в серийном и массовом производстве объективов. Анализ таких затрат позволит выявить технологические этапы, на которые приходится наибольшие затраты, что в свою очередь даст возможность выявить так называемые «узкие» места производства и сформулировать главные направления на пути их существенного снижения. На рис.5.1а и 5.1б приведены диаграммы трудовых затрат T на крупносерийное и массовое производство объективов ПФ-6 и ОП-1.8.

Из диаграммы следует, что наибольшие трудовые затраты приходятся на оптические (до 53%) и сборочные (до 35%) цеха. На обработку в механических цехах приходится меньше всего затрат – до 12%.

Обратимся к сборочным цехам. В качестве примера для выявления основных источников трудовых затрат в этих цехах рассмотрим структуру пооперационных затрат в фотообъективе И-73 (рис.5.1с), который выпускался серийно по 40-50 тысяч штук в год. Из рисунка следует, что наиболее трудоемкими операциями являются сборочные – до 50% от всех затрат, идущих на изготовление объектива, юстировочные – около 20%

затрат, и операции автоколлимационной центровки – до 12%. Таким образом, около 80% всех затрат на изготовление объектива приходится на операции, обеспечивающие необходимую точность расположения оптических элементов в конструкции объектива. Каковы же причины столь больших затрат на сборочно-юстировочных работах?

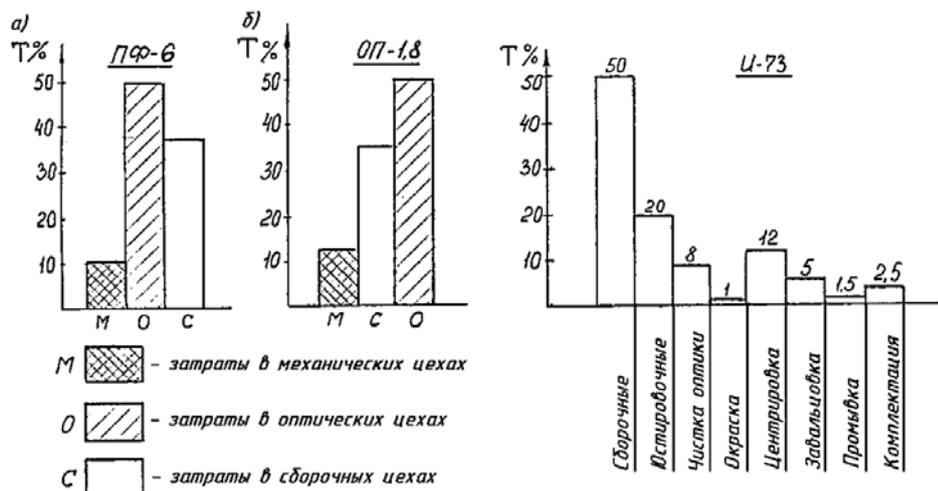


Рис. 5.1. Диаграммы трудовых затрат на объективы крупносерийного и массового производства ПФ-6 (а), ОП-1,8 (б), И-73 (с)

Для начала рассмотрим процесс центровки линз в оптических и сборочных цехах. На рис.5.2 представлено распределение децентрировок поверхностей 900 линз фотообъектива Т-43, центрируемых в оптическом цехе в патронах сжатия на станках типа ЦС-10. Поле рассеяния децентрировок всех исследованных поверхностей не превышает 0,025 мм.

На рис.5.2 представлена кривая распределения погрешностей тех же самых линз, но центрированных в оправе методом автоколлимации в сборочной схеме. Поле рассеяния децентрировок в этом случае составляет 0,043 мм, что почти в два раза хуже, чем это было в оптическом цехе. Таким образом, достаточно высокая степень центрирования, достигнутая в оптическом цехе, значительно ухудшается в сборочном цехе.

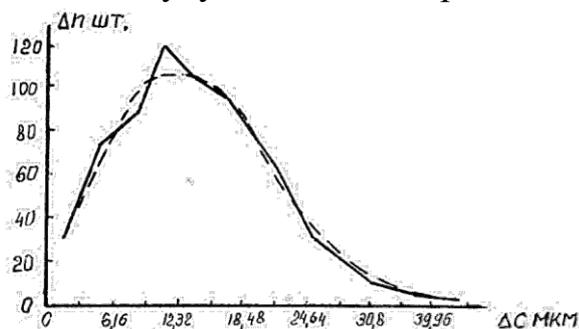


Рис.5.2. Распределение децентрировок линз, центрируемых на станках типа ЦС-10

Главными причинами такого ненормального положения, сложившегося на сегодня при крупносерийном производстве объективов является широкое

применение ручного труда высокой интенсивности, используемого при автоколлимационном способе центрировки линз в оправках.

В оптическом цехе требуемые величины децентрировок обеспечиваются станками, которые предварительно настраиваются, и в дальнейшем процесс центрирования происходит практически без участия человека. Его работа сводится только к установке линзы между патронов сжатия станка, а центрирование происходит автоматически.

В сборочном цехе автоколлимационная центрировка обеспечивается системой станок – человек. Практика показала, что в условиях крупносерийного и массового производства точность центрирования очень сильно зависит от психологического состояния рабочего и норм времени на центрировку, которые, как правило, весьма низки, а также от технического уровня технологического оборудования.

Токарно – арматурные станки, на которых в сборочном цехе производят операцию центрирования, давно морально и физически устарели. Это в основном станки типа «Кергер», вывезенные много лет назад из побежденной Германии. Биение шпинделя этих станков при закрепленных на них плавающих патронах в лучшем случае составляет 0,01-0,015 мм. Цена деления продольного и поперечного суппортов – 0,05 мм. При таких параметрах станков весьма проблематично требовать от сборочного цеха высокой точности центрировки.

Естественно возникает вопрос, как в условиях серийного и массового производства устранить в сборочных цехах автоколлимационную центрировку, требующую большого количества ручного труда, приводящего подчас к непредсказуемым результатам. Эта проблема полностью снимается при использовании насыпных вариантов конструкций. В этом случае линзы без оправ устанавливаются в корпус объектива, а воздушные промежутки выдерживаются либо прокладными кольцами (рис.5.3а), либо непосредственно опорой линз друг на друга (рис.5.3б).

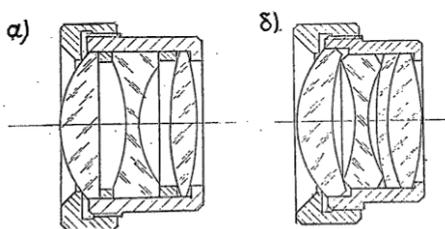


Рис.5.3. Насыпной вариант конструкции объектива: а) с использованием прокладных колец, б) опорой линз друг на друга

В чем достоинство этого типа конструкций, какие преимущества они имеют по сравнению с конструкциями автоколлимационного типа? Видимо, следует более подробно остановиться на этих вопросах.

Известно, что для повышения точности и надежности конструкций каждый разработчик стремится к созданию объектива, который имел бы

минимальное число составляющих элементов. Естественно, что возможности этого пути ограничены, так как для удовлетворительной работы объектива необходимо, чтобы в него входило определенное количество основных элементов.

Тем не менее, создание конструкций насыпного типа позволяет довольно близко подойти к решению поставленной задачи. Действительно, в конструкциях насыпного типа (рис.5.3а и 5.3б) в отличие от конструкции автоколлимационного (рис.5.4а) – отсутствуют оправы, в которых крепятся и центрируются линзы.

Это приводит к заметному уменьшению количества довольно непростых оправ, что способствует уменьшению поперечных габаритов объектива на 20-30%, уменьшению его материалоемкости, значительному сокращению сроков изготовления и, наконец, позволяет заметно повысить качество изображения за счет самоцентрировки линз в объективе.

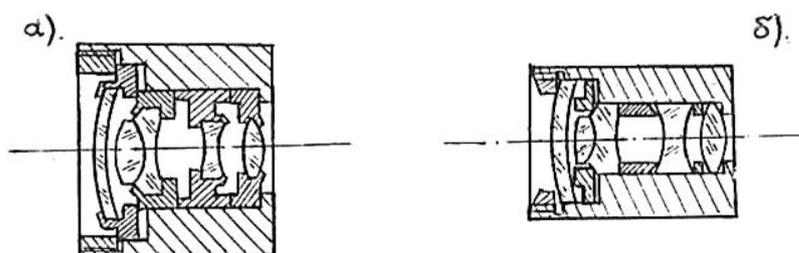
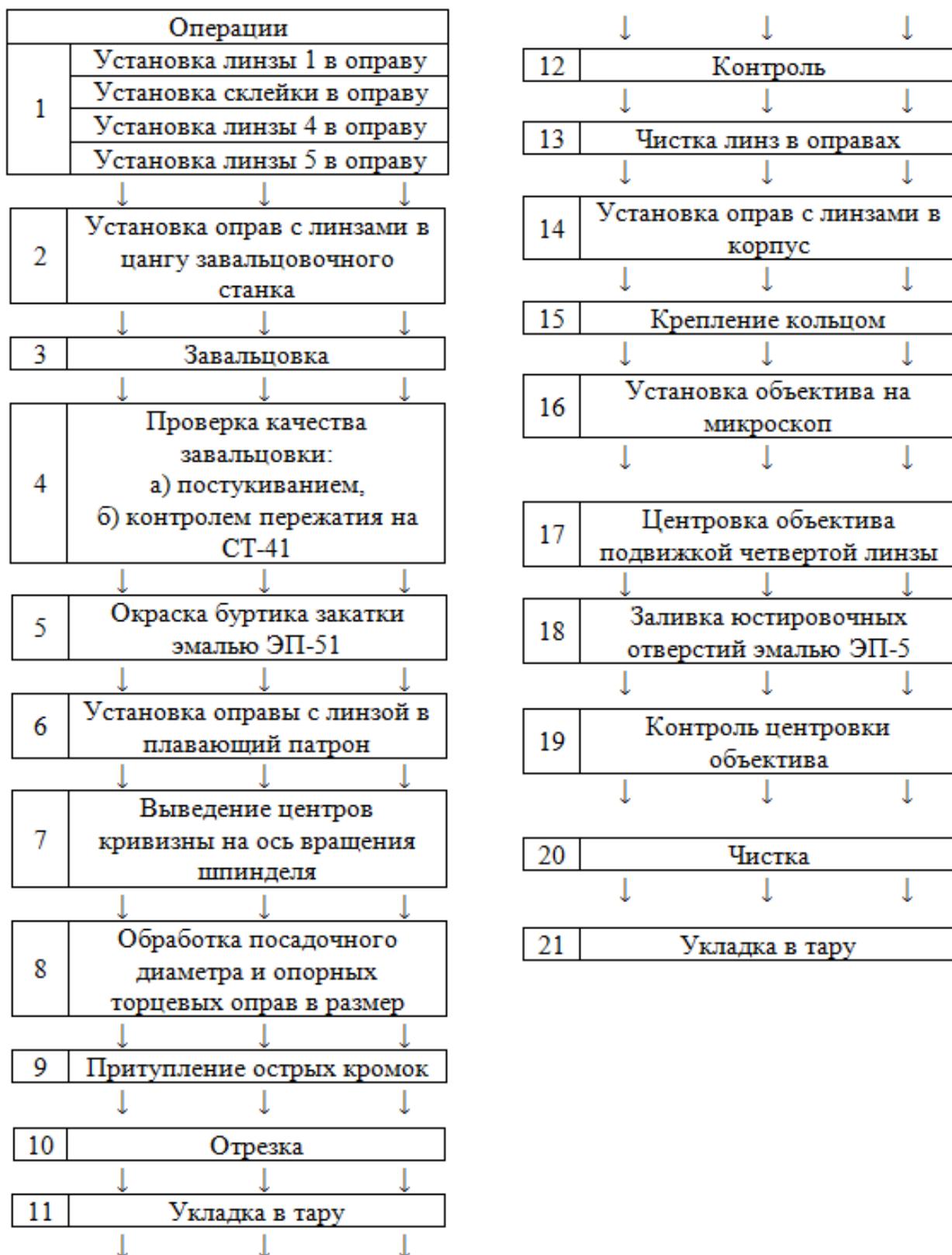


Рис.5.4. Конструкция объектива Минитар-1Л:
а) автоколлимационный вариант,
б) насыпной вариант

В качестве примера рассмотрим объектив «Минитар – 1Л». При переходе с существующего автоколлимационного варианта (рис.5.4а) на насыпной (рис.5.4б) из конструкции устраняются оправы четырех линз. При годовом выпуске 200 000 шт. объективов автоматный цех сразу освобождается от 800 000 оправ, т.е. более полумиллиона достаточно сложных в изготовлении деталей.

Экономится ежегодно более 14 тонн латуни. В сборочном цехе освобождаются и переводятся на другие работы более 8 центрировщиц, т.к. с устранением оправ отпадает необходимость в автоколлимационной центрировке. Это позволяет повысить качество изображения объектива. Кроме того, насыпной вариант имеет, по крайней мере, еще одно очень важное преимущество – он всегда менее трудоемок при сборке. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить структурные схемы технологических процессов сборки и юстировки объективов «Минитар – 1Л» автоколлимационного (а) и насыпного (б) типа (рис.5.5). В насыпном варианте конструкции объектива технологических операций в 3,5 раза меньше.

а) Автоколлимационный вариант сборки



б) Насыпной вариант сборки

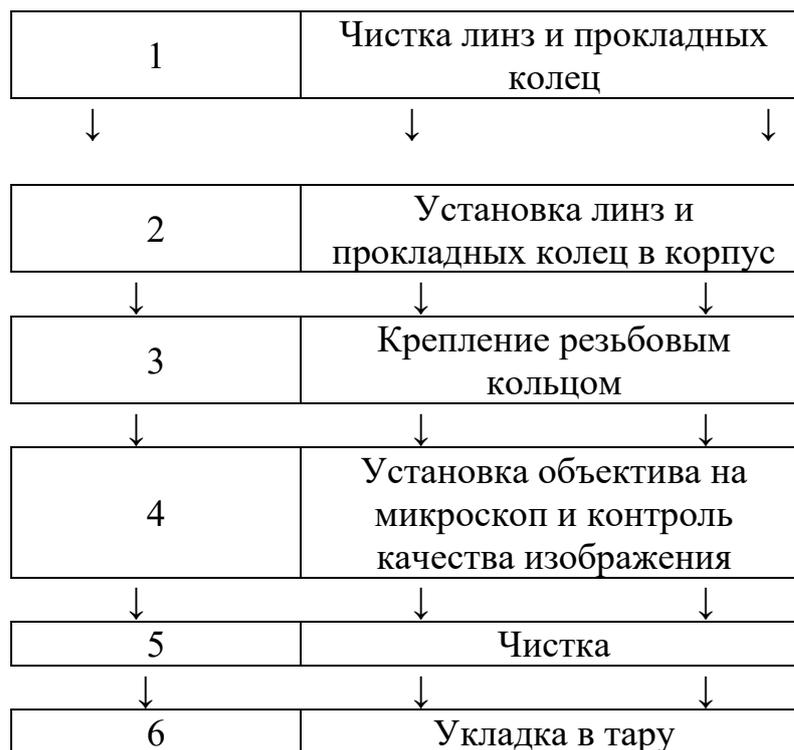


Рис.5.5. Технологический процесс сборки и юстировки объектива «Минитар-1л»

Однако для создания объективной картины необходимо представлять и трудности, которые могут встретиться на пути создания насыпных конструкций объективов. Во-первых, на сегодня полностью отсутствуют какие-либо исследования, позволяющие создать хотя бы основы проектирования насыпных вариантов конструкций объективов. Во-вторых, их создание связано с достаточно высокой точностью изготовления основных элементов конструкций:

- погрешность посадочных диаметров линз в большинстве случаев должна находиться в пределах от 0 до 0,025 мм;
- погрешность центрировки линз – 0,003-0,02 мм;
- погрешность внутреннего посадочного диаметра корпуса объектива – 0,006-0,015 мм;
- непараллельность торцов прокладных колец -0,002-0,015 мм;
- неосность наружного и внутреннего посадочных диаметров прокладных колец -0,003-0,01 мм;
- отклонение геометрической формы отверстий -0,003-0,005 мм.

Получение таких точностей на современном отечественном оборудовании не всегда возможно.

Таким образом, создание насыпных конструкций объективов является наиболее прогрессивным и современным.

5.2 Последовательность проектирования объективов

Перед каждым конструктором, берущим на себя смелость разрабатывать новые модели объективов, всегда встает один и тот же вопрос – с чего начать?

Ниже мы попытаемся дать некоторые рекомендации по решению этого и ряда других сопутствующих ему вопросов. Но совершенно очевидно, что начинать надо с внимательного изучения оптического выпуска. Здесь не следует жалеть ни времени, ни усилий, т.к. все это в дальнейшем окупится. К тому же такая работа не требует от конструктора какой-либо особой теоретической подготовки.

В первую очередь необходимо ознакомиться с геометрическими параметрами оптической схемы. И лучше всего это начинать с прорисовки в соответствующем масштабе всей схемы объектива. Образный анализ такого эскиза даст много полезной информации разработчику.

Во-первых, сразу позволит оценить самое важное в ней – ее технологичность. Если в схеме много оптических поверхностей с крутыми радиусами, то надо готовиться к трудной встрече с оптиками-технологами, особенно, когда объектив предназначается для крупносерийного и массового производства. Еще хуже, когда в оптической схеме объектива встречаются глубокие мениски. В этом случае возникают дополнительные трудности по точной центрировке линз и их контролю.

Не менее трудный разговор с представителями службы оптического цеха предстоит, если в схеме имеются так называемые «тонкие» линзы, т.е. линзы с тонкой серединой. Это линзы, в которых отношение толщины к посадочному диаметру составляет $1/30$, а иногда $1/40$ и даже $1/50$. При таких соотношениях выдержать цвет в $1,5-2$ кольца на оптических поверхностях после снятия линзы с «грибка» становится сложно.

Не меньшие трудности возникают при склейке тонких линз. Их часто «ведет». Вследствие чего на склеенной поверхности возникает заметный астигматизм. Все эти технологические проблемы в настоящий момент полностью не решены, и до сих пор вызывают в цехах серьезные трудности.

При анализе оптической схемы следует обратить особое внимание на расстояние между кромками линз. Оно может быть маленьким (менее $0,5$ мм), что в него невозможно поместить буртики оправ. В ряд случаев это может оказаться решающим для снятия этой схемы с производства.

Линзы с тонкими краями (ширина цилиндрических поясков менее $0,5$ мм) при наличии фасок на ребрах могут превратиться в лезвие бритвы. Часто в обращении с такими линзами работники получают порезы на пальцах. Именно поэтому их не любят в оптических цехах и всячески стараются не брать в работу.

И, наконец, обязательно следует проверять задний фокальный и рабочий отрезки. Дело в том, что последняя поверхность объектива может оказаться вогнутой, и поэтому, несмотря на то, что фокальный отрезок вроде

бы соответствует требованию ТЗ, фактически же он для конструкции будет уменьшен на величину прогиба последней поверхности объектива. И тогда в отрезок между плоскостью изображения и объективом не может поместиться все то, что ранее задумывалось автором ТЗ (шторки, диафрагмы, приемники, зеркала и т.д.).

Дальнейший анализ оптического выпуска должен идти по пути изучения таблиц влияния децентрировок на качество изображения. Здесь необходимо помнить о следующем. Перед тем как заказывать расчет таблиц влияния, надо четко определить какой параметр качества изображения представляет наибольший интерес. Если проектируется широкоугольный объектив, то в заводских условиях в качестве такого параметра чаще всего выбирают кривизну изображения в меридиональной плоскости, а оценку качества сборки объектива в этом случае производят по изображению дифракционной точки на краю поля или непосредственно по величине кривизны в заданных точках поля зрения.

Если проектируется «телевик» или объектив с достаточно большим фокусным расстоянием (по крайней мере, больше, чем у широкоугольного объектива), то в качестве контролируемого параметра в цеховых условиях обычно берут кому децентрировки в центре поля зрения и по ее величине судят о качестве изготовления объектива.

Такой подход оправдал себя при проектировании большинства ныне изготавливаемых объективов. Но нельзя отрицать и того факта, что часто встречаются объективы, в которых в качестве выходных параметров могут быть выбраны дисторсия, хроматизм или функция рассеяния точки и линии, концентрация энергии.

В последние года в цеха, собирающие объективы, стали внедряться установки для контроля коэффициента передачи модуляции на отдельных частотах. Следует сказать, что, несмотря на все их несовершенство, это заметный шаг вперед на пути получения более объективной и достоверной информации о качестве изображения объективов.

В связи с этим возникла необходимость вести расчет допусков исходя из допустимого изменения контраста на заранее выбранных частотах. Но проведение таких расчетов связано с наличием таблиц влияния децентрировок на изменение контраста.

При этом нельзя забывать, что теоретически зависимость между децентрировками и изменением контраста является нелинейной. Но как показал опыт, эта зависимость в пределах допусков, которые мы обычно ставим на чертежах наших объективов, может быть с достаточной для практики точностью принята за линейную.

И поэтому всю методику точностных расчетов, рассмотренную нами выше, можно использовать при расчетах изменения контраста. К сожалению, надо отметить, что на сегодня мы еще не имеем общепринятой программы расчета изменения контраста от децентрировок, что заметно сдерживает внедрение точностного анализа конструкций объективов.

Наконец, когда все вопросы, связанные с выбором необходимого параметра качества изображения решены, производят заказ таблиц расчета влияния децентрировок на изменение качества изображения. Обычно расчет длится недолго. Поэтому в этот же день вы можете получить, интересующую вас информацию в виде распечаток, в которых поиск таблиц занимает секунды. Даже беглый взгляд на таблицы позволяет определить оптические поверхности объектива, наиболее сильно влияющие на децентрировки. Более точную информацию конструктор получит, если рассчитает коэффициенты влияния децентрировок. Тем более, что этот расчет не вызывает каких-либо затруднений.

Роль и значение коэффициентов влияния децентрировок в процессе проектирования, сборки и юстировки чрезвычайно велики. Без знания величин этих коэффициентов обоснованная и логически правильная работа по созданию конструкции практически невозможна, особенно на этапах назначения и перераспределения допусков на отклонения линз от расчетного положения, при выборе компенсаторов децентрировок и схем базирования линз.

На начальном этапе проектирования, когда еще почти ничего не известно о будущей конструкции, информация, получаемая от анализа коэффициентов влияния, вполне достаточна для эскизных проработок конструкции объектива.

Итак, мы рассмотрели вопросы, на которые следует обратить особое внимание при анализе оптического выпуска объектива. Конечно, надо сразу признать, кроме этих вопросов в каждом конкретном случае существуют свои, частные проблемы. Их может быть очень много в зависимости от области применения и условий эксплуатации объектива. Рассмотреть их все просто не представляется возможным. А вот принципиальный подход к проектированию нам, кажется, очень важен.

Переходим к следующему, самому ответственному и самому сложному этапу проектирования – компоновке и выбору схем базирования линз конструкции объектива.

5.3 Компоновка объектива и базировка линз

Количество вариантов компоновки объектива резко возрастает с увеличением числа линз в объективе. Вот почему выбор необходимого компоновочного решения превращается в сложную инженерную задачу. Но задача эта решается. В первую очередь рассмотрим вопросы, связанные с определением схем базирования линз.

Известно, что число практически возможных вариантов базирования одной линзы не так уж велико – их всего четыре, двух линз – шестьдесят четыре, а трех – пятьсот двенадцать, т.е. уже достаточно много. Выбор самого оптимального из них – задача немалой сложности.

Решение этой задачи обычно связано с проведением точностных расчетов и совершенным знанием условий производства. Без таких знаний вероятность правильного выбора схемы базирования линз может оказаться ничтожно малой. Чтобы лучше понять и в какой-то степени почувствовать этот этап проектирования, обратимся к такому понятию как технологичность конструкции объектива. Это тем более важно, что проектирование без учета требований технологичности не позволит правильно скомпоновать и забазировать линзы объектива.

При всех расчетах, сопутствующих выбору схем базирования, конструктор всегда, в уме, задает себе множество вопросов и пытается сразу или поэтапно найти на них ответы. Например, как будет изготавливаться деталь, на каком оборудовании, как будут собираться узлы и во что это обойдется. Для того чтобы обеспечить решение всех этих задач, обратимся к определению технологичности и требованиям, которые оно предъявляет к конструкции объектива.

5.4 Понятие технологичности объективов

Технологичность – это свойство конструкции, позволяющее получать наиболее рациональными способами изделия с заданными выходными параметрами при наименьших затратах труда, средств, материалов и времени.

Свойство это закладывается в конструкцию объектива при его проектировании. Насколько это важно, говорит тот факт, что все правила и показатели, определяющие сегодня качественную и количественную оценку технологичности конструкции связаны в единую систему технологической подготовки производства (ЕСТПП). Далее рассмотрим только те требования к технологичности, которые представляют наибольший интерес для людей, занятых проектированием и изготовлением объективов.

1. Конструкция объектива должна иметь возможность расчленяться на рациональное число составных узлов, допускающих их независимую сборку, юстировку, контроль и испытания.
2. Конструкция объектива должна обеспечивать возможность компоновки ее из стандартных и унифицированных узлов. При этом компоновочная схема объектива должна быть как можно более простой.
3. Сборка объектива не должна обуславливать применение сложного технологического оснащения.
4. Компоновка узлов объектива должна обеспечивать удобный доступ к местам, требующим контроля, юстировки и других работ.
5. Компоновка сборочных узлов должна обеспечивать сборку всего объектива без промежуточных разборок и повторных сборок.

6. Виды используемых соединений, их конструкция и месторасположения должны соответствовать требованиям механизации и автоматизации сборочных работ.
7. Необходимо стремиться к обеспечению единства конструкторских, технологических и контрольно-измерительных баз.
8. Количество деталей, поверхностей и мест соединений отдельных узлов в общем виде должно быть наименьшим.
9. Конструкция объектива должна обеспечивать преимущественно геометрическое замыкание между соединяемыми деталями.
10. При перемещении одной детали в другой необходимо предотвращать одновременное начало контактирования нескольких соединяемых поверхностей.
11. Соединение узлов не должно требовать сложной и необоснованно точной обработки сопрягаемых поверхностей.
12. Точность расположения составных частей объектива должна быть расчетно обоснована и взаимосвязана с точностью их изготовления.
13. Расчет размерных цепей следует проводить, используя вероятностный метод.
14. Выбор метода сборки для заданного объема выпуска и типа производства должен проводиться на основании расчета и анализа размерных цепей.
15. Пределы регулирования и параметры компенсаторов должны рассчитываться на основании расчета размерных цепей и оценки изменения качества изображения в центре или по полю.
16. Компенсирующие, центрирующие и фиксирующие устройства должны иметь простую конструкцию и свободный доступ для рабочего и контрольного инструмента.

Отработка технологичности конструкции должна проводиться на всех этапах проектирования и изготовления объектива. При этом должны комплексно учитываться все требования, начиная от выбора принципиальной схемы объектива и кончая ее сборкой и юстировкой.

5.5 Примеры решения схем базирования линз в объективах

Итак, перечень основных требований, выполнение которых позволит решить задачу создания технологичной конструкции, мы имеем. Но путей решения этой задачи великое множество.

Обратимся снова к примерам.

5.5.1 Пример 1

На рис. 5.6 представлена оптическая схема широкоугольного фотографического объектива Т-56.

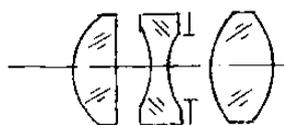


Рис. 5.6. Оптическая схема объектива Т-56

Предполагаемый объем выпуска этого объектива 200 000 штук в год. Анализ геометрических размеров линз показал, что объектив вполне может изготавливаться в условиях массового производства. Предварительный анализ таблицы с коэффициентами влияния децентрировок оптических поверхностей на кривизну по краю поля зрения ($y'=19$ мм) позволил выявить оптические поверхности объектива наиболее сильно влияющие на кривизну. Это третья и четвертая поверхности (табл. 5.1.).

Таблица 5.1

Оптическая поверхность						
№ поверхности	1	2	3	4	5	6
коэф. влияния А	3	0,26	4,2	-4,2	0,14	-3,5

Коэффициенты влияния разворотов оптических поверхностей и линз здесь не приведены. Они легко рассчитываются по данным таблицы 5.1 и далее приводятся в тексте без ссылок на эти расчёты.

Перейдем к поиску такого компоновочного решения, которое позволит получить минимально возможную кривизну на краю поля зрения и будет достаточно простым и технологичным.

Из оптической схемы объектива (рис. 5.6) следует, что световые диаметры линз по своим величинам очень близки друг к другу. Следовательно, посадочные диаметры линз в принципе могут быть сделаны одинаковыми. Изготовление же линз одного диаметра всегда выгодно для оптического производства, особенно в случае серийного и массового выпуска объектива.

Применение линз одного диаметра позволяет выбрать в качестве корпуса объектива цилиндрическую трубу, что опять-таки экономически целесообразно, т.к. позволяет использовать для обработки корпусов самые производительные на сегодня токарно-револьверные автоматы. Таким образом, компоновочное решение объектива оказывается достаточно простым (рис. 5.7). Проанализируем его.

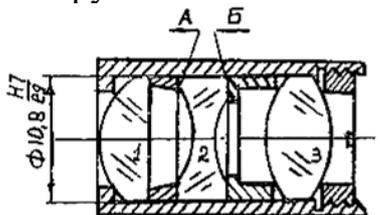


Рис. 5.7. Первое решение конструкции объектива Т-56

Для уменьшения светорассеяния все нерабочие поверхности линз (цилиндрические пояски, фаски на ребрах, торцевые поверхности) покрывают фасочными эмалями. На большинстве отечественных заводов они наносятся вручную кисточкой. При этом нет никаких гарантий, что слой эмали по всему диаметру линз будет нанесен равномерно по толщине. Измерения показали, что неравномерность слоя может колебаться от нескольких сотых до нескольких десятых долей миллиметра.

Рассмотрим вторую линзу. Кроме цилиндрического пояска фасочная эмаль должна быть нанесена на обе торцевые поверхности линзы *A* и *B*. Неравномерный слой эмали на этих поверхностях, приведет к заклону второй линзы и опирающихся на нее диафрагмы *D* и третьей линзы. Пусть неравномерность слоя эмали на поверхности *A* составляет 0,02 мм. Тогда угол заклона второй и третьей линз будет равен

$$\gamma_{2+3} = \frac{0,02}{10,8} = 6,2'$$

Угол заклона третьей линзы от неравномерности слоя эмали на поверхности *B* будет составлять также $\gamma_3 = 6,2'$.

Оценим величину кривизны на краю поля зрения, возникающую от разворотов линзы, вызванных неравномерностью эмалевого покрытия. Так как коэффициент влияния разворота второй и третьей линз равен 16 мкм/мин, то кривизна по краю поля зрения будет равна

$$K_{KP} = 16 \cdot 6,2 = 98,8 \text{ мкм} \approx 0,1 \text{ мм.}$$

Коэффициент влияния разворотов третьей линзы равен 13,4 мкм/мин. Поэтому кривизна от разворота третьей линзы составит

$$K_{KP} = 13,4 \cdot 6,2 = 83 \text{ мкм} \approx 0,083 \text{ мм.}$$

Если просуммировать кривизну на краю поля зрения, возникающую от разворотов двух линз, то получим величину, близкую к 0,2 мм. Это слишком большая величина. Нельзя забывать, что кроме этих погрешностей существует немало других, о которых мы поговорим позже.

Выходом из создавшегося положения может явиться устранение эмали с поверхности *A*. Это не вызовет заметного увеличения светорассеяния, ввиду того, что всю поверхность *A* закрывает прокладное кольцо, и прямого попадания света на нее не происходит. Вторичное же отражение света от поверхности *A* несет слишком мало энергии, чтобы заметно увеличить светорассеяние.

Однако, влияние оставшегося угла заклона второй линзы от неравномерности покрытия на ее торцевой поверхности *B* еще достаточно велико. Убрать его полностью мы не можем, т.к. оно сильно влияет на светорассеяние объектива. Кроме того, отсутствие покрытия может заметно ухудшить товарный вид изделия, т.к. при наблюдении объектива спереди будет хорошо просматриваться в виде светлого широкого кольца.

Имея это в виду, целесообразно рассмотреть другие варианты базирования линз в объективе.

Рассмотрим схему объектива, представленную на рис.5.8.

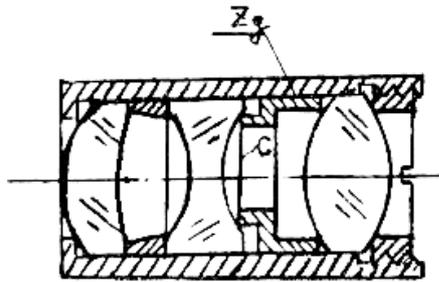


Рис. 5.8. Второе решение конструкции объектива Т-56

Здесь приведена такая схема базировки, при которой диафрагма своим опорным торцом *C* упирается в оптическую поверхность второй линзы. В этой ситуации диафрагма вместе с третьей линзой может развернуться в своем радиальном зазоре Z_q вокруг центра кривизны второй поверхности второй линзы на угол

$$\gamma_{zq} = \frac{Z_q}{\sqrt{r_{2-2}^2 - \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}} = \frac{0,046}{\sqrt{10,5^2 - \left(\frac{10,8}{2}\right)^2}} = 17'.$$

Кривизна на краю поля от такого разворота третьей линзы увеличится на

$$K_K = A_{2-2} \cdot \gamma_{zq} = 25 \cdot 17' = 425 \text{ мкм} = 0,425 \text{ мм}.$$

Это большая величина.

Рассмотрим другой вариант компоновки объектива Т-56 (рис.5.9).

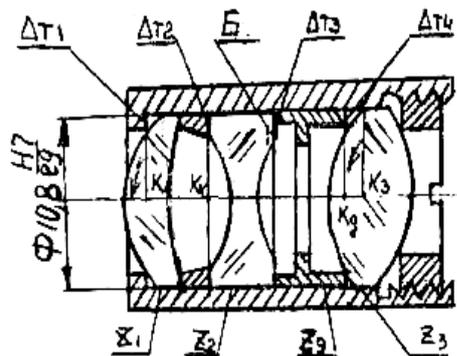


Рис. 5.9. Третье решение конструкции объектива Т-56

В этой конструкции диафрагма опирается на плоскую фаску *B*, но не по всей ее поверхности, а по узкой полоске шириной не более 0,5 мм. Вся остальная часть поверхности (на рис.5.9 она помечена штриховой линией) покрыта фасочной эмалью. При таком конструктивном решении влияние эмали на заклон третьей линзы полностью отсутствует. Поэтому примем этот вариант за базовый и рассчитаем кривизну на краю поля зрения, возникающую от всех технологических погрешностей, вызывающих децентрировку линз.

1. Торцевое биение корпуса Δ_{T1} .

Поскольку посадочный диаметр равен $\varnothing 10,8$ мм и торец корпуса будет обрабатываться с одной установки, то для торцевого биения корпуса можно записать $\Delta_{T1} \cong 0$.

2. Разворот и смещение в зазорах Z_1, Z_2, Z_q, Z_3 .

Для расчета дисперсий кривизны, возникающей от разворотов и смещений в поперечных зазорах, воспользуемся формулами параграфа 4.4.

$$A_{1+2+3, C1-1} = -0,042 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}; A_{2+3, C2-1} = -0,356 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}; A_{\perp 2} = 0; A_{\perp 3} = -3,36;$$

$$A_{3, C1-3} = 0,076; D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} K_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{Z1}}{2} \right)^2$$

где - $K_{\gamma} = 1,6$, а величина угла разворота γ_{Z1} первой линзы в зазоре Z_1 определяется посадкой линзы в корпусе объектива.

Пусть все линзы, кольцо и диафрагма изготавливаются в размер

$$\varnothing 10,8 \frac{\text{H7}}{\text{e9}} \begin{pmatrix} +18 \\ 0 \\ -32 \\ -75 \end{pmatrix}.$$

Тогда предельное значение зазора $2Z_1 = \Delta_{00} + \Delta_{0л} + \sqrt{\delta_{00}^2 + \delta_{0л}^2} = 9 + 53,5 + \sqrt{9^2 + 21,5^2} = 77$ мкм.

Здесь Δ_{00} и $\Delta_{0л}$ – координаты середины полей рассеяния оправы и линзы, δ_{00} и $\delta_{0л}$ – половины полей рассеяния оправы и линзы.

Отсюда $\gamma_{Z1} = \frac{Z_1}{C_{1-1} K_1} = \frac{Z_1}{r_{1-1} - 1} = \frac{0,0385}{10,5 - 1} = 13,5$ мин.

Следовательно, дисперсия угла разворота составит

$$D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} 1,6^2 \left(\frac{13,5}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 117 \text{ мин}^2.$$

Дисперсию рассчитаем по формуле

$$D(\gamma_K) = D(\gamma_{ZK}) - \left(\frac{C_{1-1} K_K}{C_{2-1} K_K} \right)^2 \cdot D(\gamma_{Z1}),$$

$$\text{где } D(\gamma_{ZK}) = \frac{1}{9} K_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{ZK}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,36^2 \left(\frac{0,0385}{387 \cdot 2 \cdot 0,0003} \right)^2 = \frac{1}{9} 0,051 \text{ мин}^2;$$

$$\left(\frac{C_{1-1} K_K}{C_{2-1} K_K} \right)^2 = \left(\frac{9,5}{387} \right)^2 = 6 \cdot 10^{-4}.$$

Отсюда

$$D(\gamma_K) = \frac{1}{9} 0,051 - 6 \cdot 10^{-4} \frac{1}{9} 117 = -\frac{1}{9} 0,02 \text{ мин}^2;$$

$$D(\Delta C_{\perp Z2}) = \frac{1}{9} K_{\perp}^2 \left(\frac{Z_2}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,2^2 \left(\frac{38,5}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 0,00053 \text{ мм}^2;$$

$$D(\Delta C_{\perp 3}) = \frac{1}{9} K_{\perp}^2 \left(\frac{Z_3}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,2^2 \left(\frac{38,5}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 0,00053 \text{ мм}^2;$$

$$D(\gamma_{Z3}) = \frac{1}{9} K_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{Z3}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,36^2 \left(\frac{0,0385}{61 \cdot 2 \cdot 0,0003} \right)^2 = \frac{1}{9} 2 \text{ мин}^2.$$

3. Теперь рассмотрим влияние торцевых биений.

Непараллельность торцов прокладного кольца обозначим Δ_{TK} .

Поскольку кольцо будут делать с двух установок, то можно смело задать $\Delta_{TK} = 0,02 \text{ мм}$.

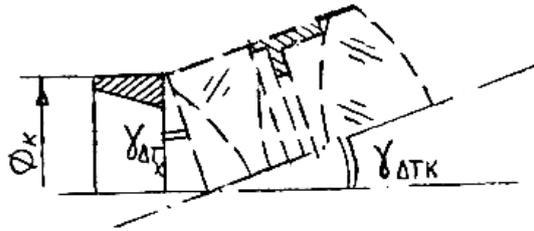


Рис.5.10. Влияние торцевого биения кольца

Тогда заклон одного торца кольца относительно другого можно рассчитать по формуле:

$$\gamma_{\Delta TK} = \frac{\Delta_{TK}}{\varnothing_K} = \frac{0,02}{10,8} = 6,2'.$$

Дисперсия заклона составит

$$D(\gamma_{\Delta TK}) = \frac{1}{9} K_{\Delta T}^2 \left(\frac{\gamma_{\Delta TK}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,13^2 \left(\frac{6,2}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2.$$

4. Непараллельность торцов во второй линзе обозначим Δ_{T2} . Пусть $\Delta_{T2} = 0,02$.

Тогда $\gamma_{\Delta T2} = 6,2'$; $D(\gamma_{\Delta T2}) = \frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$.

5. Непараллельность торцов диафрагмы обозначим $\Delta_{T\partial}$. Пусть, как и в предыдущем случае, $\Delta_{T\partial} = 0,02$.

Тогда $\gamma_{\Delta T\partial} = 6,2'$; $D(\gamma_{\Delta T\partial}) = \frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$.

Сведем полученные значения дисперсий в таблицу 5.2 и рассчитаем дисперсии кривизны от всех заклонов.

Таблица 5.2

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	$A^2 \times D$
$2Z_1=93\text{мкм}$	γ_{Z1}	$\frac{1}{9} 117 \text{ мин}^2$	-0,042	-0,00176	$\frac{1}{9} 0,2$
$2Z_K=93\text{мкм}$	γ_K	$\frac{1}{9} 0,02 \text{ мин}^2$	-0,356	0,127	$\frac{1}{9} 0,0025$
$2Z_2=93\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z2}$	$\frac{1}{9} 0,00053 \text{ мм}^2$	≈ 0	0	0
$2Z_\delta=93\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z3}$	$\frac{1}{9} 0,00053 \text{ мм}^2$	3,36	11,3	$\frac{1}{9} 0,006$
$2Z_3=93\text{мкм}$	γ_{Z3}	$\frac{1}{9} 2 \text{ мин}^2$	0,076	0,006	$\frac{1}{9} 0,012$
$\Delta_{TK}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta TK}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,016	$2,56 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0032$

Продолжение табл.5.2

$\Delta_{T2}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T2}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,013	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0021$
$\Delta_{T\delta}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T\delta}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,018	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0041$
					$\sum \frac{1}{9} 0,23 \text{ мм}^2$

Допустимое значение кривизны $2\delta_K$ будет равно

$$2\delta_K = \frac{6\sqrt{D \cdot A^2}}{K_{кр}} = \frac{6\sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,23}}{1,14} = 0,84 \text{ мм.}$$

Это очень большая величина.

Статистические исследования кривизны и разрешающей способности показали, что в объективах с относительным отверстием 1:5,6 значение кривизны для точки $y'=19 \text{ мм}$ должно быть не более $0,3 \div 0,35 \text{ мм}$. При больших значениях разрешающая способность на краю поля зрения объектива выходит за рамки требования ТУ.

Из таблицы 5.2 также следует, что основную долю в дисперсию кривизны вносит разворот первой линзы в зазоре Z_1 . Поэтому, если бы удалось уменьшить его величину, то проблема с кривизной значительно упростилась бы.

При решении этой задачи можно пойти двумя путями: либо ужесточить посадку первой линзы в корпусе, либо попытаться найти другую схему базирования линз. Первый вариант, как правило, крайне нежелателен. Поэтому целесообразно найти другой вариант схемы базирования линз.

Если внимательно посмотреть на табл.5.2, то можно увидеть, что коэффициент влияния разворота всей оптики объектива вокруг центра кривизны первой поверхности первой линзы в 8,2 раза меньше коэффициента

влияния разворота первой линзы вокруг центра кривизны ее второй поверхности.

Но при одном и том же радиальном зазоре Z_1 угол разворота в первом случае будет примерно в 37 раз больше чем во втором. Следовательно, производить базировку на вторую поверхность первой линзы все же выгоднее, чем на первую. В связи с этим рассмотрим новую схему базирования линз в объективе, представленную на рис.5.11.

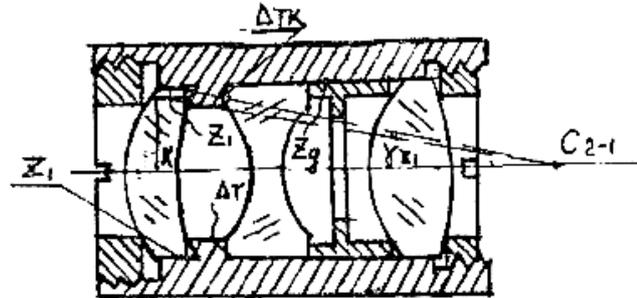


Рис. 5.11. Четвертое решение конструкции объектива Т-56

Рассчитаем для этого варианта дисперсию кривизны.

Угол разворота первой линзы в радиальном зазоре Z_1 составит (рис.5.12).

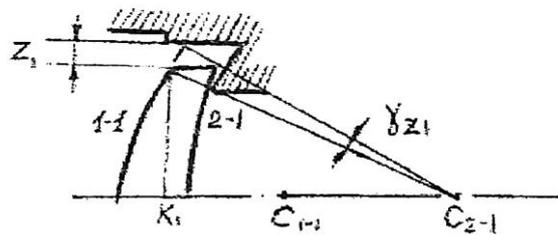


Рис. 5.12. Угол разворота первой линзы

$$\gamma_{z1} = \frac{Z_1}{K_1 C_{2-1}} = \frac{0,0385}{387} = 0,3 \text{ мин},$$

$$D(\gamma_{z1}) = \frac{1}{9} K_\gamma^2 \left(\frac{\gamma_{z1}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,6^2 \left(\frac{0,3}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 0,06 \text{ мин}^2.$$

Радиальное биение посадочного места под первую линзу равно $2\Delta e = 0,02 \text{ мм}$.

Дисперсия децентрировки при этом составит

$$D(\Delta e) = \frac{1}{9} 1,14^2 \left(\frac{10}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 32,5 \text{ мкм}^2.$$

Поскольку блок, в который входят вторая линза, диафрагма и третья линза конструктивно не изменился, то повторный расчет заклонов и дисперсий заклонов для них проводить не будем. Результаты расчетов

возьмем из предыдущей схемы базирования и снова построим таблицу расчета суммарной кривизны (табл.5.3)

Таблица 5.3

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	$A^2 \times D$
$2Z_1=93\text{мкм}$	γ_{Z1}	$\frac{1}{9}0,6 \text{ мин}^2$	0,343	0,12	$\frac{1}{9}0,017$
$\Delta e=0,01\text{мм}$	$\Delta C_{\perp 1}$	$\frac{1}{9}0,0000325 \text{ мм}^2$	3,26	10,63	$\frac{1}{9}0,000345$
$2Z_2=93\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z2}$	$\frac{1}{9}0,00053 \text{ мм}^2$	≈ 0	0	0
$2Z_\theta=93\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z3}$	$\frac{1}{9}0,00053 \text{ мкм}^2$	3,36	11,3	$\frac{1}{9}0,006$
$2Z_3=93\text{мкм}$	γ_{Z3}	$\frac{1}{9}2 \text{ мин}^2$	0,076	0,006	$\frac{1}{9}0,012$
$\Delta_{TK}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta TK}$	$\frac{1}{9}12,38 \text{ мин}^2$	0,016	$2,56 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9}0,0032$
$\Delta_{T2}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T2}$	$\frac{1}{9}12,38 \text{ мин}^2$	0,013	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9}0,0021$
$\Delta_{T\theta}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T\theta}$	$\frac{1}{9}12,38 \text{ мин}^2$	0,018	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9}0,0041$
					$\sum \frac{1}{9}0,035\text{мм}^2$

Допустимое отклонение кривизны будет равно:

$$2\delta_K = \frac{6\sqrt{D \cdot A^2}}{K_{кр}} = \frac{6\sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,035}}{1,14} = 0,33 \text{ мм.}$$

Полученная величина кривизны по краю поля примерно в два с половиной раза меньше, чем в предыдущем варианте. Но и она еще достаточно велика.

Обратимся к последней колонке табл. 5.3. Из сопоставления дисперсий кривизны видно, что наибольший прирост суммарного значения кривизны происходит за счет погрешностей $2Z_1$, $2Z_\theta$, $2Z_3$. Попробуем уменьшить их величины. Изменим величину посадки для всех линз и диафрагмы.

$$\varnothing 10,8 \frac{H7}{f8} \begin{pmatrix} +18 \\ 0 \\ -16 \\ -43 \end{pmatrix}.$$

Тогда предельное значение зазора будет равно:

$$2Z_1 = 9 + 19,5 + \sqrt{9^2 + 13,5^2} = 45 \text{ мкм.}$$

$$\gamma_{Z1} = \frac{0,0225}{387} = 0,194 \text{ мин}; D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} 1,6^2 \left(\frac{0,194}{2}\right)^2 = \frac{1}{9} 0,024 \text{ мин}^2;$$

$$\Delta C_{\perp Z3} = Z_2 = 22,5 \text{ мкм}; D(\Delta C_{\perp Z3}) = \frac{1}{9} 1,2^2 \left(\frac{22,5}{2}\right)^2 = \frac{1}{9} 0,00018 \text{ мм}^2;$$

$$\gamma_{Z3} = \frac{0,0225}{61} = 1,23 \text{ мин}; D(\gamma_{Z2}) = \frac{1}{9} 1,36^2 \left(\frac{1,23}{2}\right)^2 = \frac{1}{9} 0,7 \text{ мин}^2.$$

Составим новую таблицу 5.4.

Таблица 5.4

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	$A^2 \times D$
$2Z_1=61\text{мкм}$	γ_{Z1}	$\frac{1}{9} 0,024 \text{ мин}^2$	0,343	0,12	$\frac{1}{9} 0,0028$
$\Delta e=0,01\text{мм}$	$\Delta C_{\perp 1}$	$\frac{1}{9} 0,0000325 \text{ мм}^2$	3,26	10,63	$\frac{1}{9} 0,000345$
$2Z_2=61\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z2}$	$\frac{1}{9} 0,00018 \text{ мм}^2$	≈ 0	0	0
$2Z_0=61\text{мкм}$	$\Delta C_{\perp Z3}$	$\frac{1}{9} 0,00018 \text{ мм}^2$	3,36	11,3	$\frac{1}{9} 0,0020$
$2Z_3=61\text{мкм}$	γ_{Z3}	$\frac{1}{9} 0,7 \text{ мин}^2$	0,076	0,006	$\frac{1}{9} 0,0042$
$\Delta_{TK}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta TK}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,016	$2,56 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0032$
$\Delta_{T2}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T2}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,013	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0021$
$\Delta_{T0}=0,02\text{мм}$	$\gamma_{\Delta T0}$	$\frac{1}{9} 12,38 \text{ мин}^2$	0,018	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{9} 0,0041$
					$\sum \frac{1}{9} 0,019 \text{ мм}^2$

Рассчитаем допустимое отклонение кривизны

$$2\delta_K = \frac{6 \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,019}}{1,14} = 0,24 \text{ мм.}$$

Таким образом, в последнем варианте объектива достигнута вполне допустимая кривизна поля. Поэтому дальнейшие поиски новых систем базирования линз можно не проводить. Следует только отметить, что во всех приведенных расчетах мы не принимали во внимание собственную децентрировку оптических поверхностей в линзах. Но они, безусловно, скажутся на величине кривизны по полю и, следовательно, необходимо определить это влияние (табл. 5.5).

В исходном варианте примем децентрировки всех оптических поверхностей равными $\Delta C_{1-1} = \Delta C_{1-2} = \Delta C_{2-2} = \Delta C_{2-3} = \Delta C_i = 0,01$ мм.

Тогда дисперсия децентрировки составит

$$D(\Delta C_i) = \frac{1}{9} K_C^2 \left(\frac{\Delta C_i}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,14^2 \left(\frac{0,01}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 0,0000325 \text{ мм}^2$$

Таблица 5.5

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	$A^2 \times D$
ΔC_{1-1}	ΔC_{\perp}	$\frac{1}{9} 0,0000325$	3	9	$\frac{1}{9} 2,9 \cdot 10^{-4}$
ΔC_{1-2}	ΔC_{\perp}	$\frac{1}{9} 0,0000325$	4,2	17,64	$\frac{1}{9} 5,7 \cdot 10^{-4}$
ΔC_{2-1}	ΔC_{\perp}	$\frac{1}{9} 0,0000325$	4,2	17,64	$\frac{1}{9} 5,7 \cdot 10^{-4}$
ΔC_{2-3}	ΔC_{\perp}	$\frac{1}{9} 0,0000325$	3,5	12,25	$\frac{1}{9} 4 \cdot 10^{-4}$
					$\sum \frac{1}{9} 0,0018$

Эта добавка к дисперсии кривизны от других погрешностей увеличит допустимую кривизну до значения

$$2\delta_K = \frac{6 \sqrt{\frac{1}{9} \cdot (0,019 + 0,0018)}}{1,14} = 0,25 \text{ мм,}$$

что вполне допустимо для условий крупносерийного производства.

5.5.2. Пример 2

В этом примере обратимся снова к фотообъективу Т-57. В качестве выходных параметров, подлежащих контролю, наряду с кривизной на краю поля зрения ($y'=19$ мм), будем рассматривать также кому децентрировки в центре поля зрения ($y'=0$ мм) и изменение контраста на частоте 70 мм^{-1} .

При составлении технического задания на расчет объектива перед конструктором была поставлена задача создания такой оптической схемы, в которой получение межлинзовых промежутков осуществлялось бы упором линз друг на друга без применения промежуточных колец.

Вопрос, на который в первую очередь должен быть дан ответ при анализе оптической схемы объектива, заключается в выяснении способа установки линз в корпусе объектива и выявлении той стороны, с которой их необходимо крепить.

Просматривая оптический выпуск, было отмечено, что световые высоты на оптических поверхностях, уменьшаются от первой линзы к третьей. Поэтому совершенно логично производить засыпку линз в корпус объектива слева направо: вначале третью, затем вторую, а потом первую линзу и крепить их одной гайкой.

Второй, но не менее важный вопрос, заключается в том, чтобы выяснить, как выгоднее базировать вторую линзу на третьей или первую на второй. Чтобы ответить на него обратимся к рис.5.13, на котором представлены два варианта решения схемы базирования вышеуказанных линз.

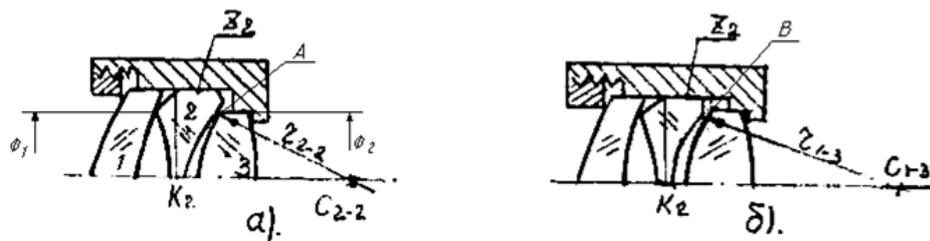


Рис. 5.13. Схемы базирования линз объектива Т-57, а) вариант 1; б) вариант 2

На рис. 5.13а представлен объектив, вторая линза которого своей второй оптической поверхностью опирается на ребро А третьей линзы, а на рис.5.13б - объектив, вторая линза которого своим ребром В опирается на первую оптическую поверхность третьей линзы.

В первом случае вторая и первая линзы будут разворачиваться в зазоре Z_2 вокруг центра кривизны второй поверхности второй линзы C_{2-2} на угол

$$\gamma'_{z_2} = \frac{Z_2}{C_{2-2}K_2} = \frac{0,021}{10,5} = 6,6';$$

во втором случае – вокруг центра кривизны первой поверхности третьей линзы C_{1-3} на угол

$$\gamma''_{z_2} = \frac{Z_2}{C_{1-3}K_2} = \frac{0,021}{21,0} = 3,3'.$$

При практически одинаковых коэффициентах влияния (0,6 и 0,7) кривизна по полю во втором случае будет в два раза меньше, чем в первом. Казалось бы, второй вариант объектива и надо закладывать в конструкцию. Однако, предварительная консультация с оптиками-технологами позволила выявить существенный нюанс, полностью изменивший отношение к первому варианту.

Дело в том, что достаточно точные значения воздушных промежутков ($\pm 0,02$) могут быть получены только в том случае, если точно изготовлены диаметры фасок второй линзы $\varnothing_1, \varnothing_2$. Такое возможно при применении сложной комплексной фрезы или при изготовлении с одной установки. В первом же варианте задача значительно упрощается, т.к. первый воздушный

промежуток получается за счет фаски \varnothing_1 , а второй – уже за счет точности округления третьей линзы, что технологически значительно проще.

Таким образом, несмотря на то, что второй вариант конструкции обеспечивает меньшую кривизну поля от разворота линз в зазоре Z_2 , первый вариант оказался более технологичным, что и сыграло решающую роль при выборе схемы базировки объектива.

Теперь обратимся к рис. 5.14, на котором представлены два варианта базировки первой линзы.

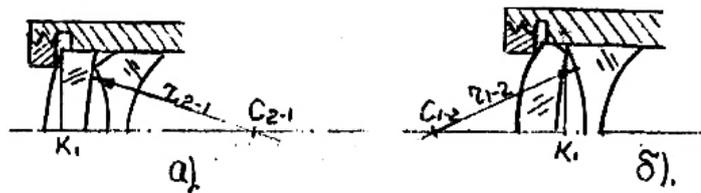


Рис. 5.14. Схемы базировки первой линзы объектива Т-57

В первом случае (рис.5.14 а) разворот первой линзы будет происходить вокруг центра кривизны второй поверхности первой линзы C_{2-1} на угол

$$\gamma_{Z1} = \frac{Z_1}{C_{2-1}K_1} = \frac{0,021}{20,2} = 3,46';$$

во втором случае (рис.5.14б) разворот будет происходить вокруг центра кривизны первой поверхности второй линзы C_{1-2} на угол

$$\gamma_{Z1} = \frac{Z_1}{C_{1-2}K_1} = \frac{0,021}{29,84} = 2,35'.$$

Коэффициенты влияния разворотов линз на кривизну поля для этих двух случаев будут соответственно равны 0,012 и 0,027. Тогда кривизна поля для первого варианта составит $K_{KP}^I = 0,012 \cdot 3,46 = 0,041$ мм, а для второго - $K_{KP}^{II} = 0,027 \cdot 2,35 = 0,063$ мм, что заметно больше.

Поэтому в окончательной конструкции был принят первый вариант и объектив стал выглядеть следующим образом (рис.5.15):

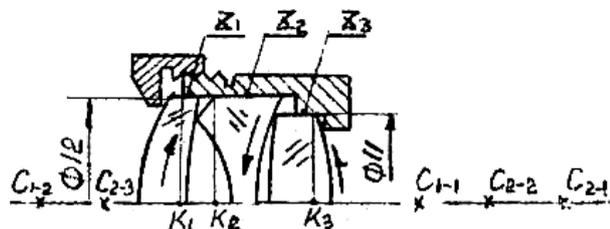


Рис.5.15. Окончательный вариант конструкции объектива Т-57

Проанализируем изменения выходных параметров объектива, зависящие от разворотов линз в зазорах Z_1 , Z_2 и Z_3 , имея ввиду, что децентрировки и торцевые биения линз близки к нулю с погрешностью 1,5-2 мкм. Из экспериментальных данных известны верхние пределы полей

рассеивания зазоров линз, они составляют $Z_{1,max}=16,5$ мкм; $Z_{2,max}=25,5$ мкм; $Z_{3,max}=21$ мкм.

Под действием усилия, развиваемого гайкой, все три линзы объектива начнут разворачиваться в своих радиальных зазорах в направлениях, указанных стрелками (рис.5.15). Третья линза развернется вокруг центра кривизны своей опорной второй поверхности на угол

$$\gamma_{Z3,max} = \frac{Z_{3,max}}{C_{2-3}K_3} = \frac{0,021}{19,75} = 3,5'.$$

Дисперсия угла разворота третьей линзы определяется выражением (4.71), где величина коэффициента относительного рассеяния определена экспериментально и составляет $k_{\gamma_3} = 1,56$. В результате расчетов получим

$$D(\gamma_{Z3}) = \frac{1}{9} k_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{Z3,max}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,56^2 \left(\frac{3,5}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 7,45 \text{ мин}^2.$$

Рассчитаем дисперсию суммарного угла поворота второй линзы по формуле (4.72) при $k_{\gamma_3} = 1,34$

$$\gamma_{Z2,max} = \frac{Z_{2,max}}{C_{2-2}K_2} = \frac{0,0255}{10,5} = 8,1'; \quad D(\gamma_{Z2}) = \frac{1}{9} 1,34^2 \left(\frac{8,1}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 29,45 \text{ мин}^2.$$

$$\text{Итак, } D(\gamma_2) = D(\gamma_{Z2}) + \left(\frac{C_{2-3}K_2}{C_{2-2}K_2} \right)^2 \cdot D(\gamma_{Z3}),$$

Следовательно,

$$D(\gamma_2) = \frac{1}{9} 29,45 + \left(\frac{17,2}{10,5} \right)^2 \cdot \frac{1}{9} 7,45 = \frac{1}{9} 49,44 \text{ мин}^2.$$

Далее рассчитаем дисперсию суммарного угла поворота первой линзы, подставим в (4.71) полученные экспериментальным путем значения параметров: $k_{\gamma_1} = 1,3$

$$\gamma_{Z1,max} = \frac{Z_{1,max}}{C_{2-1}K_1} = \frac{0,0265}{20,2} = 4,37 \text{ мин.}$$

Поэтому

$$D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} 1,3^2 \left(\frac{4,37}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 8,07 \text{ мин}^2.$$

$$C_{2-3}K_1 = 12,5 \text{ мм}; \quad C_{2-1}K_1 = 20,2 \text{ мм}; \quad C_{2-2}K_1 = 14,07 \text{ мм};$$

В результате получим

$$D(\gamma_1) = \frac{1}{9} 8,07 - \left(\frac{12,5}{20,2} \right)^2 \cdot \frac{1}{9} 7,45 + \left(\frac{14,07}{20,2} \right)^2 \cdot \frac{1}{9} 49,44 = \frac{1}{9} 29,2 \text{ мин}^2.$$

Занесем результаты вычислений в таблицу 5.6 и проведем расчет кривизны для точки поля $y'=19$ мм.

Таблица 5.6

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	A^2xD
Z_1	γ_1	$-\frac{1}{9} 29,2 \text{ мин}^2$	-0,012	$-1,44 \cdot 10^4$	$\frac{1}{9} 0,0042$
Z_2	γ_2	$-\frac{1}{9} 49,44 \text{ мин}^2$	-0,06	$-36 \cdot 10^4$	$\frac{1}{9} 0,18$
Z_3	γ_3	$-\frac{1}{9} 7,45 \text{ мин}^2$	-0,0034	$-0,116 \cdot 10^4$	$-\frac{1}{9} 0,00008$
					$\sum \frac{1}{9} 0,184 \text{ мм}^2$

$$2\delta_{KP} = \frac{2\sqrt{0,184}}{1,14} = 0,75 \text{ мм.}$$

Как видно из расчета в этом варианте конструкции (рис.5.15) полная кривизна поля $2\delta_{KP}$ очень велика. Это может привести к значительному ухудшению качества изображения на краю поля зрения.

Расшифровка фотографической разрешающей силы в экспериментальной партии объективов полностью подтвердила этот вывод. Из снятых 39 объективов 31% имел разрешающую способность ниже ожидаемого расчетного значения (22 шт./мм). В табл.5.7 приведен расчет комы децентрировки в центре поля зрения.

Таблица 5.7

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	A^2xD
Z_1	γ_1	$-\frac{1}{9} 29,2 \text{ мин}^2$	-2,4	-5,76	$\frac{1}{9} 168,2$
Z_2	γ_2	$-\frac{1}{9} 49,44 \text{ мин}^2$	1,32	1,74	$-\frac{1}{9} 86,1$
Z_3	γ_3	$-\frac{1}{9} 7,45 \text{ мин}^2$	0,21	0,04	$\frac{1}{9} 0,33$
					$\sum \frac{1}{9} 82,4 \text{ мкм}^2$

$$2\delta_K = \frac{2\sqrt{82,4}}{1,14} = 16 \text{ мкм.}$$

Полученная величина комы составляет около 50% от исходного расчета пятна. Это также много.

Экспериментальное измерение комы децентрировки в партии объективов объемом 39 шт. показало, что в наихудших объективах величина комы не превышает значений 0,015 и 0,016 мм. Таким образом, расчетные и экспериментальные результаты измерения комы практически совпадают. Этот факт дает право утверждать, что предлагаемый вероятностный метод

расчета комы децентрировки в центре поля зрения в объективах насыпных конструкций вполне может быть использован на практике.

Приведен расчет изменения контраста на частоте 70 мм^{-1} от децентрировок в центре поля зрения (табл.5.8).

Таблица 5.8

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	A^2xD
Z_1	γ_1	$-\frac{1}{9}29,2 \text{ мин}^2$	1,8	3,24	$-\frac{1}{9}94,61$
Z_2	γ_2	$-\frac{1}{9}49,44 \text{ мин}^2$	1,7	2,9	$-\frac{1}{9}143,3$
Z_3	γ_3	$-\frac{1}{9}7,45 \text{ мин}^2$	-3,41	-11,63	$-\frac{1}{9}86,64$
					$\sum \frac{1}{9}324,5\%$

$$2\delta_k = \frac{2\sqrt{324,5}}{1,42} = 25,4\%.$$

Таким образом, все поле рассеяния контраста равно 25%. Но нас, естественно, больше всего интересует наименьшее значение контраста. Определим его.

Измерения контраста в объективах показали, что с достаточной степенью надежности можно считать, что расчетное, исходное значение контраста K_p на исследуемой частоте очень близко к среднему арифметическому для всей партии объективов (см. рис. 3.4). Если принять это положение и учесть величину коэффициента относительной асимметрии, полученного экспериментально для наименьшего значения контраста K_{min} , то можно записать: $K_{min} = K_p - \alpha\delta\% - \delta\% = K_p - \delta\%(1 + \alpha)$, но, т.к. $K_p=44\%$; $\alpha=0,43$; $\delta\%=12,7\%$, то $K_{min}=44-12,7(1+0,43)=26\%$, что значительно отличается от измеренной величины 21% (см. табл.3.2).

Из таблиц 5.6 и 5.7 следует, что кривизна и кома в предложенном конструктивном решении объектива велики и это ведет к значительному снижению фотографической разрешающей способности как в центре, так и по краю. Из тех же таблиц видно, что основную долю в дисперсию кривизны поля вносит угол поворота второй линзы γ_2 . Поэтому перейдем от этого угла поворота к ее поперечному перемещению.

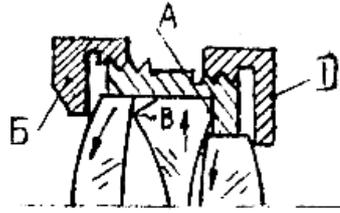


Рис. 5.16. Пятый вариант конструкции объектива Т-57

На рис. 5.16 представлена конструкция объектива, в котором вторая линза своим плоским торцом *A* базируется на торец корпуса объектива. На ее фасочное ребро *B* устанавливается и крепится гайкой *B* первая линза. С противоположной стороны на вторую поверхность второй линзы укладывается третья линза и поджимается гайкой *D*.

Для расчета дисперсий децентрировок воспользуемся формулами раздела 4.4, приведенными в примерах 2 и 3. Измерения величины зазоров в опытной партии объективов дали следующие результаты:

$$Z_{1min} \div Z_{1max} = (6,0 \div 26,5) \text{ мкм}$$

$$Z_{2min} \div Z_{2max} = (7,5 \div 25,5) \text{ мкм}$$

$$Z_{3min} \div Z_{3max} = (4,0 \div 21) \text{ мкм}$$

Поперечное смещение второй линзы $\Delta C_{2\perp}$, а вместе с ней и первой, может произойти на величины соответствующие диапазону измерения радиального зазора. Поэтому для дисперсии смещения $\Delta C_{2\perp}$ получим

$$D(\Delta C_{\perp,1+2}) = \frac{1}{9} K_{\perp c}^2 \left(\frac{Z_{2max}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,2^2 \left(\frac{25,5}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 234,1 \text{ мкм}^2.$$

При поджатии гайкой первая линза объектива может развернуться на угол

$$\gamma_{Z1} = \frac{2Z_1}{C_{2-1}K}$$

Дисперсия такого разворота рассчитывается по формуле (4.71) и будет равна

$$D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} K_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{Z1max}}{2} \right)^2 ; \gamma_{Z1max} = \frac{2Z_{1max}}{C_{2-1}K_1} = \frac{2 \cdot 0,0265}{20,2} = 8,75 \text{ мин.}$$

$$D(\gamma_{Z1}) = \frac{1}{9} 1,3^2 \left(\frac{8,75}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 32,3 \text{ мин}^2.$$

Что касается третьей линзы, то при перемещении второй линзы она будет вместе с ней перемещаться в том же направлении до тех пор, пока не выберет весь свой радиальный зазор. А поскольку наибольшая величина радиального зазора равна 21 мкм, то смещение составит $\Delta C_{\perp 3} = 21 \text{ мкм}$. Наибольшая величина угла разворота третьей линзы будет равна

$$\gamma_{Z3max} = \frac{Z_{2max} - Z_{3max} + 2Z_{3max}}{C_{2-3}K_3} = \frac{0,0465}{19,8} = 7,9 \text{ мин,}$$

а дисперсия составит

$$D(\gamma_{z3}) = \frac{1}{9} K_{\gamma}^2 \left(\frac{\gamma_{z3max}}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 1,56^2 \left(\frac{7,9}{2} \right)^2 = \frac{1}{9} 37,97 \text{ мин}^2.$$

Теперь сведем полученные результаты в табл.5.9 и проведем расчет кривизны поля.

Таблица 5.9

Технолог. погрешность	Вид децентр.	Дисперс. децентр. D	Коэф. влияния A	A^2	$A^2 \times D$
Z_1	$\Delta C_{\perp,1-2}$	$\frac{1}{9} 234,1 \text{ мкм}^2$	3,74	13,9	$\frac{1}{9} 0,003254$
Z_2	γ_{z1}	$-\frac{1}{9} 32,3 \text{ мин}^2$	$-0,012 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$	-0,00014	$\frac{1}{9} 0,0045$
Z_3	γ_{z3}	$-\frac{1}{9} 37,97 \text{ мин}^2$	-0,046	-0,0021	$\frac{1}{9} 0,08$
Z_3	$\Delta C_{\perp,z3}$	$\frac{1}{9} 158,8 \text{ мкм}^2$	$-4,001 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}$	-16	$-\frac{1}{9} 0,00254$
					$\sum \frac{1}{9} 0,085 \text{ мм}^2$

$$2\delta_k = \frac{2\sqrt{0,085}}{1,14} = 0,51 \text{ мм.}$$

Полная кривизна поля оказалась на 32% меньше, чем в исходном варианте.

К сожалению в опытной партии, состоящей из 6 объективов, не удалось измерить кривизну поля на $y'=19 \text{ мм}$, но был измерен контраст на частоте 20 мм^{-1} . Проведенные измерения показали, что среднеквадратическое отклонение контраста составило ($\sigma_0=0,047$) вместо $\sigma_0=0,097$ в исходном варианте, то есть стало в два раза меньше. При этом нижняя граница поля рассеяния поднялась в три с половиной раза и стала равной 0,14 вместо 0,04 в исходном варианте. Таким образом, объективы по своим характеристикам стали заметно лучше.

Из расчетов, проведенных для объектива Т-57, можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика расчета подтверждена экспериментально с достаточной для практических целей точностью.
2. Эту методику можно использовать для расчетов кривизны, комы и контраста в центре поля зрения на выбранных частотах для кино-, фото и телевизионных объективов.

5.5.3. Пример 3.

В этом примере рассмотрим объектив с дифракционно ограниченным качеством изображения.

Объективы с дифракционным качеством изображения в проектном и производственном планах для условий серийного производства

представляют собой достаточно сложные системы, в которых, кроме присущих всем объективам задач, приходится решать ряд дополнительных, связанных с неизбежностью проведения юстировок по нескольким видам aberrаций до определенных уровней. Правильная оценка значений этих уровней становится необходимым и достаточным условием серийного изготовления таких объективов. Но проведение расчетов по заданной величине среднеквадратического отклонения волнового фронта $W_{\text{СКВ}}$ возможно только в том случае, если известны законы вероятностного распределения aberrаций или значения основных характеристик этих распределений.

В предлагаемом параграфе обсуждаются результаты статистического исследования качества изображения объективов суперапохроматов ОА-80/480 с входным зрачком $\varnothing 80$ мм и фокусным расстоянием $f' = 480$ мм, имеющих дифракционно ограниченное качество изображения.

Исследуемый объектив ОА-80/480 является серийно выпускаемым объективом. Ежегодно ОАО «ЛОМО» изготавливало около 200-300 таких объективов. Окончательный контроль aberrаций и качество изображения объективов осуществляется на интерферометре Zygo (длина волны лазера $\lambda = 0,633$ мкм).

Пятилетняя практика изготовления объективов показала, что для получения требуемого качества изображения ($W_{\text{СКВ}} < 0,03\lambda$) достаточно при сборке и юстировке корректировать три aberrации: кому II порядка, вызываемую децентрировками оптических поверхностей; сферическую, являющуюся в основном следствием ошибок изготовления радиусов, толщин линз и воздушных промежутков, и астигматизм, вызываемый местными (ΔN) ошибками изготовления и пережатыми оптических поверхностей. Причем кома и астигматизм оцениваются и юстируются в зеленом свете на оптической скамье по виду дифракционного изображения точки, а юстировка сферической aberrации производится на интерферометре ИКД-100 ($\lambda = 0,63$ мкм) с корректором для зеленой длины волны.

По результатам статистической обработки измерений на рис. 5.17, 5.18, и 5.19 построены полигоны распределений комы, астигматизма и сферической aberrации, а на рис. 5.20 – полигоны распределения среднеквадратической деформации волнового фронта - $W_{\text{СКВ}}$.

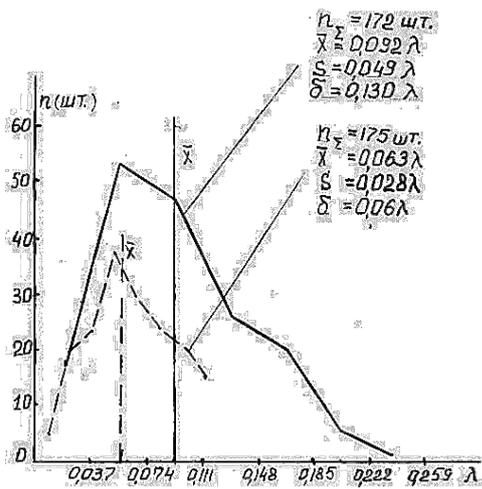


Рис. 5.17.

- Кома до повторных юстировок
- Кома после дополнительных юстировок

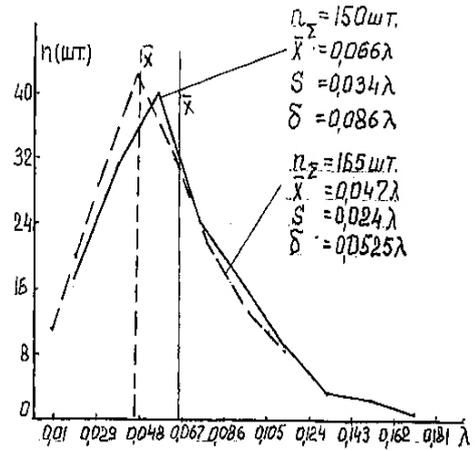


Рис. 5.18.

- Астигматизм до повторных юстировок
- Астигматизм после дополнительных юстировок

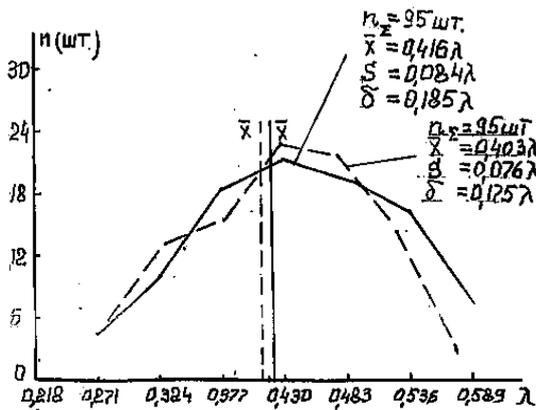


Рис. 5.19.

- Сферическая до повторных юстировок
- Сферическая после дополнительных юстировок

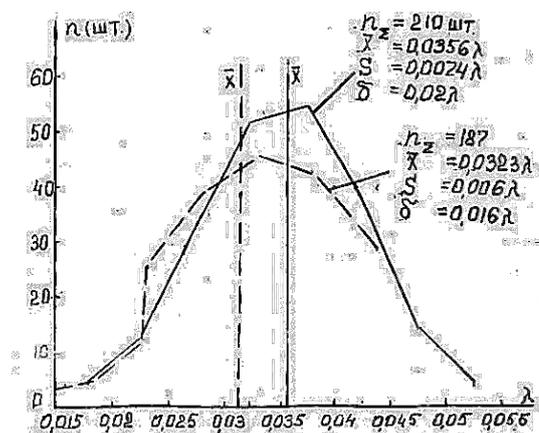


Рис. 5.20.

- $W_{СКВ}$ до повторных юстировок
- $W_{СКВ}$ после дополнительных юстировок

На всех рисунках в верхнем правом углу приведены: n_{Σ} – объем исследуемой выборки в штуках, $\bar{\lambda}$ - среднеквадратическое значение по всей выборке, S – среднеквадратическое значение, δ – половина поля рассеяния.

На каждом рисунке представлены два полигона. Один (сплошная линия) - для случая, когда объективы первый раз поступают в отдел технического контроля (ОТК) после сборки и юстировки; второй (штриховая линия) – когда все объективы, в том числе и те, которые были подвергнуты дополнительным юстировкам, окончательно приходят в ОТК, а затем передаются на склад готовой продукции.

Даже визуальное сравнение этих двух полигонов говорит о том, что они заметно отличаются друг от друга. Так, для комы и астигматизма полигоны распределений, приведенные сплошной линией, очень близки к закону Релея, а штриховой – к усеченному закону Релея. В то же время полигоны распределения сферической aberrации (рис. 5.19) как до дополнительных доводочных юстировок (сплошная линия), так и после (штриховая линия) представляют собой симметричные распределения, близкие к нормальному закону. Что касается распределений среднеквадратической деформации волнового фронта (рис. 5.20), то до дополнительных юстировок полигон распределения имел симметричный характер, очень близкий к нормальному закону, а после юстировок – характер усеченного нормального закона. Полученной в процессе статистических исследований информации вполне достаточно для расчета их числовых характеристик.

При описании волнового фронта, выходящего из объектива из-за малых величин aberrаций и небольшой апертуры, можно пренебречь aberrациями высших порядков. Практика серийного изготовления объективов подтвердила обоснованность такого допущения. Кроме того, учитывая, что деформация волнового фронта от комы децентрировки полностью аналогична коме III порядка, а астигматизм децентрировки в центре поля зрения чрезвычайно мал и при световых диаметрах линз до Ø100 мм деформация волнового фронта в основном определяется астигматизмом на оптических поверхностях и соответствует по структуре астигматизму III порядка. Воспользуемся теорией aberrации III порядка и для числа Штреля $S \geq 0,8$ запишем:

$$\left(\frac{C_{20}^2}{3} + \frac{C_{40}^2}{5} + \frac{C_{11}^2}{4} + \frac{C_{31}^2}{8} + \frac{C_{22}^2}{6} \right) \leq W_{\text{СКВ}}^2, \quad (5.1)$$

где C_{20} , C_{40} , C_{11} , C_{31} , C_{22} – ортогональные полиномы расфокусировки, сферической, поперечного смещения, комы и астигматизма в разложении Цернике; $W_{\text{СКВ}}$ – среднеквадратическое отклонение волнового фронта.

При измерениях объективов фокусировка прибора в плоскость изображения объектива производилась настолько точно, что ортогональный коэффициент дефокусировки Цернике имел величину меньшую, чем $0,005\lambda$, а коэффициент поперечного смещения C_{11} был практически близок к нулю. Поэтому при дальнейшем изложении материала оперировать столь малыми значениями коэффициентов C_{11} и C_{20} мы не будем.

Тогда выражение (5.1) примет вид:

$$\left(\frac{C_{40}^2}{5} + \frac{C_{31}^2}{8} + \frac{C_{22}^2}{6} \right) \leq W_{\text{СКВ}}^2, \quad (5.2)$$

Из формулы (5.2) следует, что $W_{\text{СКВ}}^2$ определяется в основном тремя aberrациями III порядка, для которых

$$C_{40} = \frac{W_{40}}{6}; \quad C_{31} = \frac{W_{31}}{3}; \quad C_{22} = \frac{W_{22}}{2},$$

где W_{40} , W_{31} , W_{22} - соответственно волновые aberrации: сферическая, кома и астигматизм.

Подставив эти значения aberrаций в формулу (5.2), получим:

$$\frac{W_{40}^2}{180} + \frac{W_{31}^2}{72} + \frac{W_{22}^2}{24} \leq W_{\text{СКВ}}^2 \quad (5.3)$$

или

$$0,0055W_{40}^2 + 0,0139W_{31}^2 + 0,0417W_{22}^2 \leq W_{\text{СКВ}}^2. \quad (5.4)$$

Если эта формула верна, то после подстановки в нее среднеарифметических значений aberrаций $\bar{X}(W_{40}) = \bar{X}_{\text{сф.э}} = 0,403\lambda$; $\bar{X}(W_{31}) = \bar{X}_{\text{ком.э}} = 0,063\lambda$; и $X(W_{22}) = \bar{X}_{\text{аст.э}} = 0,047\lambda$, определенных экспериментально (рис. 5.17, 5.18, 5.19), мы должны получить среднеарифметическое $\bar{X}(W_{\text{СКВ}})$, которое должно соответствовать экспериментально полученному значению $\bar{X}_{\text{СКВ.э}} = 0,0323\lambda$ (рис.5.20).

Итак,

$$\begin{aligned} & 0,0055\bar{X}_{\text{сф}}^2 + 0,0139\bar{X}_{\text{ком}}^2 + 0,0417\bar{X}_{\text{аст}}^2 = \\ & = 0,0055 \cdot (0,403\lambda)^2 + 0,0139 \cdot (0,063\lambda)^2 + 0,0417 \cdot (0,047\lambda)^2 = \\ & = 0,00104\lambda^2 \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\bar{X}^2(W_{\text{СКВ}}) = 0,00104\lambda^2.$$

Отсюда

$$\bar{X}(W_{\text{СКВ}}) = 0,03225\lambda.$$

Сравним полученное расчетное значение среднеарифметического $\bar{X}(W_{\text{СКВ}})$ с экспериментальным $\bar{X}_{\text{СКВ.э}} = 0,0323\lambda$. Не трудно видеть, что разница между ними не превышает 1%. Следовательно, выражение (5.3) верно. И его можно использовать для сложения среднеарифметических (истинных) значений aberrаций при определении среднеарифметического значения $W_{\text{СКВ}}$.

Конечно, наибольший интерес представляет дисперсия среднеквадратического отклонения деформации волнового фронта $D(W_{\text{СКВ}})$. Рассчитаем ее величину.

Из формулы (5.4) следует:

$$W_{\text{СКВ}} = \sqrt{0,0055W_{40}^2 + 0,0139W_{31}^2 + 0,0417W_{22}^2} \quad (5.5)$$

Для определения отклонения текущего значения $W_{\text{СКВ}}$ от среднеарифметического $\bar{X}(W_{\text{СКВ}})$, продифференцируем выражение (5.5):

$$\Delta W_{\text{СКВ}} = \frac{1}{\bar{X}(W_{\text{СКВ}})} [0,0055 \cdot \bar{X}(W_{40})\Delta W_{40} + 0,0139 \cdot \bar{X}(W_{31})\Delta W_{31} + 0,0417 \cdot \bar{X}(W_{22})\Delta W_{22}] \quad (5.6)$$

Из формулы (5.6) нетрудно получить:

$$\begin{aligned} D(W_{\text{СКВ}}) &= \frac{1}{\bar{X}^2(W_{\text{СКВ}})} [(0,0055 \cdot \bar{X}(W_{40}))^2 D(W_{40}) + \\ &+ (0,0139 \cdot X(W_{31}))^2 D(W_{31}) + (0,0417 \cdot \bar{X}(W_{22}))^2 D(W_{22})] \end{aligned} \quad (5.7)$$

В этом выражении $D(W_{40}) = 0,0058\lambda^2$, $D(W_{31}) = 0,00078\lambda^2$, $D(W_{22}) = 0,000576\lambda^2$ (рис. 5.17, 5.18, 5.19). Величины $\bar{X}(W_{40})$, $\bar{X}(W_{31})$, $\bar{X}(W_{22})$ и $\bar{X}(W_{СКВ})$ нам уже известны. После подстановки всех этих значений в формулу (5.7) будем иметь:

$$D(W_{СКВ}) = 0,00003\lambda^2.$$

Экспериментальное значение $D(W_{СКВ}) = 0,000033\lambda$ (рис. 5.20). Как видно, отличие расчетного значения от экспериментального невелико.

Из всего сказанного можно сделать следующий вывод. Сложение aberrаций с использованием элемента теории вероятностей дает результаты, совпадающие с экспериментальными данными.

Поэтому, при точностном анализе объективов, когда известны значения aberrаций и допустимые поля их рассеяния, нетрудно оценить поле рассеяния среднеквадратического отклонения деформации волнового фронта. Для этого в выражении (5.7) вместо дисперсий следует поставить их значения через коэффициенты относительного рассеивания "K" и половины полей допусков "δ":

$$D = \frac{1}{9} k^2 \delta^2. \quad (5.8)$$

В результате будем иметь:

$$\delta_{СКВ} = \sqrt{\frac{1}{\bar{X}(W_{СКВ})^2 \cdot k_{СКВ}^2} \cdot \left[(0,0055 \cdot \bar{X}(W_{40}))^2 \cdot k_{сф}^2 \delta_{сф}^2 + (0,0139 \cdot \bar{X}(W_{31}))^2 \cdot k_{ком}^2 \delta_{ком}^2 + (0,0417 \cdot \bar{X}(W_{22}))^2 \cdot k_{аст}^2 \delta_{аст}^2 \right]} \quad (5.9)$$

Значения $\bar{X}(W_{40})$, $\bar{X}(W_{31})$, $\bar{X}(W_{22})$, $\bar{X}(W_{СКВ})$, а также $\delta_{сф}$, $\delta_{ком}$, $\delta_{аст}$ берем из рис.5.17, 5.18, 5.19 и 5.20. Величины $k_{СКВ} = 1,1$; $k_{сф} = 1,3$; $k_{ком} = 1,4$; $k_{аст} = 1,35$ были получены в процессе обработки статистических данных.

После подстановки этих значений в формулу (5.9) будем иметь

$$\delta_{СКВ} = 0,015\lambda.$$

Сравним его с экспериментально полученным $\delta_э = 0,016\lambda$ (рис.5.20). Разница не превышает 6%.

Рассмотрим обратную задачу: по известной величине $W_{СКВ}$ оценим допустимые значения сферической, комы и астигматизма.

Автором были проанализированы несколько наиболее распространенных способов проектных расчетов, основанных на случайном характере погрешностей. Это методы пропорционального влияния, равных допусков, экономического обоснования. К сожалению, результаты этих расчетов не соответствовали экспериментально полученным значениям. Пришлось вводить целый ряд дополнительных коррекционных расчетов, что заметно увеличило объем расчетов и их сложность. Для рассматриваемых нами объективов предлагается несколько другой подход к расчету допустимых значений aberrаций. Практика серийного изготовления объективов с дифракционным качеством изображения показала, что все эти

объективы производятся на пределе технических возможностей производства. Поэтому те величины aberrаций, которые нам удалось получить на сегодня, представляют собой предел возможностей производства. Дальнейшее ужесточение допусков на aberrации бессмысленно, так как их получения мало вероятно. Следовательно, допустимые величины aberrаций в объективах с дифракционным качеством изображения определяются только возможностями производства. Хотя некоторые предпосылки для варьирования этими величинами пусть и в небольших пределах, но все же имеются. Так, если заказчика объективов интересует только суммарная величина среднеквадратического отклонения деформации волнового фронта $W_{СКВ}$, а величины самих aberrаций его интересуют значительно в меньшей степени, то изготовитель имеет возможность варьировать значения юстируемых aberrаций. Например, если при изготовлении и юстировке легче исправляется астигматизм, то можно ужесточить допуск на его отклонение, при этом расширив допуски на другие aberrации, сохраняя суммарное отклонение $W_{СКВ}$ в заданных пределах. Встречаются заказчики, которых интересует не только допустимая величина $W_{СКВ}$, но и максимальное значение одной из aberrаций. Понятно, что в этом случае для производства возможности варьирования заметно уменьшаются. Бывают и такие случаи, когда требования заказчика и производственные возможности вообще не совпадают. В этом случае лучше всего незамедлительно отказаться от разработки такого объектива.

Снова обратимся к рис. 5.17 и 5.18 и сравним между собой среднеарифметические значения комы и астигматизма. Они незначительно отличаются друг от друга ($\bar{X}_{ком} = 0,063\lambda$, $\bar{X}_{аст} = 0,047\lambda$). Что касается среднеарифметического сферической aberrации ($\bar{X}_{сф} = 0,398\lambda$), то оно примерно в 7 раз больше, чем $\bar{X}_{ком}$ или $\bar{X}_{аст}$.

Это связано с тем, что исследуемые нами объективы работают в зеленой области ($\lambda=0,546$ мкм), а контроль качества изображения производится в красной области ($\lambda=0,633$ мкм). Для того чтобы объективы в зеленой области имели сферическую aberrацию близкую к нулю, необходимо, чтобы в красной области они имели бы сферическую не выше и не ниже $0,4\lambda$. В противном случае в зеленой части спектра сферическая возрастет или в положительной, или в отрицательной области. Таким образом, для проектных расчетов можно принять

$$\bar{X}_{ком} \approx \bar{X}_{аст} = \bar{X}_0, \quad \text{а} \quad \bar{X}_{сф} = 7\bar{X}_0.$$

Подставив эти значения в формулу (5.4) получим:

$$\bar{X}_0 = \frac{W_{СКВ}}{0,58}. \quad (5.10)$$

Экспериментальное значение $W_{СКВ} = 0,0323\lambda$. После подстановки этого значения в формулу (5.10), получим $X_0 = 0,056\lambda$ и $\bar{X}_{сф} = 7\bar{X}_0 = 0,392\lambda$. Если сравнить эти расчетные величины с экспериментально полученными ($\bar{X}_{ком.э} = 0,063\lambda$, $\bar{X}_{аст.э} = 0,047\lambda$, $\bar{X}_{сф} = 0,398\lambda$), то следует

отметить их незначительное расхождение, что вполне приемлемо для проектных расчетов.

Вернемся к рис.5.17, 5.18, 5.19 и обратим внимание на среднеквадратические отклонения aberrаций. Значения среднеквадратических отклонений очень близки друг к другу ($S_{\text{ком.э}} = 0,028\lambda, S_{\text{аст.э}} = 0,024\lambda$). Что касается сферической aberrации, то $S_{\text{сф.э}} = 0,076\lambda$, что примерно в 3 раза больше, чем $S_{\text{ком.э}}$ или $S_{\text{аст.э}}$. Следовательно, при проектных расчетах можно принять $S_{\text{ком}} \approx S_{\text{аст}} = S_0$, а $S_{\text{сф}} = 3S_0$. После подстановки их в формулу (5.7) получим:

$$S_0^2 = \frac{S_{\text{СКВ.}\Sigma}^2}{0,04775}, \quad (5.11)$$

но, так как $S_{\text{СКВ.}\Sigma}^2 = 0,000036\lambda^2$, то $S_0 = 0,0274\lambda$, а $S_{\text{сф}} = 0,08\lambda$.

Экспериментальное значение $S_{\text{ком.э}} = 0,028\lambda, S_{\text{аст.э}} = 0,024\lambda, S_{\text{сф.э}} = 0,076\lambda$ (рис.5.17, 5.18, 5.19). Видно, что разница между расчетными значениями среднеквадратических отклонений и экспериментальными невелика.

Зная величины среднеквадратических отклонений комы, астигматизма и сферической из выражения (5.8), нетрудно оценить половины полей рассеяния этих aberrаций: для комы и астигматизма это будет

$$\delta_0 = \frac{13,73}{k} \cdot S_{\text{СКВ.}\Sigma},$$

а для сферической

$$\delta = \frac{41,2}{k_{\text{сф}}} \cdot S_{\text{СКВ.}\Sigma},$$

где значения k для комы равно $k_{\text{ком}} = 1,40$, для астигматизма $k_{\text{аст}} = 1,35$, для сферической $k_{\text{сф}} = 1,30$.

Таким образом, предложенный подход к расчету числовых характеристик \bar{X} и S , распределений aberrаций и допусков на них для объективов с дифракционно ограниченным качеством изображения наиболее точно соответствует современным условиям их производства.

При выборе конструкции объектива одновременно учитываются многие факторы. Это и степень коррекции aberrаций, предполагаемый объем выпуска, возможные методы контроля, цех-изготовитель и даже квалификация рабочего, выполняющего сборочно-юстировочные работы. Только при удачном сочетании всех этих факторов возможно экономически обоснованное и выгодное серийное производство столь высокого класса объективов.

На сегодняшний день при создании конструкции нового объектива можно пойти двумя путями: разработать насыпной вариант конструкции или спроектировать автоколлимационный. На начальном этапе проектирования нами был проработан насыпной вариант. В этом варианте исполнения неоправленные линзы устанавливались непосредственно в корпус объектива. Промежутки между ними выдерживались прокладным кольцом (первый

воздушный промежуток) и тремя латунными плоскими «лапками» (второй промежуток). Все это крепились гайкой, которая через пружинное кольцо (или непосредственно) упиралась в линзу. Юстировка избыточного астигматизма производилась разворотом линз в корпусе; комы – поперечными перемещениями линз стопорами; сферической – заменой латунных прокладок из подбора по толщинам.

Крепление линз непосредственно гайкой могло привести к их пережатию, что неоднократно отмечалось нами при изготовлении ранее выпускаемых объективов. Перемещение линз непосредственно стопорами могло вызвать сколы и трещины, локальные деформации оптических поверхностей, что является недопустимым. Вращение линз пальцами или «присосками» могло привести к загрязнению оптических поверхностей линз. Устранение избыточной сферической aberrации прокладками, отличающимися друг от друга на 0,01-0,015 мм, потребовало бы довольно большого набора прокладок, что неминуемо приводило к нарушению целого ряда вопросов технологичности объективов. Вследствие всего этого, применение насыпного варианта нам показалось не самым лучшим решением. Поэтому мы предложили другой, автоколлимационный вариант (рис.5.21), при котором каждая линза крепится в своей оправе герметиком, и затем центрируется на станке с помощью автоколлимационного микроскопа ЮС-13.

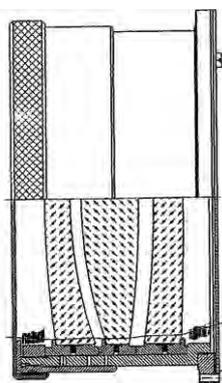


Рис.5.21. Автоколлимационный вариант конструкции

Такое решение позволяет избежать пережатия линз, так как гайка в этом случае упирается не в линзу, а в ее оправу. При юстировке комы децентрировки юстировочные стопора упираются не в линзу, а также в оправу, что при правильно выбранных посадочных диаметрах оправы, удается избежать локальных деформаций линз. Астигматизм устраняется разворотами оправ с линзами в специальном технологическом корпусе, в котором предусмотрен доступ ко всем трем оправам с линзами. И, наконец, сферическая aberrация устраняется за счет подрезка соответствующих торцов оправ в точных цанговых патронах. При такой подрезке непараллельность торцов не превышает 0,005 мм, что вполне допустимо для получения объективов, соответствующих ТУ по качеству изображения

($ptv \leq 0,16\lambda$; $r.m.s. \leq 0,03\lambda$). Опыт изготовления апохроматов заставил нас обратить пристальное внимание на термическую обработку заготовок, как перед грубой обточкой, так и перед окончательной обработкой оправ. Материал, который мы решили применить для оправ, относился к алюминиевым сплавам – Д16Т. Без термической обработки уже на 2-3 день после окончательной юстировки оправы «велю» так, что заметно нарушалась первоначальная настройка объектива. Поэтому мы вынуждены были в каждой партии объективов тщательнейшим образом контролировать наличие термической обработки оправ.

Как отмечалось выше, для повышения оперативности сборки и юстировки в условиях серийного производства было решено кому и астигматизм контролировать и доводить до необходимого уровня на оптической скамье ОСК-2, модернизированной специально для производства объективов. Модернизация заключалась в замене «родного» объектива скамьи на новый, вновь рассчитанный, у которого ptv и $r.m.s.$ были значительно меньше ($ptv \leq 0,05\lambda$; $r.m.s. \leq 0,008\lambda$). Все это позволило повысить процент выхода годных объективов с первой подачи на контроль качества изображения до 80%.

Единственным условием успешной работы на оптической скамье являлась высокая квалификация сборщика-юстировщика объективов.

Расчет допусков на технологические погрешности, вызывающие децентрировки проводился аналогично методике, изложенной в главе 4.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ЮСТИРОВКА ОБЪЕКТИВОВ
ПЕРЕМЕННОГО ФОКУСНОГО
РАССТОЯНИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы объективы с переменным фокусным расстоянием стали неотъемлемой частью новых моделей фото-, кино- и видеоаппаратов.

Столь широкое распространение этих объективов объясняется тем, что они обладают рядом значительных преимуществ по сравнению с объективами постоянного фокусного расстояния, к которым следует отнести:

- возможность подбора оптимальной композиции кадра без изменения точки съемки;
- создание, так называемого, эффекта «наезда» и «отъезда» без относительного перемещения аппарата и снимаемых объектов;
- повышение оперативности и удобства работы при эксплуатации;
- заметное уменьшение общих габаритов и веса.

С каждым годом параметры объективов переменного фокусного расстояния совершенствуются:

- увеличивается уровень кратности изменения фокусных расстояний в одной модели;
- возрастает светосила объективов как за счет увеличения относительного отверстия, так и за счет повышения коэффициента пропускания;
- уменьшается значение ближайшей дистанции съемки (объективы с «макрозумом» позволяют осуществлять съемку объективов, расположенных вплотную к оправе объектива);
- уменьшаются габариты и вес объективов;
- повышается качество изображения.

Анализ тенденций развития объективов с переменным фокусным расстоянием показывает, что в будущем следует ожидать как дальнейшего развития параметров объективов, перехода рекордных, присущих лишь отдельным моделям в рядовые, так и совершенствование схем и конструкций типовых объективов в направлении значительного повышения качества изображения.

Являясь наиболее сложным узлом в расчетном, конструктивном и производственном плане, объектив в основном определяет как сроки освоения новых моделей, так и общую трудоемкость производства съемочной камеры.

Все изложенное обуславливает необходимость всемерного усиления внимания к вопросам разработки и изготовления объективов переменного фокусного расстояния.

К настоящему времени по теории и методике расчета оптических систем с переменным фокусным расстоянием опубликовано значительное

количество работ отечественных и зарубежных авторов, в то же время вопросы конструктивного устройства и технологии производства объективов переменного фокусного расстояния практически нигде не освещены кроме нескольких работ общего характера.

Так, Цуккерман С.Т. [2.1], Уэрмишам А.У. [2.2], Бардин А.Н. [2.3], Новик Ф.С. [2.4], Плотников В.С. [2.5] и др. рассмотрели в своих трудах принципиальную схему объективов с переменным фокусным расстоянием, дали описание ее работы и высказали ряд замечаний о необходимости более точного их изготовления по сравнению с объективами постоянного фокусного расстояния.

Чуриловский В.Н. [2.6] исследовал теоретическую схему инверсного панкратика и рассмотрел его принципиальное конструктивное решение без анализа на точность, технологичность и т.д.

Литвин Ф.Л. [2.7] дал методику силового расчета в объективе с механической компенсацией с аксиальным расположением подвижных оправ.

По панкратическим зрительным трубам имеется оригинальная работа Погорева Г.В. [2.8], в которой впервые подробно затрагиваются вопросы юстировки панкратической системы с механической компенсацией, указываются основные погрешности, влияющие на выходные параметры зрительных труб, рассматривается методика их выявления, компенсации и связь с выходными параметрами.

Основными источниками сведений о конструкциях объективов переменного фокусного расстояния являются патентные материалы, заводская документация и образцы объективов. Все эти источники дают разрозненные сведения о конструкциях и их отдельных элементах, не содержат никакого анализа или обобщений и рекомендаций, способствующих рациональному выбору конструкций и организации рациональных технологических процессов изготовления новых образцов.

Проектирование объективов носит субъективный характер и в большинстве случаев зависит от личного производственного опыта и профессиональных навыков проектировщика. Единых методов проектирования объективов не существует.

В то же время объективы переменного фокусного расстояния в конструкторском и производственном плане для условий серийного и массового производства представляют собой сложные оптико-механические системы, в которых, кроме присущих всем объективам конструкторско-производственных задач, приходится решать ряд дополнительных вопросов:

- обеспечение точного взаимного перемещения оптических компонентов (погрешность взаимного расположения компонентов составляет 0,01-0,03 мм);
- стабильность центрировки при изменении положения компонента (0,015-0,05 мм);

- обеспечение постоянства положения плоскости изображения при всех изменениях фокусного расстояния (0,015-0,03 мм);
- обеспечение минимальных затрат времени, необходимых для проверки качества изображения на различных значениях фокусного расстояния;
- достижение простоты, удобства сборки и юстировки и др.

Чем выше выходные параметры объектива (требуемое качество изображения, относительное отверстие, кратность изменения фокусного расстояния и др.), тем сложнее схема и конструкция объектива и критичность его к решению упомянутых проблем.

Во многом полнота и правильность решения этих проблем связана с наличием производственных методов точностного анализа, которые обоснованно отражали бы не только фактическое положение оптического элемента в конструкции объектива, но и реальные возможности производства. Таким требованиям отвечают теоретико-вероятностные методы расчетов.

ГЛАВА 6. Обзор и анализ типовых конструкций объективов переменного фокусного расстояния

6.1. Принципы устройства

Появление первых объективов переменного фокусного расстояния относится к концу XIX века [2.9]. Это были преимущественно системы дискретного изменения фокусного расстояния.

Объективы плавного изменения фокусного расстояния появились в 20-е годы XX столетия [2.10]. Систематические исследования этих объективов как у нас, так и за границей начинаются в 30-е годы. К концу 50-х за рубежом они заметно потеснили объективы дискретного изменения фокусного расстояния.

В нашей стране широкий фронт работ по проектированию и изготовлению объективов переменного фокусного расстояния развернулся в конце 50-х начале 60-х годов, когда отечественная промышленность приступила к выпуску любительской кинотехники на 8-мм формат пленки. Первые отечественные объективы переменного фокусного расстояния для киносъемочной аппаратуры, рассчитанной на 8-мм формат, были освоены в серийном производстве в 1963-64 гг.: ПФ-2 для киноаппарата «Лада», «Метеор-2» - для киноаппарата «Кварц-3».

Основной специфической задачей, которая решается при выборе и расчете оптической схемы объективов переменного фокусного расстояния является обеспечение постоянства расположения плоскости изображения при изменении фокусного расстояния. Решить эту задачу возможно лишь при условии одновременного перемещения двух или более компонентов объектива и нелинейной зависимости взаимных перемещений этих подвижных компонентов (рис.6.1). Оптические системы переменного фокусного расстояния, в которых выполняются эти условия, получили название систем с механической компенсацией плоскости изображения.

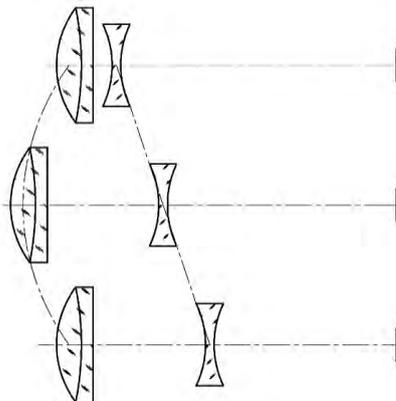


Рис. 6.1. Система с механической компенсацией сдвига плоскости изображения

Технологическая сложность исполнения конструкций объективов с механической компенсацией, обусловленная нелинейными зависимостями

взаимных перемещений подвижных оптических компонентов, предопределила поиск и создание другой системы, в которой изменение фокусного расстояния и обеспечение постоянства плоскости изображения достигается перемещением жестко связанных между собой подвижных компонентов, относительно чередующихся с ними неподвижных компонентов. Такие системы называются системами с оптической компенсацией сдвига плоскости изображения (рис.6.2).

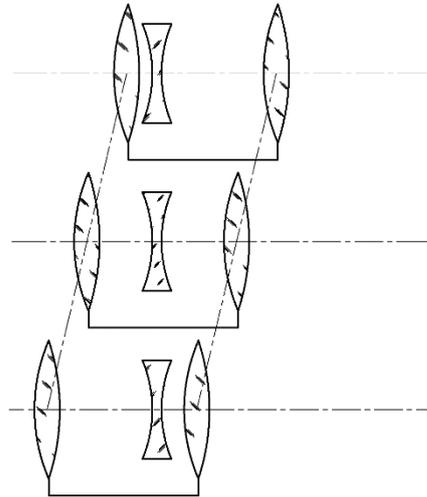


Рис. 6.2. Система с оптической компенсацией сдвига плоскости изображения

Рассматривая кинематические и оптические схемы объективов, следует выделять в них три основных узла: насадку Н афокальную в трансфокаторах и неафокальную в вариообъективах, призму или зеркало П и собственно объектив О (рис.6.3).

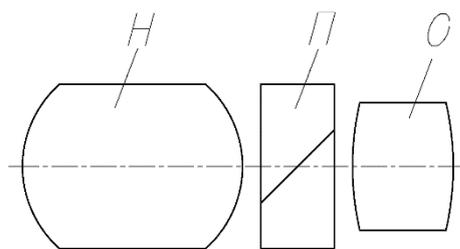


Рис. 6.3. Пузловая схема объектива

Насадка предназначена для изменения увеличения, компенсации сдвига плоскости изображения, фокусировки объектива и частичной коррекции аберрации; призма (зеркало) служит для отвода части светового потока в визирное, а иногда, в экспонометрическое устройство; задача «собственно» объектива сводится в основном к построению изображения в кадровом окне фильмового канала и коррекции остаточных аберраций.

6.2. Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с механической компенсацией

Напомним, у объективов с механической компенсацией перемещение подвижных компонентов происходит по различным законам, связанным между собой нелинейной зависимостью. В этом случае обеспечивается наилучшее постоянство расположения плоскости изображения. Кроме того, объективы с механической компенсацией имеют значительно меньшие габариты при больших перепадах фокусного расстояния, меньшее количество оптических элементов по сравнению с объективами с оптической компенсацией и т.д.

По этим причинам объективы с механической компенсацией получили в настоящее время преимущественное распространение.

При разработке конструкции объектива основными задачами, решаемыми в процессе проектирования, являются: обеспечение стабильности и точности положения подвижных компонентов; выбор способов крепления и сопряжения компонентов исходя из условия достижения необходимой точности и технологичности конструкции; достижение минимальных усилий для перемещения подвижных компонентов и др. В зависимости от того, каким путем решаются эти проблемы все конструкции могут быть разделены на два типа:

- объективы с кулачковыми механизмами;
- объективы с рычажными механизмами.

В конструкциях с кулачковыми механизмами нашли применение два вида кулачков: цилиндрические и дисковые.

В конструкциях с рычажными механизмами используются инверсорные устройства и специальные рычажные устройства.

По видам направляющих поступательного движения конструкции объективов могут быть разделены на устройства с использованием винтовых аксиальных (соосных с оптической осью объектива) оправ, винтовых неаксиальных стержней и оправ, гладких цилиндрических аксиальных оправ, гладких неаксиальных втулок и стержней.

Механизмы с цилиндрическими кулачками и направляющие в виде аксиальных цилиндрических оправ позволяют создавать компактные и малогабаритные конструкции объективов. Механизмы с дисковыми кулачками в отличие от устройств с цилиндрическими кулачками, дают возможность применять более простые методы обработки (например, вырубка). Но их использование при любых видах известных направляющих устройств и при прочих равных условиях всегда ведет к увеличению габаритов конструкций объективов.

Несмотря на то, что кулачковые механизмы обладают рядом достоинств (воспроизведение требуемых математических функций, получение относительно небольших габаритов и др.), все они сравнительно сложны в производстве. Эта сложность обуславливается требованием

высокой точности получения профилей кулачков (0,02-0,03 мм), а при использовании цилиндрических кулачков к тому же необходимостью обеспечения точного взаимного расположения криволинейных пазов, количество которых в объективе может достигать шести.

Факт периодического появления в технической, в частности патентной, литературе сведений о различных типах рычажных устройств обуславливается, видимо, привлекательностью технологической простоты их изготовления. В качестве примера можно привести сообщение фирмы Буш [2.11] о расчете с помощью ЭВМ устройства, которое обеспечивает перемещение оптических компонентов по заданным законам с точностью до 0,025 мм. К сожалению, о практической реализации этого механизма никаких сведений найти не удалось.

Приведенное выше деление позволяет проводить систематизацию конструкций объективов и дает достаточное представление о главных их особенностях. Дальнейшее изложение материала ведется в соответствии с этим делением, при этом рассматриваются конструкции, отражающие наиболее характерные этапы развития объективов переменного фокусного расстояния.

6.2.1. Конструкции объективов с использованием цилиндрических кулачков

Одной из первых попыток использования цилиндрических кулачков в киносъёмочном объективе явилась конструкция (рис.6.4), созданная А.Уэрмишем в 1931г. [2.12].

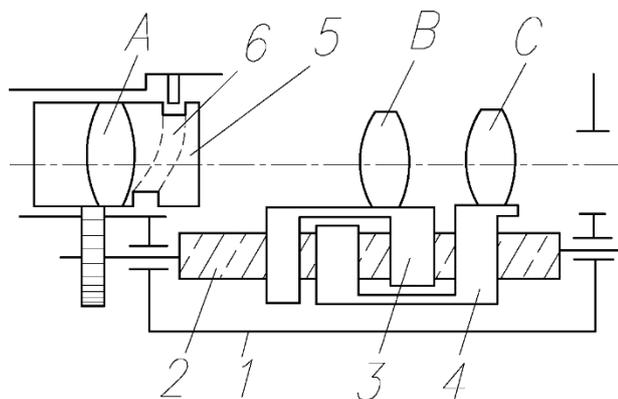


Рис. 6.4. Конструкция Уэрмишема

Для осуществления изменения фокусного расстояния в ней вращают рукоятку, расположенную на корпусе аппарата (на рис.6.4 не показана); при этом происходит совместное перемещение оправ 3, 4 с компонентами B и C вдоль винта 2 и оправы 5 с компонентом A вдоль цилиндрической направляющей в корпусе 1. Криволинейный паз 6 в оправе 5 служит для придания компоненту A заданного закона перемещения.

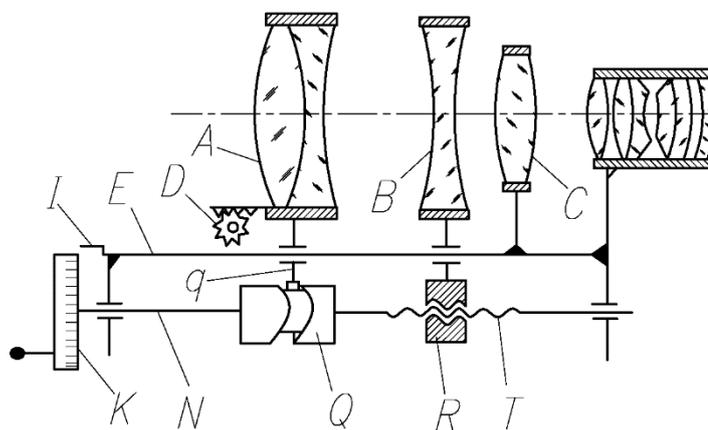


Рис. 6.5. Конструкция Капстофа

Развитием этой конструкции можно считать трансфокатор Капстофа [2.13] (рис.6.5). В этой конструкции изменение увеличения афокальной насадки, состоящей из компонентов A, B, C достигалось следующим образом. Вращением рукоятки K со шкалой увеличений или фокусных расстояний движение передавалось на стержень N с пазовым кулачком Q и резьбой T . При этом оправа R компонента B перемещалась вдоль стержня N , а компонент A , щуп q которого входил в паз кулачка Q , перемещался по заданному нелинейному закону.

Фокусировка осуществлялась компонентом A с помощью реечного зацепления D ; K и I – соответственно шкала дистанций и указатель.

По сравнению с конструкцией Уэрмиша в этом объективе имеется несколько новых решений.

Во-первых, элементы, перемещающие оптические компоненты по нелинейной и линейной зависимости, сведены в один узел-стержень N . Это позволяет исключить ошибки передачи между элементом и криволинейным пазом и элементом, обеспечивающим прямолинейное движение компонентов, исключить ошибки относительного расположения винта и детали с кулачковым пазом.

Во-вторых, если в конструкции Уэрмиша функции направляющего и силового элемента выполняет винт 2, то у Капстофа эти функции поделены соответственно между стержнями E и N , что позволяет снизить требования к точности изготовления винта и к точности его выставки относительно оптической оси прибора.

В-третьих, все оптические компоненты A, B, C насадки базируются на одном элементе – стержне E . В конструкции Уэрмиша базой для компонента A является корпус, для компонентов B и C – винт.

Интересен другой тип конструкции (рис.6.6), предложенный Н.Науманном в 1931г. [2.14]. При изменении фокусного расстояния, вращение цилиндра 1 за некатаную часть 1' передается оправе 2 с криволинейными пазами, два из которых 8, 9 нарезаны по цилиндрической

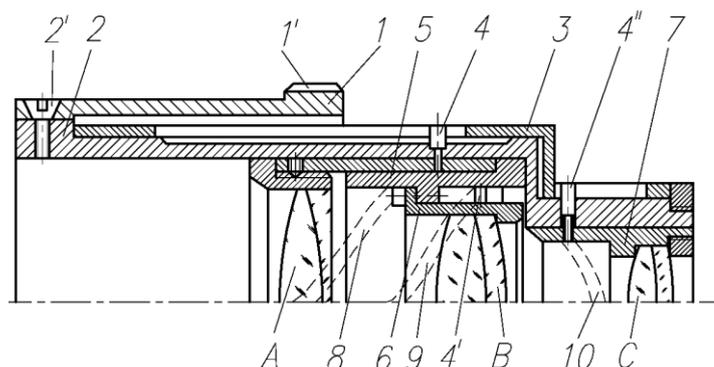


Рис. 6.6. Конструкция Наумана: 1 – цилиндр; 1' – накатка; 2 – оправа; 2' – винт; 3 – корпус; 4, 4', 4'' – пальцы; 5, 6, 7 – оправы подвижных компонентов А, В, С; 8, 9, 10 – криволинейные пазы

винтовой линии одного шага, а третий 10 – по закону, позволяющему компенсировать сдвиг плоскости изображения при изменении фокусного расстояния. Оправа 2 соединена с цилиндром 1 винтом 2'. В пазы оправы 2 входят пальцы 4, 4', 4'', закрепленные в оправках 5, 6, 7. Вращение оправы 2 вызывает перемещение пальцев по криволинейным пазам. При этом оправки 5, 6, 7 с компонентами А, В, С движутся вдоль оптической оси. Для устранения вращения оптических компонентов пальцы 4, 4', 4'' входят в прямолинейные пазы корпуса. В этой конструкции перемещения всех трех компонентов осуществляется вращением одной оправы 2.

Здесь, как и в предыдущей конструкции, элементы, определяющие законы перемещения компонентов (пазы), сведены в один узел – цилиндрическую оправку 2. Но если в конструкции Капстофа это узел (стержень *N*) является и силовым элементом, а роль направляющего выполняет стержень *E*, то в конструкции, предложенной в [14], оправка 2 выполняет одновременно функции управления и направления. Это, безусловно, сокращает количество деталей и позволяет значительно уменьшить габариты объектива и повысить точность взаимного расположения компонентов.

Этот тип конструкции нашел самое широкое распространение во всем мире, в том числе и в отечественных объективах («Агат-14», «ПФ-3», «Агат-6А»).

В качестве примера (рис.6.7) приведена схема объектива «Агат-14». При изменении фокусного расстояния, вращение цилиндрического кулачка 3 передается оправкам 4 и 5 с компонентами *B* и *B*. Компонент *B* перемещается по криволинейному пазу, компонент *B* – по винтовому.

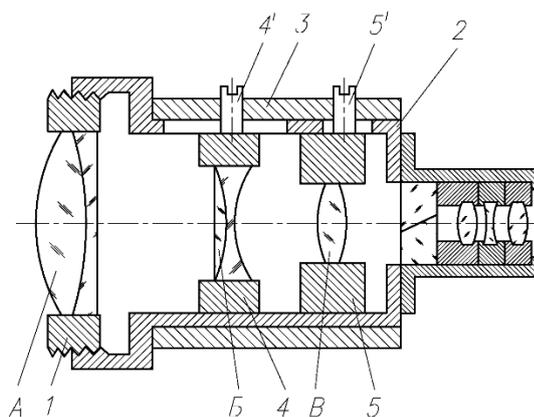


Рис. 6.7. Объектив “Агат-14”: 1 – оправа первого компонента; 2 – корпус; 3 – кулачок; 4, 5 – оправы подвижных компонентов; 4', 5' – пальцы

Для устранения вращения оптических компонентов пальцы 4' и 5' входят в прямолинейные пазы корпуса 2. Установка дистанции осуществляется перемещением компонента А по резьбе в корпусе 2.

Дальнейшее развитие конструкции объективов с механической компенсацией шло в основном по пути усовершенствования схемы, в которой криволинейные пазы нарезались на одной цилиндрической оправе. В связи с этим необходимо отметить интересную конструкцию, разработанную Анженье. [2.15] (рис.6.8).

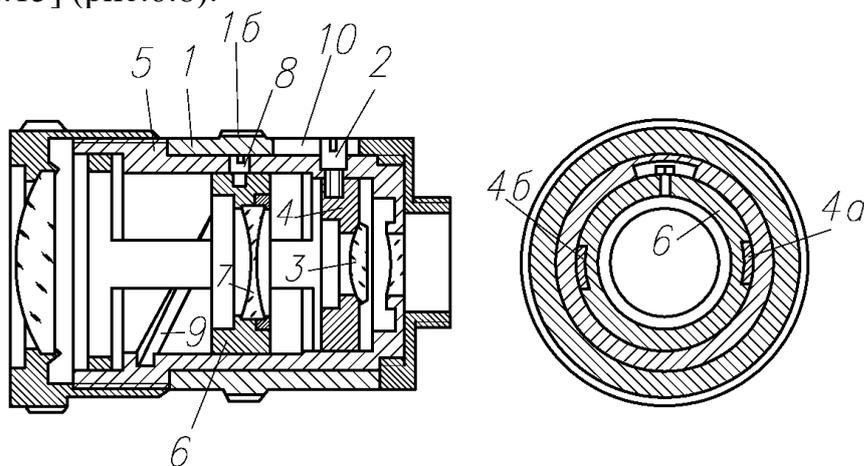


Рис. 6.8. Конструкция Анженье

Изменение увеличения достигается здесь вращением оправы 1 за накатанную часть 1б; при этом паз 1а через палец 2 перемещает оправу 4 с линзой 3 вдоль оптической оси по криволинейному пазу (не указанному на рис.6.8) в детали 5. При своем перемещении вдоль оптической оси оправа 4 вращается. Это вращение через отводы 4а и 4б передается оправе 6 с линзой 7 и винтом 8. Винт 8 входит в паз 9 оправы 5, поэтому при вращении оправа 6 одновременно перемещается вдоль оси объектива. Интересно отметить, что применяемое конструктивное решение оправы 4 позволяет значительно уменьшить заклинивание и перекося линзы 3 и, следовательно, применить один направляющий криволинейный паз вместо трех через 120°, как это сейчас широко распространено. Кроме того, это решение позволяет

одновременно решить задачу перемещения оправы 6 с линзой 7. Применение несквозного внутреннего паза 9 ограничит попадание в него пыли и грязи, что положительно сказывается на точности работы конструкции и уменьшении возможности заедания подвижного компонента.

6.2.2. Конструкции объективов с использованием дисковых кулачков

Как уже отмечалось, наряду с цилиндрическими кулачками в объективах переменного фокусного расстояния нашли применение дисковые кулачки.

Одной из первых конструкций объектива с использованием дискового кулачка следует назвать устройство, спроектированное Уолкером в 1929г. [2.16]. Конструкция отличалась большими габаритными размерами и массой. Для согласования перемещений компонентов использовались конические и реечные зубчатые зацепления. Направляющими для компонентов служили гладкие цилиндрические стержни, фокусирующие устройства отсутствовали. Из более поздних разработок наибольший интерес представляет конструкция Кецнике (Австрия), разработанная им в 1959г. [2.17] и конструкция Мартина (США), разработанная в 1960г. [2.18].

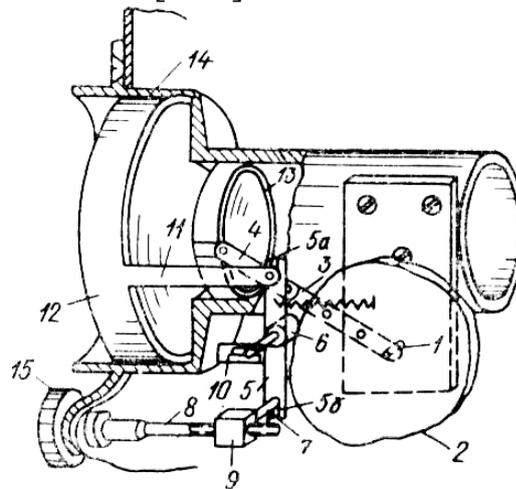


Рис. 6.9. Конструкция Кецнике

На рис.6.9 изображен механизм перемещения компонентов в объективе Кецнике. При изменении фокусного расстояния вращение кулачка 2 вокруг оси 1, жестко связанной с кулачком, через рычаг 3 и рычаг 4 передается оправе 13 со вторым компонентом, который перемещается по линейному закону в направляющей 14. Вращение кулачка 2 вызывает перемещение шупа 6 в направляющей 10, параллельно оптической оси. Рычаг 5 поворачивается вокруг неподвижного пальца 7, входящего в паз 5б. На другом конце рычага находится паз 5а, в который входит палец выступа 11 оправы 12 первого компонента, перемещающегося при развороте рычага 5 по гиперболическому закону. Для фокусировки объектива вращают рукоятку 15, жестко связанную с винтом 8, при этом перемещается гайка 9 со стержнем 7. Рычаг 5

разворачивается вокруг точки контакта щупа 6 и кулачка 2, вызывая перемещение паза 5а и связанного с ним выступа 11 оправы 12 с первым компонентом.

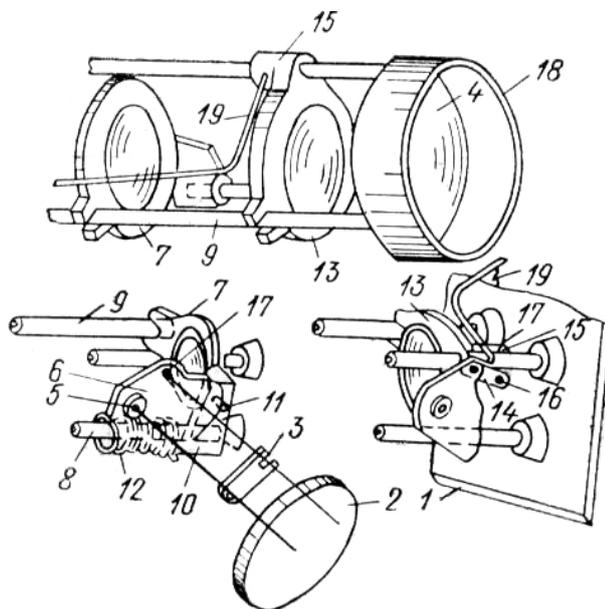


Рис. 6.10. Конструкция Мартина

На рис.6.10 изображен механизм перемещения компонентов в объективе Мартина. Основным достоинством этой конструкции является то, что она позволяет прилагать значительно меньше усилия для перемещения, чем в предыдущем варианте; обеспечивать большую плавность хода при той же и даже меньшей длине направляющих. Объясняется это тем, что величина плеча приложения силы в этом варианте обычно в несколько раз (5-8) меньше, чем в варианте с направляющими аксиального типа. Для изменения фокусного расстояния вращается рукоятка 2 и жестко связанный с ней рычаг 3, в паз которого входит палец 17 кулачка 6. На пальце 17 крепится рычаг 14. При вращении кулачка 6 вокруг оси 5 движение через рычаг 14 и палец 16 передается оправе 13 со вторым компонентом. Рычаг 19, укрепленный в направляющей 15 оправы 13, передает движение второму компоненту от двигателя аппарата (пружинного или электрического). Перемещение третьего компонента происходит следующим образом. При вращении кулачка 6 щуп 11, закрепленный на направляющей 10 оправы 7, скользит вдоль профильной поверхности кулачка, вызывая перемещение оправы 7 с третьим компонентом вдоль направляющих пинолей 9 и 8. Для постоянного контакта между щупом 11 и кулачком 6 на пиноли 8 навита пружина 12, один конец которой закреплен на направляющей 10 оправы 7, а другой крепится на оправе 18. Фокусировка осуществляется вручную перемещением оправы 4 с первым компонентом в оправе 18.

Сравнивая конструкции объективов Кецнике и Мартина, можно заметить, что принципиальная разница между ними заключается в выборе направляющих элементов. Если в конструкции Кецнике это цилиндрическая

оправа, то в конструкции Мартина для направления движения оптических компонентов используются пиноли. Безусловно, изготовление пинолей проще, чем сложной оправы 14, а базовая пластина 1 и оправы 8 могут быть получены штамповкой из листового материала. Кроме того, необходимо отметить в конструкции Мартина более удачное конструктивное решение узла кулачка и компонента, перемещающегося по нелинейному закону. Оно исключает все зазоры и связанные с ними мертвые хода в сопряжениях, влияющих на положение подвижного компонента. В конструкции Кецнике при реверсивном перемещении компонента 12 на точность его установки будет сказываться зазор в сопряжении кольца оправы 11 и паза 5а. И все же в конструкции с пинолями точность расположения оправ относительно оптической оси зависит от большого количества факторов, чем в конструкции с одной направляющей оправой.

6.2.3. Конструкции объективов с использованием рычажных механизмов

Использование рычажных механизмов для объективов переменного фокусного расстояния в отечественной съемочной аппаратуре еще не имело место. За рубежом запатентовано несколько вариантов таких конструкций и, в частности инверсорных. Как известно, инверсорным называется устройство, осуществляющее преобразование $\rho_p \cdot \rho_q = K^2 = const$, где $\rho_p = \beta(\psi)$, $\rho_q = \rho(\varphi)$ (рис.6.11), а угол θ между

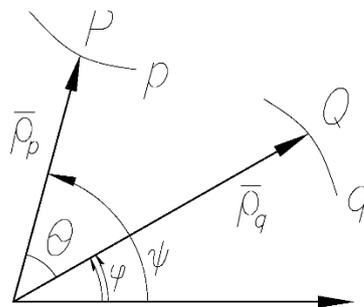


Рис. 6.11. Схема работы инверсорного устройства

векторами $\bar{\rho}_p$ и $\bar{\rho}_q$ постоянен [2.19]. Среди инверсионных механизмов, используемых в объективах, необходимо отметить конструкцию, предложенную Холстом [2.20] в 1934г. Схема объектива показана на рис.6.12.

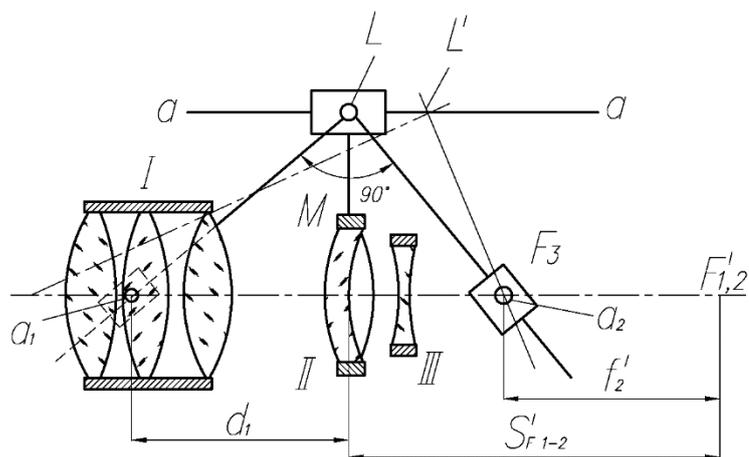


Рис. 6.12. Объектив с инверсным механизмом

Первый компонент имеет возвратно-поступательное движение; второй перемещается по линейной зависимости; третий служит для коррекции остаточных aberrаций. Фокусные расстояния первого и второго компонентов равны по абсолютной величине и обратны по знаку. Из схемы механизма непосредственно следует закон перемещения I и II компонентов: $(S'_{F1-2} - f_1') \cdot d_1 = m_1^2$, где m_1 - расстояние от оси а-а до оптической оси. Перемещение компонентов происходит следующим образом. По оси а-а, параллельной оптической оси, вручную перемещается оправка М с компонентом II. При этом происходит вращение прямоугольного рычага вокруг оси, лежащей в передней главной плоскости второго компонента. Левый конец рычага скользит по втулке a_1 , закрепленной на оправе первого компонента. Ось вращения втулки a_1 лежит в его главной плоскости. Правый конец прямоугольного рычага скользит в оправке a_2 , ось вращения которой лежит в передней фокальной плоскости третьего компонента. При перемещении оправы М со вторым компонентом в сторону третьего компонента происходит совместное движение первого и второго компонентов, причем, второй компонент движется быстрее первого. Достигнув положения, при котором плечи прямоугольного рычага становятся равными, первый компонент останавливается, затем при дальнейшем движении оправы М со вторым компонентом вправо, она перемещается в противоположном направлении. В 1961г. в Японии был предложен объектив с двухкратным перепадом фокусного расстояния $f' = (50 \div 100)$ мм, в котором для перемещения оптических элементов был применен рычажный механизм [2.21], принципиальная схема которого показана на рис.6.13.

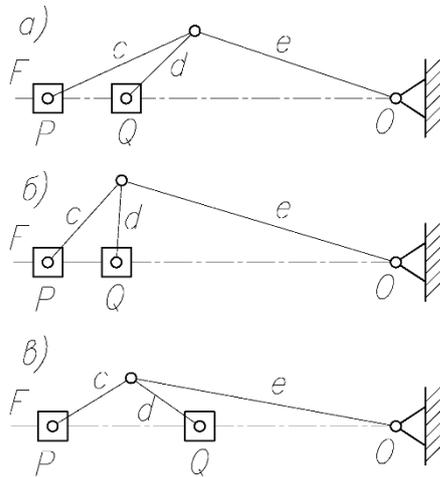


Рис. 1.13. Устройство рычажного механизма объектива

С ползунами P и Q рычажного механизма соответственно связаны второй и третий компоненты. В положении (рис.6.13,а) объектив имеет максимальное фокусное расстояние 100 мм, в положении (рис.6.13,б) – среднюю величину фокусного расстояния. При этом положении шатун d перпендикулярен к оси F , а увеличение третьего компонента, закрепленного на ползуне Q , равно – 1. В положении (рис.6.13,в) минимальная величина фокусного расстояния будет равна 50 мм. Несколько типов рычажных устройств для панкратических объективов предложил Манн (Германия, 1959г.) [2.22]. Два из них показаны на рис.6.14.

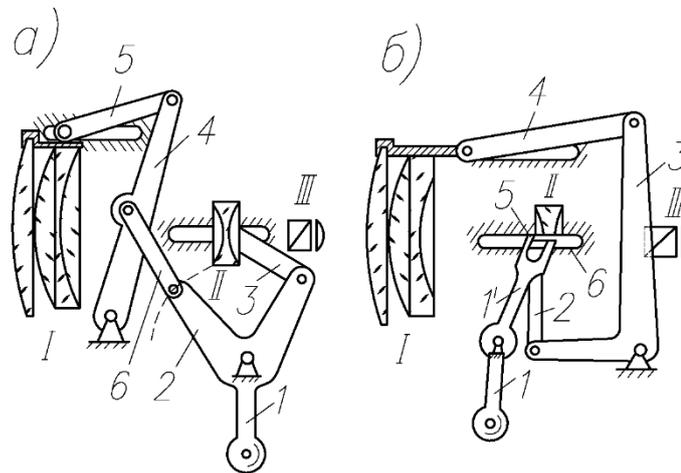


Рис. 6.14. Рычажные конструкции Манна

При изменении фокусного расстояния вращают рукоятку 1 по часовой стрелке, что вызывает перемещение второго компонента вправо вдоль паза. Если рычаги 6 и 2 до вращения лежали на одной линии, то рычаг 4 начнет вращаться также по часовой стрелке, перемещая рычаг 5 и компонент I вправо. При вращении рукоятки 1 против часовой стрелки компонент II будет двигаться влево, причем, перемещение первого компонента влево

будет происходить до тех пор, пока рычаги 6 и 2 не окажутся на одной линии. Дальнейшее вращение рукоятки 1 против часовой стрелки вызовет поворот рычага 4 по часовой стрелке, а первый компонент будет перемещаться вправо. Положение рукоятки 1, при котором рычаги 2 и 6 лежат на одной линии, соответствуют увеличению второго компонента равного «-1». Этому же увеличению второго компонента отвечает положение рычагов (рис.6.14,б), при котором рычаг 2 перпендикулярен к прорези 6. При вращении рукоятки 1 по часовой стрелке движение через рычаг 1 и палец 5 передается рычагу 2 и второму компоненту, который перемещается вправо. При вращении в другую сторону рукоятки 1 первый и второй компоненты будут перемещаться влево, причем, движение первого компонента будет происходить до тех пор, пока рычаг 2 не станет перпендикулярен прорези 6. При дальнейшем движении рукоятки 1 компонент I начнет смещаться вправо.

6.3. Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с оптической компенсацией

В объективах с оптической компенсацией, как уже отмечалось, для изменения фокусного расстояния необходимо осуществлять перемещение подвижных компонентов между попеременно чередующимися с ними неподвижными компонентами. При разработке конструкций таких объективов приходится решать главным образом задачи, связанные с обеспечением рациональных с точки зрения точности и технологичности способов крепления и сопряжения подвижных и неподвижных компонентов; необходимого направления для подвижных компонентов при сохранении требуемой центрировки; удобного для оператора способа перемещения подвижных компонентов. В зависимости от того, как решается первая из этих задач, различают два типа конструкций. К первому типу относятся конструкции, в которых подвижные и неподвижные компоненты устанавливаются и крепятся один за другим в определенном порядке вдоль оптической оси. При этом крепление неподвижных компонентов между подвижными, а в некоторых случаях – подвижных между неподвижными, как правило, осуществляется винтами через отверстия и пазы в оправках (рис.6.15).

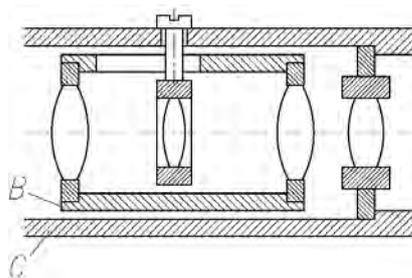


Рис. 6.15. Первый тип конструкции объектива

В таких конструкциях практически невозможно определить действительное взаимное расположение компонентов в собранном виде, т.к. непосредственный доступ к ним отсутствует. Ко второму типу относятся конструкции, в которых сборка подвижных и неподвижных компонентов осуществляется двумя отдельными независимыми узлами (рис.6.22), устанавливаемыми относительно друг друга поперечными взаимными перемещениями. При такой сборке не нарушается предварительная поузловая выставка компонентов и отпадает контроль их взаимного расположения в готовом объективе. Направляющие моменты во всех известных конструкциях объективов с оптической компенсацией выполняются обычно в виде цилиндрических оправ аксиального типа.

Механизмы, предназначенные для перемещения подвижных компонентов, более разнообразны. Ими служат устройства с цилиндрическими кулачками, устройства с использованием резьбовых соединений и, наконец, устройства, в которых перемещение осуществляется вручную за выступающие части рычагов. Одной из первых систем с оптической компенсацией следует считать осветитель для микроскопа, разработанный Р. Рихтером в 1933г. [2.23]. На рис.6.16 показано его принципиальное устройство.

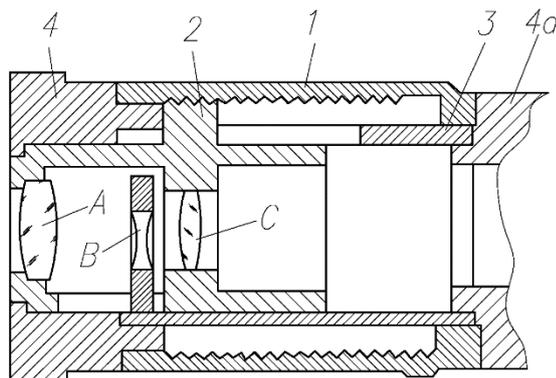


Рис. 6.16. Конструкция Рихтера

Для осуществления изменения увеличения в данной конструкции использован механизм с резьбовым соединением. Он работает следующим образом. Вращение оправы 1 с внутренней резьбой вызывает перемещение сопряженной с ней оправы 2, в которой закреплены подвижные компоненты А и С. Для исключения вращения оправы 2 служит прямой паз в детали 3. Направляющими элементами конструкции служат цилиндрические оправы аксиального типа. По способу сопряжения подвижных и неподвижных компонентов конструкцию Рихтера следует отнести к первому типу. В 1950г. Сивильер [2.24] запатентовал конструкцию объектива «Пан-Синор», принципиальная схема которого дана на рис.6.17.

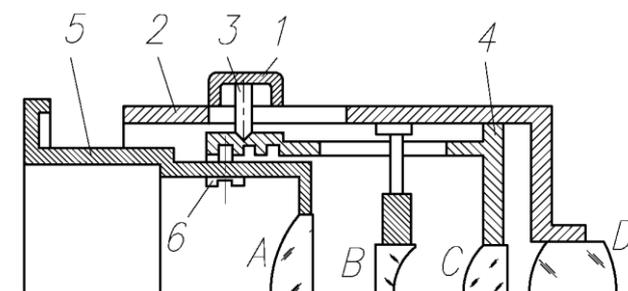


Рис. 6.17. Конструкция Сивильера

Изменение фокусного расстояния в данной конструкции осуществляется одновременным перемещением компонентов *A* и *C*. С этой целью используется кольцо 1, которое через палец 3, оправы 4, 5 и винт 6 связано как с компонентом *A*, так и с компонентом *C*. Смещение кольца 1 производится вручную вдоль прямого паза в корпусе 2. При фокусировке объектива вращается оправа 5 с установленным в ней винтом 6, который скользит в прямоугольном пазу оправы 4, вызывая продольно перемещение компонента *A*. В качестве направляющих элементов в данной конструкции используются гладкие цилиндрические оправы. По способу сопряжения подвижных (*A*, *C*) и неподвижных (*B*, *D*) компонентов конструкция Сивильера, как и предыдущая, относится к первому типу. В 1953г. Бэк и Лоуэн создают объектив (рис.6.18) [2.25], конструктивная схема которого подчинена задаче совмещения функций изменения фокусного расстояния и фокусировки в одном органе управления. Для этого служит стержень 1 с резьбой 2 на одном конце и рукояткой 3 – на другом. Изменение фокусного расстояния производится продольным перемещением стержня 1 в цилиндрической части 6 оправы 8. При этом связанные выступы 4 и 9 скользят в пазу 8а, перемещая оправу 9 с линзой *C* и оправу 5 с линзой *A* вдоль оптической оси. Фокусировка осуществляется вращением рукоятки 3. При этом выступ 4 оправы 5 перемещается вдоль прямоугольно паза 8а и паза в оправе 7, передвигая линзу *A*. Что касается направляющих элементов и способа сопряжения подвижных и неподвижных компонентов, то они аналогичны конструкции Сивильера.

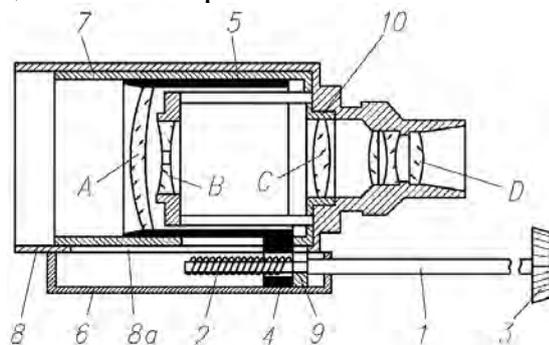


Рис. 6.18. Конструкция Бэка и Лоуэна

В 1960г. Бэк предложил две оригинальные конструкции объектива переменного фокусного расстояния [2.26]. В одной из них получает развитие

идея совмещения узла фокусировки и узла изменения фокусного расстояния (рис.6.19), в другой (рис.6.20) эти узлы конструктивно разделяют. В конструкции, представленной на рис.6.19,

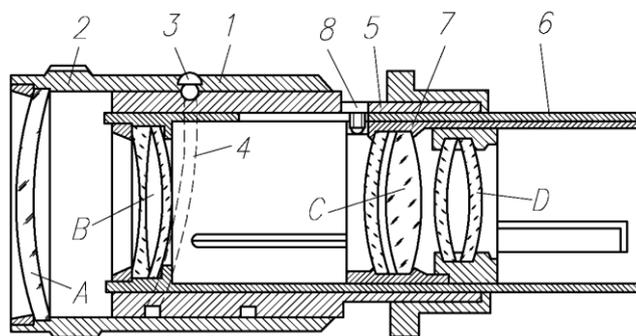


Рис. 6.19. Конструкция Бэка

изменение фокусного расстояния достигается продольным перемещением оправы 1 за накатанную часть оправы 2. Через винт 3, оправу 5, винт 8, ввинченный в прямоугольный паз в детали 6 в оправу 7, движение передается компонентам *A* и *C*. При фокусировке объектива вращают оправу 1 за накатку оправы 2, при этом винт 3 скользит в винтовом пазу 4, перемещая оправу 1 с первым компонентом *A* вдоль оптической оси. Такое совмещение фокусировки и изменения фокусного расстояния делает объектив более компактным, чем в первой конструкции Бэка [2.25]. Во второй конструкции изменение фокусного расстояния производится основным перемещением оправы 5 с компонентами *D* и *B*. Винт 6 служит для соединения компонента *B* с подвижной оправой 5. Отличие двух конструкций Бэка не только в решении узлов фокусировки, но и в подходе к решению панкратических частей объектива (компоненты *A*, *B*, *C* в первой конструкции и компоненты *B*, *C*, *D* – во второй). В конструкции, представленной на рис.6.19, один из подвижных компонентов крепится на винтах в тубусе с неподвижными компонентами. В конструкции на рис.6.20, наоборот, на винтах крепится неподвижный компонент в подвижном тубусе.

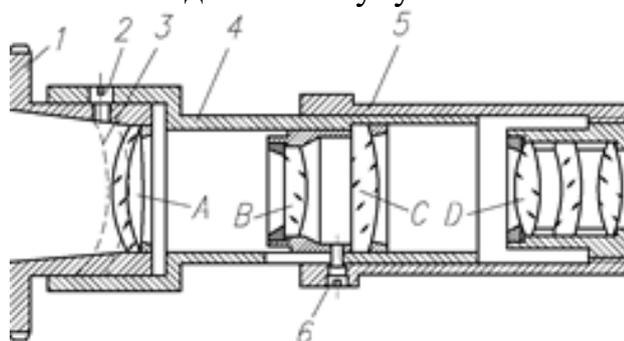


Рис. 6.20. Конструкция Бэка

Аналогично второй конструкции Бэка (рис.6.20) решена панкратическая часть (компоненты *B*, *C*, *D*) объектива «Зумар-16» [2.27] (рис.6.21).

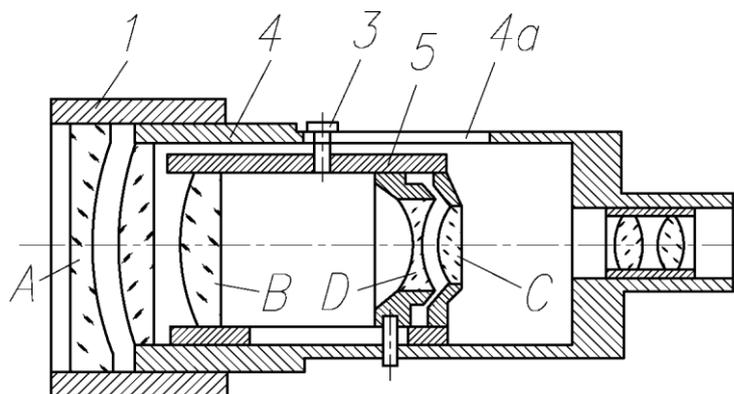


Рис. 6.21. Объектив «Зумар-16»

Изменение фокусного расстояния в объективе осуществляется смещением винта 3 в прямолинейной прорези 4а корпусной детали 4. При этом происходит перемещение подвижной оправы 5 с компонентами *B* и *C* вдоль оптической оси. Фокусировка также решена отдельно от узла фокусного расстояния. По такому же принципу построены панкратические части и узлы фокусировки отечественных объективов «Метеор-2» и «Метеор-5». В рассмотренных выше конструкциях (рис.6.17-6.21) способ сопряжения подвижных и неподвижных компонентов объективов сводится к последовательной установке и креплению компонентов вдоль оптической оси. Такое решение затрудняет обеспечение необходимой точности расположения компонентов, крепящихся посредством винтов через пазы и отверстия в оправках, и, как уже отмечалось выше, значительно усложняет контроль их взаимного расположения в сборке. Всего этого удалось избежать в конструкции, предложенной С.Г. Бабушкиным в 1962г. [2.28]. В ней (рис.6.22) наряду с возможностью контроля взаимного расположения компонентов обеспечивается их надежная ориентация в собранном объективе путем значительного увеличения длины направляющих элементов. Для достижения указанных преимуществ автор выполнил неподвижную 1 и подвижную 2 оправы в виде полуцилиндров. При сборке их совмещают таким образом, чтобы они образовывали цилиндр, и вставляют в общую базовую оправу 3. Перемещение подвижной оправы производят через прямолинейный паз 3а с помощью пальца 4. В конструкции объектива ПФ-2, показанной на рис.6.22, фокусировка объектива осуществляется перемещением компонента *A* с помощью резьбового соединения, причем повышение точности центрировки компонента *A* при его перемещении вдоль оптической оси объектива обеспечивается сопряжением по цилиндрической посадке оправы 5 и корпуса 3.

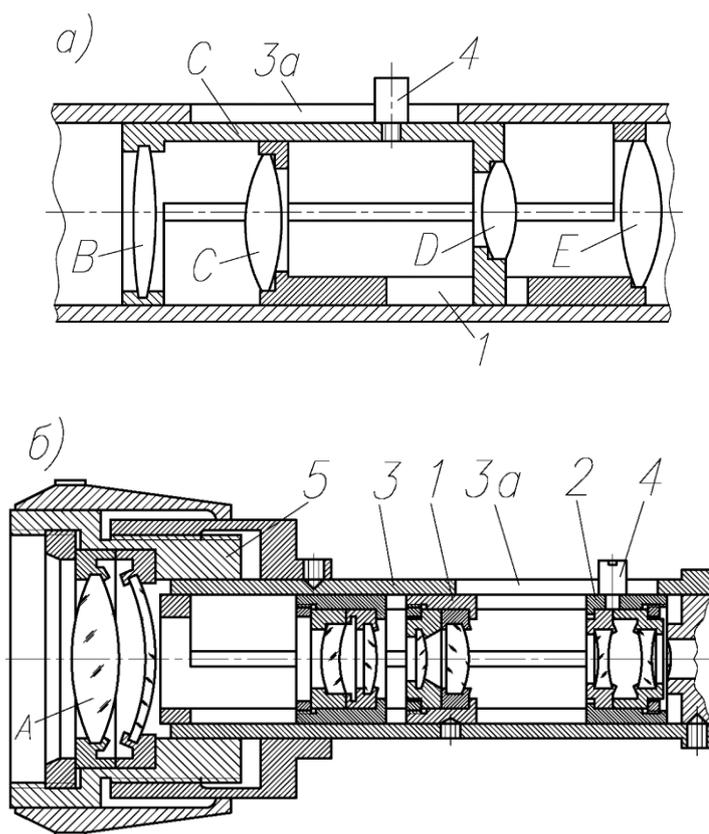


Рис. 6.22. Конструкция Бабушкина

В заключение следует сказать следующее. Изготовление объективов переменного фокусного расстояния относительно трудоемко. Это обуславливает необходимость поиска новых путей их схемного, конструктивного и технологического совершенствования. Для конструкции объективов с оптической компенсацией более предпочтительны решения, когда подвижные и неподвижные компоненты собираются отдельными контролируемыми узлами. Относительная простота перемещения подвижных компонентов в объективах с оптической компенсацией обеспечивает возможность конструктивного объединения органов управления изменением фокусного расстояния и фокусировкой объектива.

ГЛАВА 7. Основные принципы конструирования объективов переменного фокусного расстояния

В настоящее время отсутствуют какие-либо единые методы проектирования, которые позволяли бы однозначно определять оптимальный вариант конструкции объектива переменного фокусного расстояния. Тем не менее накопившийся опыт проектирования на отечественных заводах, позволяет сформулировать некоторые принципы конструирования, как совокупность общих для проектирования правил.

7.1. Ознакомление с принципом построения и работы оптической схемы

Проектирование любых оптических систем, в том числе и объективов переменного фокусного расстояния, должно начинаться с изучения оптической схемы и таблиц коэффициентов влияния децентрировок качества изображения и продольных отклонений оптических элементов от расчетного положения на сдвиг плоскости изображения.

При наличии оптического выпуска со всем необходимым графическим и табличным материалом, конструктор в первую очередь должен выяснить следующее.

1. К какому классу объектив относится: к трансфокаторам или вариообъективам. Если к трансфокаторам, то каким образом рассчитывалась афокальная насадка и собственно объектив – раздельно или совместно.
2. Сколько оптических компонентов, склеек и линз содержит схема; каково число компонентов в насадке.
3. Из какого количества компонентов состоит панкратическая часть, каковы знаки и величины их оптических сил.
4. Каковы минимальные и максимальные величины переменных воздушных промежутков.
5. Как много подвижных и неподвижных компонентов в схеме.
6. Каковы величины допусков на положения подвижных и неподвижных компонентов объектива.
7. Какова величина заднего фокального отрезка и форма последней поверхности собственно объектива.
8. Каковы габариты отдельных линзовых элементов и всей оптической схемы в целом.
9. Какова толщина линз по краю.
10. Имеется ли перегиб на кривой, определяющий перемещение компенсирующего компонента и т.д.

Роль и значение коэффициентов влияния децентрировок продольных сдвигов оптических элементов на качество изображения в процессе проектирования, как уже отмечалось, чрезвычайно велико. Без знания

величин этих коэффициентов в различных точках диапазона изменение фокусного расстояния обоснованная и логически правильная работа по созданию конструкции практически невозможна. Положительный исход при такой работе может иметь место только в том случае, когда за плечами проектировщика богатый производственный опыт. Но в любом случае издержки при такой работе значительны.

В качестве примера практического использования коэффициентов влияния обратимся к таблицам 7.1, 7.2, рассчитанных для объектива «Вариогоир – ЛОМО».

Таблица 7.1. Коэффициенты влияния поперечных смещений Δc_{\perp} на кому децентрировки в центре поля зрения ($\beta = 0^{\circ}$).

Номер компонента	$f' = f'_{\min}$	$f' = f'_{\max}$
I	0,024	-0,06
II	-0,05	0,10
III	0,027	0,01
IV	0,22	0,22
V	0,28	0,28

Таблица 7.2. Коэффициенты влияния осевых смещений ΔS компонентов на сдвиг плоскости изображения.

Номер компонента	$f' = f'_{\min}$	$f' = f'_{cp}$	$f' = f'_{\max}$
I	-0,006	0,03	-0,057
II	-0,07	0,17	0,02
III	0,60	0,30	0,05
IV	0,63	0,63	0,63
V	1	1	1

Анализ коэффициентов влияния поперечных смещений Δc_{\perp} показывает, что из пяти компонентов, наиболее сильно влияющими на изменение поперечных aberrаций, следует считать IV и V компоненты. Влияние смещений I-ого компонента – наиболее слабое.

Из табл.7.2 видно, что погрешности осевой выставки I-ого компонента сильнее всего сказываются на f'_{\max} , их влияние на этом фокусе, примерно, в десять раз выше, чем на f'_{\min} .

Это означает, что расчет точности устройства, которое должно перемещать первый компонент, и выставка дистанционной шкалы должна осуществляться на f'_{\max} .

Дальнейший анализ таблицы показывает, что при всех значениях фокусного расстояния точность продольно выставки второго компонента значительно ниже, чем у первого компонента. При этом погрешность выставки второго компонента наиболее сильно сказывается на средних значениях фокусного расстояния, она в 2,5-8,5 раз выше, чем на крайних.

Третий компонент должен выставляться при малых значениях f' , так как требование к точности расположения на больших значениях фокусного расстояния в 12 раз ниже, чем на малых.

Полученные выводы позволяют обоснованно подойти к точностным требованиям на изготовление кулачков, используемых для перемещения подвижных компонентов.

IV и V компоненты наиболее сильно влияют на сдвиг плоскости изображения. Их можно использовать для юстировочных подвижек при компенсации сдвига плоскости изображения.

Таким образом, следует сказать, что анализ оптической схемы и таблиц с коэффициентами влияния позволяют конструктору обоснованно подойти к решению задач, связанных с проектированием объективов переменного фокусного расстояния и избежать в дальнейшем многих ошибок.

Более подробно об использовании коэффициентов влияния будет сказано ниже.

7.2. Изучение научно-технической и патентной литературы

Непосредственной работе над конструкцией объектива должны предшествовать сбор, обработка и изучение опыта выполнения отечественных и зарубежных образцов, анализ их достоинств и недостатков, выяснение тенденций развития в мировой практике.

Необходимо систематическое изучение отечественной и зарубежной периодической литературы и патентных материалов. К сожалению, необходимо отметить, что в настоящее время на отечественных заводах отсутствуют систематические подборки материалов по конструкциям объективов переменного фокусного расстояния.

В качестве основы для проведения таких подборок предлагается использовать данные, приведенные в этой главе.

7.3. Методика компоновки и агрегатирования объективов

Перед тем как приступить к решению всех необходимых задач компоновки объективов переменного фокусного расстояния, важно выявить то главное, что определяет производственные затраты на объективы. Это сразу позволит установить правильное направление разработки компоновочной схемы конструкции.

7.3.1. Трудоемкость изготовления

Трудовые затраты зависят главным образом от количества оптических элементов, их геометрической сложности, требуемой точности расположения линз и компонентов в объективе, способа изготовления деталей и узлов, их юстировки, квалификации рабочих.

Сказанное, конечно, не охватывает вопроса во всей его сложности, но тем не менее дает понять, что на улучшение конструкции объектива могут значительно влиять очень многие факторы.

На рис.7.1 показаны соотношения трудовых затрат по цехам, занятых в производстве объективов ПФ-2, ПФ-3, «Агат-6А» и «Метеор-5».

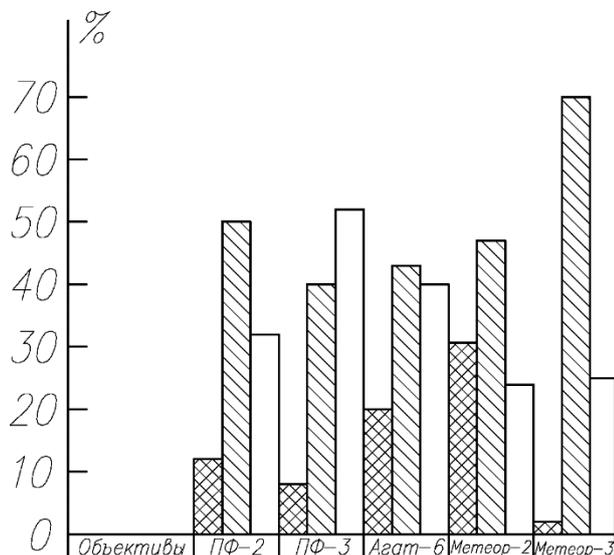


Рис. 7.1. Диаграмма трудовых затрат по цехам

На диаграмме двойной штриховкой обозначены затраты цехов по обработке механических деталей, одинарной – затраты оптических цехов, без штриховки – затраты сборочных цехов.

Трудовые затраты берутся в процентах от всех трудовых затрат на объектив.

Из диаграммы видно, что наибольшая доля трудоемкости изготовления – от 40 до 70 % приходится на изготовление оптических деталей и от 25 до 53% - на сборочные цеха; доля механических цехов составляет 1-17%. Большие затраты на механическую обработку в объективе «Метеор-2» – около 32% - объясняется тем, что большая часть механических деталей объектива не собственного производства, а покупные.

Полученные результаты показывают, что основная часть затрат при изготовлении объективов приходится на оптические и сборочные цеха. Поэтому снижение трудоемкости изготовления объективов, в первую очередь, связано с сокращением трудоемких работ в этих цехах.

Из диаграммы следует, что в объективах с оптической компенсацией (ПФ-2, «Метеор-2» и «Метеор-5») трудовые затраты на изготовление оптики значительно превосходят затраты на сборку по сравнению с соответствующими затратами на объективы с механическими компенсацией (ПФ-3, «Агат-6А»).

Объясняется это тем, что объективы с оптической компенсацией состоят из большего количества оптических элементов (более 18), в то время как в объективах с механической компенсацией их значительно меньше: в ПФ-3 – 15, а в «Агате-6А» – 13.

Из диаграммы видно, что если в объективах ПФ-2, ПФ-3, «Агат-6А» и «Метеор-3» трудовые затраты на изготовление оптики примерно одинаковые, то затраты на сборку этих объективов значительно отличаются друг от друга. Так, в объективах с оптической компенсацией (ПФ-2 и «Метеор-2») они соответственно составляют 35% и 25%, а в объективах с механической компенсацией (ПФ-3 и «Агат-6А») соответственно 53% и 38%.

Приведенные данные убедительно подтверждают тот факт, что объективы с механической компенсацией в сборке действительно представляют для производства более сложные системы, чем объективы с оптической компенсацией.

Таким образом, из рассмотрения затрат на изготовление объективов переменного фокусного расстояния следует, что вне зависимости от класса объектива и условий производства, качество изготовления в значительной степени формируется при сборке. Причем, чем ниже класс объектива, тем проще его конструкция и тем больше его сборка приближается к сборке, выполняемой на основе полной взаимозаменяемости, тем меньше ее влияние на качество объектива и тем относительно большее влияние на качество объектива оказывают свойства деталей и, следовательно, процессы их изготовления. Наоборот, чем сложнее объектив, тем в большей степени его качество формируется в процессе сборки. Так, в объективе ПФ-3 на сборку приходится 53% всех затрат на объектив, в то время, как на объектив ПФ-2, который имеет более низкие эксплуатационно-технические параметры и более простую конструкцию, приходится 30%. На механическую обработку, наоборот, затраты в объективе ПФ-3, примерно, в два раза меньше, чем в объективе ПФ-2.

К основным причинам, определяющих большой объем трудовых затрат в сборочных цехах, следует отнести:

- нерациональность конструктивных решений объективов;
- низкий уровень унификации элементов конструкции;
- большой удельный вес юстировочных и доделочных работ, связанный с необходимостью достижения требуемой точности расположения оптических элементов в собранном объективе;
- отсутствие научно-обоснованных решений юстировочных задач, имеющих место при сборке объектива.

Из этого следует, что основное внимание при компоновке конструкции необходимо уделить решению вопросов сборки и юстировки объектива и проводить их следует так, чтобы наибольшее снижение трудоемкости приходилось на эти операции.

При компоновке должны быть учтены характер сборки и разборки, предусмотрены условия удобного осмотра и устранения отклонения компонентов от заданных положений в процессе юстировки без нарушения выставки других компонентов, разработаны принципиальные кинематические схемы механизмов и др.

Процесс компоновки во многом зависит от опыта, навыков и способностей конструктора, поэтому приводимая ниже методика не является единственно возможной, ее следует считать как пример, цель которого показать то основное, что в той или иной степени присуще проектированию объектива переменного фокусного расстояния.

7.3.2. Поузловая компоновка

Развитие систем переменного увеличения идет по пути усложнения конструктивных схем и повышения требований к точности их изготовления. При этом роль сборочно-юстировочных работ возрастает и вопросы блочности конструкции приобретает особенно важное значение.

Задача определения необходимой компоновочной схемы объектива должна ставиться на этапе составления ТЗ для оптического расчета. При этом конструктор должен учитывать тип возможного крепления объектива в съемочном аппарате и влияние его на сборку остальных узлов аппарата.

Исходя из этих рассуждений принципиальную компоновочную схему объектива можно представить в виде четырех блоков, как это показано на рис.7.2.



Н – блок насадки

П – блок призмы

Д – блок диафрагмы

О – блок собственно объектива

Рис. 7.2. Блочная схема объектива

При решении задач, имеющих место при проектировании конструкции объектива, необходимо всегда стремиться к соблюдению сборочной независимости указанных блоков. Это позволит отдельно собирать и контролировать их, облегчит поиск и устранение дефектов; значительно повысит уровень взаимозаменяемости отдельных элементов конструкции без разъюстировки соседних узлов; позволит организовать параллельные работы и этим сократить цикл сборки, даст возможность специализировать рабочие места и оборудовать их своими приспособлениями и т.д.

Исследование отечественных и зарубежных съемочных аппаратов показало, что количество практически применяемой компоновки блоков можно свести к четырем (см. рис.7.3), отличающихся друг от друга по месторасположения объектива О, призмы П и диафрагмы относительно насадки Н.

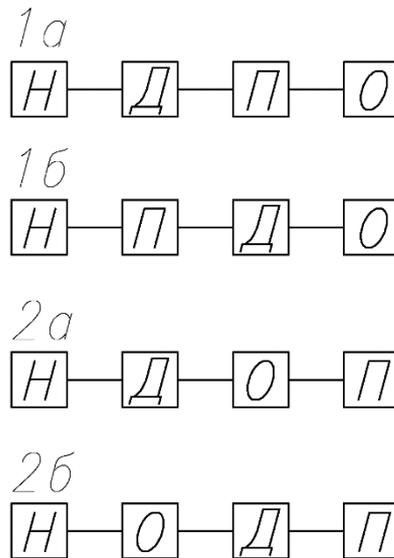


Рис. 7.3. Вариант компоновки

Принципиальное различие первого и второго вариантов состоит в том, что в первом случае блок призмы устанавливается до “собственно” объектива, а во втором – за ним.

Отличие вариантов 1а от 1б и 2а от 2б сводится к различному положению диафрагмы относительно призмы.

С точки зрения получения минимума габаритов объектива, второй вариант более предпочтителен чем первый, но если сравнивать варианты по величине трудовых затрат на сборку и юстировку, то второй вариант, безусловно, значительно уступает первому. При таком компоновочном решении повышаются требования к точности выставления призмы, так как она в этом варианте работает в сильно сходящихся пучках, и погрешности ее положения (заклоны) сильнее влияют на качество изображения, чем в параллельных или слабо расходящихся пучках, что имеет место в первом варианте. Кроме того, при выставлении плоскости изображения относительно ползков фильмового канала уменьшаются возможности юстировочных подвижек собственно объектива. В случае, когда призма П и объектив О объединены в единый узел, перемещение этого узла при совмещении плоскости изображения с плоскостью фильмового канала вызовет смещение изображения вдоль и поперек оси визира. Для избежания срезания поля зрения визира его выставление должно производиться после окончательной установки объектива относительно фильмового канала. Таким образом, установка визира в кинокамере становится зависимой. Это может усложнить производственный процесс сборки аппарата и, особенно, при повторных сборках-разборках, имеющих место в рабочих цехах.

Окончательный выбор того или иного варианта расположения призмы зависит от конкретных задач, стоящих перед проектировщиком. Что касается положения диафрагмы, то в любительских объективах ее выставление до призмы при малых отверстиях диафрагмы приводит к изменению

освещенности в визире; уменьшению точности внутрибазового дальномера; возникновению неравномерного экспонирования по полю кадра при использовании полупрозрачных или зеркальных пятен и колец для отвода части светового потока в визир.

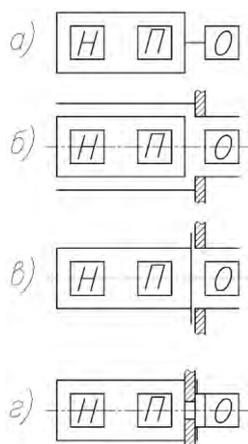
Все эти недостатки отсутствуют при установке диафрагмы после призмы.

Относительное крепление блоков насадки Н, призмы П и объектива О может быть следующим.

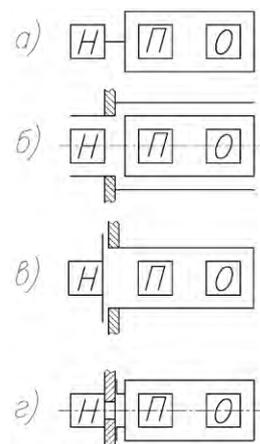
Насадка Н и призма П объединяются в один укрупненный узел “собственно” объектива О (рис.7.4).

Призма П и объектив О объединяются в один узел, к которому в дальнейшем присоединяют узел насадки Н (рис.7.5).

Соединение узлов может происходить или в единой корпусной детали (рис.7.4б и 7.5б) или по схемам, представленным на рис.7.4в, г и 7.5в, г. Здесь узел “собственно” объектива О или укрупненный узел “собственно” объектива О и призмы П крепятся к корпусной детали насадки или корпусу киноаппарата одним из известных способов.



*Рис. 7.4. Варианты крепления
блоков объектива*



*Рис. 7.5. Варианты крепления
блоков объектива*

Объединение всех трех узлов в единой корпусной детали предпочтительнее использовать для вариообъективов, когда между насадкой и объективом имеет место значительная расходимость пучков лучей, при которой поперечные смещения и заклоны сильно сказываются на качестве изображения.

Второй вариант предпочтительнее для трансфокаторов или вариообъективов с незначительной расходимостью лучей за насадкой.

С точки зрения простоты и удобства сборки первый вариант значительно уступает второму.

В качестве примера рассмотрим принципиальные схемы конструкций объективов «Гранит-3» (рис.7.6).

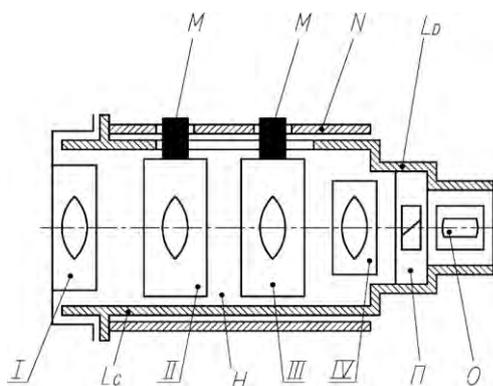


Рис. 2.6. Принципиальная компоновочная схема объектива «Гранит-3»

Узлы объектива «Гранит-3» крепятся в корпусной детали L , причем, если узел объектива O обладает автономностью, то этого нельзя сказать ни об узле призмы Π , ни об узле насадки H . Действительно, чтобы вынуть узел призмы Π (для чистки или восстановления юстировки), необходимо последовательно разобрать всю насадку. То же самое приходится делать, если по каким-либо причинам требуется доступ к IV компоненту. Понятно, что такой разборки насадки можно и не производить, если выполнить ее отдельным узлом; в этом случае достаточно было бы провести расстыковку ее корпусной части L_C с остальной частью L_D .

При этом, без разборки всей насадки, открывался бы доступ к узлу призмы и компоненту IV .

На рис.7.7 изображена схема другого объектива «Метеор-2». В этой конструкции, как и в предыдущей, только объектив VII является независимым узлом. Узлы призмы и насадки не обладают этим свойством. Но в отличие от объектива «Гранит-3» здесь более удачно решена компоновка насадки. Она состоит из трех независимых узлов: узла I компонента, узла A подвижных компонентов II и IV и узла B неподвижных компонентов II и V , которые быстро и просто собираются и разбираются в корпусе объектива. Конструкция объектива еще более выиграла, если бы поузловое членение объектива было выполнено до конца.

Так, при изготовлении насадки отдельным блоком, значительно облегчились бы установка призмы, IV компонента и доступ к ним. Указанных недостатков лишена компоновочная схема объектива «Агат-14» (рис.6.7).

В этой конструкции «собственно» объектив и призма объединены в один узел, который собирается и юстируется отдельно от узла насадки. Из схемы следует, что для того чтобы вынуть узел призмы не надо разбирать всю насадку, как это приходилось делать в объективе «Гранит-3». Для этого достаточно снять укрупненный узел призмы Π и собственно объектива O .

При такой компоновке без особого ущерба для юстировки всего кинообъектива, возможен легкий доступ к призме, собственно объективу и насадке.

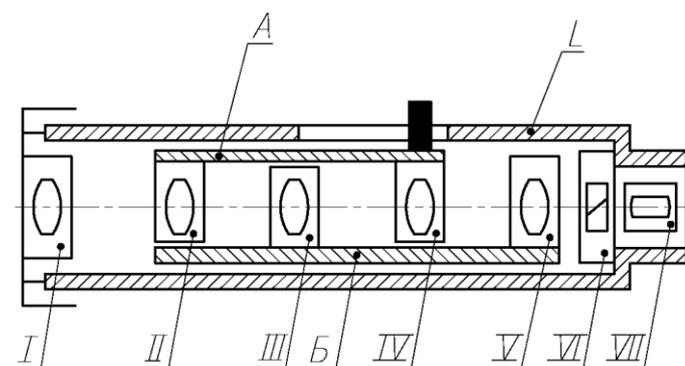


Рис. 7.7. Принципиальная компоновочная схема «Метеор-2»

7.4. Проектирование насадки

7.4.1. Основные задачи, решаемые при проектировании насадки

Насадка, как отмечалось выше, выполняет основные функции в объективах переменного фокусного расстояния: при перемещении ее компонентов происходит изменение фокусного расстояния объектива и компенсация возникающего при этом сдвига плоскости изображения.

Трудности проектирования насадки сводятся в основном к решению задач выбора необходимых механизмов для придания плавного перемещения подвижным компонентам насадки в соответствии с заданными законами движения; сохранения допустимой центрировки во всем диапазоне перемещения этих компонентов; обеспечение простоты и удобства сборки и юстировки насадки. Невыполнение хотя бы одного из поставленных требований значительно снижает возможность серийного выпуска изделия.

Удовлетворительное решение задач зависит от многих факторов и, в первую очередь, от ожидаемого объема выпуска объективов, кинематического построения оптической схемы, допустимых отклонений оптических элементов от расчетного положения и допустимых габаритов.

7.4.2. Проектирование подвижных компонентов

После тщательного ознакомления с таблицами коэффициентов влияния конструктор должен обратить внимание на подвижные элементы. Именно с них необходимо начинать проектирование насадки, так как от того насколько тщательно они спроектированы будут зависеть основные функциональные и эксплуатационные свойства объектива.

Наиболее важным, как с точки зрения нахождения принципиальной схемы механизма перемещения компонентов, так и ожидаемой последовательности сборки насадки является вариатор. Перемещаясь на значительно большие расстояния, чем компенсатор, он накладывает серьезные ограничения на выбор максимальной длины направляющей, чем фактически определяет возможность появления или отсутствия заедания.

Например, в объективе ПФ-3 при перемещении вариатора на 41,6 мм длина направляющей не может быть больше 8 мм.

При цилиндрических направляющих аксиального типа, примененных в этом объективе, и тех материалах, из которых они изготовлены (Д16Т – ЛС59-1), для предотвращения неизбежного при этом заклинивания перемещение компонента осуществляется тремя пазами, расположенными друг относительно друга через 120°.

В объективе «Агат-14», в котором также использованы цилиндрические направляющие аксиального типа, длину направляющей больше чем 12 мм получить не удалось. При применении одного направляющего паза вместо трех, заедание удалось устранить уменьшением трения в трущейся паре за счет отказа от пары Д 16Т – Д 16Т и переходом к паре В95 – фторопласт-4.

В объективе «Вариогор-2Б» использование конструкции направляющих аксиального типа с длиной направляющей 30 мм даже с анодированными трущимися парами В95 – В95 не удалось получить необходимой плавности хода. В результате чего пришлось перейти к другому типу направляющих цилиндрическим аксиальным (конструкция на пинолях), что позволило значительно улучшить плавность хода.

Таким образом, решение конструкции вариатора определяет фактически выбор типа направляющих для перемещения подвижных компонентов в объективе.

Конструкция вариатора должна решать и другую важную задачу: возможность юстировки контрольных переменных воздушных промежутков объектива. Это означает, что с помощью вариатора должно осуществляться приведение переменных воздушных промежутков в соответствии положению винтов в направляющих пазах относительно конструктивной базы кулачка. Теоретические основы юстировки промежутков будут рассмотрены нами в главе 8.

7.4.3. Выбор механизма для перемещения компонентов

Число возможных механизмов, которые могли бы быть использованы для перемещения подвижных компонентов по заданным законам, достаточно велико. Но в практике проектирования отечественной и зарубежной промышленности наибольшее распространение получили два типа механизмов: кулачковые устройства с применением цилиндрических и дисковых кулачков и рычажные устройства (см. п.6.2).

Выбор того или иного механизма зависит от многих факторов:

- выходных параметров объектива,
- ожидаемого объема выпуска,
- производственных мощностей на данном предприятии,
- культуры производства, сложившихся традиций и т.д.

Из этого следует, что давать какие-то окончательные рекомендации по выбору механизмов чрезвычайно сложно и трудно.

Но изучение патентной и технической литературы, исследование зарубежных образцов позволяют сделать следующие выводы:

1. Для получения минимальных габаритов объективов и особенно объективов с большим перепадом изменения фокусного расстояния почти всегда применяются цилиндрические кулачки аксиального типа.
2. Если требования к габаритам не являются преобладающими и объективы относятся к массовым или крупным партиям, то применение дисковых кулачков более предпочтительно.
3. Применение рычажных механизмов весьма редкое явление и используются они в основном при перепадах фокусных расстояний, не превышающих $2-3^x$.

7.4.4. Задачи, решаемые при проектировании механизма перемещения компонентов

При проектировании механизма для перемещения подвижных компонентов конструктор должен, во-первых, стремиться к получению минимально простого, с технологической точки зрения, решения, так как нельзя забывать, что речь идет об объективах, выпускаемых крупными сериями.

Во-вторых, конструктор должен обеспечить требуемую точность децентрировки подвижных компонентов на всем диапазоне изменения фокусного расстояния.

В-третьих, конструктор должен добиться такой плавности хода, когда перепад усилий при изменении фокусного расстояния не превышал бы 1,5-2 раз, а момент вращения кулачка не превышал бы заданной величины, определяемой характеристиками электродвигателей, используемых для зуммирования.

В-четвертых, при использовании цилиндрических кулачков необходимо стремиться к тому, чтобы число пазов в нем не превышало бы двух (один – криволинейный, для компенсатора, второй – винтовой, для вариатора), так как нарезание большого количества пазов, например, шести в объективах «Гранит-3» и «Пандора-6А», ведет к снижению точности расположения компонентов, увеличению перепадов в моментах вращения при переходе точки перегиба криволинейного паза, уменьшению угловой длины паза, что ведет к ослаблению жесткости кулачка и повышению трудовых затрат на его изготовление.

В-пятых, при проектировании оправ подвижных компонентов объективов среднего и высокого класса желательно учесть возможность отдельного контроля их центрировки.

В-шестых, в конструкции должна быть учтена возможность корректировки контрольных переменных воздушных промежутков с помощью резьбового соединения, прокладок, эксцентричных винтов, шайб или «сухариков», ограничивающих вращение кулачка.

В-седьмых, желательно устанавливать и крепить отдельные линзы в оправках в подвижных компонентах со стороны входа и выхода насадки. Это позволит при сборочно-разборочных работах значительно упростить работы, связанные с проведением центрировки, чистки объективов и различного рода доделочных операций.

7.4.5. Анализ конструкций направляющих для подвижных компонентов

В большей части объективов переменного фокусного расстояния применяются направляющие замкнутого типа с трением скольжения по цилиндрическим и призматическим поверхностям.

Выше отмечалось, что основной проблемой, решаемой в процессе проектирования, является проблема обеспечения высокой точности положения подвижных компонентов. Проанализируем подробнее с этой точки зрения конструктивные решения направляющих, нашедших в настоящее время наиболее широкое распространение в объективах переменного фокусного расстояния.

Цилиндрические направляющие аксиального типа

Поперечные смещения подвижных компонентов в конструкции с направляющими аксиального типа определяются заклоном в зазоре Z между корпусом и наружной оправой компонента и поперечным смещением в зазорах Z_1 , Z_2 , Z_3 между винтами и соответствующими пазами кулачка (рис.7.8). Заклон в зазоре Z возникает из-за самоторможения оправы компонента в корпусе объектива, что часто происходит из-за неправильного выбора длины направляющих для применяемых видов материалов.

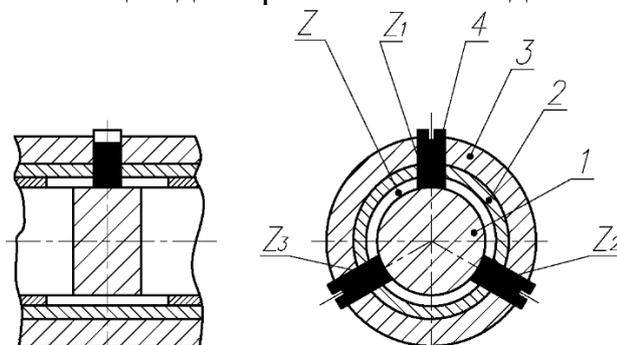


Рис. 2.8. Конструкция с направляющими аксиального типа

При малом зазоре между подвижными компонентами и корпусом объектива возникающее реактивное давление R , прикладываемое к оправе

подвижного компонента, распределяется по закону, зависящему от многих параметров. Будем предполагать, что

$$F = \frac{3Pd}{l} \mu \quad [2.29]$$

Самоторможение отсутствует при $P \geq F = F_1 + F_2$, где P – действующая сила. Откуда $l \geq 3\mu d$ (рис.7.9).

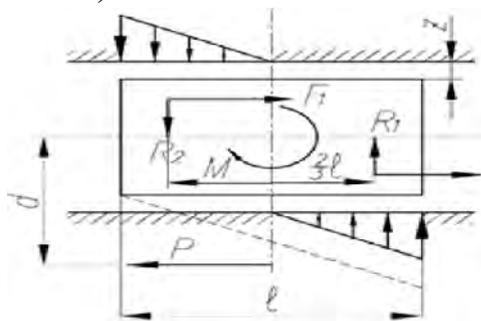


Рис. 7.9. Схема распределения усилий в подвижном компоненте

Для обеспечения большой легкости хода и уменьшения износа рекомендуется выбирать длину направляющей так, чтобы $l \geq 4\mu d$.

В случае применения анодированных пар Д16 – Д16, для которых коэффициент сухого трения равен $\mu = 0,35$, длина l направляющей подвижных компонентов должна быть не менее $l = 1,4d$ мм, а при использовании смазки $l = 0,4d$ мм.

Анализ направляющих в объективе «Агат-14» на основе полученных соотношений показал, что в этом объективе длина направляющих равна 22 мм и без использования смазочных материалов возможно заклинивание ($l = 30,8$ мм при $\mu \approx 0,35$; $l = 8,8$ мм при $\mu \approx 0,1$).

Оценим поперечное смещение компонента в зазоре между винтами и пазами корпуса, расположенными через 120° (рис. 7.10).

Пусть имеется подвижный компонент, оптическая ось которого проходит через точку O перпендикулярно к координатной плоскости XOY . Пусть между винтами и корпусом в пазах имеются зазоры Z_1, Z_2, Z_3 , в общем случае не равные между собой.

Допустим, что компонент смещается в направлении, определяемом углом θ (рис.7.10).

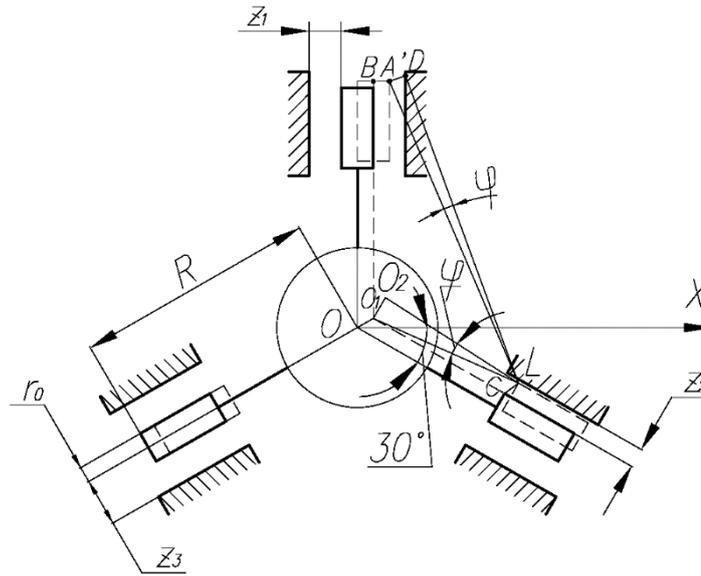


Рис. 7.10. Схема смещений компонента в зазорах Z_1 , Z_2 и Z_3

Величина этого смещения OO_1 определяется зазором Z_2 и будет равна

$$CL = \frac{Z_2}{\sin(\theta + 30^\circ)} = OO_1.$$

После того как точка C займет положение точки L , последует разворот компонента относительно точки L на угол φ за счет зазора $A'D$

$$\varphi = \frac{A'D}{A'L} = \frac{Z_1 \sin(\theta + 30^\circ) - Z_2 \cos\theta}{\sqrt{3}R \sin(\theta + 30^\circ) \cos 30^\circ}.$$

При развороте компонента на угол φ , его центр, занимавший положение O_1 , переместится в положение O_2 . Величина этого смещения будет равна

$$O_1O_2 = R \cdot \varphi = \frac{Z_1 \sin(\theta + 30^\circ) - Z_2 \cos\theta}{\sqrt{3} \sin(\theta + 30^\circ) \cos 30^\circ}.$$

Определим суммарную величину смещения OO_2 . Для этого спроектируем OO_1 и O_1O_2 на оси координат X и Y

$$\begin{aligned} \sum X &= OO_1 \cos\theta + O_1O_2 \cos(60^\circ + \alpha), \\ \sum Y &= OO_1 \sin\theta + O_1O_2 \sin(60^\circ + \alpha). \end{aligned}$$

Так как α мало ($\operatorname{tg}\alpha = \frac{r_0}{R}$), то можно принять

$$\cos(60^\circ + \alpha) = \cos 60^\circ, \quad \sin(60^\circ + \alpha) = \sin 60^\circ$$

Тогда

$$\sum X = \frac{Z_2 \cos\theta}{\sin(\theta + 30^\circ)} + \frac{(Z_1 \sin(\theta + 30^\circ) - Z_2 \cos\theta) \cos 60^\circ}{\sqrt{3} \sin(\theta + 30^\circ) \cos 30^\circ},$$

$$\sum Y = \frac{Z_2 \sin \theta}{\sin(\theta + 30^\circ)} + \frac{[Z_1 \sin(\theta + 30^\circ) - Z_2 \cos \theta] \sin 60^\circ}{\sqrt{3} \sin(\theta + 30^\circ) \cos 30^\circ}.$$

Отсюда

$$OO_2 = \sqrt{\left[\frac{2 \cos \theta \cdot Z_2}{3 \sin(\theta + 30^\circ)} + \frac{1}{3} Z_1 \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3} \sin \theta - \cos \theta}{\sqrt{3} \sin(\theta + 30^\circ)} Z_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} Z_1 \right]^2}.$$

Поскольку, как правило, допустимые значения зазоров $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_0$, то величина смещения компонента будет равна:

$$OO_2 = \frac{\sqrt{28}}{3} Z_0 = 1,76 \cdot Z_0 \text{ при } \theta = 0^\circ;$$

$$OO_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} Z_0 = 1,15 \cdot Z_0 \text{ при } \theta = 30^\circ;$$

$$OO_2 = \frac{4}{3} Z_0 = 1,33 \cdot Z_0 \text{ при } \theta = 60^\circ;$$

$$OO_2 = \frac{\sqrt{28}}{3} Z_0 = 1,76 \cdot Z_0 \text{ при } \theta = 90^\circ.$$

Из приведенных данных следует, что минимальная величина поперечного смещения будет иметь место, когда направление смещения совпадает с осью одного из винтов.

Поэтому крепление объектива к киноаппарату должно происходить таким образом, чтобы ось одного из винтов лежала в плоскости, содержащей направление силы веса оправы.

Приведенный расчет также показывает, что наибольшее смещение за счет зазора почти в два раза превышает его допустимое значение. Сказанное позволяет правильно ориентироваться при выборе посадок в сопряжении винт – паз.

Цилиндрические направляющие неаксиального типа – конструкции на пинолях.

Известно два типа конструкций на пинолях, т.е. на цилиндрических стержнях.

В первом – пиноли крепятся своими концами в корпусной детали и по ним происходит перемещение подвижных компонентов. Во второй – пиноли жестко устанавливаются на оправках подвижных компонентов и совместно с ними перемещаются вдоль внутренних пазов корпуса объектива.

На рис.7.11 представлена принципиальная схема конструкции первого типа (пат.3106125 США), в которой подвижный компонент 1 перемещается вдоль неподвижных пинолей 2 и 2а (рис.7.12).

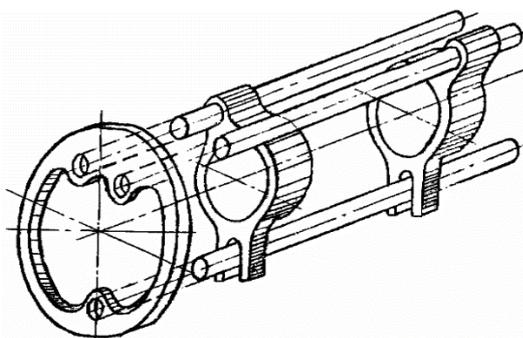


Рис. 7.11. Принципиальная схема объектива на пинолях

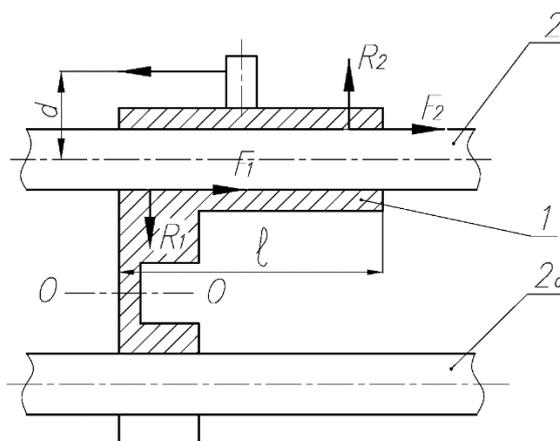


Рис. 7.12. Распределение усилий в направляющих на пинолях

Основным достоинством этой конструкции является то, что она позволяет прилагать значительно меньшие усилия для перемещения, чем в предыдущем варианте; обеспечивать большую плавность хода при той же и даже меньшей длине направляющих. Объясняется это тем, что величина плеча приложения силы в этом варианте обычно в несколько раз (5-8) меньше, чем в варианте с направляющими аксиального типа. Из рассмотрения схемы следует $F = F_1 + F_2 = \frac{3Pd}{l} \mu$.

Явление самоторможения будет отсутствовать, если $P > F$. Отсюда $l > 3d\mu$.

Для обеспечения большей легкости хода и уменьшения износа рекомендуется выбирать размеры так, чтобы $l \geq 16d\mu$.

Например, для фрикционной пары (сталь-50, Д-16) («Вариогоир-2Б») коэффициент сухого трения равен $\mu \approx 0,2$ мм; $d = 4$ мм; длина направляющей l должна быть не менее 12,8 мм.

В конструкции объектива длина направляющей l принята равной 20 мм, что вполне достаточно для обеспечения плавности хода.

Определим поперечное смещение оси О-О отверстия несущей оправы в зазорах Z_1, Z_2 сопряжений пиноль – оправа и от погрешностей в координатах мест крепления концов пинолей.

Рассмотрим несколько вариантов расположения пинолей друг относительно друга и попытаемся определить вариант, позволяющий

получить наименьшую величину смещения оси О-О отверстия оправы под оптику при различных направлениях силы тяжести относительно пинолей.

В общем случае радиальные зазоры Z_1 , Z_2 между пинолями и отверстиями не равны между собой (рис.7.13). Пусть $Z_2 > Z_1$, тогда при смещении оправы в направлении, определяемом углом μ , центр оправы O сместится на величину $OO_1 = Z_1$ в положение O_1 . При дальнейшем действии усилия в этом направлении произойдет разворот оправы вокруг точки N на угол γ в зазоре $AC = \frac{BC}{\cos \varphi}$ сопряжения оправы – пиноль 2а. Центр оправы займет новое положение O_2 . Определим величину результирующего смещения оси оправы $O-O_2$. Очевидно $OO_2 = \sqrt{OO_3^2 + O_2O_3^2}$. Из рис.7.13 следует

$$\left. \begin{aligned} OO_3 &= OO_1 \cos \mu + O_1O_2 \cos \beta \\ O_2O_3 &= OO_1 \sin \mu + O_1O_2 \sin \beta \end{aligned} \right\},$$

где

$$OO_1 = Z_1;$$

$$\sin \beta = \frac{EO_1}{NO_1} = \frac{a + r \cos \mu}{NO_1}; \quad \cos \beta = \frac{EN}{NO_1} = \frac{b - r \sin \mu}{NO_1}.$$

$$O_1O_2 = NO_1 \cdot \gamma; \quad \gamma = \frac{AC}{CN};$$

$$AC = \frac{BC}{\cos \varphi}; \quad BC = Z_2 - Z_1 \cos \mu;$$

$$\cos \varphi = \frac{R + b - r \sin \mu}{CN}.$$

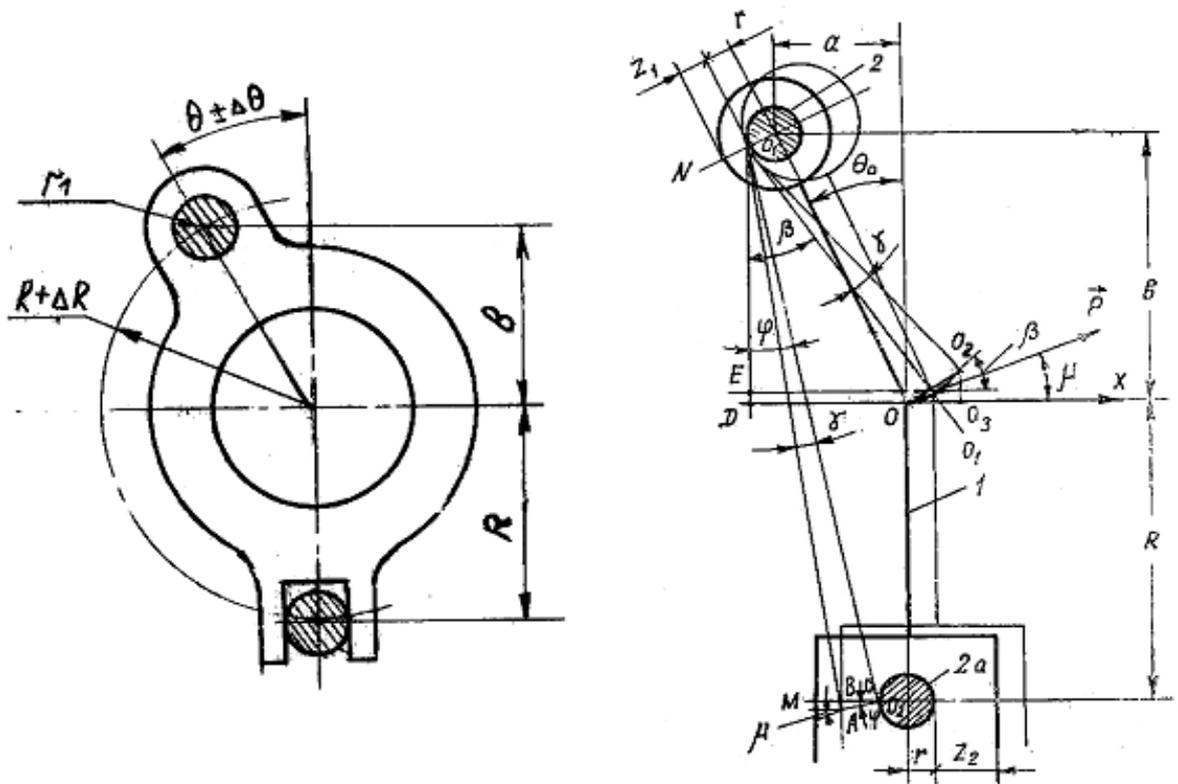


Рис. 7.13. Схема для расчета смещений компонента в зазорах Z_1 и Z_2

Отсюда

$$\gamma = \frac{Z_2 - Z_1 \cos \mu}{R + b - r_1 \sin \mu}.$$

Подставив значения OO_1 , OO_2 , $\cos \beta$, $\sin \beta$ в выражения для OO_3 , O_2O_3 , получим:

$$OO_3 = Z_1 \cos \mu + \gamma(b - r_1 \sin \mu);$$

$$O_2O_3 = Z_1 \sin \mu + \gamma(a - r_1 \sin \mu).$$

Окончательно

$$OO_2 = \sqrt{(Z_1 \cos \mu + \gamma(b - r_1 \sin \mu))^2 + (Z_1 \sin \mu + \gamma(a + r_1 \cos \mu))^2}. \quad (1)$$

Полученное выражение справедливо для углов $(270^\circ + \theta) \leq \mu \leq (90^\circ + \theta)$. Для остальной области углов $(90^\circ + \theta) \leq \mu \leq (270^\circ + \theta)$ следует применять формулу

$$OO_2 = \sqrt{(Z_1 \cos \mu - \gamma(b - r_1 \sin \mu))^2 + (Z_1 \sin \mu - \gamma(a + r_1 \cos \mu))^2}, \quad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{Z_2 + Z_1 \cos \mu}{R + b - r_1 \sin \mu}.$$

При эксплуатации объектива возможны различные его положения относительно направления силы тяжести P . Рассмотрим случаи, когда угол μ , задающий направление смещения, равен 0° , 90° , 180° и 270° . Величина результирующего смещения OO_2 для каждого из них будет определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
1. \mu = 0^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)b}{R+b}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(a+r_1)}{R+b}\right)^2}. \\
2. \mu = 90^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(\frac{b-r_1}{R+b-r_1} Z_2\right)^2 + \left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot a}{R+b-r_1}\right)^2}. \\
3. \mu = 180^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)b}{R+b}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(a-r_1)}{R+b}\right)^2}. \\
4. \mu = 270^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(\frac{Z_2}{R+b+r_1}(b+r_1)\right)^2 + \left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot a}{R+b+r_1}\right)^2}.
\end{aligned}$$

Если положение пинолей задано в полярных координатах (β, R) и угол $\beta = \theta$ отсчитывается от оси, проходящей через ось системы объектива 0-0 и центр пиноли Q, а R – расстояние от оси системы объектива 0-0 до центров пинолей, то для получения суммарного смещения OO_2 необходимо в формулы (1) и (2) вместо b и a подставить $R \cdot \cos \theta$ и $R \cdot \sin \theta$.

Рассмотрим второй вариант конструкции на пинолях (табл.7.3, второй вариант), когда угол, определяющий положение оси OQ_1 равен θ° , и оценим суммарную величину смещений центра оправы компонента в зазорах Z_1, Z_2 для различных направлений смещения $\mu: 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Так как вывод соответствующих формул ничем не отличается от предыдущего варианта, то сразу приведем окончательные результаты вычислений:

$$\begin{aligned}
1. \mu = 0^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1)a}{R+a}\right)^2 + \left((Z_2 + Z_1) \frac{b+r_1}{R+a}\right)^2}. \\
2. \mu = 90^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{(Z_2 - Z_1) \cdot a}{R+a}\right)^2 + \left(\frac{(Z_2 - Z_1)(b-r_1)}{R+a}\right)^2}. \\
3. \mu = 180^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + Z_2 \frac{b}{R+a-r_1}\right)^2 + \left(Z_2 \frac{a-r_1}{R+a-r_1}\right)^2}. \\
4. \mu = 270^\circ & \quad OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + \frac{Z_2 \cdot b}{R+a+r_1}\right)^2 + \left(\frac{Z_2(a+r_1)}{R+a+r_1}\right)^2}.
\end{aligned}$$

Для перехода к полярным координатам необходимо в полученных выражениях вместо b и a подставить $R \cdot \cos \theta$ и $R \cdot \sin \theta$.

В третьем варианте конструкций на пинолях (табл.7.3, третий вариант) определим величину смещения OO_2 только для $\mu = 270^\circ$, т.к. остальные направления смещений не имеют практической ценности. После несложных преобразований получим:

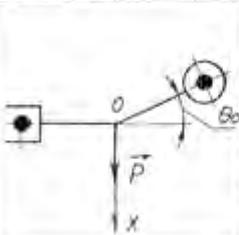
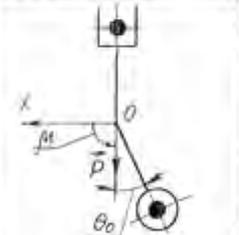
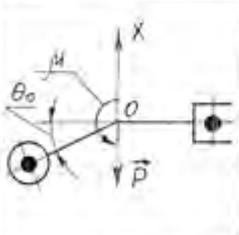
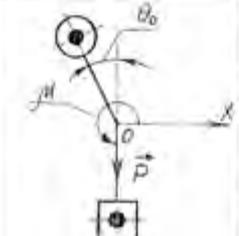
$$OO_2 = \sqrt{\left(Z_1 + (Z_1 + Z_2) \frac{a}{R+a}\right)^2 + \left((Z_2 + Z_1) \frac{b+r_1}{R-a}\right)^2}.$$

Результаты вычисления для различных схем расположения пинолей в полярных координатах сведены в табл.7.3. В последней (5) колонке таблицы

приведены расчетные значения смещений OO_2 для $Z_1=Z_2=0,01$; $R=132$ мм, $r_1=1,25$ мм; $\theta_0=13^\circ$.

Анализ этих значений позволяет сделать вывод, что при одних и тех же условиях первый вариант конструкции обеспечивает более высокую точность расположения подвижного компонента, чем два последующих.

Таблица 7.3

Номер схе- мы	Принципиальная схема располо- жения пинолей	Направ- ление смеще- ния, μ	Выражение для результирую- щего смещения OO_2	Смещение оправы при $\theta_0=13^\circ$ $R=13,2$ мм $z=1,25$ мм $Z_1=Z_2=0,01$
1	2	3	4	5
ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ				
I.1		0°	$\left[\left(Z_1 + (Z_2 - Z_1) \cdot \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_0 + 1} \right)^2 + \left((Z_2 - Z_1) \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0 + z}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
I.2		90°	$\left[\left(Z_1 + Z_2 \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1) - z} \right)^2 + \left(Z_2 \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0 - z}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1) - z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,012
I.3		180°	$\left[\left(Z_1 + (Z_2 - Z_1) \cdot \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_0 + 1} \right)^2 + \left((Z_2 - Z_1) \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0 - z}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
I.4		270°	$\left[\left(Z_1 + Z_2 \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1) + z} \right)^2 + \left(Z_2 \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0 + z}{R \cdot (\cos \theta_0 + 1) + z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,012

Продолжение таблицы 7.3

1	2	3	4	5
ВТОРОЙ ВАРИАНТ				
2.1		0°	$\left[\left(z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_0 + 1} \right)^2 + \left((z_2 - z_1) \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0 - z}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
2.2		90°	$\left[\left(z_1 + z_2 \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1) - z} \right)^2 + \left(z_2 \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0 - z}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1) - z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,018
2.3		180°	$\left[\left(z_1 + (z_2 - z_1) \cdot \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_0 + 1} \right)^2 + \left((z_2 - z_1) \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0 + z}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,010
2.4		270°	$\left[\left(z_1 + z_2 \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1) + z} \right)^2 + \left(z_2 \cdot \frac{R \cdot \sin \theta_0 + z}{R \cdot (\sin \theta_0 + 1) + z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,017
ТРЕТИЙ ВАРИАНТ				
3.1		0°	$\left[\left(z_1 + (z_1 + z_2) \cdot \frac{\sin \theta_0}{1 - \sin \theta_0} \right)^2 + \left((z_1 + z_2) \cdot \frac{R \cdot \cos \theta_0 + z}{R \cdot (1 - \sin \theta_0)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	0,030

Рассмотрим влияние погрешностей расположения ΔR и $\Delta \theta$ мест крепления несущей пиноли Q на величину смещения центра несущей оправы подвижного компонента с оси системы объектива.

Допустим, что отверстие в корпусе объектива для установки в нем конца пиноли при изготовлении сместилось с расчетного положения Q_1 в новое положение Q'_1 на величину ΔR (рис.7.14). Очевидно, при креплении конца пиноли в отверстии, занявшем новое положение, центр O несущей оправы сместится с оси объектива. Определим величину этого смещения.

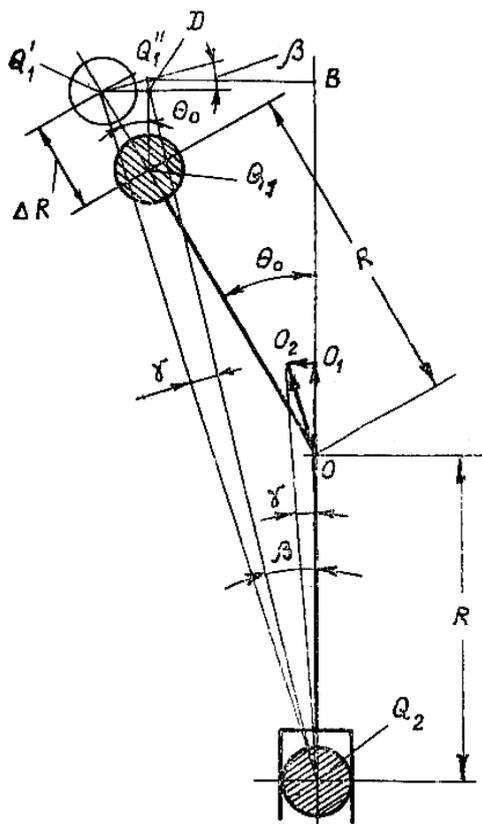


Рис. 7.14. Схема для расчета смещения компонента от погрешности ΔR

Процесс перемещения пиноли из расчетного положения в новое можно представить в виде двух движений: перемещения вверх на величину Q_1, Q'_1 и разворота пиноли на угол γ вокруг центра Q_2 второй пиноли. При этом центр O несущей оправы сместится с оси объектива соответственно на величины OO_1 и O_1O_2 .

В результате суммарное смещение OO_2 будет определяться выражением $OO_2 = \sqrt{OO_1^2 + O_1O_2^2}$,

где

$$OO_1 = Q_1Q' = Q_1D + DQ'' = \Delta R \cdot \cos \theta_0 + Q'_1D \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Здесь

$$Q'_1D = \Delta R \cdot \sin \theta_0,$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{Q_1'' B}{Q_2 B},$$

$$Q_1'' B = R \cdot \sin \theta_0,$$

$$Q_2 B = R(1 + \cos \theta_0).$$

После подстановки значений $Q_1'' D$ и $\operatorname{tg} \beta$ в выражение для OO_1 получим

$$OO_1 = \Delta R.$$

Из рис.2.13 следует:

$$O_1 O_2 = R \cdot \gamma,$$

$$\gamma = \frac{Q_1' Q_1''}{Q_1'' Q_2},$$

где

$$Q_1' Q_1'' = \frac{Q_1' D}{\cos \beta}, \quad Q_1' D = \Delta R \cdot \sin \theta_0, \quad \cos \beta = \frac{Q_2 B}{Q_2 Q_1''}$$

Здесь

$$Q_2 B = R(1 + \cos \theta_0), \quad Q_2 Q_1'' = \sqrt{Q_2 B^2 + B Q_1''^2},$$

Так как $B Q_1'' = R \cdot \sin \theta_0$, то

$$Q_2 Q_1'' = R \sqrt{2(1 + \cos \theta_0)}, \quad \cos \beta = \sqrt{0,5(1 + \cos \theta_0)}$$

Окончательно

$$Q_1' Q_1'' = \frac{\Delta R \cdot \sin \theta_0}{\sqrt{0,5(1 + \cos \theta_0)}}.$$

Поскольку $\Delta R \ll R$, то можно считать $Q_2 Q_1 = Q_2 Q_1''$.

Поэтому

$$\gamma = \frac{\Delta R \cdot \sin \theta_0}{R(1 + \cos \theta_0)}.$$

Следовательно, $O_1 O_2 = \frac{\Delta R \cdot \sin \theta_0}{1 + \cos \theta_0}$.

Подставим значения OO_1 и $O_1 O_2$ в формулу для OO_2 :

$$OO_2 = \sqrt{\Delta R^2 + \frac{\Delta R^2 \cdot \sin^2 \theta_0}{(1 + \cos \theta_0)^2}} = \frac{\Delta R}{\cos \frac{\theta_0}{2}}.$$

Определим смещение центра оправы OO_2' от наличия погрешности в угле θ_0 .

Из рис.7.15 следует, что $OO_2' = \sqrt{OO_1'^2 + O_1' O_2'^2}$, где

$$OO_1' = Q_1 O_1' = QC - Q_1' C = R \Delta \theta_0 \cdot \sin \theta_0 - R \Delta \theta_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot \operatorname{tg} \beta.$$

Но $\operatorname{tg} \beta = \frac{Q_1' D}{Q_2 D} = \frac{\sin \theta_0}{1 + \cos \theta_0}$.

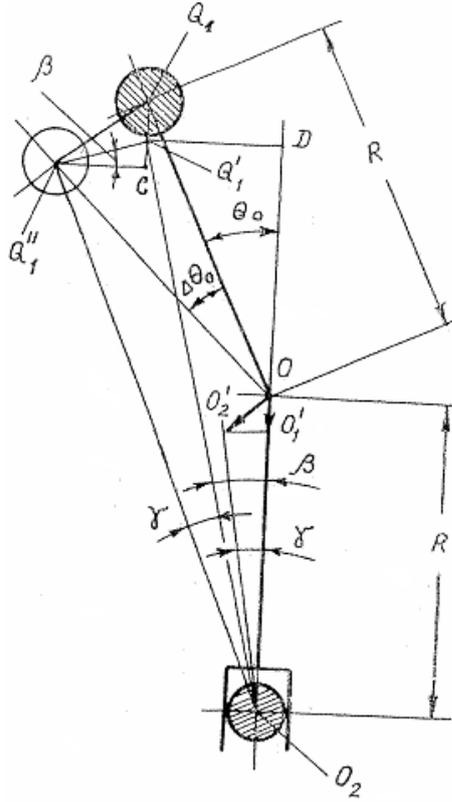


Рис. 7.15. Схема для расчета смещения компонента от погрешности $\Delta\theta_0$

Поэтому

$$OO_1' = Q_1Q_1' = \frac{R\Delta\theta_0 \sin \theta_0}{1 + \cos \theta_0}, \quad O_1'O_2' = R \cdot \gamma,$$

Где

$$\gamma = \frac{Q_1Q_1''}{Q_2Q_1'}$$

$$O_1'O_1'' = \frac{Q_1''C}{\cos \beta}; \quad Q_1''C = \Delta\theta_0 R \cdot \cos \theta_0,$$

$$\cos \beta = \frac{Q_2D}{Q_2Q_1'} = \sqrt{\frac{1 + \cos \theta_0}{2}}$$

Здесь $Q_2Q_1' = R\sqrt{2(1 + \cos \theta_0)}$.

Подставив значения Q_1Q_1'' и Q_2Q_1' в выражение для γ , получим

$$\gamma = \frac{\cos \theta_0}{1 + \cos \theta_0} \Delta\theta_0.$$

Следовательно

$$O_1'O_2' = \frac{\cos \theta_0}{1 + \cos \theta_0} R \Delta \theta_0.$$

Окончательно

$$OO_2' = \frac{R}{1 + \cos \theta_0} \Delta \theta_0.$$

Если предположить, что погрешности ΔR и $\Delta \theta_0$ подчиняются нормальному закону распределения, то результирующее смещение центра оправы будет описываться нормальным законом на плоскости, модуль смещения которого – законом, близким к рэлеевскому. Поэтому для допустимого смещения несущей оправы от погрешностей $\pm \Delta R$ и $\pm \Delta \theta_0$ можно записать

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{k_{\Sigma}} \sqrt{\frac{R^2}{(1 + \cos \theta_0)^2} \Delta \theta_0^2 + \frac{1}{\cos^2 \theta_0 / 2} \Delta R^2},$$

где δ_{Σ} - допустимое суммарное смещение центра несущей оправы, k_{Σ} - коэффициент относительного рассеяния для распределения, подчиняющегося закону Рэлея.

Практические расчеты серийно идущих объективов показали, что выведенные выражения для определения погрешностей положения подвижного компонента в объективе позволяют достаточно обоснованно выбирать необходимый вариант конструкции на пинолях и задавать допуски на сопряжение деталей объектива.

Другим оригинальным и широко применяемым решением направляющих неаксиального типа является конструкция Анженье. Отличие ее от варианта, рассмотренного выше, заключается в том, что если в предыдущей конструкции пиноли жестко крепятся к корпусу и его неподвижным деталям, то в конструкции Анженье пиноли крепятся на оправках подвижных компонентов (рис.7.16).

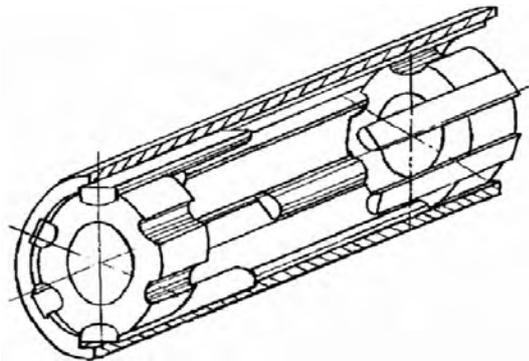


Рис. 7.16. Принципиальная схема конструкции Анженье

Определим величину поперечного смещения OO_3 компонента с оптической оси объектива. Для чего рассмотрим рис.7.17, на котором схематично представлена оправа с пинолями радиуса r в корпусе объектива. Углы $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 180^\circ$ (вариант 1).

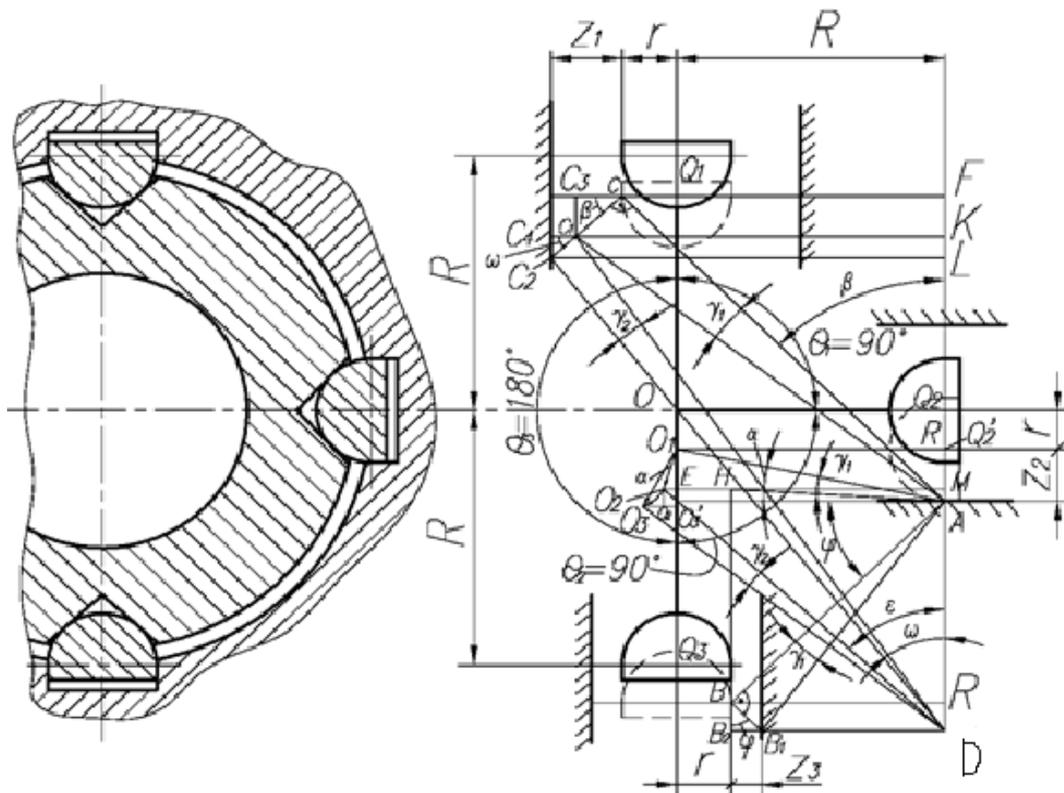


Рис. 7.17. Принципиальная схема конструкции направляющих Анженье и схема расчета смещений компонента в зазорах Z_1 , Z_2 и Z_3

В общем случае $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$. Допустим $Z_1 > Z_2 > Z_3$, $OO_1 = OO_2 = OO_3 = R$. Пусть оптическая ось компонента, след которой на рис. 2.15в обозначен через O , сместится в зазоре Z_2 на величину $OO_1 = Z_2$ в направлении, определяемом силой веса компонента. При этом пиноль Q_2 займет новое положение Q'_2 и коснется стенки паза корпуса в точке A . Далее под действием веса оправы компонента развернется вокруг точки A на угол γ_1 , равный

$$\gamma_1 = \frac{BB_1}{BA},$$

где

$$BB_1 = \frac{Z_3}{\sin \varphi},$$

$$BA = \frac{BH}{\sin \varphi} = \frac{R - r}{\sin \varphi}.$$

Отсюда

$$\gamma_1 = \frac{Z_3}{R-r}.$$

Разворот оправы в зазоре Z_3 на угол γ_1 , вызовет дополнительное смещение центра оправы на величину $O_1O_2 = O_1A \cdot \gamma_1$. Определим это смещение. Из треугольника AO_1E находим, что $O_1A = \sqrt{R^2 + r^2}$. Отсюда

$$\begin{aligned} O_1O_2 &= \frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{R-r} Z_3, \\ O_1O'_2 &= O_1O_2 \cdot \sin \alpha \\ O_1O''_2 &= O_1O_2 \cdot \cos \alpha, \end{aligned}$$

где

$$\cos \alpha = \frac{AE}{AO_1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{r}{\sqrt{R^2 + r^2}}.$$

Поэтому

$$\begin{aligned} O_1O''_2 &= \frac{R}{R-r} Z_3; \\ O_1O'_2 &= \frac{r}{R-r} Z_3. \end{aligned}$$

При развороте оправы на угол γ_1 , опорная точка C пиноли Q_1 займет новое положение, определяемое точкой C_1 .

После того, как пиноли Q_2 и Q_3 упрутся в стенки пазов корпуса объектива, соответственно в точках A и B_1 , пиноль Q_1 под действием веса получит дополнительный разворот в оставшемся зазоре C_1C_4 на угол γ_2 вокруг мгновенного центра вращения D . Этот разворот приведет к смещению центра оправы из положения O_2 в положение O_3 . Определим это смещение

$$O_2O_3 = DO_2 \cdot \gamma_2,$$

где

$$\gamma_2 = \frac{C_2C_1}{DC_1};$$

$$C_2C_1 = \frac{C_1C_4}{\cos \omega},$$

но

$$\cos \omega = \frac{DK}{DC_1}, \quad C_1C_4 = Z_1 - CC_3;$$

$$DK = 2R;$$

$$CC_3 = C_1C \cdot \cos \beta, \quad \cos \beta = \frac{AF}{AC};$$

$$C_1C = AC \cdot \gamma_1,$$

$$AF = R + r$$

Отсюда

$$CC_3 = (R+r)\gamma_1$$

$$\gamma_2 = \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2R}.$$

Окончательно

$$O_2O_3 = DO_2 \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2R},$$

$$O_2O'_3 = O_2O_3 \cdot \sin \varepsilon, \quad \cos \varepsilon \cong \frac{R}{DO_2}.$$

$$O_2O''_3 = O_2O_3 \cdot \cos \varepsilon, \quad \sin \varepsilon \cong \frac{R}{DO_2}.$$

Следовательно

$$O_2O'_3 = \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2},$$

$$O_2O''_3 = \frac{Z_1 - (R+r)\gamma_1}{2}.$$

Результирующее смещение будет равно

$$OO_3 = \sqrt{(OO_1 + O_1O'_2 + O_2O''_3)^2 + (O_2O'_2 + O_3O''_2)^2}$$

или после подстановки

$$OO_3 = \frac{1}{2} \sqrt{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3)^2 + (Z_1 - Z_3)^2}.$$

Приведем результирующее смещение для второго варианта конструкции, в котором углы между направляющими пинолями равны $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 120^\circ$.

$$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{3}(Z_2 + Z_3)^2 + \frac{1}{9}(2Z_1 + Z_3 - Z_2)^2}.$$

В третьем варианте $\theta_1 = \theta_3 = 135^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, расчет результирующего смещения проводится аналогичным образом. Поэтому ниже приведем только выражение для суммарного смещения OO_3 :

$$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(Z_3 + Z_2)^2 + \frac{1}{2(1+\sqrt{2})^2}(2Z_1 - Z_2 + Z_3)^2}.$$

Результаты вычислений смещений по трем вариантам крепления пинолей сведены в табл.4, в последней колонке 5 даны значения смещений OO_3 для $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0,02$.

Анализ данных табл.4 показывает, что при разработке конструкции на пинолях типа Анженье предпочтение следует отдать варианту II, позволяющему получать наименьшее поперечное смещение подвижного компонента в зазорах направляющих.

Таблица 7.4

Но- мер вари- анта	Принципиальная схема располо- жения пинолей	Углы между пино- лями	Результирующее смещение компонента OO_3	Смещение OO_3 при $Z_1 = Z_2 = Z_3 = 0,02$ мм
1	2	3	4	5
1		$\theta_1 = 90^\circ$ $\theta_2 = 90^\circ$ $\theta_3 = 90^\circ$	$OO_3 = 0,5\sqrt{(Z_1 + 2Z_2 + Z_3)^2 + (Z_1 - Z_3)^2}$	0,04
2		$\theta_1 = 120^\circ$ $\theta_2 = 120^\circ$ $\theta_3 = 120^\circ$	$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{3}(Z_2 + Z_3)^2 + \frac{1}{9}(2Z_1 + Z_3 - Z_2)^2}$	0,027
3		$\theta_1 = 135^\circ$ $\theta_2 = 90^\circ$ $\theta_3 = 135^\circ$	$OO_3 = \sqrt{\frac{1}{2}(Z_2 + Z_3)^2 + \frac{1}{2(1+\sqrt{2})^2}(2Z_1 - Z_2 + Z_3)^2}$	0,031

7.4.6. Цилиндрический кулачок

Цилиндрический кулачок является наиболее ответственной деталью в объективе не только с точки зрения ее функционального назначения, но и также с точки зрения проектирования и изготовления. Поэтому часто цилиндрическому кулачку предъявляют требования, заметно противоречащие друг другу. В качестве примера можно рассмотреть цилиндрический кулачок к объективам современных ручных видеокамер. С одной стороны он должен отвечать требованию получения минимально возможного момента вращения. И это требование очень жесткое, так как полностью определяется мощностью, развиваемой отечественными, но еще довольно не совершенными электродвигателями, используемыми в этих камерах для изменения фокусного расстояния. С другой стороны, к вращению цилиндрического кулачка предъявляются определенные требования по шуму. И они также достаточно жесткие. Шум, издаваемый подвижными частями объектива, не должен превышать 20-22 децибел. Это связано с использованием встроенных в камеру микрофонов.

Оба эти требования для проектировщика достаточно противоречивы. Так, достижение минимально возможного момента вращения кулачка и плавность

его хода в большинстве случаев требует перехода от трения скольжения (рис.7.18) к трению качения (рис.7.19).

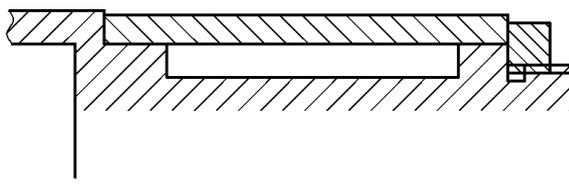


Рис. 7.18. Кулачок с трением скольжения

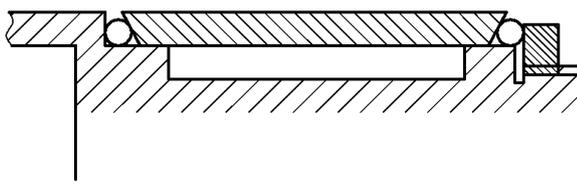


Рис. 7.19. Кулачок с трением качения

Но как замечено, этот переход всегда связан с появлением дополнительного шума, часто выходящего за допустимые пределы. К причинам его появления обычно относят микронеровности на поверхностях качения; проскальзывание за счет разности линейных скоростей в точках качения шариков, а в случае отсутствия сепараторов, задевание шариков друг за друга. Борьба с шумом в этих случаях идет по пути повышения чистоты рабочих поверхностей до $\nabla 10$ и выше, что может быть достигнуто применением алмазного точения; использованием сепараторов из антифрикционных материалов, таких как фторопласт-4; замены металлических шариков на неметаллические. Но как показал опыт, несмотря на всякие конструктивные и технологические ухищрения шума в таких конструкциях всегда больше, чем в конструкциях с трением скольжения. Поэтому радикальное уменьшение шума обычно связывают с использованием в объективах трения скольжения. Но и в этом случае стремятся уменьшить трение за счет применения различного рода антифрикционных покрытий. Именно по этому пути пошли многие японские и американские фирмы при создании ручных телевизионных видеокамер.

В отечественных объективах также используются различные покрытия. Но чаще всего это фторопласт или фторопласт с различными наполнителями. Наносятся они либо напылением, либо окунанием в раствор. В обоих случаях толщина антифрикционного слоя, как правило, не мерная и колеблется от нескольких микрон до десятых долей миллиметра. В связи с чем кулачки требуют дополнительной обработки. Применение кулачков на трении скольжения более перспективно еще и потому, что объектив в этом случае получается легче и проще в сборке и юстировке. При компоновании объектива цилиндрический кулачок размещается внутри корпуса или снаружи.

Расположение кулачка снаружи корпуса выгодно тем, что в этом случае значительно облегчается сборка и юстировка объектива, особенно, выставка его подвижных компонентов; упрощается конструктивная схема автозумма и доступ ко всем его узлам на этапе окончательной сборки аппарата.

К преимуществам расположения цилиндрического кулачка внутри корпуса следует отнести большую пыле- и грязезащищенность кулачков, приближения точек приложения сил, перемещающих подвижные компоненты, к направляющим поверхностям скольжения. Внутреннее расположение цилиндрических кулачков применяется также в тех случаях, когда на корпусе объектива необходимо разместить механизмы и устройства, например, такие как электродвигатели, гальванометры, электросхемы и т.д., по тем или иным причинам не помещающиеся в корпусе аппарата.

Криволинейные пазы, обеспечивающие перемещение подвижных компонентов по требуемым законам, могут быть нанесены на корпусе объектива или на отдельной цилиндрической оправке.

Нарезание пазов на отдельной оправке имеет ряд существенных преимуществ перед нанесением их на корпусе объектива. К этим преимуществам, в первую очередь, следует отнести отсутствие вращения подвижных компонентов в корпусе объектива при их перемещении вдоль оптической оси. Наличие такого вращения из-за погрешностей изготовления корпуса (неправильность геометрической формы отверстия корпуса вдоль всего посадочного места) может привести к заметному нарушению центрировки объектива и этим заметно ухудшить качество изображения. Именно поэтому нарезание пазов в корпусе применяется в объективах с невысокими выходными параметрами. Нарезание пазов на отдельной цилиндрической оправке значительно технологичнее, чем нарезание в корпусе по той причине, что в этом случае требуются менее сложные устройства и приспособления для изготовления и контроля. В случае возникновения недопустимых погрешностей изготовления брак кулачков, полученных на отдельной оправке, обходится производству дешевле, чем брак корпусной детали, которая, как правило, является более сложной и трудоемкой.

К недостаткам использования цилиндрических оправ с пазами следует отнести возможность возникновения перемещений вдоль оптической оси объектива от биения торца корпуса, к которому поджимается кулачок, и попадания грязи, пыли, стружки в места сопряжения опорных торцов. Все эти факторы могут вызвать неучитываемые перемещения подвижных компонентов вдоль оси объектива. При нарезании пазов в корпусе отмеченные погрешности отсутствуют.

Кроме рабочих пазов, задающих соответствующий закон перемещения подвижным компонентам, на кулачке нарезается или радиальный паз, концы которого служат ограничителями разворота кулачка, или устанавливается упор, который при разворотах кулачка замыкает (размыкает) контактные

группы, закрепленные на корпусе объектива в момент приближения к верхним или нижним границам диапазона изменения фокусного расстояния. Кроме того, на кулачке предусматривается место для применения зубчатого сектора, передающего вращательный момент на кулачок с электропривода камеры. Наконец, на кулачке должны быть предусмотрены технологические пазы или отверстия для юстировки переменных контрольных воздушных промежутков.

7.4.7. Материалы

Кулачковые механизмы в объективостроении отличаются характерной особенностью, заключающейся в том, что размеры кулачков в объективах преимущественно небольшие, усилия, необходимые для их вращения, составляют от 20-30 г до 1 кг, скорости до 5-10 об/мин, продолжительность непрерывной работы также мала, благодаря чему износ кулачков в приборах практически отсутствует. Исходя из изложенного и учитывая, что надежность кулачков определяется не износом, а точностью их изготовления, нет необходимости применять для них высокопрочные и легированные стали и тем самым усложнять технологию и повышать стоимость изготовления кулачка.

Выбор материалов для изготовления кулачков объективов связан с необходимостью решения задач уменьшения веса, трения в подвижных частях и упрощения технологии изготовления и сборки.

Стремление к уменьшению веса любительских объективов привело к тому, что алюминиевые сплавы Д-16Т, В-95, Д-1Т, Ал-2 и др. почти вытеснили ранее широко используемые стали 45 и 50 и латуни ЛС59-1, Л62. Применение латуней в настоящее время в основном связано с изготовлением роликов, винтов, направляющих типа пиноли и прокладных шайб. Очевидно, дальнейшее уменьшение веса объективов, уменьшение трения их трущихся частей, упрощение технологии изготовления и сборки связано с применением пластмасс. Примеры использования пластмасс как в отечественном, так и зарубежном приборостроении имеются. Так, в объективах ПФ-3, «Агат-14» в некоторых трущихся парах используется фторопласт-4, обладающий превосходными антифрикционными свойствами и являющийся чрезвычайно износостойким материалом.

В объективе «Volex Vario» (1:2,8) американского производства вся оправа третьего компонента, винты, входящие в направляющие пазы, и переходная оправа изготовлены из пластмасс типа твердого капрона и т.д.

Следует ожидать, что в недалеком будущем корпуса объективов и, что особенно важно, кулачки и шкалы, будут изготавливаться также из соответствующих сортов пластмасс.

7.4.8. Конструкция первого компонента

Особенность конструкции первого компонента связана с необходимостью продольного перемещения при фокусировке на снимаемый объект. К настоящему времени известно два типа конструкций первого компонента. В первом типе перемещение компонента осуществляется с помощью винтовых пазов, во втором - с помощью резьбового соединения, причем резьба может выполнять как функцию силового элемента, так силового и несущего элемента одновременно. В первом случае резьба служит только для перемещения компонента вдоль оси (поперечные смещения компонента в этом случае определяются посадкой цилиндрических оправ), во втором - для перемещения и придания необходимого положения в поперечном направлении относительно оси объектива.

К основным достоинствам первого типа конструкции относятся возможность получения меньшего поперечного сечения в зазоре между корпусом объектива и оправой первого компонента и меньших поперечных габаритов передней части объектива. Недостатками варианта являются большой заклон компонента при установке минимальной дистанции и значительные неудобства, связанные со сборкой на этапе выставки дистанционной шкалы.

Второй вариант лишен указанных недостатков, что и явилось основным условием его широкого распространения.

Крепление линз первого компонента в этом варианте осуществляется в основном тремя способами, приведенными ниже (рис.7.20).

При высоких требованиях к центрировке чаще всего применяется вариант (рис.7.20,в). В этом варианте децентрировка поверхностей определяется торцевым биением несущей оправы, поперечными смещениями в зазорах между оправами линз и несущей оправой, а также погрешностью автоколлимационной центрировки.

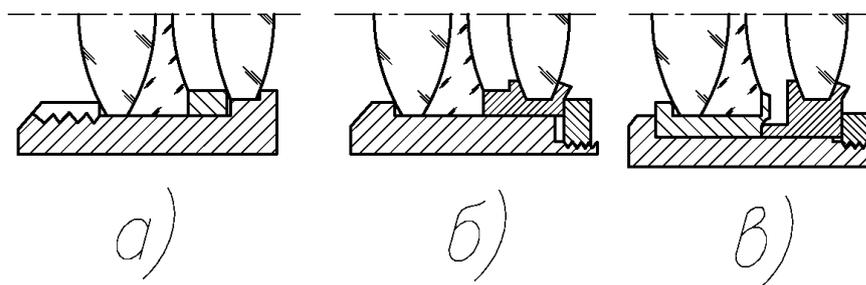


Рис. 7.20. Схема конструкции первого компонента

Вариант (рис.7.20,а) более технологичен и чаще применяется в объективах невысоких и средних параметров при серийном и массовом производстве. В этом варианте децентрировки поверхностей определяют биением торцов несущей оправы и гайки, зазором в резьбе,

эксцентриситетом опорного диаметра гайки и резьбы, и собственной децентрировкой линз.

Вариант (рис.7.20,б) чаще всего применяется в тех случаях, когда нельзя использовать вариант (рис.7.20,а).

7.4.9. Последовательность проектирования первого компонента

При решении всех задач, возникающих при проектировании дистанционного (первого) компонента, конструктору необходимо все время держать в уме три самые важные проблемы, подлежащие обязательному решению: минимизация веса, габаритов и отклонения линз от своих расчетных положений. Линзы первого компонента, по сравнению с линзами других компонентов, во всех объективах переменного фокусного расстояния имеют наибольшие поперечные размеры. Поэтому именно они в большинстве случаев определяют поперечные габариты объективов. Следовательно, первую линзу, как самую большую в первом компоненте, необходимо устанавливать непосредственно в корпус компонента без каких-либо промежуточных оправ. А толщину корпуса под первую линзу делать как можно меньше (1-1,5 мм). Что касается веса первого компонента, то он, как правило, очень велик. Так, в телевизионном объективе «Вариогоир-47» вес первого компонента равен половине веса всех остальных линз объектива и поэтому, естественно, выворачивающий момент объектива из мест его крепления в корпусе аппарата будет зависеть не только от того, как далеко удален первый компонент от мест крепления, но и от того каков его реальный вес. Таким образом, при проектировании конструкции первого компонента необходимо всячески стремиться к уменьшению веса, т.е., фактически, к уменьшению числа всевозможных оправ в нем.

Теперь перейдем к самому важному, что определяет качество изображения в объективе, а именно к точности расположения линз. Обычно, на начальном этапе проектирования точностные расчёты являются прикидочными и производятся для получения максимального отклонения, что позволяет достаточно быстро оценить точностные возможности рассматриваемого конструктивного решения. Заметим, что всю последовательность проектирования, приводимую ниже, будем рассматривать на примере телевизионного объектива «Вариогоир-47» (1:1,8), который занимает некое среднее положение по своей сложности среди остальных объективов. Начнем анализ с самого распространенного крепления линз - завальцовки с последующей автоколлимационной центрировкой (рис.7.21).

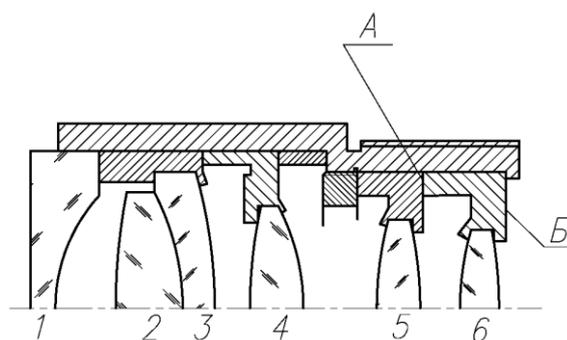


Рис. 7.21. Автоколлимационный вариант конструкции объектива

В этом варианте основными технологическими погрешностями, вызывающими децентрировки, являются: торцевые биения оправ и корпуса; поперечные смещения оправ с линзами в радиальных зазорах; собственные децентрировки оптических поверхностей линз, оставшиеся после автоколлимационной центрировки и конструкторские небрежности, неизбежно возникающие при создании эскизного решения. Посмотрим внимательно на рис.7.21 и особенно на ту его часть, которая содержит 5 и 6 линзы. Обращает на себя внимание расположение завальцовки. Оправа с 6 линзой неминуемо получит дополнительный заклон за счет непараллельности ее торцов *А* и *Б*. Эта непараллельность возникает когда оправу с завальцованной линзой устанавливают по технологической резьбе в плавающий патрон (рис.7.22) и затем, после центрировки с помощью ЮС-13, протачивают наружный посадочный диаметр *D* и торец *А*, выдерживая с необходимой точностью вершинный отрезок h_1 , добиваются самого точного взаимного расположения поверхностей *А* и *D* и оптической оси линзы. После чего оправу отрезают в размер $b > h_2 + h_1 + d$ и

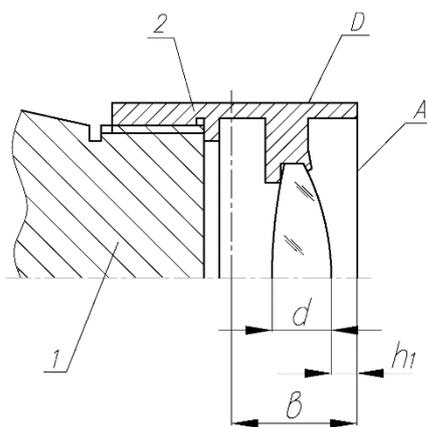


Рис. 7.22. Схема крепления оправы при автоколлимационной центрировке

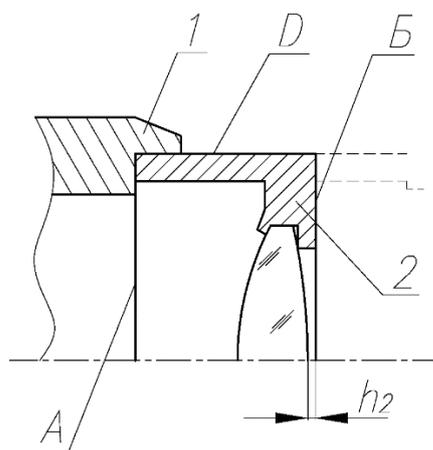


Рис. 7.23. Схема установки оправы в цанговый патрон

устанавливают на другой станок в цанговый патрон (рис.7.23) по поверхностям D и A . Для получения вершинного отрезка h_2 с необходимой точностью протачивают торец B . Таким образом, торец B протачивается со второй установки. На имеющемся отечественном заводском оборудовании это неминуемо приводит к биению торца B относительно торца A .

Если мы хотим получить наивысшую точность расположения линзы в корпусе компонента, следует устанавливать оправу с линзой 6 по торцу A , находящемуся со стороны завальцовки.

Все вышесказанное относится и к оправе с линзой 6. Поэтому та часть компонента, которая содержит линзы 5 и 6 должна несколько измениться (рис.7.24).

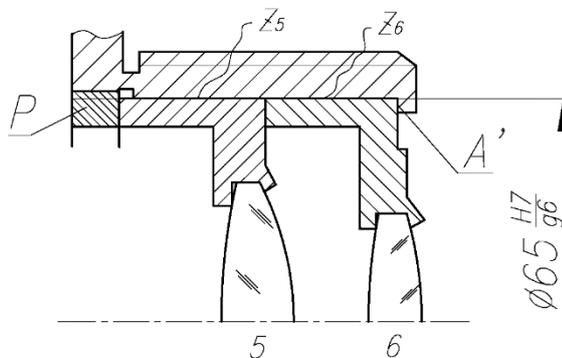


Рис. 7.24. Схема крепления оправ с линзами 5 и 6

Что же произойдет в этом случае при креплении оправ с линзами 5 и 6 в корпусе компонента. При заворачивании гайки P оправа с 6 линзой прижмется к торцу A' корпуса компонента. Если этот торец и посадочные диаметры под линзы обрабатывались с одной установки, то их взаимного биения не должно быть. Но мы хорошо знаем, что даже самая прекрасная технология на местах частенько нарушается. Поэтому и в наших проработках будем считать, что торец A' имеет небольшое, скажем $0,01$ мм, торцевое биение. Тогда обе оправы склонятся на угол

$$\gamma_{\Delta A'} = \frac{0,01}{65} = 0,5',$$

что вызовет кому децентрировки

$$K_{5+6} = 0,5' \cdot 3,8 = 1,9 \text{ мкм.}$$

Здесь 3,8 – коэффициент влияния, взятый из таблиц влияния децентрировок на телевизионный объектив «Вариогоир-47».

Если учесть, что количество линз в объективе 24, и положение каждой из них определяется 3-4 технологическими ошибками, а исходное абберационное пятно в плоскости наилучшей наводки составляет 18 мкм, то становится понятным, что заклон пятой и шестой линз на 0,5' нежелателен.

Кроме совместного с шестой линзой заклона, оправка с пятой линзой получит дополнительный поворот за счет непараллельности торцов в оправе с шестой линзой. Пусть эта непараллельность составляет 0,02 мм. Тогда

$$\gamma_{\Delta L A'} = \frac{0,02}{65} = 1'.$$

И кома будет равна $K_5 = 1' \cdot 1,0 = 1 \text{ мкм}$. Это тоже не так уж мало.

Кроме заклонов будут происходить поперечные смещения оправ с линзами в радиальных зазорах Z_5 и Z_6 между корпусом первого компонента и оправками. При посадке $\phi 65 \frac{H7^{(+30)}}{\partial 6_{(-30)}}$ радиальный зазор должен быть не более 30 мкм.

Кома от поперечного смещения в этом зазоре будет равна

$$K_5 = 30 \cdot 0,048 = 1,4 \text{ мкм,}$$

$$K_6 = 30 \cdot 0,08 = 2,40 \text{ мкм,}$$

где 0,044 и 0,08 – коэффициенты влияния.

Это уже довольно большие величины. И поэтому здесь следует перейти к приточке. Тогда радиальный зазор может быть уменьшен в два раза, и мы получим

$$K_5 = 15 \cdot 0,048 = 0,72 \text{ мкм,}$$

$$K_6 = 15 \cdot 0,08 = 1,4 \text{ мкм.}$$

Кроме этих погрешностей нельзя забывать о собственных децентрировках оптических поверхностей линз. Пусть они будут по 10 мкм. Тогда кома от них станет равна

$$K_{1-5} = 10 \cdot 0,049 = 0,5 \text{ мкм,}$$

$$K_{2-5} = 10 \cdot 0,0014 = 0,014 \text{ мкм,}$$

$$K_{1-6} = 10 \cdot 0,0325 = 0,32 \text{ мкм,}$$

$$K_{2-6} = 10 \cdot 0,048 = 0,48 \text{ мкм.}$$

В сумме это даст заметную величину. А поскольку точнее чем то, что мы использовали в расчетах, в цеховых условиях не получить, то следует подумать о разработке нового варианта крепления пятой и шестой линз.

Таким вариантом может быть решение, показанное на рис.7.25.

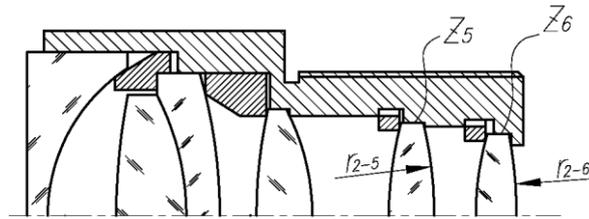


Рис. 7.25. Насыпной вариант

В отличие от предыдущего решения в этом варианте в зазорах Z_5 и Z_6 линзы будут разворачиваться вокруг центров кривизны опорных поверхностей.

Пусть $Z_5 = Z_6 = 15$ мкм. Углы разворотов линз будут равны

$$\gamma_{Z_5} = \frac{Z_5}{r_{2-5}} = \frac{0,015}{5445} = 0,01';$$

$$\gamma_{Z_6} = \frac{Z_6}{r_{2-6}} = \frac{0,015}{158} = 0,3'.$$

Они вызовут кому

$$K_5 = 0,01' \cdot 2 = 0,02 \text{ мкм};$$

$$K_6 = 0,3' \cdot 1 = 0,3 \text{ мкм}.$$

Если сравнить эти значения комы децентрировок с теми, что мы получили в предыдущем варианте (0,72 и 1,40), то нетрудно увидеть, что кома от разворота пятой линзы в зазоре $Z_5 = 0,015$ мм будет в 36 раз меньше, чем от поперечного ее смещения в том же зазоре; кома от разворота шестой линзы в 4,7 раз меньше, чем от ее поперечного перемещения в том же зазоре $Z_6 = 0,015$ мм. Кому от собственных децентрировок первых поверхностей мы уже просчитывали. Они равны $K_{1-5} = 0,5$ мкм и $K_{1-6} = 0,32$ мкм. Таким образом, очевидно, что суммарная кома децентрировок в новом конструктивном решении значительно меньше, чем в первом, да и технологически она заметно проще. Поэтому остановимся на этом решении и перейдем к анализу базировки остальных линз первого компонента. Снова рассмотрим автоколлимационный вариант (рис.7.21). Из-за непараллельности торцов прокладного кольца, установленного за четвертой линзой, опирающиеся на него с первой по четвертую линзы, получают заклон на угол

$$\gamma_{\Delta_T} = \frac{\Delta_T}{100}.$$

Пусть $\Delta_T = 0,02$ мм. Тогда $\gamma_{\Delta_T} = 0,67'$, что вызовет кому в центре поля зрения, равную $K_{1-4} = \gamma_{\Delta_T} \cdot A_{1-4,\gamma} = 0,67 \cdot 0,3 = 0,2$ мкм. Это вполне допустимая величина. Здесь $A_{1-4,\gamma} = 0,3$ - коэффициент влияния.

Из-за непараллельности торцов в оправе четвертой линзы остальные заклонятся на угол

$$\gamma_{\Delta T} = \frac{\Delta_T}{100} = \frac{0,02}{100} = 0,67'.$$

Это приведет к появлению комы $K_{1-3} = 0,67 \cdot 0,8 = 0,54$ мкм, что также вполне приемлемо.

Из-за непараллельности торцов оправы со склейкой $\Delta_T = 0,02$ мм первая линза получит дополнительный разворот на $0,67'$, что приведет к появлению комы $K_1 = 0,67 \cdot 3,0 = 2,01$ мкм. Это уже большая и поэтому недопустимая величина. От такого разворота первой линзы надо уходить.

Теперь рассмотрим влияние поперечных смещений линз в зазорах посадки $\phi 100 \frac{H7^{(+35)}}{\delta 6_{(-35)}}$.

В этом случае радиальный зазор может быть равен 35 мкм. И поперечные смещения линз в нем вызовут следующие значения комы:

$$K_4 = 35 \cdot 0,117 = 4,1 \text{ мкм};$$

$$K_{2-3} = 35 \cdot 0,071 = 2,48 \text{ мкм};$$

$$K_1 = 35 \cdot 0,088 = 3,08 \text{ мкм},$$

где вторые множители являются коэффициентами влияния.

Нетрудно увидеть, что это очень большие значения комы. Даже приточка оправ по корпусу до диаметрального зазора в 30 мкм не позволит радикально уменьшить кому децентрировок:

$$K_4 = 15 \cdot 0,117 = 1,75 \text{ мкм};$$

$$K_{2-3} = 15 \cdot 0,071 = 1,06 \text{ мкм};$$

$$K_1 = 15 \cdot 0,088 = 1,32 \text{ мкм}.$$

Как мы видим и в этом случае кома еще достаточно велика. А если учесть влияние собственных децентрировок семи поверхностей, то суммарная кома увеличится еще больше.

Таким образом, конструктивное решение базировки первых четырех линз не самое лучшее и следует подумать о другом решении.

Обратимся к первой линзе. Поскольку ее поперечное перемещение вызывает недопустимую кому, перейдем к конструктивному решению, которое вместо поперечного перемещения вызовет разворот линзы в том же поперечном зазоре. Такое решение представлено на рис.2.25. В этом случае угол разворота будет равен

$$\gamma_{z1} = \frac{0,015}{161} = 0,3',$$

где 161 мм – расстояние от центра кривизны второй поверхности первой линзы до переднего опорного торца прокладного кольца между первой и второй линзами. Этот разворот вызовет кому $K = 0,3' \cdot 0,9 = 0,27$ мкм, которая по сравнению с предыдущим вариантом в 4,9 раз меньше. Кома такой величины нас вполне устроит.

Теперь перейдем к анализу положения 2, 3 и 4 линз. Поскольку поперечные смещения склейки и четвертой линзы вызывают большие значения комы, то здесь, как и в случае с первой линзой, перейдем от

смещения линз в радиальных зазорах к их разворотам в тех же зазорах. Рассмотрим два варианта крепления. Первый вариант представлен на рис.7.26, а второй на рис.7.27.

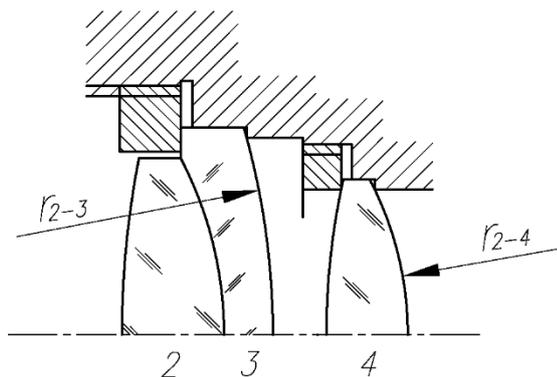


Рис. 7.26. Первый вариант крепления линз 2, 3 и 4

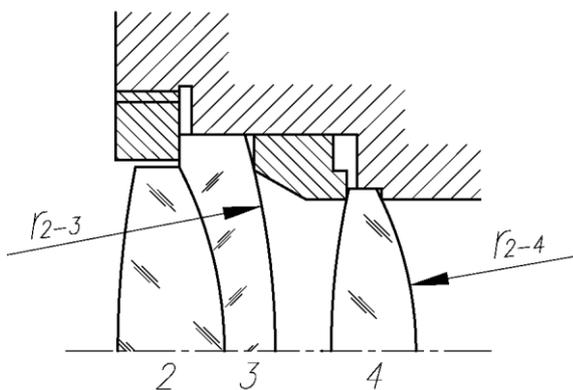


Рис. 7.27. Второй вариант крепления линз 2, 3 и 4

В первом варианте линзы крепятся отдельно, а во втором - через прокладное кольцо. Пусть места под линзы приточены с радиальными зазорами $Z_{2+3} = Z_4 = 0,015$ мм. Рассчитаем углы разворота и кому для первого случая.

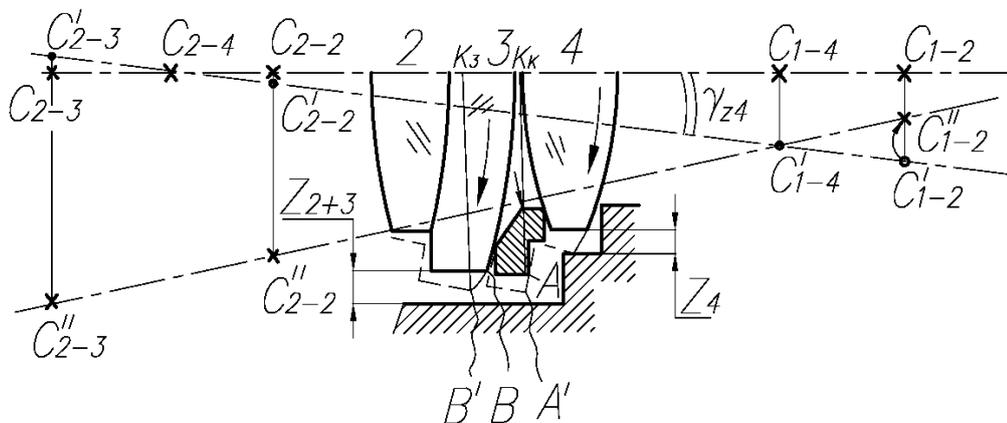


Рис. 7.28. Схема для расчета децентровок

$$\gamma_{Z_{2+3}} = \frac{0,015}{124} = 0,4';$$

$$\gamma_{Z_4} = \frac{0,015}{140} = 0,3'.$$

$$K_{2+3} = 0,4 \cdot 1,45 = 0,58 \text{ мкм};$$

$$K_4 = 0,3 \cdot 5,8 = 1,75 \text{ мкм}.$$

Из приведенных расчетов следует, что если разворот склейки вызывает допустимую величину комы, то кома от разворота четвертой линзы довольно велика.

Приведем расчет комы для второго варианта.

Разворот четвертой линзы вокруг центра кривизны C_{2-4} ее опорной поверхности, а вместе с ней второй и третьей линз в зазоре $Z_4 = 0,015 \text{ мм}$, произойдет на угол

$$\gamma_{Z_4} = \frac{0,015}{140} = 0,00011 \text{ рад} = 0,3'.$$

Для дальнейших расчетов нам потребуются знания радиусов и оптических толщин приведенных ниже:

$$r_{1-2} = 1630 \text{ мм}; d_2 = 21,1 \text{ мм}; r_{2-2} = -55 \text{ мм} = -r_{1-3}; r_{2-3} = -125 \text{ мм}; d_3 = 3 \text{ мм};$$

$$d_{3-4} = 0,1 \text{ мм}; r_{1-4} = 320 \text{ мм}; r_{2-4} = -140 \text{ мм}.$$

При развороте четвертой линзы точка A прокладного кольца сместится вниз на величину $C_{2-4} K_K \cdot \gamma_{Z_4} = 100 \cdot 0,00011 = 0,011 \text{ мм}$. В оставшемся зазоре $0,015 - 0,011 = 0,004 \text{ мм}$ кольцо и опирающаяся на него склейка получат дополнительный разворот, но уже вокруг центра кривизны C_{1-4} первой поверхности четвертой линзы, к которой кольцо поджимается:

$$\gamma_{ZK} = \frac{0,004}{320} = 0,0000125 = 0,04'.$$

А ребро B склейки после разворота на угол γ_{Z_4} займет положение B' , сместившись на величину $C_{2-4} K_3 \cdot \gamma_{Z_4} \approx 0,01 \text{ мм}$, а после разворота на угол γ_{Z_4} вокруг C_{1-4} практически упрется в корпус компонента.

Рассчитаем смещение центров кривизны и кому децентрировки

$$\Delta C_{1-2} = -(C_{2-4} C_{1-2}) \cdot \gamma_{Z_4} + C'_{1-4} C'_{1-2} \cdot \gamma_{ZK} = -1734,3 \cdot 0,00011 + 1603,8 \cdot 0,0000125 =$$

$$= -0,19 + 0,02 = -0,17 \text{ мм};$$

$$\Delta C_{2-2} = -(C_{2-4} C_{2-2}) \cdot \gamma_{Z_4} + C'_{1-4} C'_{2-2} \cdot \gamma_{ZK} = -72,4 \cdot 0,00011 - 262 \cdot 0,0000125 =$$

$$= -0,008 - 0,0033 = -0,011 \text{ мм};$$

$$\Delta C_{2-3} = -(C_{2-4} C_{2-3}) \cdot \gamma_{Z_4} + C'_{1-4} C'_{2-3} \cdot \gamma_{ZK} = 5,5 \cdot 0,00011 - 445 \cdot 0,0000125 =$$

$$= -0,0006 - 0,0055 = -0,005 \text{ мм};$$

$$\Delta C_{1-4} = -(C_{2-4} C_{1-4}) \cdot \gamma_{Z4} = -450,5 \cdot 0,00011 = -0,05 \text{ мм.}$$

Из таблиц влияния децентрировок на кому в центре поля зрения находим коэффициенты влияния:

$$A_{1-2} = -0,0005; A_{2-2} = -0,068; A_{2-3} = -0,0025; A_{1-4} = 0,051; A_{2-4} = 0,066.$$

Теперь нетрудно определить максимальную суммарную кому децентрировок от разворотов склейки и четвертой линзы в своих зазорах:

$$K_{\Sigma} = -0,0005 \cdot (-0,17) - 0,068 \cdot (-0,011) - 0,0025 \cdot (-0,005) + 0,051 \cdot (-0,05) = 0,000085 + 0,00075 + 0,0000125 - 0,00255 = -0,0017 \text{ мм} \approx -1,7 \text{ мкм.}$$

За счет непараллельности торцов прокладного кольца склейка получит дополнительный разворот на угол

$$\gamma_{\Delta TK} = \frac{\Delta_{TK}}{\phi_K} = \frac{0,02}{100} = 0,67',$$

что вызовет дополнительную кому, равную $K_{\Delta T} = 1,5 \cdot 0,67' = 1 \text{ мкм.}$

Сравнивая два варианта крепления склейки и четвертой линзы, следует отметить, что они достаточно близки друг к другу по влиянию на кому децентрировки в центре поля зрения и окончательный выбор варианта будет зависеть от уровня технологии изготовления оправ на данном предприятии.

Итак, мы рассмотрели общий подход к проектированию первого компонента на примере телевизионного объектива «Вариогоир-47». Проведенный анализ позволяет однозначно сказать, что требования к точности расположения линз первого компонента очень жесткие. А это, в свою очередь, означает, что точность изготовления корпусной детали первого компонента должна быть высокой.

На практике это достигается тем, что все посадочные места под линзы первого компонента точатся с одной установки. При этом корпусная деталь крепится на станке по тем поверхностям, по которым она базируется в корпусе объектива. А поскольку, чаще всего, такая базировка осуществляется по окулярной, многозаходной резьбе, то и на станке она должна крепиться по этой самой резьбе. Далее, зазор в резьбовом соединении корпус первого компонента – корпус объектива не должен превышать 0,02 мм. А так как такого точного соединения получить чрезвычайно непросто, необходимо предусмотреть притирку вышеуказанных двух деталей. При такой технологии изготовления появляется возможность получать самую высокую параллельность всех опорных торцов корпуса и соосность всех его посадочных диаметров под линзы, где-то до 2-5 мкм.

После того, как подобным образом будут спроектированы все компоненты объектива, производят окончательный расчет, связанный с определением дисперсии комы децентрировки по методикам, рассмотренным нами в части 1.

7.4.10. Конструкция четвертого компонента («собственно» объектива)

В том случае, когда компонент состоит из одной линзы или склейки, а в особо сложных объективах, из комбинации склеек и простых линз, их крепление мало отличается от крепления линз в переходных оправках подвижных компонентов (см. выше). Когда же четвертый компонент представляет собой «собственно» объектив, то при его проектировании необходимо учитывать способ сборки, особенности метода юстировки на контрольно-юстировочных приборах цеха и возможность продольных юстировочных подвижек в корпусе объектива при выставке рабочего отрезка и дистанционной шкалы.

В отечественной промышленности для сборки «собственно» объектива чаще всего используют такой способ насыпки, при котором в корпусную деталь засыпаются линзы, закрепленные и отцентрированные каждая в своей оправке. Такой способ позволяет в процессе сборки проводить центрировку «собственно» объектива перемещением или вращением наиболее чувствительного линзового элемента до положения, когда его собственная децентрировка полностью или частично компенсирует децентрировку остальных оптических элементов.

Для продольных юстировочных подвижек «собственно» объектива должна быть предусмотрена возможность его перемещения в корпусе объектива. С этой целью чаще всего на корпусной детали «собственно» объектива нарезают резьбу или оставляют радиальную канавку, в которую через корпус объектива при юстировке устанавливают инструмент для подвижки объектива. Возможны и другие способы перемещения.

ГЛАВА 8. Разработка методики юстировки сдвига плоскости изображения

При разработке методики сборки и юстировки объективов переменного фокусного расстояния (ОПФР), в первую очередь должна быть решена задача достижения минимального смещения плоскости изображения во всем диапазоне изменения фокусного расстояния и во вторую очередь должна быть обеспечена такая степень центрировки оптических элементов, которая в полной мере гарантировала бы необходимое качество изображения для всех значений фокусного расстояния.

Рассмотрим решение первой задачи на примере объективов с механической компенсацией сдвига плоскости изображения, получивших в настоящее время преимущественное распространение.

Большая часть современных ОПФР с механической компенсацией, как мы отмечали ранее, строится по четырехкомпонентной кинематической схеме, в которой при изменении фокусного расстояния перемещаются два компонента: один – по линейной зависимости, другой – по нелинейной. Из двух других первый, дистанционный, служит для фокусировки объектива на снимаемый объект, четвертый, в основном, для коррекции остаточных aberrаций и установки заданной величины рабочего отрезка объектива (рис.8.1).

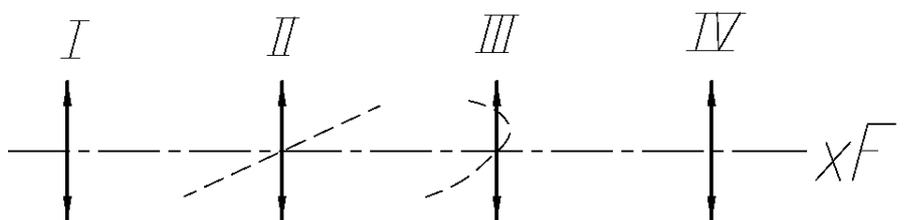


Рис. 8.1. Принципиальная оптическая схема ОПФР с механической компенсацией

Обычно процесс сборки объектива и большая часть его юстировочных операций происходит при конкретном значении фокусного расстояния, называемым контрольным фокусным расстоянием. Значения воздушных промежутков, соответствующих этому фокусному расстоянию, называют контрольными и обозначают d_1^o , d_2^o , d_3^o , d_4^o и т.д. Точки профиля паза, где должны устанавливаться оси винтов подвижных компонентов в соответствии с выбранным значением контрольного фокусного расстояния будем по аналогии называть контрольными точками паза. Выбор контрольного значения фокусного расстояния определяется в процессе разработки методики юстировки объектива, о чем будет рассказано несколько позже. Но, как правило, это такое значение, при котором имеет место наиболее сильное влияние погрешностей положения и установки компонентов на смещение плоскости изображения. При выборе контрольного значения фокусного расстояния обязательно учитывается угол подъема μ паза кулачка в контрольной точке (рис.8.2).

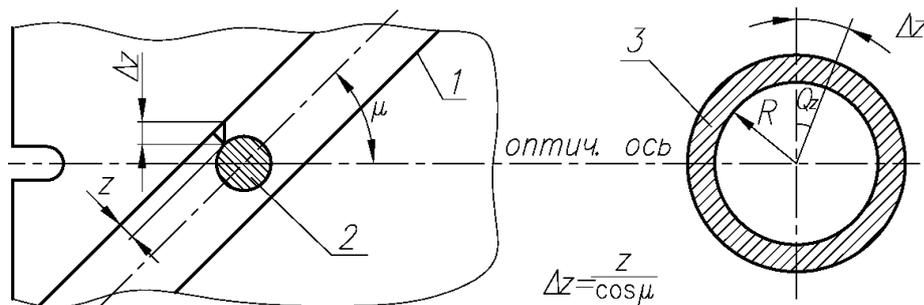


Рис. 8.2. Влияние зазора z на разворот кулачка: 1 – паз кулачка, 2 – винт, 3 – кулачок

Чем меньше этот угол, тем слабее влияние зазора z между винтом и стенками паза на дополнительный разворот кулачка $Q_z = \frac{\Delta z}{R}$, приводящий к смещению расчетной точки паза относительно оси винта. К сожалению, не всегда удастся получить нужную величину угла подъема μ . И в тех случаях, когда это не удастся, придется отказываться от чисто винтового паза и переходить к его локальным искривлениям за счет выпрямления (уменьшения μ) криволинейного паза. И, наконец, оптический компонент, от которого устанавливаются все другие компоненты объектива, будем называть базовым.

При разработке оптимальной для конкретной кинематической схемы объектива варианта сборки и юстировки очень важно определить последовательность установки оптических компонентов в корпусе объектива, технологические погрешности изготовления, вызывающие отклонения оптических компонентов от расчетных положений и способы компенсаций этих отклонений.

8.1. Выбор последовательности юстировки подвижных компонентов

Конечно, при проектировании объектива всегда стремятся к созданию такой конструкции, которая позволяла бы проводить сборку объектива без дополнительной юстировки. К сожалению, из-за погрешностей изготовления и расположения пазов, неточности установки осей винтов подвижных компонентов в контрольные точки пазов кулачка, недопустимых смещений осей винтов относительно оптики подвижных компонентов, погрешностей выставки контрольных воздушных промежутков и т.д. это не всегда удается.

Рассмотрим влияние перечисленных погрешностей на выбор последовательности юстировки положений подвижных компонентов.

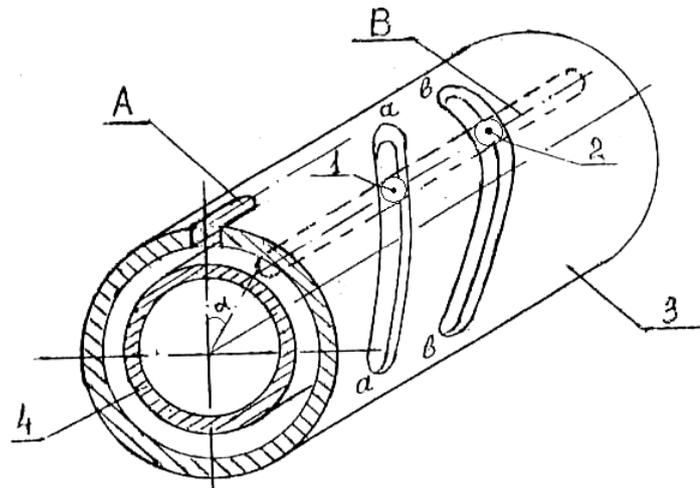


Рис. 8.3. Схема расположения винтов в пазах кулачка и корпуса объектива

На рис.8.3 представлен узел кулачка 3 с базовым пазом *A*, относительно которого нарезаются винтовой «а-а» и криволинейный «в-в» пазы, и корпуса объектива 4 с осевым пазом *B*. На пересечениях винтового и криволинейного пазов с осевым устанавливаются оси винтов 1 и 2 подвижных компонентов II и III.

На рис.8.4 схематично представлены подвижные компоненты и траектории, по которым они перемещаются. В идеальном случае, когда механизмы объектива изготавливаются без погрешностей, оси винтов подвижных компонентов при сборке точно устанавливаются в контрольные точки пазов «а-а» и «в-в». При этом воздушный промежуток между компонентами соответствует его контрольному значению d_{2-3}^0 (рис.8.4).

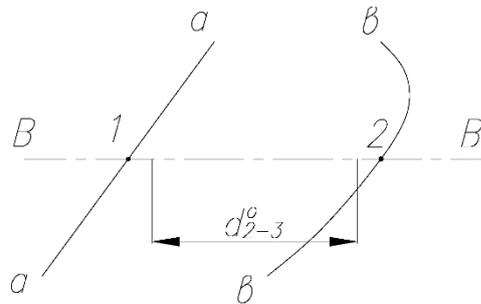


Рис. 8.4. Траектории перемещения винтов 1 и 2

Рассмотрим случай, когда из-за погрешностей изготовления весь винтовой паз сместится относительно оси базового паза *A* на угол $\Delta\alpha$, а криволинейный останется в расчетном положении (рис.8.5).

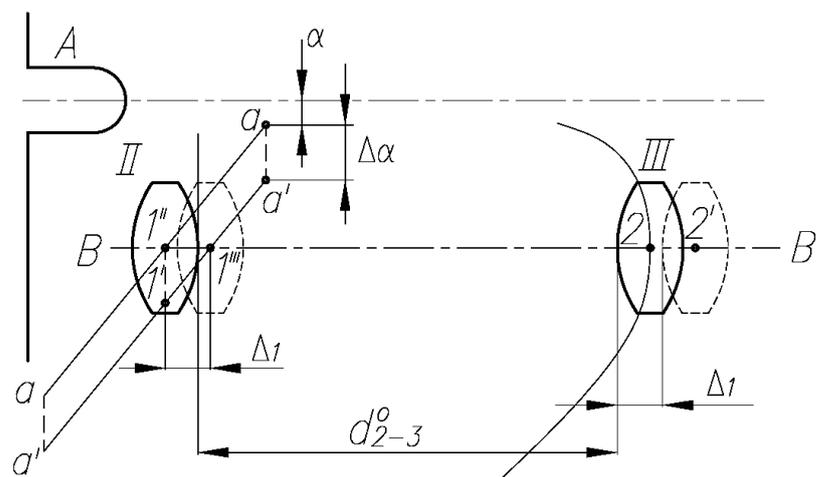


Рис. 8.5. Схема перемещения компонентов при смещении винтового паза на $\Delta\alpha$

Очевидно, ось винта в криволинейном пазу будет находиться в расчетной точке 2, а оптика III-го компонента займет расчетное положение (сплошная линия). Что касается II-го компонента, то из-за разворота паза «а-а» на $\Delta\alpha$ расчетная точка 1 займет новое положение 1', а на ось В-В паза корпуса в положение 1''' установится точка 1'', смещенная относительно расчетного положения на величину Δ_1 . Вместе с винтом новое положение займет оптика II-го компонента (штриховая линия).

Если базовым компонентом является III компонент, то контрольный промежуток d_{2-3}^0 должен выставляться осевыми подвижками оптики второго компонента.

В этом случае оптика II-го компонента должна быть смещена из своего нового положения (штриховая линия) влево на величину Δ_1 и занять расчетное положение (сплошная линия). Таким образом, в отъюстированном состоянии ось II-го компонента находится в пазу, смещенном вдоль объектива на величину Δ_1 , а его оптика – в расчетном положении. Нетрудно видеть, что при вращении кулачка ось II-го компонента будет перемещаться по смещенному пазу а'-а', каждая точка которого отстоит от соответствующей точки расчетного паза а-а на неизменную величину Δ_1 , вследствие чего оптика II-го компонента будет перемещаться по теоретической траектории и закон изменения воздушного промежутка d_{2-3} не нарушится.

Если базовым компонентом является II, то контрольный промежуток d_{2-3}^0 будет устанавливаться осевыми подвижками оптики III-го компонента. В этом случае оптика III-го компонента сместится вправо от расчетного положения на величину Δ_1 . А так как ось винта III-го компонента находится в контрольной точке криволинейного паза, занимающего расчетное положение, то перемещение оптики III-го компонента, как это следует из вышеприведенных рассуждений, будет также происходить по

теоретическому закону и, следовательно, закон изменения промежутка d_{2-3} не будет нарушен.

Рассмотрим случай, когда из-за погрешностей изготовления криволинейный паз сместится относительно базового паза A на величину $\Delta\alpha$, а винтовой паз и оптика II-го компонента будут находиться строго в расчетном положении (рис.8.6).

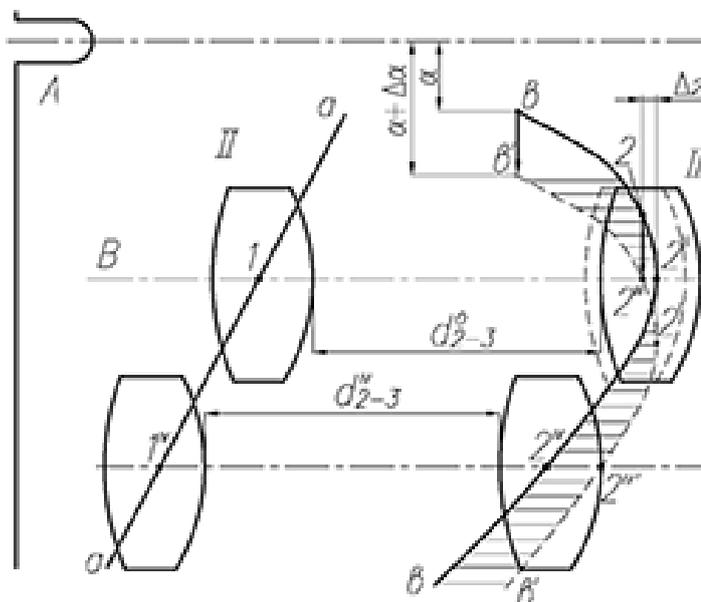


Рис. 8.6. Схема перемещения компонентов при смещении криволинейного паза на $\Delta\alpha$

Ясно, что контрольная точка 2 криволинейного паза займет новое положение 2', а ось винта установится в положение 2''', смещенного относительно расчетного на величину Δ_2 . Допустим, что базовым компонентом является второй. В этом случае установка контрольного воздушного промежутка d_{2-3}^o будет производиться осевыми подвижками оптики третьего компонента. Нетрудно видеть, что оптика третьего компонента должна быть смещена из нового положения вправо на величину Δ_2 и этим самым занять положение, соответствующее положению оси винта в точке 2.

Но из-за смещения всего паза на $\Delta\alpha$ это положение оптики будет соответствовать положению винта в точке 2''', сдвинутого вдоль оси на Δ_2 от расчетного положения точки 2. Предположим, что второй компонент переместился в положение 1^{IV}. Новому положению оси винта второго компонента должен соответствовать другой расчетный промежуток между вторым и третьим компонентами - d_{2-3}^{IV} . Но так как ось винта третьего компонента в действительности займет положение 2^{IV'}, сдвинутое относительно расчетного на Δ_2' , то и воздушный промежуток будет отличаться на ту же самую величину.

Таким образом, при вращении кулачка ось винта третьего компонента будет двигаться по смещенному пазу $v'-v'$, а оптика третьего компонента перемещается не по теоретической кривой, а по траектории, которая не совпадает с расчетной на переменные величины, отмеченные на рис.3.6 горизонтальной штриховкой. Следовательно, закон изменения d_{2-3} будет нарушен.

Если мы допустим, что базовым будет являться третий компонент, то в этом случае установку контрольного промежутка d_{2-3}^o должны производить осевыми подвижками оптики второго компонента (рис.8.7).

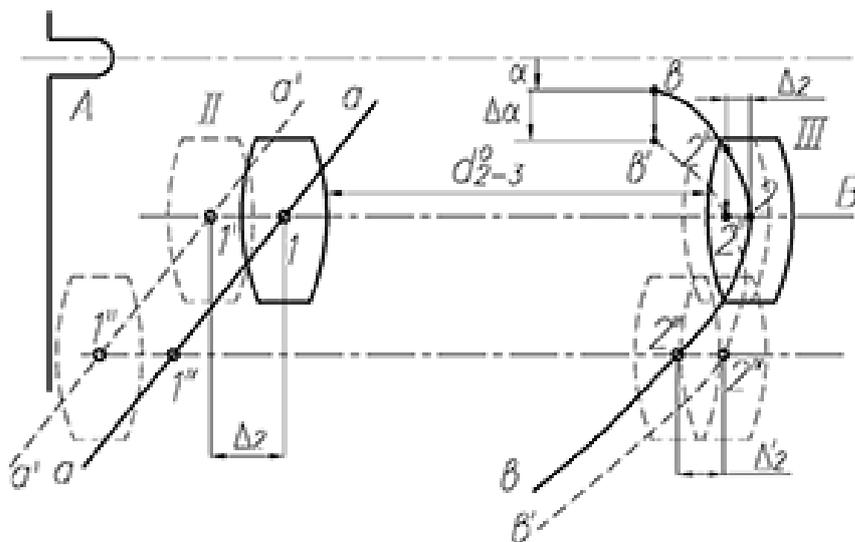


Рис. 8.7. Схема установки d_{2-3}^o при базовом III компоненте

Очевидно, при установке d_{2-3}^o оптика второго компонента будет смещена влево от расчетного положения на величину Δ_2 . При вращении кулачка ось первого винта второго компонента будет перемещаться по теоретическому профилю $a-a'$, а его оптика – по параллельной траектории $a'-a'$, соответствующей теоретическому закону перемещения, но сдвинутой на величину Δ_2 . При этом ось винта третьего компонента и его оптика будут перемещаться по сдвинутому пазу $v'-v'$. Пусть ось винта второго компонента переместилась в точку 1^{IV} . Тогда ось винта третьего компонента займет положение 2^{IV} , сдвинутое относительно теоретического положения $2'''$ на величину $\Delta_2' \neq \Delta_2$. А так как погрешность положения Δ_2' третьего компонента будет величиной переменной, то компенсировать ее постоянной по величине юстировочной подвижкой оптики второго компонента невозможно.

Все сказанное выше справедливо для случая, когда ось В-В продольного паза корпуса объектива проходит через контрольные точки пазов кулачка, определяемые углом α относительно базового паза А. Рассмотрим случай, когда контрольные точки не совпадают с осью В-В продольного паза корпуса объектива. Такой случай может иметь место, например, при дополнительном развороте кулачка на величину $\Delta\alpha$,

возникающем при сборке объектива (рис.8.8). В результате на ось паза корпуса установятся не теоретические точка 1 винтового паза и точка 2 криволинейного, а другие точки этих пазов 1' и 2' (положение 1'' и 2'').

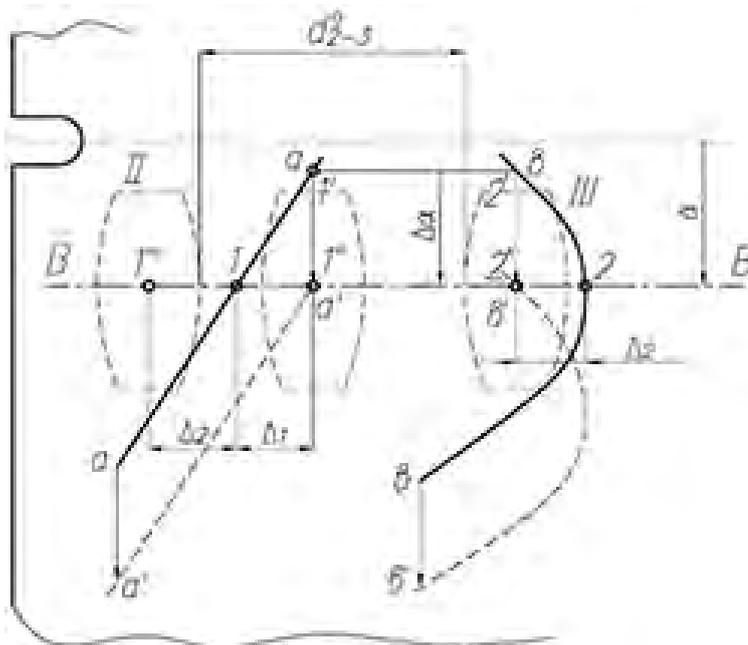


Рис. 8.8. Схема юстировки при несовпадении оси В-В с контрольными точками пазов

Рассмотрим, что произойдет при юстировке, если третий компонент является базовым.

В этом случае при установке контрольного промежутка d_{2-3}^o подвижкой второго компонента, его оптика должна быть смещена из положения 1'' в положение 1''' на величину $\Delta_2 + \Delta_1$, или на величину Δ_2 относительно расчетного положения 1. Тогда, при вращении кулачка ось винта второго компонента будет перемещаться по винтовому пазу, смещенному вдоль оси объектива относительно расчетной траектории на постоянную величину Δ_1 , вследствие чего закон перемещения оптики второго компонента не будет отличаться от расчетного. Что касается третьего компонента, то осевая величина смещения каждой точки профиля паза относительно теоретической траектории не будет постоянной величиной, а будет меняться как по величине, так и по знаку. Вследствие чего закон перемещения оптики третьего компонента, а значит и закон изменения воздушного промежутка d_{2-3} будут иметь характер, отличный от расчетного.

Нетрудно представить, что произойдет, когда базовым станет второй компонент. В этом случае при установке контрольного промежутка d_{2-3}^o , оптика второго и третьего компонентов будет смещена относительно своего теоретического положения на величину Δ_1 . При вращении кулачка второго компонента будет перемещаться по профилю, сдвинутому относительно

расчетного на постоянную величину Δ_1 . Поэтому закон его перемещения не изменится. При перемещении второго винта третьего компонента по смещенному на Δ_1 профилю, положение его оптики относительно теоретического не будет постоянным. Вследствие этого исходный закон изменения промежутка d_{2-3} нарушится.

Выводы:

1. Возникающее при изготовлении и сборке смещение винтового паза параллельно самому себе как поперек, так и вдоль оси объектива, после установки контрольного воздушного промежутка не влияет на закон изменения воздушного промежутка между подвижными компонентами.
2. Параллельное смещение криволинейного паза поперек оси объектива относительно расчетного положения не может быть скомпенсировано в процессе юстировки переменного воздушного промежутка. Поэтому требования к его точности расположения должны быть выше, чем к винтовому пазу. И, следовательно, в качестве базового всегда необходимо выбирать третий компонент.

8.2 Способы установки винтов подвижных компонентов в контрольные точки пазов кулачка

Для правильной выставки переменных воздушных промежутков, необходимо в конструкцию объектива закладывать возможность установки оси винтов подвижных компонентов в расчетные положения, которые мы назвали контрольными точками. Делается это различными способами. Рассмотрим некоторые из них.

Для объективов, в которых погрешности выставки переменных воздушных промежутков слабо влияют на смещение плоскости изображения, оси винтов устанавливаются в контрольные точки пазов кулачка по рискам А и Б (рис.8.9), нанесенных на его цилиндрической поверхности напротив контрольных точек. Контроль положения относительно этих рисок осуществляется визуально. После чего устанавливается контрольное значение воздушного промежутка d_{2-3}^o . Из-за невысокой точности этого способа, широкого распространения в промышленности он не получил.

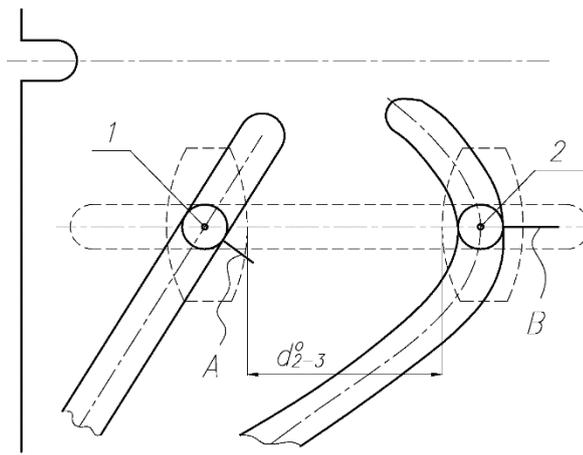


Рис. 8.9. Выставка винтов по рискам А и В

При достаточно точном изготовлении пазов кулачка, часто применяют так называемые «аппендиксы», которые представляют собой небольшие дополнительные удлинения пазов, параллельные базовому торцу кулачка, начиная от контрольной точки (рис.8.10).

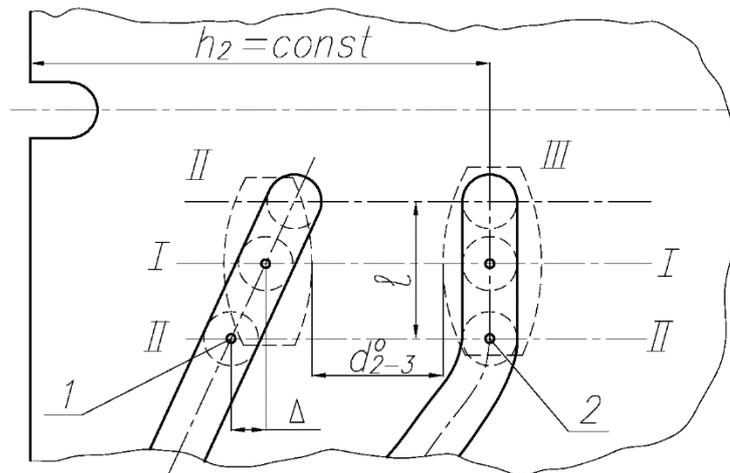


Рис. 8.10. Выставка винта 2 в «аппендиксе»

Такое удлинение криволинейного паза, обозначенное на рис.8.10 буквой l обычно составляет в угловой мере не более 5° . Очевидно, перемещение винта третьего компонента вдоль «аппендикса» не изменит величину контрольного воздушного промежутка d_{2-3}^0 . Это свойство «аппендикса» явилось причиной его достаточно широкого распространения. Но при его использовании необходимо помнить, что «аппендиксы» должны изготавливать не для одного какого-то паза, а одновременно для винтового и криволинейного пазов. Объясняется это следующим. Пусть в процессе юстировки в кулачке с «аппендиксом» только для криволинейного паза (рис.8.10) оси винтов второго и третьего компонентов установлены в положение 1-1 в обоих пазах. После чего выставлен контрольный промежуток d_{2-3}^0 . Вращением кулачка переместим оси винтов в положение II-

II, соответствующее контрольным точкам пазов 1 и 2. При таком смещении винтов третий компонент, как это следует из рис.8.10 не переместится вдоль оси объектива, а второй компонент сдвинется на величину Δ . Таким образом, при выходе винтов компонентов в рабочую зону (контрольные точки 1 и 2) контрольный воздушный промежуток будет отличаться от расчетного значения d_{2-3}^o на величину Δ , которая может оказаться недопустимой. Такое изменение контрольного промежутка не произойдет, если “аппендиксы” изготовлены в двух пазах (рис.8.11).

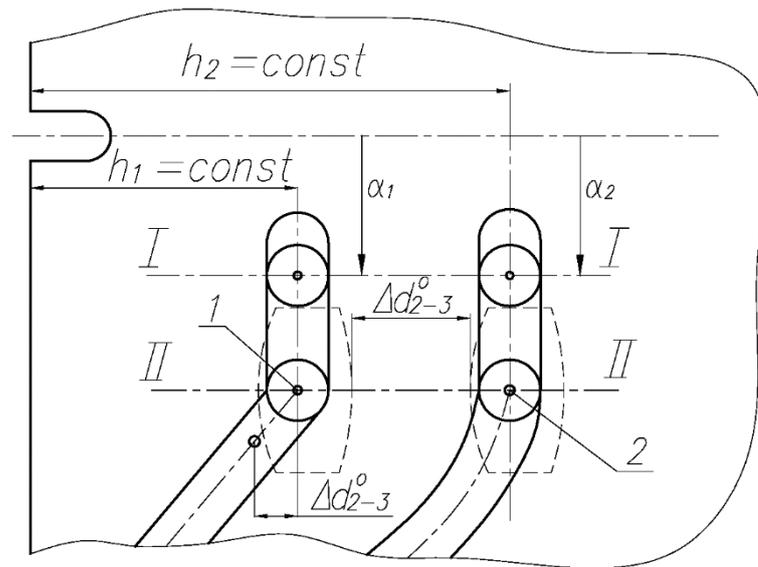


Рис. 8.11. Выставка винтов 1 и 2 в “аппендиксах”

В этом случае выход винтов в рабочую зону пазов будет происходить одновременно, что не вызовет изменения контрольного воздушного промежутка между подвижными компонентами.

А теперь рассмотрим влияние погрешностей расположения пазов на точность выставки контрольного воздушного промежутка между подвижными компонентами. Допустим, что пазы изготовлены с погрешностями, которые вызывают их смещение относительно базового торца кулачка соответственно на $\pm \Delta h_1$ и $\pm \Delta h_2$, и разворот относительно базового паза A на величины $\pm \Delta \alpha_1$ и $\pm \Delta \alpha_2$. Если отклонения пазов Δh_1 и Δh_2 достаточно легко компенсируются при выставке контрольного воздушного промежутка дополнительной юстировочной подвижкой оптики второго компонента на величину $(\Delta h_1 \pm \Delta h_2)$, то относительный разворот пазов, возникающий когда $\Delta \alpha_1$ и $\Delta \alpha_2$ не равны как по величине, так и по направлению, приведет к тому, что один из винтов выйдет в рабочую зону раньше, чем другой на величину $R \cdot (\Delta \alpha_1 \pm \Delta \alpha_2)$. Здесь R - половина диаметра цилиндрического кулачка. При этом произойдет изменение контрольного воздушного промежутка на $d_{2-3}^o = R \cdot (\Delta \alpha_1 \pm \Delta \alpha_2) \cdot \operatorname{tg} \mu$, где μ - угол подъема паза кулачка относительно оси аппендикса.

В кинолюбительских объективах размеры кулачков обычно невелики. Пусть $R=20$ мм; $\Delta\alpha_1 = \pm 3'$; $\Delta\alpha_2 = \pm 3'$; $\mu = 30^\circ$, тогда $d_{2-3}^\circ = 20 \cdot (9 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-4}) \cdot \text{tg}30^\circ \approx 0,02$. Эта величина изменения контрольного воздушного промежутка может оказаться допустимой. Но для объективов с большими размерами кулачков (например, телевизионных с большими перепадами увеличений), эта величина может вырасти в 2-3 раза и уже окажется недопустимой.

В большинстве объективов винты подвижных компонентов перемещаются не в едином осевом пазу корпуса (рис.8.9), а каждый в своем (рис.8.12).

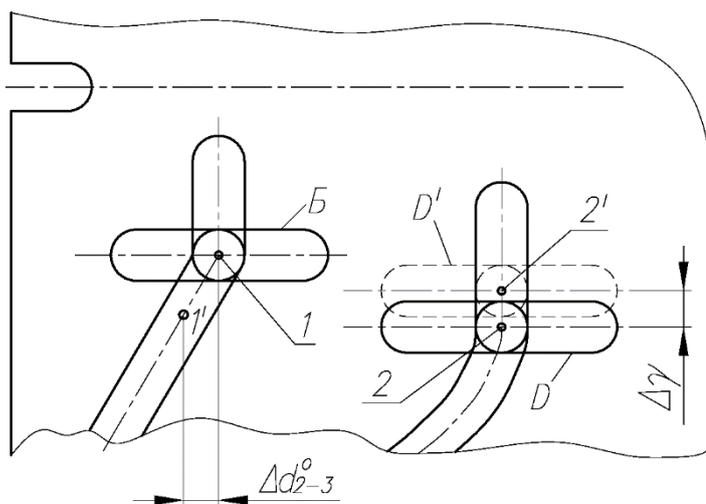


Рис. 8.12. Установка винтов 1 и 2 в двух осевых пазах Б и D

Из-за угловой погрешности $\Delta\gamma$ расположение одного осевого паза корпуса B относительно другого D ось винта третьего компонента придет не в контрольную точку 2, а в отстоящую от нее на величину $\Delta\gamma \cdot R$ точку 2'. В тоже время ось винта второго компонента придет в свою контрольную точку 1. При дальнейшем вращении кулачка ось винта третьего компонента займет положение точки 2, а ось винта второго компонента переместится в точку 1', смещенную вдоль оси объектива на величину $\Delta d_{2-3}^\circ = R \cdot \Delta\gamma \cdot \text{tg}\mu$. Таким образом, при выходе в рабочую зону второй компонент будет опережать третий, а величина контрольного промежутка между подвижными компонентами нарушится.

Очевидно, все сказанное будет справедливо и для конструкции объектива, в которой продольное перемещение компонентов осуществляется не осевыми пазами корпуса, а направляющими пинолями. Как было отмечено выше, в конструкциях на пинолях на опережающее или отстающее движение компонентов сказывается ошибка расположения винта на подвижном компоненте (рис.8.13), что также приводит к отклонению d_{2-3}° от расчетного значения на величину $\Delta d_{2-3}^\circ = R \cdot \Delta\beta \cdot \text{tg}\mu$.

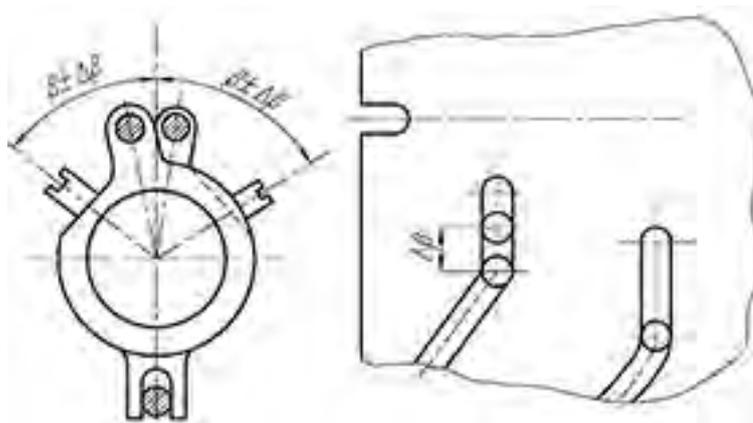


Рис. 8.13. Юстировка винтов при перемещении компонентов по пинолям

Рассмотрим способ задания контрольных точек в пазах кулачка без применения “аппендиксов” (рис.8.14).

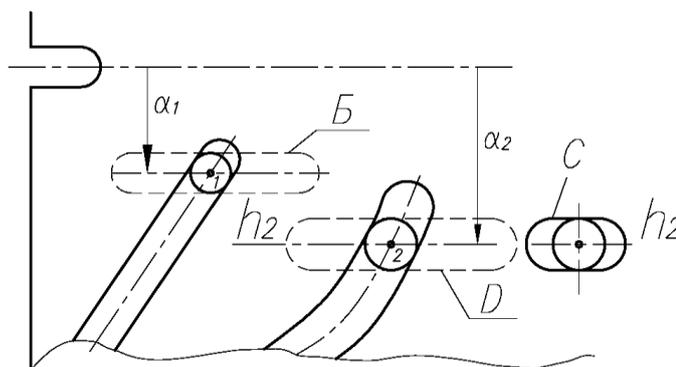


Рис. 8.14. Юстировка по контрольному пазу С

Суть его состоит в следующем. На образующей кулачка $h_2 - h_2$, проходящей через контрольную точку 2, рядом с криволинейным пазом, одновременно с его изготовлением фрезеруется отверстие или паз С, т.к. при фрезеровании отверстия возможно его разбиение. При проведении юстировки берется калибр с цилиндрической головкой, равной по диаметру ширине паза, и устанавливается насквозь через этот паз кулачка и осевой паз D корпуса объектива. Очевидно при этом ось продольного паза D корпуса объектива будет проходить через контрольную точку 2 криволинейного паза. А поскольку положение осевого паза B корпуса объектива задается достаточно жестко относительно осевого паза D, то при отсутствии недопустимых погрешностей изготовления этих пазов, ось паза B также должна пройти через контрольную точку 1 винтового паза. Следовательно, оси винтов, установленные через эти пазы в подвижном компоненте, должны совпадать с контрольными точками.

Отметим некоторые особенности этого способа установки винтов. Самое важное в этом способе – добиться точного прохождения оси юстировочного паза С через контрольную точку 2. Понятно, что такое возможно только при их одновременном изготовлении. Если это сделать, то ошибки взаимного углового расположения винтового и криволинейного

пазов $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$, ошибка $\Delta\gamma$ во взаимном расположении осевых пазов B и D не приведут к изменению контрольного воздушного промежутка между компонентами.

Несколько иначе проводится юстировка в объективах с пинолями. Поскольку необходимости в продольных составляющих пазах в этих объективах нет – их роль выполняют направляющие пиноли, то произойдет изменение юстировки. Через паз C вворачивают в компонент юстировочный винт. После чего известными способами закрепляют кулачок на корпусной детали таким образом, чтобы он был лишен возможности вращаться. Затем выворачивают юстировочный винт и, перемещая третий компонент вдоль пиноли, добиваются совмещения резьбового отверстия под винт с криволинейным пазом. После совмещения через криволинейный паз устанавливают рабочий винт, его ось должна совпасть с контрольной точкой криволинейного паза. Перемещая вдоль пиноли второй компонент, добиться совмещения его резьбового отверстия под винт с винтовым пазом. После крепления винта его ось также должна совпасть с контрольной точкой криволинейного паза. Но даже если из-за погрешностей изготовления они не совпадут, дополнительного изменения d_{2-3} не произойдет.

8.3 Технологические погрешности, вызывающие сдвиг плоскости изображения

После того как выявлено контрольное значение фокусного расстояния, соответствующие ему величины переменных воздушных промежутков, способ и последовательность установки подвижных компонентов, определяются оптические компоненты, которыми наиболее удобно и быстро можно проводить юстировку контрольных воздушных промежутков. Практика изготовления ОПРФ показала, что к таким компонентам, в первую очередь, следует отнести первый и последний компоненты, к которым имеется относительно легкий доступ. Второй и третий компоненты находятся глубоко внутри объектива, поэтому использование их для проведения юстировочных работ всегда не просто и чаще всего связано с разборкой всего объектива.

Как мы выяснили выше, при установке контрольных воздушных промежутков в качестве базового компонента следует брать третий компонент, закон перемещения которого определяется криволинейным пазом. Сборка объектива должна начинаться с установки оси винта третьего компонента в контрольную точку паза кулачка. При этом, за счет технологических погрешностей изготовления, может произойти смещение третьего компонента от расчетного положения:

- параллельное смещение профиля паза от расчетного положения вдоль оси цилиндрического кулачка - $\Delta_{\Pi h}$;
- параллельное смещение профиля паза по углу относительного базового паза кулачка - $\Delta_{\Pi\alpha}$;

- погрешность установки оси винта компонента в контрольную точку паза - Δy ;
- погрешность положения оптического блока компонента относительно винта - Δ_{OB} ;
- местная ошибка профиля паза кулачка - Δh ;
- смещение в зазоре между стенками паза и винтом - Δz ;
- угловая ошибка взаимного расположения осевых направляющих - $\Delta \gamma$.

Обозначим суммарную погрешность положения третьего компонента через Δ_3 (рис.8.15).

На следующем этапе сборки устанавливают четвертый и второй компоненты, выдерживая при этом соответствующие значения контрольных воздушных промежутков d_3^o и d_2^o . Выбор последовательности установки четвертого и второго компонентов в большинстве случаев принципиального значения для сборки не имеет. Пусть за установкой третьего компонента следует установка четвертого компонента. Очевидно, четвертый компонент будет иметь свою ошибку положения Δ_4 , величина которой будет зависеть от того, перемещается он по пазу или устанавливается неподвижно. Если четвертый компонент перемещается

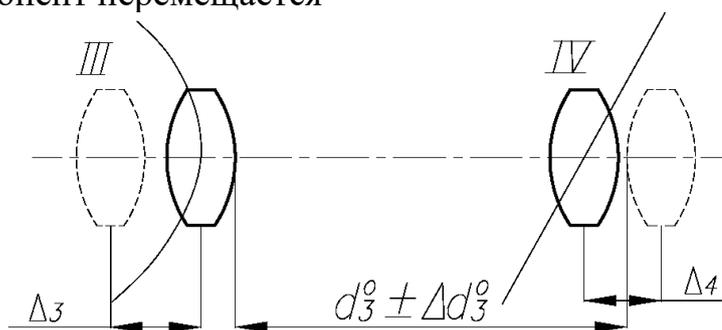


Рис. 8.15. Расположение компонентов при погрешностях сборки

вдоль паза цилиндрического кулачка, то величина Δ_4 будет определяться теми же технологическими погрешностями, что и Δ_3 для третьего компонента. Если же четвертый компонент неподвижен, то его положение будет определяться значительно меньшим числом погрешностей (двумя-тремя).

После установки оси винта четвертого компонента в контрольную точку паза, производится установка контрольного промежутка d_3^o . Совершенно ясно, что при $\Delta_3=0$ и идеальной выставке контрольного промежутка ($\Delta d_3=0$), ошибка положения четвертого компонента будет полностью компенсирована.

При этом, если четвертый компонент крепится неподвижно, закон изменения d_3 определяется законом перемещения третьего компонента, а если он перемещается по винтовому пазу, то после выставки d_3^o

несовпадение его положения с расчетным не оказывает влияния на закон изменения d_3 , т.к. его перемещение и в новом положении происходит по пазу с неизменным углом подъема во всем диапазоне перемещения компонента. При наличии ошибок положения третьего ($\Delta_3 \neq 0$) и четвертого ($\Delta_4 \neq 0$) компонентов, но при $\Delta d_3^o = 0$ произойдет компенсация ошибок положения этих компонентов для выбранного контрольного значения фокусного расстояния объектива. При других значениях фокусного расстояния из-за нелинейности закона перемещения третьего компонента полная компенсация ошибки положения Δ_3 будет невозможна. Вследствие этого требуемый закон изменения d_3 нарушается. Ошибка положения четвертого компонента не приведет к изменению закона d_3 , т.к. угол подъема винтового паза, по которому он перемещается, будет постоянным для всех значений воздушного промежутка d_3 . Если же четвертый компонент крепится неподвижно, то, как было сказано выше, изменение воздушного промежутка d_3 будет определяться только законом перемещения третьего компонента.

Все вышеприведенные рассуждения справедливы при условии отсутствия местных ошибок как в криволинейных, так и в винтовых пазах. Случаи, когда эти ошибки имеют место, будут рассмотрены особо. Аналогичные рассуждения могут быть применены к последующей выставке второго и первого компонентов.

Таким образом, можно сделать вывод, что в собранном объективе имеют место ошибки положения третьего компонента - Δ_3 , ошибки выставки контрольных воздушных промежутков между третьим и четвертым компонентами - Δd_3^o , между третьим и вторым - Δd_2^o и между вторым и первым компонентами - Δd_1^o .

8.4 Расчет коэффициентов влияния

Сила и степень влияния погрешностей на сдвиг плоскости изображения оценивается с помощью коэффициентов влияния, которые представляют собой отношение величины сдвига $\Delta S'$ плоскости изображения от расчетного положения к величине погрешности Δ , вызывающей этот сдвиг, и обозначается буквой A :

$$A = \frac{\Delta S'}{\Delta}.$$

Коэффициенты влияния определяются в процессе оптического расчета. По существу они представляют собой произведения продольных увеличений компонентов. Так, если в четырехкомпонентном объективе имеются погрешности переменных воздушных промежутков Δd_1 , Δd_2 , Δd_3 , то смещение плоскости изображения можно определить по приближенным, но вполне достаточным для практических целей формулам [36]:

$$\Delta S'_{1d} = -\beta_2^2 \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta d_1 = -A_{1-2} \cdot \Delta d_1;$$

$$\Delta S'_{2d} = -\beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta d_2 = -A_{2-3} \cdot \Delta d_2 ;$$

$$\Delta S'_{3d} = -\beta_4^2 \cdot \Delta d_3 = -A_{3-4} \cdot \Delta d_3 .$$

Если оптические компоненты установлены с ошибками положения, то для смещения плоскости изображения можно записать:

$$\Delta S'_{1\Delta} = \beta_2^2 \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_1 = A_1 \cdot \Delta_1 ;$$

$$\Delta S'_{2\Delta} = (1 - \beta_2^2) \cdot \beta_3^2 \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_2 = A_2 \cdot \Delta_2 ;$$

$$\Delta S'_{3\Delta} = (1 - \beta_3^2) \cdot \beta_4^2 \cdot \Delta_3 = A_3 \cdot \Delta_3 .$$

Во всех приведенных формулах β - поперечное увеличение компонентов.

8.5 Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения для объективов типа «Янтарь»

Разработку методики юстировки сдвига плоскости изображения (ПИ) проведем на примере отечественных объективов «Янтарь-21» и «Гранит 10А».

Принципиальная оптическая схема объектива «Янтарь-21» представлена на рис.8.16. Из рис.8.16 видно, что это четырехкомпонентный объектив, первый и четвертый компоненты которого жестко связаны между собой и

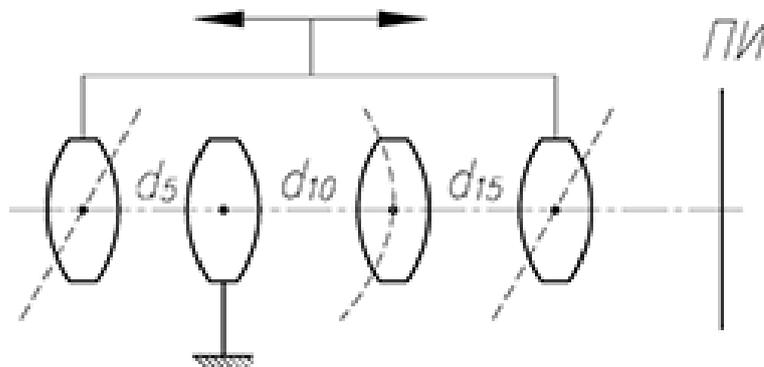


Рис. 8.16. Принципиальная оптическая схема объектива «Янтарь-21»

при изменении фокусного расстояния вместе перемещаются по винтовым пазам; третий компонент движется по криволинейному пазу, а второй компонент неподвижен. Кроме того первый компонент используется еще и для фокусировки объектива. Коэффициенты влияния погрешностей положения третьего компонента и переменных воздушных промежутков приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

$A \backslash f', \text{ мм}$	36	76	136
A_5	0,17	0,75	2,41
A_{10}	1,53	3,14	4,73
A_{15}	0,07	0,34	0,65
A_{III}	$\pm 1,46$	$\pm 2,8$	$\pm 4,08$

Примечание: положительное значение коэффициента влияния A_{III} соответствует смещению третьего компонента в сторону четвертого компонента.

При разработке методики юстировки сдвига ПИ следует всегда придерживаться следующих правил:

- юстировочные подвижки оптических компонентов должны производиться при том значении фокусного расстояния, при котором они будут иметь наименьшие величины;
- юстировочные подвижки должны осуществляться теми компонентами, к которым имеется наиболее простой доступ. Практическое применение этих простых правил позволит предотвратить взаимные столкновения подвижных компонентов, избежать возможность их выпадения из конструкции при юстировке и значительно ускорит проведение юстировочных работ.

Теперь перейдем непосредственно к разработке методики юстировки объектива. В общем случае, после сборки объектива будут иметь погрешности положения третьего компонента Δ_{III} , переменных воздушных промежутков Δd_5 , Δd_{10} , Δd_{15} и отклонение базового торца байонета относительно оптики объектива на величину $\Delta S'_0$. Рассмотрим предельно возможный случай, когда смещение ПИ от всех этих погрешностей происходит в одну сторону и результирующее смещение равно их арифметической сумме. В соответствии с табл.8.1 такой случай представлен на рис.8.17.

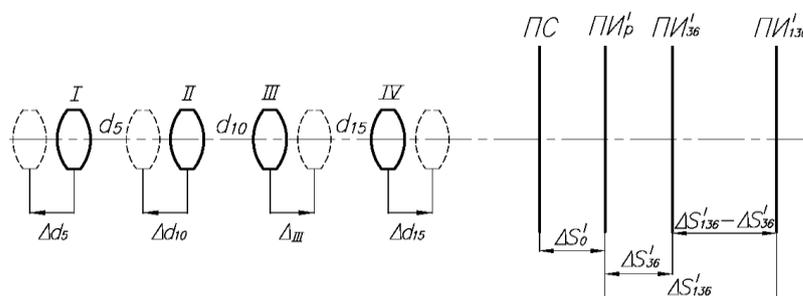


Рис. 8.17. Смещение плоскости изображения при погрешностях установки компонентов

На нем буквами ПС обозначено положение плоскости, находящейся на рабочем расстоянии от торца байонета, а буквами III_p - расчетное положение плоскости изображения при отсутствии каких-либо погрешностей изготовления.

Из-за погрешности установки воздушных промежутков и положения третьего компонента на $f' = 36$ мм ПИ сместится на величину $\Delta S'_{36}$, равную $\Delta S'_{36} = A_5^{36} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15}$ и займет новое положение III'_{36} . В приведенном выражении индекс сверху «36» означает величину фокусного расстояния, для которого берутся коэффициенты влияния. В дальнейшем индекс сверху будет также обозначать фокусное расстояние, которому соответствуют выбранные коэффициенты влияния.

Из-за тех же погрешностей изготовления на $f' = 136$ мм плоскость изображения сместится от расчетного положения III'_p на величину $\Delta S'_{136} = A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15}$, и займет положение III'_{136} . При этом $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}$ с учетом значений A табл.5 будет равна $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36} = 2,24\Delta d_5 + 3,2\Delta d_{10} + 2,62\Delta_{III} + 0,58\Delta d_{15}$.

Компенсация сдвига ПИ должна начинаться с совмещения ПИ с ПС подвижкой всего объектива. Такое начало юстировки объясняется тем, что, во-первых, при подвижке всего объектива не нарушаются промежутки внутри объектива, во-вторых, сама величина подвижки в несколько раз меньше, чем юстировочные подвижки четвертого и первого компонентов, и наконец, кинематическая схема объектива предусматривает подвижку всего объектива при использовании его в режиме макрозумма, что, конечно, значительно сильно упрощает задачу юстировки всем объективом. Очевидно, совмещение ПИ и ПС должно проводиться на $f' = 36$ мм, т.к. именно при этом значении фокусного расстояния будет иметь место наименьшее смещение ПИ от расчетного положения (см. табл.5). Установим $f' = 36$ мм. Произведем совмещение ПИ с плоскостью сетки.

После совмещения III'_p займет положение левее сетки (рис.3.18,а).

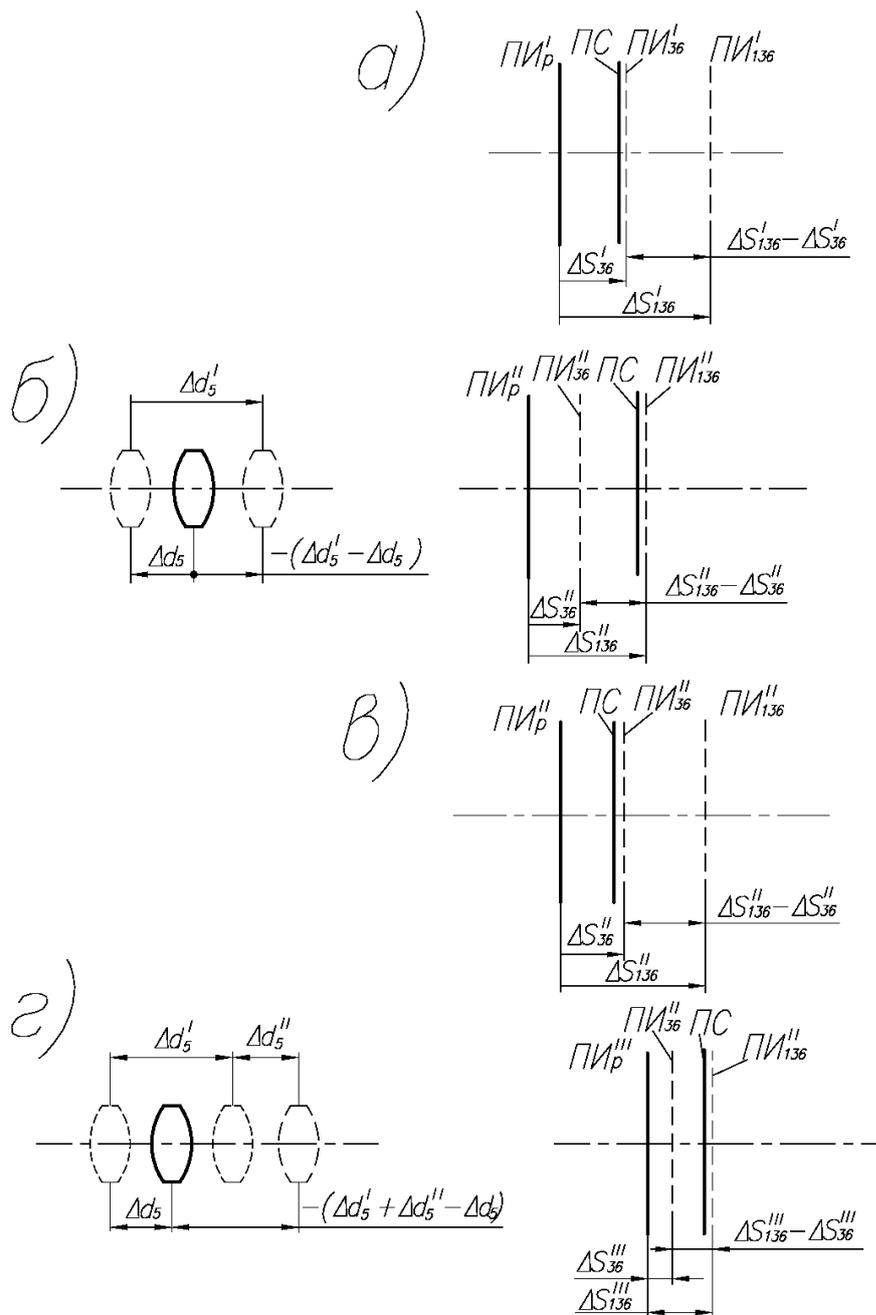


Рис. 8.18 – Смещение плоскости установки при погрешности установки первого компонента

При переводе фокусного расстояния на $f' = 136$ мм ПИ сместится от ПС вправо на величину $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}$. Компенсируем ее подвижкой первого компонента на

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}}{A_5^{136}} \quad (3) \text{ (рис.3.18,б)}$$

В результате смещение ПИ от $ПИ''_p$ будет равно

$$\begin{aligned} \Delta S''_{136} &= -A_5^{136}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + \Delta S'_{136}. \end{aligned}$$

Подставив вместо $\Delta d'_5$ его значение (3), получим

$$\Delta S'_{136} = -\frac{A_5^{136}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136} = \Delta S'_{36}.$$

При переводе фокусного расстояния на $f' = 36$ мм ПИ сместится от III''_p на величину (рис.3.18в)

$$\begin{aligned} \Delta S''_{36} &= -A_5^{36}(\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= \Delta S'_{36} - \frac{A_5^{36}}{A_5^{36}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}). \end{aligned}$$

Таким образом, смещение ПИ от ПС будет равно

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Подставив значения A_5^{36} и A_5^{136} из табл.5, получим

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = 0,07(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Нетрудно увидеть, что разница в смещениях ПИ на $f' = 136$ мм и $f' = 36$ мм стала почти на порядок меньше, чем исходная величина $\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}$. Но и в этом случае она еще достаточно велика. Поэтому вновь установленное $f' = 36$ мм подвижкой всего объектива на величину $\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36}$ совместим ПИ и ПС (рис.3.18в). Затем, переведя фокусное расстояние на $f' = 136$ мм, подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d''_5 = \frac{\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36}}{A_5^{136}} = \frac{A_5^{36}}{(A_5^{136})^2}(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Совместим ПИ с ПС (положение III'''_{136} см. рис.3.18г). Если мы переведем фокусное расстояние на $f' = 36$ мм, то ПИ сместится от III'''_p в III'''_{36} на

$$\begin{aligned} \Delta S'''_{36} &= -A_5^{36}(\Delta d''_5 + (\Delta d'_5 - \Delta d_5)) + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= \Delta S'_{36} - \left(\left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \right)^2 + \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \right) \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}), \end{aligned}$$

а при $f' = 136$ мм на

$$\begin{aligned} \Delta S'''_{136} &= -A_5^{136}(\Delta d''_5 + (\Delta d'_5 - \Delta d_5)) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36}. \end{aligned}$$

От ПС ПИ будет смещена на величину

$$\begin{aligned} \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} &= \left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \right)^2 \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0,005(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = \\ &= 0,01\Delta d_5 + 0,016\Delta d_{10} + 0,003\Delta d_{15}. \end{aligned}$$

При погрешностях $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta d_{15} = \Delta_{III} = 0,1$ мм смещение от ПС будет равно $\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0,004$ мм, что вполне приемлемо, т.к. полностью входит в глубину резкости объектива (0,035 мм).

Таким образом, по приведенной схеме юстировки даже в самом худшем случае, когда все смещения ПИ от погрешности изготовления

складываются в одну сторону, можно добиться почти полной компенсации сдвига ПИ при крайних значениях фокусного расстояния.

Теперь, когда положения ПИ на $f' = 136$ мм и $f' = 36$ мм практически совмещены, выявим величину сдвига ПИ от $ПИ_p$ на других значениях фокусного расстояния - f' . Очевидно,

$$\begin{aligned}\Delta S'''_{fi} &= -A_5^{fi}(\Delta d_5'' + (\Delta d_5' - \Delta d_5)) + A_{10}^{fi} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{fi} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{fi} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= -A_5^{fi} \cdot \Delta d_5'' - A_5^{fi} \cdot \Delta d_5' + \Delta S'_{fi}.\end{aligned}$$

Вместо $\Delta d_5''$ и $\Delta d_5'$ подставим в эту формулу их выражения, полученные раньше. Тогда

$$\begin{aligned}\Delta S'''_{fi} &= -\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2} (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}} (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{fi} = \\ &= -\left(\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2} + \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}} \right) \cdot (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{fi}.\end{aligned}$$

Смещение ПИ на f'_i от ПС, с которой совмещена ПИ, на $f' = 136$ мм будет равно:

$$\begin{aligned}\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{fi} &= -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36} + \left(\frac{A_5^{fi} A_5^{36}}{(A_5^{136})^2} + \frac{A_5^{fi}}{A_5^{136}} \right) (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \Delta S'_{fi} = \\ &= -0,07(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{36} + (0,03 A_5^{fi} + 0,415 A_5^{fi})(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) - \Delta S'_{fi} = \\ &= (-0,07 + 0,445 A_5^{fi})(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{fi}).\end{aligned}$$

Рассчитаем по полученной формуле смещения ПИ для следующих значений фокусного расстояния: 56, 76, 96, 116, 126. После подстановки коэффициентов влияния получим для

$$\begin{aligned}f' = 56 \text{ мм} \quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{56} &= -0,47 \Delta d_{10} - 0,46 \Delta_{III} - 0,06 \Delta d_{15}; \\ f' = 76 \text{ мм} \quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{76} &= -0,6 \Delta d_{10} - 0,6 \Delta_{III} - 0,12 \Delta d_{15}; \\ f' = 96 \text{ мм} \quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{96} &= -0,7 \Delta d_{10} - 0,7 \Delta_{III} - 0,11 \Delta d_{15}; \\ f' = 116 \text{ мм} \quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{116} &= -0,9 \Delta d_{10} - 0,9 \Delta_{III} - 0,1 \Delta d_{15}; \\ f' = 126 \text{ мм} \quad \Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{126} &= -0,35 \Delta d_{10} - 0,33 \Delta_{III} - 0,06 \Delta d_{15}.\end{aligned}$$

Из приведенных вычислений следует, что, во-первых, сдвиг ПИ на фокусных расстояниях между $f' = 36$ мм и $f' = 136$ мм определяется в основном погрешностями установки третьего компонента и воздушного промежутка Δd_{10} и, во-вторых, для уменьшения их влияния на сдвиг ПИ, необходимо всегда стремиться к положению, при котором $\Delta_{III} = -\Delta d_{10}$.

Но даже в том случае, когда это равенство не выполняется, а допуски на погрешности имеют вполне приемлемые для условий производства величины, например, $\Delta d_{10} = 0,015$ мм, $\Delta_{III} = 0,02$ и $\Delta d_{15} = 0,02$ мм сдвиг ПИ относительно ПС не будет превышать 0,030 мм, что входит в глубину резкости объектива и является вполне допустимым.

Пробовать компенсировать сдвиг ПИ $\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36}$ при фокусном расстоянии f'_i изменением воздушного промежутка d_{10} или смещением

третьего компонента практически бесполезно. Такие юстировочные подвижки к положительным результатам не приведут. Поэтому при сборке объектива следует выдерживать Δd_{10} и Δ_{III} в заданных допустимых пределах, а если это не удастся, то необходимо стремиться по возможности выполнять условие $\Delta d_{10} = -\Delta_{III}$.

8.6. Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения

Рассмотрим случай, когда выставка контрольных воздушных промежутков и третьего компонента в контрольной точке криволинейного паза происходит при наличии местной ошибки Δh профиля паза кулачка (рис.3.19).

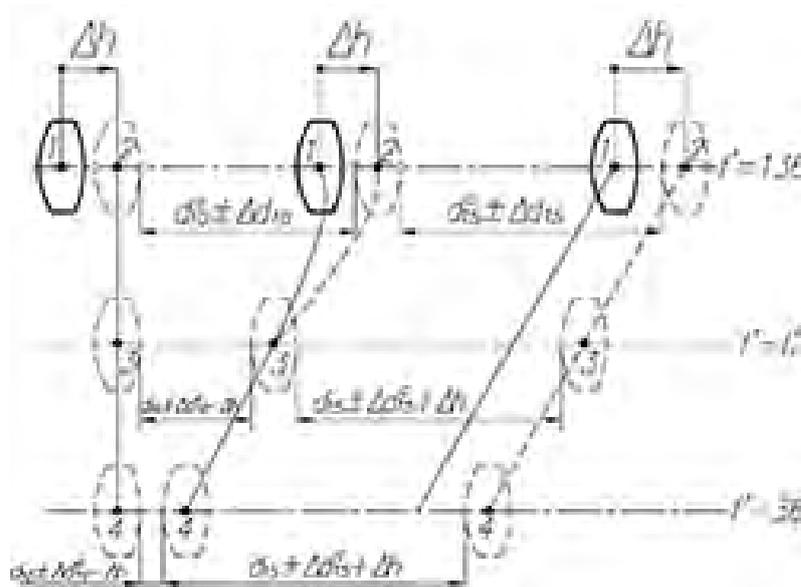


Рис. 3.19. Схема юстировки при наличии местной ошибки Δh

Из-за ошибки Δh третий компонент будет установлен в положение 2, которое отличается от расчетного положения на величину Δh . После выставки контрольных промежутков d_{10}° и d_{15}° второй и четвертый компоненты окажутся смещенными относительно своих минимальных положений также на величину Δh . При вращении кулачка на некотором угле разворота ось винта третьего компонента выйдет на теоретическую кривую (сплошная линия) перемещения третьего компонента.

Очевидно в этом и во всех последующих положениях ошибка положения третьего компонента от Δh будет равна нулю. Но при этом возникнут ошибки переменных воздушных промежутков: d_{10} уменьшится на Δh , а d_{15} увеличится на эту же величину.

В этих новых условиях проведем компенсацию сдвига ПИ по ранее приведенной схеме.

Пусть установка третьего компонента и контрольных воздушных промежутков d_{10}° и d_{15}° производится при $f' = 136$ мм (в положении 2). Тогда

$$\begin{aligned}\Delta S'_{136} &= A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} (\Delta_{III} + \Delta h) + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15}, \\ \Delta S'_{36} &= A_5^{36} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{36} (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} (\Delta d_{15} + \Delta h).\end{aligned}$$

Переведем фокусное расстояние на $f' = 36$ мм и совместим ПИ с ПС. Затем установим $f' = 136$ мм и подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}}{A_5^{136}},$$

компенсируем сдвиг ПИ. При этом ПИ сместится относительно III'_p на

$$\begin{aligned}\Delta S''_{136} &= -A_5^{136} (\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{136} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{136} (\Delta_{III} + \Delta h) + A_{15}^{136} \cdot \Delta d_{15} = \\ &= -A_5^{136} \cdot \Delta d'_5 + \Delta S'_{136} = -(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136} = \Delta S'_{36}.\end{aligned}$$

А при переводе фокусного расстояния на $f' = 36$ мм ПИ сместится относительно III'_p на

$$\begin{aligned}\Delta S''_{36} &= -A_5^{36} (\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{36} \cdot (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{36} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{36} \cdot (\Delta d_{15} + \Delta h) = \\ &= -A_5^{36} (\Delta d'_5 + \Delta S'_{36}) = -\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) + \Delta S'_{136}\end{aligned}$$

Отсюда

$$\Delta S''_{136} - \Delta S''_{36} = \frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}).$$

Величина эта еще достаточна велика. Поэтому повторим еще раз процесс компенсации сдвига ПИ, получим

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = \left(\frac{A_5^{36}}{A_5^{136}} \right)^2 (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0,005 (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

где

$$\begin{aligned}\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36} &= (A_5^{136} - A_5^{36}) \Delta d_5 + (A_{10}^{136} - A_{10}^{36}) \Delta d_{10} + (A_{III}^{136} - A_{III}^{36}) \Delta_{III} + (A_{15}^{136} - A_{15}^{36}) \Delta d_{15} + \\ &+ (A_{10}^{136} + A_{III}^{136} - A_{15}^{36}) \Delta h = 2,24 \Delta d_5 + 3,2 \Delta d_{10} + 2,62 \Delta_{III} + 0,58 \Delta d_{15} + 5,54 \Delta h.\end{aligned}$$

Подставим это выражение в вышеприведенную формулу

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0,01 \Delta d_5 + 0,016 \Delta d_{10} + 0,013 \Delta_{III} + 0,003 \Delta d_{15} + 0,028 \Delta h.$$

Если, как и раньше, предположить, что $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta d_{15} = \Delta_{III} = 0,1$ мм, то $\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{36} = 0,01$ мм, что естественно полностью входит в глубину резкости объектива.

Таким образом, наличие местной ошибки в контрольной точке не сказывается на компенсации сдвига ПИ на крайних значениях f' . Определим величину сдвига ПИ на промежуточных значениях фокусного расстояния. Для этого воспользуемся ранее выведенной формулой для сдвига ПИ:

$$\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{f_i} = (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{f_i}) + (0,445 A_5^{f_i} - 0,07) (\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

где с учетом местной ошибки

$$\begin{aligned}\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{f_i} &= (A_5^{36} - A_5^{f_i}) \Delta d_5 + (A_{10}^{36} - A_{10}^{f_i}) \Delta d_{10} + (A_{III}^{36} - A_{III}^{f_i}) \Delta_{III} + (A_{15}^{36} - A_{15}^{f_i}) \Delta d_{15} + \\ &+ (A_{10}^{f_i} - A_{10}^{36} + A_{15}^{36} - A_{15}^{f_i}) \Delta h.\end{aligned}$$

Выражение для $(\Delta S'''_{36} - \Delta S'''_{f_i})$ было получено выше. Анализ выражений $(\Delta S'_{36} - \Delta S'_{f_i})$ и $(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36})$ показывает, что влияние местной ошибки Δh определяется последними слагаемыми.

С учетом высказанного замечания величина ПИ от местной ошибки профиля паза может быть записана

$$\begin{aligned}\Delta S_{136}''' - \Delta S_{f_i}''' &= ((-A_{10}^{36} + A_{10}^{f_i} + A_{15}^{36} - A_{15}^{f_i}) + (0,445A_5^{f_i} - 0,07) \times (A_{10}^{36} + A_{III}^{136} - A_{15}^{36}))\Delta h = \\ &= (-1,85 + A_{10}^{f_i} - A_{15}^{f_i} + 2,47A_5^{f_i})\Delta h.\end{aligned}$$

На основе данных табл.1 рассчитаем по полученной формуле ПИ от Δh

$$f' = 56 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{56}''') = 1,29\Delta h;$$

$$f' = 76 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{76}''') = 2,70\Delta h;$$

$$f' = 96 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{96}''') = 4,36\Delta h;$$

$$f' = 116 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{116}''') = 5,30\Delta h;$$

$$f' = 126 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{126}''') = 6,94\Delta h.$$

Теперь выставку контрольных промежутков и третьего компонента проведем на другом крайнем значении фокусного расстояния $f' = 36$ мм. Будем, как и в предыдущем случае, считать, что в контрольной точке паза на $f' = 36$ мм имеется местная ошибка Δh . Тогда

$$\begin{aligned}\Delta S'_{36} &= A_5^{36} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{36} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{36}(\Delta_{III} + \Delta h) + A_{15}^{36} \cdot \Delta d_{15}; \\ \Delta S'_{136} &= A_5^{136} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{136}(\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^{136} \cdot \Delta_{III} + A_{15}^{136}(\Delta d_{15} + \Delta h).\end{aligned}$$

А величина сдвига

$$\begin{aligned}\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36} &= (A_5^{136} - A_5^{36})\Delta d_5 + (A_{10}^{136} - A_{10}^{36})\Delta d_{10} + (A_{III}^{136} - A_{III}^{36})\Delta_{III} + (A_{15}^{136} - A_{15}^{36})\Delta d_{15} + \\ &+ (A_{15}^{136} + A_{10}^{136} - A_{III}^{36})\Delta h = 2,24\Delta d_5 + 3,2\Delta d_{10} + 2,62\Delta_{III} + 0,58\Delta d_{15} + 5,54\Delta h.\end{aligned}$$

После проведения операции компенсации сдвига ПИ на крайних значениях f' получим

$$\Delta S_{136}''' - \Delta S_{36}''' = 0,005(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}) = 0,01\Delta d_5 + 0,016\Delta d_{10} + 0,013\Delta_{III} + 0,58\Delta d_{15} - 5,54\Delta h.$$

Сравнивая это выражение с выражением, полученным при выставке контрольных промежутков на фокусном расстоянии $f' = 136$ мм, видим, что разница заключена только в знаке перед слагаемым с Δh .

Рассмотрим изменение величины сдвига ПИ на промежуточных значениях f'_i .

Согласно ранее выведенной формуле

$$\Delta S_{136}''' - \Delta S_{f_i}''' = (\Delta S'_{36} - \Delta S'_{f_i}) + (0,445A_5^{f_i} - 0,07)(\Delta S'_{136} - \Delta S'_{36}),$$

где

$$\begin{aligned}\Delta S'_{36} - \Delta S'_{f_i} &= (A_5^{36} - A_5^{f_i})\Delta d_5 + (A_{10}^{36} - A_{10}^{f_i})\Delta d_{10} + (A_{III}^{36} - A_{III}^{f_i})\Delta_{III} + (A_{15}^{36} - A_{15}^{f_i})\Delta d_{15} + \\ &+ (A_{III}^{36} + A_{10}^{f_i} - A_{15}^{f_i})\Delta h.\end{aligned}$$

Сдвиг ПИ только от местной ошибки будет равен

$$\begin{aligned}\Delta S_{136}''' - \Delta S_{f_i}''' &= (A_{III}^{36} + A_{10}^{f_i} - A_{15}^{f_i}) + (0,445A_5^{f_i} - 0,07)(A_{15}^{136} - A_{10}^{136} - A_{III}^{36})\Delta h = \\ &= (-2,47A_5^{f_i} + A_{10}^{f_i} - A_{15}^{f_i} + 1,85)\Delta h.\end{aligned}$$

Подставив в эту формулу значения коэффициентов влияния для $f' = 56$; 76; 96; 116; 126, получим

$$f'_i = 56 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{56}''') = 3,00\Delta h;$$

$$f'_i = 76 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{76}''') = 2,70\Delta h;$$

$$f'_i = 96 \text{ мм} \quad (\Delta S_{136}''' - \Delta S_{96}''') = 2,14\Delta h;$$

$$f'_i = 116 \text{ мм} \quad (\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{116}) = 2,09 \Delta h;$$

$$f'_i = 126 \text{ мм} \quad (\Delta S'''_{136} - \Delta S'''_{126}) = 0,76 \Delta h.$$

Из приведенных вычислений следует, что при наличии местной ошибки одной и той же величины в контрольных точках паза на крайних значениях фокусного расстояния, ее влияние на сдвиг ПИ при выставке контрольных промежутков и третьего компонента на $f' = 136$ мм более чем в два раза выше, чем при юстировке на $f' = 36$ мм во всем диапазоне изменения фокусного расстояния.

8.7. Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения в объективах типа «Гранит»

Рассмотрим методику юстировки объектива с другой, более распространенной, кинематической схемой. На рис.3.20 представлена принципиальная оптическая схема объектива киносъёмочного аппарата на 8 мм (формат пленки типа S).

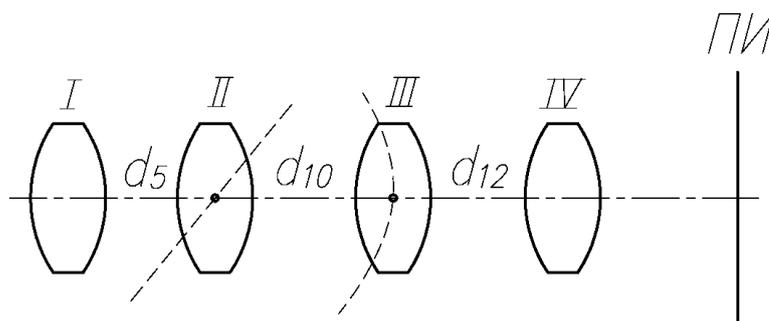


Рис. 3.20. Принципиальная оптическая схема объектива «Гранит»

Из рис.3.20 видно, что его схема, как и предыдущего объектива, четырехкомпонентная. Первый компонент дистанционный, при фокусировке объектива перемещается вдоль оси объектива по окулярной резьбе. Вторым – вариатор, перемещается по винтовому пазу цилиндрического кулачка. Третий – компенсатор, перемещается по криволинейному пазу, а четвертый компонент неподвижный.

Коэффициенты влияния погрешностей переменных воздушных промежутков и положения третьего компонента на сдвиг ПИ приведены в табл.6.

Таблица 6

A_i \ $f', \text{ мм}$	7	17,6	47
A_5	0,03	0,15	1,07

A_{10}	0,17	0,22	0,16
A_{15}	0,57	0,57	0,57
A_{III}	-0,4	-0,35	-0,41

Как и в предыдущем варианте объектива рассмотрим идеальный случай, когда смещение ПИ от всех погрешностей происходит в одну сторону, а результирующее смещение равно их арифметической сумме (рис.3.21). Так как на начальном этапе юстировки сдвига ПИ совмещают ПИ на крайних значениях диапазона изменения фокусного расстояния, представим исходное положение ПИ на $f'=7$ мм и $f'=47$ мм от погрешностей установки $\Delta d_5, \Delta d_{10}, \Delta_{III}, \Delta d_{12}$ (рис.3.22).

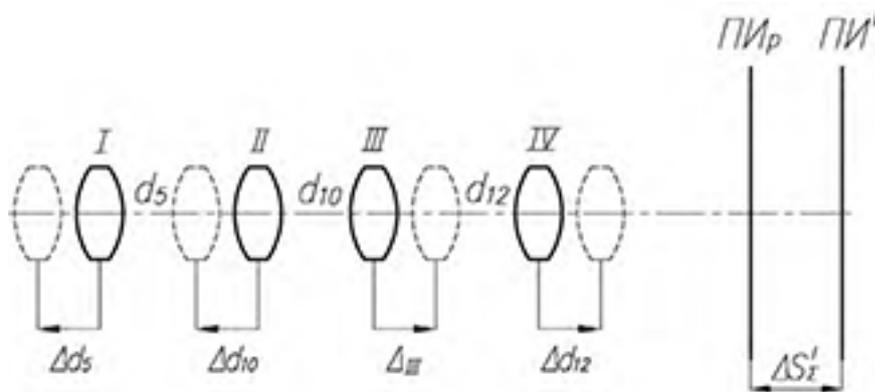


Рис. 3.21. Смещение плоскости изображения при погрешностях установки компонентов

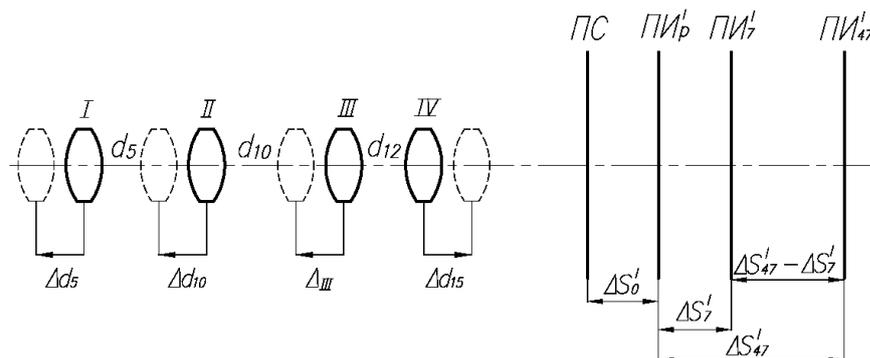


Рис. 3.22. Смещение плоскости изображения на $f'=7$ мм и $f'=47$ мм

Все обозначения на рисунках те же, что и на рисунках объектива «Янтарь-21». Смещение ПИ на $f'=47$ мм от своего расчетного положения будет равно

$$\Delta S'_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} + A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12},$$

а на $f'=7$ мм

$$\Delta S'_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} + A_{12}^7 \cdot \Delta d_{12}.$$

Для величины взаимного сдвига на этих значениях фокусного расстояния можно записать

$$\Delta S'_{47} - \Delta S'_7 = (A_5^{47} - A_5^7)\Delta d_5 + (A_{10}^{47} - A_{10}^7)\Delta d_{10} + (A_{III}^{47} - A_{III}^7)\Delta_{III} + (A_{12}^{47} - A_{12}^7)\Delta d_{12}.$$

Компенсацию сдвига ПИ относительно ПС будем производить четвертым компонентом на $f' = 7$ мм. При этом четвертый компонент будем перемещать до тех пор, пока $ПИ'_7$ не совпадет с ПС (положение $ПИ''_7$) (рис.3.23).

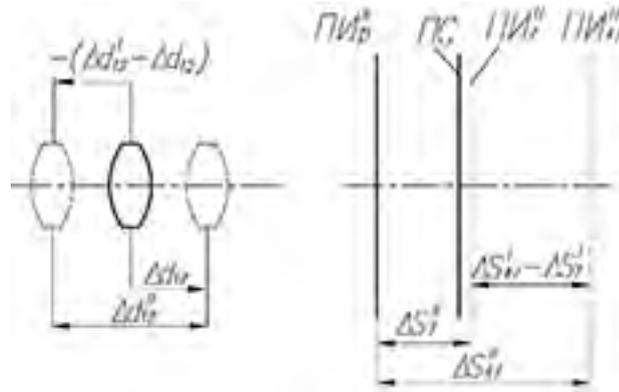


Рис. 3.23. Компенсация сдвига плоскости изображения изменением промежутка Δd_{12}

Величина этого перемещения будет равна

$$\Delta d'_{12} = \frac{\Delta S'_0 - \Delta S'_7}{A_{12}^7}.$$

Отсюда

$$\Delta S''_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7 (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \Delta S'_7 - A_{12}^7 \cdot \Delta d'_{12} = \Delta S'_0;$$

$$\Delta S''_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} - A_{12}^{47} (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \Delta S'_{47} - \frac{A_{12}^{47}}{A_{12}^7} (\Delta S'_0 - \Delta S'_7).$$

А так как $A_{12}^{47} = A_{12}^7$ (табл.6), то

$$\Delta S''_{47} = \Delta S'_{47} - (\Delta S'_0 - \Delta S'_7).$$

Определим величину $\Delta S''_{47} - \Delta S''_7$, которая в данном случае является смещением ПИ от ПС на $f' = 47$ мм.

$$\Delta S''_{47} - \Delta S''_7 = \Delta S'_{47} - \Delta S'_7.$$

Компенсируем ее подвижкой первого компонента при $f' = 47$ мм на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S''_{47} - \Delta S''_7}{A_5^{47}}.$$

При этом ПИ совместится с ПС (рис.3.24).

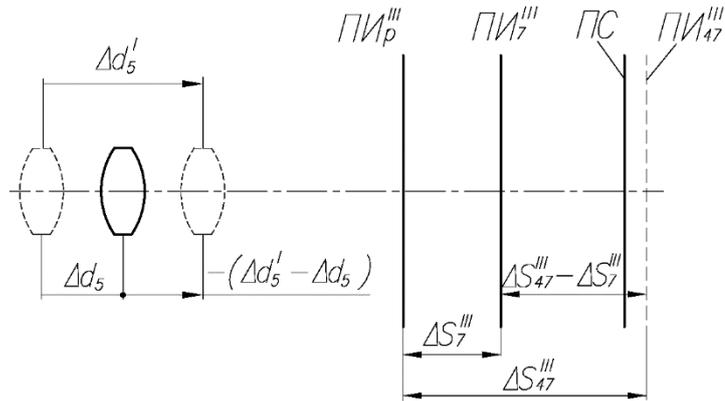


Рис. 3.24. Компенсация сдвига плоскости изображения изменением промежутка Δd_5

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta S_{47}''' &= -A_5^{47}(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} \cdot \Delta_{III} - A_{12}^{47}(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) = \\ &= -A_5^{47} \cdot \Delta d_5' + \Delta S_{47}' - A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12}' = -(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') - (\Delta S_0' + \Delta S_7') = \\ &= -\Delta S_0' = \Delta S_7''; \\ \Delta S_7''' &= -A_5^7(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^7 \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) = \\ &= -A_5^7 \cdot \Delta d_5' + \Delta S_7' - A_{12}^7 \cdot \Delta d_{12}' = -\frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') - (\Delta S_0' + \Delta S_7') = \\ &= -\frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') - \Delta S_0'. \end{aligned}$$

Сдвиг ПИ

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = \frac{A_5^7}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}' - \Delta S_7'),$$

но т.к. $A_5^{47} \approx 1$, то можно записать $\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = A_5^7(\Delta S_{47}' - \Delta S_7')$.

Подставив в это выражение значения коэффициентов влияния из табл.6, окончательно получим $\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = 0,03\Delta d_5 - 0,0003\Delta d_{10} - 0,0003\Delta_{III}$. Из этого уравнения следует, что для получения минимального сдвига ПИ необходимо стремиться к получению как можно меньшей величины Δd_5 . Но даже без учета этого положения сама по себе величина сдвига весьма мала.

Пусть $\Delta d_5 = \Delta d_{10} = \Delta_{III} = \Delta d_{12} = 0,1$ мм, тогда $\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = 0,003$ мм, что несоизмеримо меньше глубины резкости объектива (0,02 мм).

Теперь, когда на крайних значениях фокусного расстояния ПИ совмещены, определим сдвиг ПИ для любого значения f_i' внутри диапазона изменения фокусных расстояний

$$\begin{aligned} \Delta S_{fi}''' &= -A_5^{fi}(\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{fi} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{fi} \cdot \Delta_{III} + A_{12}^{fi}(\Delta d_{12}' - \Delta d_{12}) = \\ &= -A_5^{fi}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') / A_5^{47} + \Delta S_{fi}' - A_{12}^{fi}(\Delta S_0' + \Delta S_7') / A_{12}^7 = \\ &= -\frac{A_5^{fi}}{A_5^{47}}(\Delta S_{47}'' - \Delta S_7'') + \Delta S_{fi}' - \frac{A_{12}^{fi}}{A_{12}^7}(\Delta S_0' + \Delta S_7'). \end{aligned}$$

Смещение ПИ при фокусном расстоянии f'_i относительно положения ПИ на $f' = 47$ мм будет равно

$$\Delta S'''_{47} - \Delta S'''_{f'_i} = -\Delta S'_0 + \frac{A_5^{f'_i}}{A_5^{47}} \Delta S'_{f'_i} + \frac{A_{12}^{f'_i}}{A_{12}^7} \Delta S'_0 + \frac{A_{12}^{f'_i}}{A_{12}^7} \Delta S'_7.$$

Коэффициент влияния изменения d_{12} на всех значениях фокусного расстояния равен 0,57 (табл.6), то окончательно можно записать

$$\Delta S'''_{47} - \Delta S'''_{f'_i} = \frac{A_5^{f'_i}}{A_5^{47}} \Delta S'_{47} + \left(1 - \frac{A_5^{f'_i}}{A_5^{47}}\right) \Delta S'_7 - \Delta S'_{f'_i}.$$

Расчет этой величины проведем для фокусных расстояний 13; 18; 28; 38; 43 мм. Значения коэффициентов влияния возьмем из графиков, представленных на рис.3.25. Результаты расчетов приведены в табл.7.

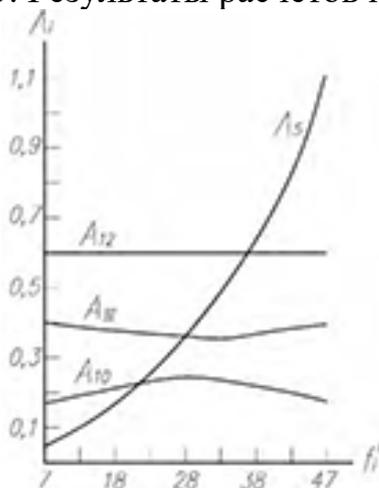


Рис. 3.25. Изменение коэффициентов влияния при изменении f' от 7 до 47 мм

Из приведенных результатов вычислений следует, что для промежуточных значений фокусного расстояния основную и наиболее весомую часть в сдвиг ПИ вносят погрешности воздушного промежутка Δd_{10} и установки третьего компонента в расчетную точку паза. Для уменьшения их влияния при сборке всегда необходимо стремиться к такому положению, чтобы $\Delta d_{10} = \Delta_{III}$. Но даже при наличии погрешностей порядка 0,1 мм, что из-за большой величины встречается крайне редко, смещение ПИ в самом худшем случае ($f' = 28$ мм) не будет превышать 0,017 мм, что входит в глубину резкости объектива (0,02 мм).

Таблица 7

f'_i	$\Delta S'''_{47} - \Delta S'''_{f'_i}$
13	$0,028\Delta d_5 - 0,021\Delta d_{10} + 0,04\Delta_{III}$
18	$0,028\Delta d_5 - 0,057\Delta d_{10} + 0,058\Delta_{III}$
28	$0,02\Delta d_5 - 0,073\Delta d_{10} + 0,08\Delta_{III}$
38	$0,01\Delta d_5 - 0,06\Delta d_{10} + 0,057\Delta_{III}$
43	$0,007\Delta d_5 - 0,058\Delta d_{10} + 0,02\Delta_{III}$

8.8. Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения

Рассмотрим случай, когда выставка третьего компонента и контрольных воздушных промежутков производится при наличии местной ошибки Δh в контрольной точке профиля криволинейного паза.

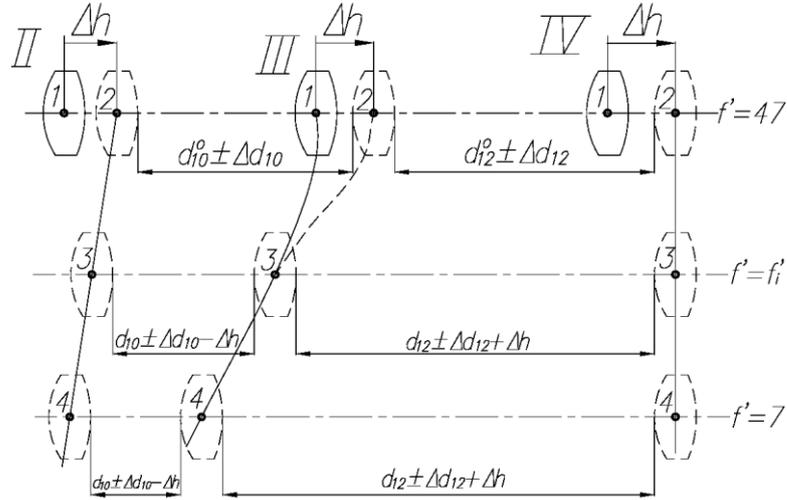


Рис. 3.26. Юстировка промежутков при наличии местной ошибки Δh

На основе рис.3.26 запишем:

$$\Delta S'_{47} = A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} (\Delta_{III} + \Delta h) + A_{12}^{47} \cdot \Delta d_{12};$$

$$\Delta S'_7 = A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} + A_{12}^7 (\Delta d_{12} + \Delta h).$$

Совместим ПИ с ПС на $f' = 7$ мм подвижкой четвертого компонента на

$$\Delta d'_{12} = \frac{\Delta S'_0 + \Delta S'_7}{A_{12}^7}.$$

При этом, как и ранее, получим

$$\begin{aligned} \Delta S''_{47} &= A_5^{47} \cdot \Delta d_5 + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} (\Delta_{III} + \Delta h) - A_{12}^{47} (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \\ &= A_{12}^{47} \cdot \Delta d'_{12} + \Delta S'_{47} + A_{III}^{47} \cdot \Delta h = (\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) - \Delta S'_0 + A_{III}^{47} \cdot \Delta h; \\ \Delta S''_7 &= A_5^7 \cdot \Delta d_5 + A_{10}^7 (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7 (\Delta d'_{12} - (\Delta d_{12} + \Delta h)) = \\ &= \Delta S'_7 - A_{10}^7 \cdot \Delta h - A_{12}^7 \cdot \Delta d'_{12} + A_{12}^7 \cdot \Delta h = -\Delta S'_0 + (A_{12}^7 - A_{10}^7) \Delta h; \\ \Delta S''_{47} - \Delta S''_7 &= (\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7) \Delta h. \end{aligned}$$

Подвижкой первого компонента на величину

$$\Delta d'_5 = \frac{\Delta S''_{47} - \Delta S''_7}{A_5^{47}} = \frac{(\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7) \Delta h}{A_5^{47}}$$

совместим ПИ с ПС. Для вновь полученного расположения

$$\begin{aligned} \Delta S'''_{47} &= -A_5^{47} (\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^{47} \cdot \Delta d_{10} + A_{III}^{47} (\Delta_{III} + \Delta h) - A_{12}^{47} (\Delta d'_{12} - \Delta d_{12}) = \\ &= \Delta S'_0 + (A_{12}^7 - A_{10}^7) \Delta h = \Delta S'_7 \\ \Delta S'''_7 &= -A_5^7 (\Delta d'_5 - \Delta d_5) + A_{10}^7 (\Delta d_{10} - \Delta h) + A_{III}^7 \cdot \Delta_{III} - A_{12}^7 (\Delta d'_{12} - (\Delta d_{12} + \Delta h)) = \\ &= -A_5^7 \frac{(\Delta S'_{47} - \Delta S'_7) + (A_{III}^{47} + A_{10}^7 - A_{12}^7) \Delta h}{A_5^{47}} + \Delta S'_7. \end{aligned}$$

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = \Delta S_7'' + \frac{A_5^7}{A_5^{47}} (\Delta S_{47}' - \Delta S_7' + (A_{III}^7 + A_{10}^7 - A_{12}^7) \Delta h) - \Delta S_7'',$$

а так как $A_5^{47} \approx 1$, то

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = A_5^7 (\Delta S_{47}' - \Delta S_7' + (A_{III}^7 + A_{10}^7 - A_{12}^7) \Delta h).$$

После подстановки значений коэффициентов влияний получим

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_7''' = 0,03(\Delta S_{47}' - \Delta S_7') - 0,024\Delta h.$$

Второе слагаемое этого выражения определяет степень влияния местной ошибки на величину сдвига ПИ. При $\Delta h = 0,1$ добавление к сдвигу будет составлять 0,0024 мм, т.е. реально величина неощутимая. А теперь рассмотрим влияние Δh на сдвиг ПИ на промежуточных значениях f_i' .

$$\begin{aligned} \Delta S_{f_i}''' &= -A_5^{f_i} (\Delta d_5' - \Delta d_5) + A_{10}^{f_i} (\Delta d_{10}' - \Delta h) + A_{III}^{47} \Delta_{III} - A_{12}^{f_i} (\Delta d_{12}' - (\Delta d_{12} - \Delta h)) = \\ &= \Delta S_{f_i}' - \frac{A_5^{f_i}}{A_5^{47}} (\Delta S_{47}' - \Delta S_7') + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7) \Delta h - A_{10}^{f_i} \cdot \Delta h - \\ &- \frac{A_{12}^{f_i}}{A_{12}^7} (\Delta S_0' + \Delta S_7') + A_{12}^{f_i} \cdot \Delta h = \Delta S_{f_i}' - \frac{A_5^{f_i}}{A_5^{47}} (\Delta S_{47}' - \Delta S_7') + (A_{III}^{47} - A_{12}^7 + A_{10}^7) \Delta h + \\ &+ (A_{12}^{f_i} - A_{10}^{f_i}) \Delta h - (\Delta S_0' + \Delta S_7'). \end{aligned}$$

Сдвиг ПИ будет равен

$$\Delta S_{47}''' - \Delta S_{f_i}''' = (A_5^{f_i} \cdot \Delta S_{47}' + (1 - A_5^{f_i}) \Delta S_7' - \Delta S_{f_i}') + (-0,17 + A_{10}^{f_i} - 0,8A_5^{f_i}) \Delta h.$$

Степень влияния местной ошибки на сдвиг ПИ определяется коэффициентом $(-0,17 + A_{10}^{f_i} - 0,8A_5^{f_i})$. Для фокусных расстояний 13; 18; 28; 38; 43 мм рассчитаны значения добавок к сдвигу ПИ от Δh (табл.8).

Таблица 8

f_i'	$\Delta S_{47}''' - \Delta S_{f_i}'''$
13	-0,04
18	-0,07
28	-0,22
38	-0,47
43	-0,59

Из приведенных данных следует, что влияние местной ошибки увеличивается с возрастанием фокусного расстояния и на наибольших значениях становится весьма значительным.

3.9. Особенности центрировки

Практика точностного анализа и изготовления ОПФР показала, что в объективах с трех, а иногда и четырехкратным перепадом фокусного расстояния, точность положения оптических элементов в большинстве случаев может быть обеспечена изготовлением деталей по допускам. В объективах с большими перепадами фокусных расстояний изготовление деталей на современном уровне точности изготовления не позволяет

получить объективы требуемого качества изображения и поэтому при своем изготовлении и сборке они требуют введения юстировочных операций. Все современные ОПРФ с большой кратностью состоят из двух и более десятков линз, имеют точную механику, поэтому выявление технологических погрешностей, вызвавших появление aberrаций, децентрировок в полностью собранном объективе, представляет собой достаточно сложную задачу. В связи с чем при разработке методики юстировки очень важно определить основной принцип ее построения. Но и сейчас уже достаточно ясно, что во всех случаях следует стремиться к созданию так называемого покомпонентного контроля и устранения децентрировок. Только после этого можно проводить окончательную сборку ОПФР. Выполнение этого в общем-то простого принципа позволяет в дальнейшем значительно упростить сборку объективов и заметно повысить качество ее проведения. Теперь посмотрим как должны проводиться поузловой контроль и юстировка. Во всех известных трансфокаторах и в некоторой части вариобъективов aberrации последнего компонента обычно хорошо скорректированы. Это позволяет контролировать степень его децентрировки на любой оптической скамье. Контроль осуществляется по искажению дифракционного изображения точки и чаще всего по наличию комы децентрировки в центре поля зрения. Если кома децентрировки недопустимо велика, то поперечными перемещениями или разворотах наиболее сильно влияющей на кому линзы устраняют ее. Бывают случаи, когда собственная коррекция aberrаций последнего компонента настолько слаба, что на оптической скамье не наблюдается изображение точки. Наблюдается большое размытое пятно. В этих случаях рассчитывают и изготавливают компенсатор, который состоит из двух, трех линз, а его aberrация по величине и знаку равны aberrации предшествующей части объектива для одного из значений фокусного расстояния. При юстировке последнего компонента этот компенсатор устанавливают перед ним в единую корпусную деталь, но с возможностью проведения юстировочных подвижек линз. Часто в условиях производства применяют другой вариант контроля и юстировки децентрировок. Он заключается в следующем. Последний компонент устанавливают по посадочным поверхностям в оправу, закрепленную в патроне шпинделя станка. Посадочные места оправы предварительно тщательно проверяют на предмет торцевого и радиального биения. Если величина биений велика, то, не снимая оправы, ее «пропыляют». Далее, на направляющие станки устанавливают автоколлимационный микроскоп ЮС-13.

Микроскоп последовательно фокусируют на изображения центров кривизны всех оптических поверхностей линз компонента и, вращая шпиндель станка, определяют величину биений изображений центров кривизны. Зная увеличение, переходят к децентрировке действительных центров кривизны оптических поверхностей. Если эти величины для каких-то линз окажутся больше требований, записанных в чертежах, то компонент

должен быть разобран, а линзы с плохой центрировкой заново отцентрированы.

По такой схеме контролируются децентрировки всех оптических элементов объектива. Расчет положений автоколлимационных изображений центров кривизны и увеличение должны заранее рассчитываться и вводиться в комплект конструкторской документации. После проведения покомпонентного контроля децентрировок и аттестации оптических узлов в окончательно собранном объективе все же возможно появление децентрировок. Для определения причин их появления устанавливают объектив на оптическую скамью и, изменяя фокусное расстояние, определяют на каком из них появилась кома децентрировки. Она может появиться как при больших, так и при малых значениях фокусного расстояния. Если кома возникает при больших значениях, а при остальных сильно уменьшается или совсем исчезает, то причиной ее появления чаще всего является децентрировка линз первого или второго компонентов. Об этом более подробную информацию могут дать коэффициенты влияния децентрировок. Экспериментально же проверка осуществляется на наибольшем значении фокусного расстояния разворотом первого компонента. При этом, естественно, происходит его продольное перемещение, следовательно, осевое перемещение плоскости изображения. Но перефокусируя микроскоп, можно вновь увидеть дифракционное изображение точки. Если при этом наблюдается разворот дифракционного изображения точки с комой, то значит в первом компоненте какая-то линза или группа линз децентрированы. Если же такого разворота не наблюдается, то тогда, скорее всего, децентрирован второй компонент или составляющие его линзы. При появлении комы на малых значениях фокусного расстояния причиной в большинстве случаев является децентрировка линз последнего компонента. Проверка, как и в предыдущем случае, осуществляется его разворотом, а устранение - подвижками наиболее влияющими на кому децентрировки линзами.

При поиске причин децентрировок в вариаторе и компенсаторе обычно возникают трудности, которые не всегда можно преодолеть. Связаны они с невозможностью подобраться к ним, когда объектив полностью собран. Поэтому, когда становится ясным, что ни первый, ни последний компоненты не вносят кому децентрировки, полностью выкручивают из корпуса первый компонент и разворачивают оптику второго компонента. После чего устанавливают в исходное положение первый компонент и наблюдают дифракционное изображение точки. Если кома децентрировки развернулась, то совершенно ясно, что причина ее появления находится во втором компоненте. При отсутствии ее разворота, причина ее появления находится в третьем компоненте.

Наконец, следует отметить, что если габариты объектива позволяют не только установить его в объективодержатель оптической скамьи, но и вращать вокруг оси, то имеется хорошая возможность контролировать

децентрировки всех оптических поверхностей объектива с помощью автоколлимационного микроскопа ЮС-13.

При оценке качества изображения на оптической скамье часто наблюдается поперечное смещение изображения при изменении фокусного расстояния.

Причиной такого смещения обычно является заклон оси объектива относительно оси коллиматора оптической скамьи.

Для устранения такого перемещения:

1. устанавливают минимальное значение фокусного расстояния f'_{\min} объектива, так как, именно на этом значении фокусного расстояния будет иметь место наименьшее смещение изображения с оси коллиматора.
2. совмещают центр изображения сетки коллиматора с центром сетки измерительного микроскопа подвижками последнего.
3. устанавливают наибольшее значение фокусного расстояния f'_{\max} и разворотами объектива добиваются совмещения центра изображения сетки коллиматора с центром сетки микроскопа.
4. устанавливают f'_{\min} и далее повторяют пп.2,3.

При юстировке пп.1-3 повторяется до тех пор, пока не будет отсутствовать поперечное смещение изображения при изменении фокусного расстояния.

ЛИТЕРАТУРА

Список литературы к части I

- 1.1. Оптический производственный контроль. Машиностроение. – М. :1985.
- 1.2. Hofmann C. Feingerutechnik, 1977. Bd26N:1
- 1.3. Данилевич Ф.М. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Машиностроение. – М.:1983.
- 1.4. Hofmann C. Feingerutechnik10.Helf 11.: 1961,с 16.
- 1.5. Губель Н.Н. Аберрации децентрированных оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1975.
- 1.6. Слюсарев Г.Г. Геометрическая оптика. М. – Л. Изд. АН СССР, 1946.
- 1.7. Мальцев М.Д. Расчёт допусков на оптические детали. М.: Машиностроение, 1974.
- 1.8. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб. – М.: Лань, 2015.
- 1.9. Крынин Л.И. ОМП №3, 1988.
- 1.10. Корякин Б.М. ОМП №4,5, 1935.
- 1.11. Schuch K. Optik №16, 1959.
- 1.12. Сухопаров С.А., Долинский И.М. ОМП №3, 1967.
- 1.13. Сухопаров С.А., Долинский И.М. ОМП №4, 1967.
- 1.14. Савоскин В.И., Труды МВТУ, №180, 1975.
- 1.15. Гуревич Э.С. ОМП №2, 1987.
- 1.16. Латыев С.М. ОМП №4, 1987.
- 1.17. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства.: АН СССР, 1950.
- 1.18. Приборостроение и средства автоматизации, т.1.: Машгиз, 1963.
- 1.19. Румшинский Я.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971.
- 1.20. Бородачев Н.А. Анализ качества и точности производства. – М.: АН СССР, 1950.
- 1.21. Цесник А.С., Яковлева Т.А. ОМП №4, 1971.
- 1.22. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. Изд. физ.-мат. литературы., 1965.

- 1.23. Румянцев А.В. Технология изготовления кулачков. – Л.: Машиностроение, 1969.
- 1.24. Сумин В.В. и др. ОМП №4, 1983.
- 1.25. Vox G.E. Welson K.B. On the Experimental Atteinment of Optimum Conitions – J. Roy. Statist. Soc, Ser B, 1951.
- 1.26. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.
- 1.27. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение, 1989.
- 1.28. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969.
- 1.29. Шторм Р. Теория вероятности и статистика. – М.: Мир, 1970.
- 1.30. Креопалова Г.В. и др. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987.
- 1.31. Herriott W. JOSA, v. 35, 559, 1945.
- 1.32. 48 Josand N., Wolf B. JOSA, v. 35, 559, 1945.
- 1.33. Иконика. – М.: Наука, 1968.
- 1.34. Huber S.Z. Instrumenteuk, 63, 333-341, 1943/
- 1.35. Джеймс Г. и др. Оценка качества оптического изображения.: Годезиздат, 1959.
- 1.36. ОМП №4, 1986, с. 49-54.
- 1.37. Справочник конструктора оптико-механических приборов.: Машиностроение, 1980.
- 1.38. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1945.
- 1.39. Куцеконь В.А. Точность кинематических цепей приборов.: Машиностроение, 1980.

Список литературы к части II

- 2.1. Цуккерман С.Т. точные механизмы. – М.: Оборонгиз, 1941
- 2.2. Warmigsheim. SMPTE. 1932, т.19, №4, стр. 329-339.
- 2.3. Бардин А.Н. Сборка и юстировка оптических приборов. – М.: Высшая школа, 1968.
- 2.4. Новик Ф.С., Ногин П.А. Киносъёмочная оптика. – М.: Искусство, 1968.
- 2.5. Плотников В.С. и др. Расчёт и конструирование оптико-механических приборов. – М.: Машиностроение, 1972.
- 2.6. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1968.
- 2.7. Литвин Ф.П. Проектирование механизмов и деталей приборов. – Л.: Машиностроение, 1973.
- 2.8. Погорев Г.В. Юстировка оптических приборов. – Л.: Машиностроение, 1968.
- 2.9. Анащенко Н.Д. Общий курс кинематографии, т.1, – М.: Теоксидпечать, 1929.

- 2.10. Волосов Д.С. Методы расчёта сложных фотографических систем.: Гостехиздат, 1948.
- 2.11. Product Engineering, 1967, Bd38, N18.
- 2.12. Патент США №1947669, 1931.
- 2.13. Патент США № 2165341, 1936.
- 2.14. Naumann H. Feinwerktechnik, 1968, 72, №6.
- 2.15. Патент Франции №2873646, 1954.
- 2.16. Патент США №1898471, 1929.
- 2.17. Патент Австрии №3059534, 1959.
- 2.18. Патент США №3106125, 1960.
- 2.19. Артоболевский И.И. Теория Механизмов для воспроизведения плоских кривых. – М.: АН СССР, 1959.
- 2.20. Патент США №4130347, 1934.
- 2.21. Патент Японии №9950, 1961.
- 2.22. Патент США №3051048, 1960.
- 2.23. Патент США №2.078.586, 1933.
- 2.24 Патент США №2.566.485, 1950.
- 2.25. Патент США №2.732.763, 1953.
- 2.26. Патент США №3.094.581, 1960.
- 2.27. Back F., Lowen H., JOSA, 1954,44.
- 2.28. Патент СССР №155959, 1962.
- 2.29. Кожевников С.Н. теория механизмов и машин. – М.: АН СССР, 1949.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТИВОВ С ПОСТОЯННЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

Введение	4
ГЛАВА 1. ДЕЦЕНТРИРОВКА – ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ	6
1.1 Определение центрировки и децентрировки оптических элементов в конструкции объектива	6
1.2 Анализ методов расчётов децентрировок в конструкции объектива.....	8
ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЪЕКТИВОВ	14
2.1 Эксцентриситеты, торцевые биения опорных торцов и овальности оправ	15
2.2 Направления и модули векторных технологических погрешностей	17
2.3 Децентрировки линз	21
2.4 Толщины линз и базовые вершинные отрезки	23
2.5 Переменные воздушные промежутки	28
2.6 Линейные координаты кулачка	29
2.7 Поперечные смещения оправ с линзой в зазоре между оправой и корпусом	30
2.8 Оценка связи между децентрировками поверхностей в линзах центрированных автоколлимационным способом	33
2.9 Оценка связи между децентрировками поверхностей линз и отклонениями от параллельности торцов оправ	35
2.10 Оценка комплектации линз по толщине	37

ГЛАВА 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТИВОВ.....	45
3.1 Визуальные методы оценки качества изображения объективов в производственных условиях	45
3.1.1 Вероятностный характер распределения комы децентрировки	46
3.1.2 Статистическая оценка связи между децентрировками и комой децентрировки	48
3.2 Вероятностный характер распределения частотно-контрастной характеристики и выбор оптимальных частот для оценки контраста объективов в условиях серийного производства	50
3.3 Оценка качества изображения объектива по функции рассеяния линии	56
3.4 вероятностный характер распределения величины заднего фокального отрезка и фокусного расстояния	63
3.5 Статистические исследования погрешности визуального наведения с помощью микроскопа	65
ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ДЕЦЕНТРИРОВОК.....	72
4.1 Оценка децентрировок, возникающих при креплении линз завальцовкой	80
4.1.1 Децентрировка от торцевого биения	81
4.1.2 Децентрировка от разворота линз в поперечном зазоре между оправой и линзой	89
4.1.3 Децентрировка, возникающая при автоколлимационной центрировке	92
4.1.4 Децентрировка от радиального биения посадочного места под линзу в оправе	93
4.2 Оценка децентрировок, возникающих при креплении линз гайкой	94
4.2.1 Децентрировка от торцевого биения в оправе.....	95
4.2.2 Децентрировка линзы в зазоре от торцевого биения гайки	96
4.2.3 Децентрировка от эксцентриситета оси внутреннего опорного отверстия гайки относительно оси её резьбы	110
4.2.4 Децентрировка от эксцентриситета оси внутреннего опорного отверстия оправы относительно оси резьбы этой оправы	110
4.2.5 Определение погрешностей в гайке, наиболее сильно влияющих на величину децентрировки линзы	111
4.2.6 Децентрировка, возникающая при поперечном смещении оправы с линзой в радиальном зазоре	113
4.3 Расчёт децентрировок в двухлинзовом объективе	115
4.3.1 Пример 1	115
4.3.2 Пример 2	122

4.3.3 Пример 3	124
4.3.4 Пример 4	128
4.3.5 Пример 5	129
4.3.6 Пример 6	135
4.4 Расчёт децентрировок в трёхлинзовом объективе	138
4.4.1 Пример 1	138
4.4.2 Пример 2	143
4.5 Экспериментальные оценки статистической связи между поперечными зазорами и децентрировками	147
ГЛАВА 5. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАСЫПНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ	153
5.1 Анализ трудоёмкости изготовления объективов	153
5.2 Последовательность проектирования объективов	159
5.3 Компоновка объектива и базировка линз	161
5.4 Понятие технологичности объектива	162
5.5 Примеры решения схем базирования линз в объективах	163
5.5.1 Пример 1	163
5.5.2 Пример 2	173
5.5.3 Пример 3	180

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЮСТИРОВКА ОБЪЕКТИВОВ ПЕРЕМЕННОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

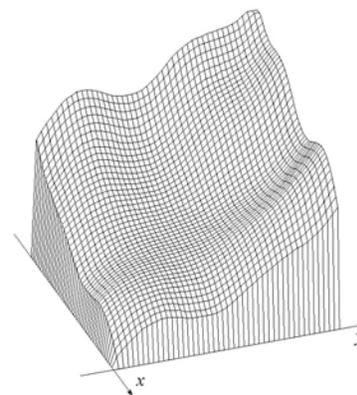
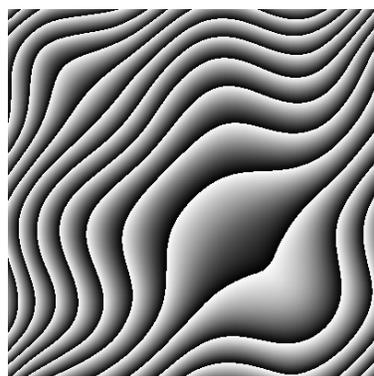
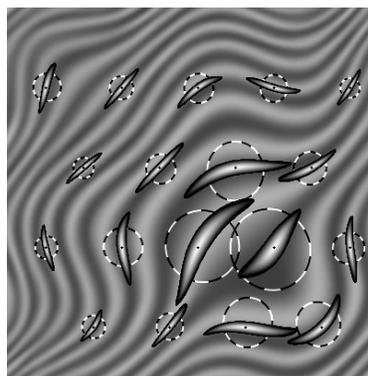
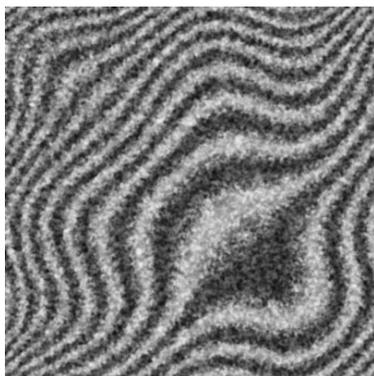
Введение	191
ГЛАВА 6. ОБЗОР И АНАЛИЗ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ ПЕРЕМЕННОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ.....	194
6.1 Принципы устройства	194
6.2 Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с механической компенсацией	196
6.2.1 Конструкции объективов с использованием цилиндрических кулачков	197
6.2.2 Конструкции объективов с использованием дисковых кулачков	201
6.2.3 Конструкции объективов с использованием рычажных механизмов.....	203
6.3 Обзор конструкций объективов переменного фокусного расстояния с оптической компенсацией	206

ГЛАВА 7. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ПЕРЕМЕННОГО ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ	212
7.1 Ознакомление с принципом построения и работы оптической схемы	212
7.2 Изучение научно-технической и патентной литературы.....	214
7.3 Методика компоновки и агрегатирования объективов	214
7.3.1 Трудоёмкость изготовления	214
7.3.2 Поузловая компоновка	217
7.4 Проектирование насадки	221
7.4.1 Основные задачи, решаемые при проектировании насадки	221
7.4.2 Проектирование подвижных элементов	221
7.4.3 Выбор механизмов для перемещения компонентов	222
7.4.4 Задачи, решаемые при проектировании механизма перемещения компонентов	223
7.4.5 Анализ конструкций направляющих для подвижных компонентов	224
7.4.6 Цилиндрический кулачок	241
7.4.7 Материалы	244
7.4.8 Конструкции первого компонента	245
7.4.9 Последовательность проектирования первого компонента.....	246
7.4.10 Конструкция четвертого компонента	255
ГЛАВА 8. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЮСТИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ КОМПОНЕНТОВ	256
8.1 Выбор последовательности юстировки подвижных компонентов	257
8.2 Способы установки винтов подвижных компонентов в контрольные точки пазов кулачка	263
8.3 Технологические погрешности, вызывающие сдвиг плоскости изображения	268
8.4 Расчёт коэффициентов влияния	270
8.5 Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения для объективов тип «Янтарь».....	271
8.6 Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения.....	277
8.7 Теоретические основы юстировки сдвига плоскости изображения в объективах типа «Гранит»	280
8.8 Влияние местных ошибок профиля пазов кулачка на сдвиг плоскости изображения.....	285
8.9 Особенности центрировки	286
Литература	290
Оглавление.....	293

М.В. Волков, Н.Б. Маргарянц

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И
КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС**

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2018**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

М.В. Волков, Н.Б. Маргарянц

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И
КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика" и 12.04.02 –
"Оптотехника" в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

Волков М.В., Маргарянц Н.Б. Методы обработки интерференционных сигналов и картин интерференционных полос: Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 107 с.

Рецензент: Коняхин Игорь Алексеевич, д.т.н., профессор, Университет ИТМО.

В данном учебном пособии рассмотрены особенности формирования интерференционных сигналов, представлены методы обработки интерференционных сигналов и картин интерференционных полос, методы восстановления и развертывания фазы двумерных интерференционных полос, рассмотрены особенности применения специализированного ПО для обработки интерференционных данных.

Пособие адресовано студентам, обучающимся по направлению подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика", по дисциплине "Компьютерная обработка экспериментальных данных", по направлению подготовки 12.04.02 – "Оптотехника", по дисциплине "Методы обработки интерферограмм", студентам при проведении НИР в рамках перечисленных направлений подготовки, а также аспирантам и специалистам, интересующимся проблематикой интерференционных измерений.



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

© Университет ИТМО, 2018

© Волков Михаил Владимирович, Маргарянц Никита Борисович, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1.	МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	8
1.1.	Обобщенное описание интерферометрических систем	8
1.2.	Классификация методов восстановления фазы по способу регистрации интерференционного сигнала	12
1.3.	Классификация методов обработки двумерных картин интерференционных полос	12
Глава 2.	ОБРАБОТКА ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	17
2.1.	Адаптивная фильтрация с определением локальной частоты сигнала	17
2.2.	Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала	23
2.3.	Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала при исключении фоновой составляющей	27
2.4.	Выравнивание фона и амплитуды сигнала	28
2.5.	Восстановление фазы сигнала	29
Глава 3.	ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	30
3.1.	Метод устранения помех и дефектов картин интерференционных полос	30
3.2.	Определение локального шага полос	31
3.3.	Определение локального направления полос	34
3.4.	Определение размеров областей фильтрации	36
3.5.	Формирование областей фильтрации и получение итерационных оценок сигнала полос	39
3.6.	Преобразование сигнала для сохранения его амплитуды при обработке картин интерференционных полос с сильно изменяющимися характеристиками или шумом, неравномерным по полю	42
3.7.	Применение нелинейного метода при подавлении помех интерференционных полос	45
3.8.	Реализация методов обработки зашумленных картин интерференционных полос	48

Глава 4.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ПО ЛИНИЯМ ЭКСТРЕМУМОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	53
4.1.	Восстановление линий интерференционных экстремумов	53
4.2.	Восстановление фазы по линиям экстремумов	57
5.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	63
5.1.	Восстановление фазы интерференционных полос	63
5.2.	Развертывание полной фазы полос с устранением локальных дефектов приведенной фазы	67
5.3.	Оценка погрешностей разработанных методов подавления помех и восстановления фазы интерференционных полос	69
5.4.	Восстановление рельефа кратеров лазерной абляции, наблюдаемых при воздействии на исследуемую поверхность фемтосекундных лазерных импульсов	70
Глава 6.	ПРОГРАММА FRINGE ANALISER, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ АДАПТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	81
6.1	Общие сведения о программе.	81
6.2	Интерфейс программы	82
6.3	Настройка параметров программы для анализа интерференционных полос и итерационного подавления помех	92
6.4	Обработки интерференционных картин большого размера	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103

ВВЕДЕНИЕ

Классические интерференционные методы позволяют сравнивать мало отличающиеся друг от друга волновые фронты – исследуемый и эталонный. В качестве эталонного фронта обычно используют плоскую или сферическую волну. Вследствие этого, в классической интерферометрии исследуются оптически совершенные объекты, такие как зеркала, пластины и линзы.

Использование лазерных источников излучения позволяет расширить возможности интерферометрии, в том числе на основе методов голографии [1-4]. Методы голографической интерферометрии [5-13] позволяют исследовать свойства разнообразных объектов.

Голографические методы позволяют сравнивать объекты с эталонными, определять смещения поверхности объектов, деформации, измерять амплитуды вибраций и др. Широкое распространение получили также методы муаровой интерферометрии [14-17] и спекл-интерферометрии [9-12].

Интерференционные методы позволили осуществить переход от измерения пространственно распределенных величин в дискретных точках к получению измерительной информации сразу по всему полю исследуемого объекта бесконтактным способом с высокими точностью и быстродействием. В перечисленных методах требуется анализировать картины интерференционных полос, представленных отсчетами интенсивности излучения.

При решении качественных (оценочных) задач характер картины полос позволяет делать выводы о состоянии объекта или изменении его параметров. Однако в большинстве практических задач нужна не только качественная картина, но и количественная информация об исследуемых объектах или процессах. Для этого требуются системы, представляющие собой измерительно-вычислительные комплексы, предназначенные для получения интерферометрической информации при преобразовании, обработке и расшифровке картин полос.

В настоящее время наиболее перспективной является разработка оптико-электронных систем [9, 13], в которых в качестве первичного преобразователя используется интерферометр, преобразующий значения измеряемых величин в поле яркости картины интерференционных полос, которое с помощью оптико-электронных устройств преобразуется в цифровую форму для последующей компьютерной обработки.

Во многих задачах неразрушающего контроля информация об исследуемом объекте содержится в фазе зарегистрированных картин полос, однако извлечение этой информации может быть осложнено влиянием помех и значительными изменениями локальных характеристик полос. Разработка методов восстановления фазы интерференционных

полос в условиях помех и при значительных изменениях характеристик полос является важной задачей, от эффективности которой зависит точность определения характеристик исследуемого объекта.

В данном учебном пособии рассмотрены особенности применения помехоустойчивого метода нелинейной локально-адаптивной фильтрации. При обработке картин интерференционных полос метод позволяет практически без снижения видности полос и без внесения существенных фазовых погрешностей эффективно подавлять помехи и локальные дефекты, в частности, устранять разрывы полос. Метод обеспечивает улучшение качества и анализ характеристик весьма сложных интерферограмм, обработка которых при традиционных подходах представляется весьма проблематичной.

Получение оценок локальных характеристик интерференционных полос при предварительном подавлении помех позволяет реализовать два различных подхода к задаче восстановления фазы. Первый подход заключается в построении линий интерференционных экстремумов и развертывании полной фазы по этим линиям. При этом полная фаза картины полос может быть восстановлена по линиям экстремумов интерференционных полос с помощью линейной интерполяции. Второй подход состоит в построении локально-достоверной модельной картины полос, получении приведенной фазы методом минимизации среднего квадратичного отклонения между модельной и реальной картинами полос, и развертывании полной фазы по значениям приведенной фазы.

Известные методы построения линий экстремумов на основе алгоритмов отслеживания полос часто неэффективны при наличии разрывов в картине полос. Разработанный метод восстановления линий экстремумов на основе анализа локальных характеристик полос позволяет получить корректную картину линий экстремумов при наличии разрывов в картине полос. Разработан метод нумерации линий интерференционных экстремумов, позволяющий развернуть полную фазу полос, в том числе при наличии разрывов в картине линий экстремумов.

В данном учебном пособии представлен новый метод восстановления полной фазы, характеризующийся значительно более высокой точностью. Оценки локального шага и локального направления полос, полученные в процессе предварительного подавления помех, позволяют получить значения фона и огибающей сигнала полос, и в окрестности каждой точки картины полос построить локально-достоверное модельное поле разности фаз. Значение фазы в рассматриваемой точке может быть восстановлено с заданной точностью по критерию минимума среднего квадратичного отклонения между реальной и модельной картинами полос в пределах выбранной окрестности. Разработаны методы последующего развертывания полной фазы полос, позволяющие определить области с дефектами фазы, развернуть фазу вне этих областей,

и доопределить полную фазу внутри рассмотренных областей методом экстраполяции.

Применение адаптивных методов анализа, обработки и восстановления фазы двумерных картин интерференционных полос, зарегистрированных оптико-электронными интерферометрическими приборами на основе методов голографической, муаровой и спекл-интерферометрии при решении задач неразрушающего контроля объектов является важной частью учебного процесса и подготовки студентов по ряду дисциплин. В учебном пособии рассмотрены следующие методы.

1. Методы получения оценок параметров, подавления помех и восстановления фазы одномерных интерферометрических сигналов, анализа параметров и адаптивного нелинейного подавления влияния помех в двумерных картинах интерференционных полос.

2. Методики определения локального шага полос, направления полос и формирования импульсного отклика пространственно-неинвариантного фильтра по значениям шага полос и локального направления полос.

3. Метод восстановления полной фазы полос на основе выделения линий интерференционных экстремумов с корректным восстановлением фазы при наличии повреждений в картине полос.

4. Метод восстановления фазы полос на основе минимизации среднего квадратичного отклонения локальной модельной картины полос, синтезированной по вычисленным значениям шага и локального направления полос, и обрабатываемой картины полос, и развертывания полной фазы полос по значениям приведенной фазы, содержащей локальные дефекты.

Рассмотренные в данном учебном пособии методы анализа параметров картин интерференционных полос, подавления помех и восстановления фазы полос основаны на положениях теории когерентности и формирования интерференционных полос, теории оптико-электронных приборов и систем, теоретических положениях интерферометрии, теории обработки сигналов.

Изложенные в данном пособии теоретические и практические материалы могут быть использованы в процессе обучения студентов по направлениям подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика" и 12.04.02 – "Оптотехника".

Глава 1. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

1.1. Обобщенное описание интерферометрических систем

Интерферометрическая система [18] содержит источник излучения, расположенный со стороны входного зрачка, приёмник излучения, расположенный у выходного люка в поле интерференции, и ветви интерферометра, имеющие общий входной зрачок и общее поле. Следовательно, интерферометрическую систему можно представить [19] в виде структурной схемы, содержащей источник с комплексной амплитудой электрического поля E , два или несколько трактов w_1, w_2, \dots, w_n , распространения когерентных световых волн с результирующей комплексной амплитудой E_Σ (см. рис. 1.1). Передаточная функция тракта w_i , $i = 1, 2, \dots, n$, является комплексной величиной $w = |w| \exp(j2\pi \arg w)$. Характеристики исследуемого объекта определяются значениями оптических длин трактов, т.е. значениями $\Delta \arg w = \varphi / 2\pi$, где φ – разность фаз интерферирующих волн.

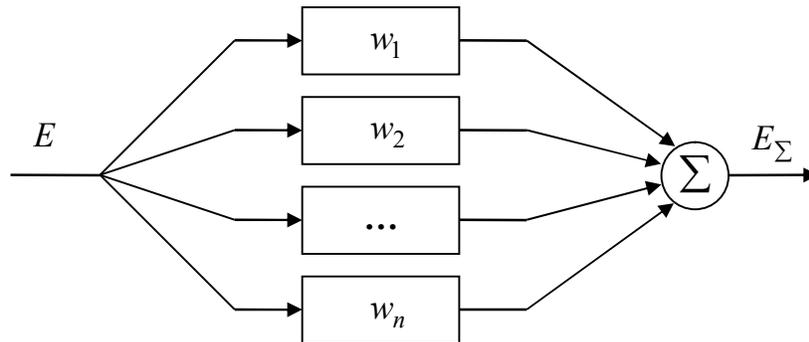


Рис. 1.1. Структурная схема интерферометрической системы

Структурную схему, приведенную на рис. 1.1, можно представить в обобщенном виде (см. рис. 1.2).

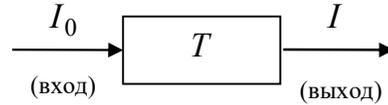


Рис. 1.2. Обобщенная схема интерферометрической системы

В схеме рис. 1.2 исходное излучение I_0 преобразуется в выходное излучение I . Преобразование оптической информации определяется оператором T интерферометрической системы, представляющим собой аппаратную функцию интерферометра.

Наибольшее распространение получили двухлучевые интерферометрические системы, в которых используется два тракта распространения оптических волн w_1 и w_2 (см. рис. 1.1).

Интерференция когерентных монохроматических плоских световых волн с комплексными амплитудами $E_1 = A_1 \exp(j\varphi_1)$, $E_2 = A_2 \exp(j\varphi_2)$, как известно, наблюдается при квадратичном детектировании суммарного колебания $E = E_1 + E_2$, а именно,

$$I = |E|^2 = EE^* = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi, \quad (1.1)$$

где $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\Delta/\lambda$ – разность фаз, Δ – оптическая разность хода, λ – длина волны.

Обозначим $A_1^2 + A_2^2 = I_0$, $2A_1A_2/(A_1^2 + A_2^2) = V$, тогда в соответствии с рис. 1.2, выражение (1.1) можно записать в форме

$$I = T(\varphi)I_0, \quad (1.2)$$

где аппаратная функция интерферометра

$$T(\varphi) = 1 + V \cos \varphi. \quad (1.3)$$

Разность фаз φ определяется свойствами исследуемого объекта или процесса и одновременно является аргументом аппаратной функции (1.3). Следовательно, в математической формулировке обработки информации в интерферометрической системе в общем случае следует рассматривать как решение обратной задачи идентификации аппаратной функции в (1.2) [20]. Можно попытаться получить искомую оценку этой функции методом прямого обращения

$$\hat{T}(\varphi) = I/I_0, \quad (1.4)$$

после чего из (1.3) определить разность фаз как

$$\hat{\varphi} = \arccos\{[\hat{T}(\varphi) - 1]/V\}. \quad (1.5)$$

Проблема заключается в том, что значения I_0 , V в (1.4), (1.5) априори известны со значительными погрешностями. Кроме этого, формирование интерферометрических данных в (1.1) на практике

сопровождается воздействием комплекса шумов и помех. В результате при вычислениях согласно формуле (1.5) решение не удовлетворяет условиям единственности и устойчивости.

Преодолеть указанные трудности можно при помощи методов регуляризации решения обратной задачи [21], которые основываются на использовании априорной информации об исследуемом процессе. Практически при получении соотношений вида (1.1) нужно учитывать [22]:

- спектральные (временные и пространственные) характеристики источника излучения и связанные с ним параметры когерентности;
- отклонения формы волнового фронта, направления векторов поляризации, волновых векторов и значения показателей преломления среды в рабочей зоне интерферометра;
- геометрические размеры в сечении световых пучков и чувствительной площадки фотодетектора.

Важное значение имеют также такие параметры, как коэффициенты отражения отдельных рабочих поверхностей и параметры шумов источника излучения, пространственных шумов, вызванных остаточной шероховатостью поверхностей оптических элементов, шумов приемника излучения.

Интенсивность света (1.1) в целях последующей обработки данных подвергается дискретизации по одной или двум независимым переменным, фотоэлектрическому преобразованию и квантованию по уровню. В реальных условиях данные искажаются воздействием помех, которое характеризуется оператором D , при этом выходная последовательность для одномерного случая имеет вид:

$$s_e(k, \theta) = D(\mu\{I(k), \Delta s_q\}) \quad , \quad (1.6)$$

где $k = 1, \dots, L$, L – объем выборки, $\theta = (\varphi, I_0, V)^T$ – вектор параметров модели, $I(k)$ – значения интенсивности, полученные в результате дискретизации на k -м шаге, μ – постоянный коэффициент фотоэлектрического преобразования, Δs_q – вектор, компонентами которого являются элементарные (кодовые) квантованные сигналы. Процесс формирования интерферометрических данных иллюстрируется схемой рис. 1.3.

Учитывая воздействие влияющих факторов, можно выделить три основные вида модели (1.6), а именно:

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta) + N_1(k); \quad (1.7)$$

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta)\{1 + N_2(k)\}; \quad (1.8)$$

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta + \delta\theta_k), \delta\theta_k = \mathbf{N}(k), \quad (1.9)$$

где $s(k, \theta)$ – идеализированная модель данных; N_1, N_2 – случайные шумовые последовательности; $\mathbf{N}(k)$ – вектор, компонентами которого являются шумовые последовательности, соответствующие компонентам вектора θ .

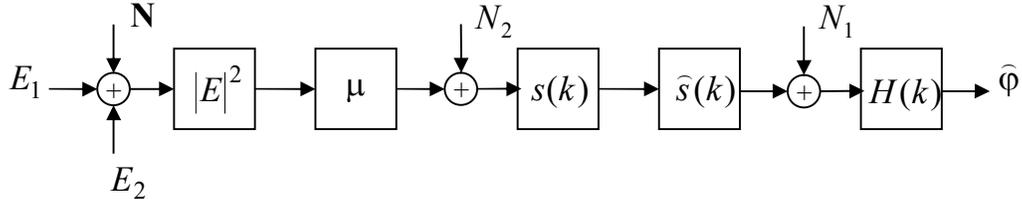


Рис. 1.3. Обобщенная схема реальной двухлучевой интерферометрической системы: $s(k)$ – последовательность данных при дискретизации по независимой переменной; $\hat{s}(k)$ – квантованные по уровню данные; $H(k)$ – обобщенный оператор обработки; N_1, N_2, \mathbf{N} – составляющие помех.

Оператор D в (1.6) характеризует в соответствии с (1.7)–(1.9) воздействие аддитивного шума N_1 , не зависящего от полезных данных $s(k, \theta)$, шума N_2 , коррелированного с этими данными, параметрического шума \mathbf{N} , в частности, в виде флуктуаций фазы (рис. 1.3).

Интерферометрические данные с шумами вида (1.7) в основном относятся к случаю влияния шума квантования при аналого-цифровом преобразовании данных.

Из (1.1) – (1.3) следует, что дробовой шум источника и приемника излучения, флуктуации направления векторов поляризации, изменения коэффициентов отражения рабочих поверхностей порождают модель вида (1.8). Модель (1.9) в общем случае учитывает влияние неравномерности яркости источника, параметров когерентности, остаточной шероховатости, флуктуаций показателя преломления и ряда других факторов.

Следует отметить, что в (1.7) – (1.9) параметры идеализированной модели интерферометрических данных $s(k, \theta)$, как правило, априори неизвестны с требуемой точностью. Известен лишь вид модели двухлучевого интерференционного одномерного сигнала:

$$s(k, \theta) = s_0(k) + s_m(k) \cos \varphi(k). \quad (1.10)$$

Следовательно, необходимо дополнительно оценивать или исключать влияние сопутствующих параметров $s_0(k)$ и $s_m(k)$ в выражении (1.10).

Важно отметить, что отдельные варианты модели (1.6), такие как композиции моделей (1.7) – (1.9), изучены еще недостаточно полно. Известны общие принципы обработки исходных данных в оптико-электронных системах, повышающие помехозащищенность и, следовательно, точность искомых оценок: метод модуляции, методы

спектральной обработки, метод управляемого фазового сдвига и ряд других методов, которые рассмотрены в следующем разделе.

Для описания двумерных картин интерференционных полос вида

$$s(i, j, \theta) = s_0(i, j) + s_m(i, j) \cos \varphi(i, j), \quad (1.11)$$

рассматриваются двумерные модели (1.7-1.9),

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta) + N_1(i, j); \quad (1.12)$$

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta) \{1 + N_2(i, j)\}; \quad (1.13)$$

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta + \delta\theta_{i,j}), \delta\theta_{i,j} = N(i, j). \quad (1.14)$$

1.2. Классификация методов восстановления фазы по способу регистрации интерференционного сигнала

Можно выделить две группы интерференционных методов, принципиально отличающихся по способу восстановления фазы.

К первой группе относятся методы, в которых восстановление фазы производится по значениям сигнала или по серии интерферограмм, полученных при известном изменении параметров интерферометра. При этом основным изменяющимся параметром является фазовый сдвиг между интерферирующими пучками. По способу внесения фазового сдвига различаются модуляционная интерферометрия, гетеродинная интерферометрия и интерферометрия дискретного фазового сдвига.

Модуляционные и гетеродинные интерферометрические системы исследовались в течение длительного времени, начиная с работ [23-26], результаты исследований представлены в многочисленных научных статьях (см., например, [26, 27]), обзорах [23, 28] и в ряде монографий (см., например, [29-31]). Основным преимуществом интерферометрических систем этой группы является перенос спектра интерферометрического сигнала в область высоких временных частот при последующей обработке сигналов на переменном токе, что обеспечивает повышение чувствительности и помехоустойчивости интерферометрических систем. Во многих случаях в силу принципиальных физических ограничений, вносимых особенностями интерферометрического процесса, использование модуляционных и гетеродинных интерферометрических систем оказывается невозможным.

Методы дискретного фазового сдвига [9, 10, 32, 33], основаны на регистрации нескольких картин полос с известными фазовыми сдвигами отсчетов интерференционного сигнала, по которым фазу можно восстановить с помощью простых тригонометрических преобразований.

Ко второй группе относятся методы, в которых восстановление фазы производится по сигналу или интерферограмме, полученной при фиксированных параметрах интерферометра.

Согласно (1.11), интерферометрический сигнал, представляющий неподвижную интерференционную картину, содержит фоновую составляющую $s_0(i, j)$ и, в общем случае, неизвестную локальную амплитуду $s_m(i, j)$. Для исключения фоновой составляющей интерференционного сигнала первоначально использовали следующие основные методы [23]:

метод дифференциальных фотоэлектрических сигналов, основанный на вычитании сигналов приемников излучения со смещенными полями зрения;

метод сканирования неподвижной интерференционной картины, заключающийся в том, что с помощью сканирующего устройства, например, в виде качающегося зеркала, сканируют поле интерференции и таким образом осуществляют модуляцию фототока, гармонический анализ которого позволяет выделить информативные составляющие интерферометрического сигнала.

Перечисленные методы и соответствующие устройства можно отнести к классу интерферометрических систем первого поколения, которые основывались на использовании блоков оптико-механического сканирования, поскольку такие системы разрабатывались до создания многоэлементных приемников оптического излучения.

В связи с активным развитием технологии многоэлементных приёмников оптического излучения с повышенным разрешением и современных компьютерных технологий в настоящее время получил наибольшее распространение метод дискретизации распределения интенсивности в интерференционной картине. Метод дискретизации имеет повышенную помехозащищенность, так как дает возможность оценивать параметры и осуществлять фильтрацию двумерного распределения интенсивности в картине полос. С помощью данного метода возможны исследования динамических процессов, и его применение не требует дополнительных принципиальных модификаций известных интерферометров.

1.3. Классификация методов обработки двумерных картин интерференционных полос

Методы и алгоритмы обработки интерферометрической информации в двумерных картинах интерференционных полос основываются на нескольких подходах, которые можно подразделить на следующие основные группы: методы обработки в двумерной области пространственных частот; методы аппроксимации двумерного распределения интенсивности в области независимых переменных; методы двумерной фильтрации в области независимых переменных; методы отслеживания линий экстремумов интерференционных полос.

Наибольшее распространение получили методы восстановления фазы на основе выделения координат полос [10, 34-37], преобразования Фурье-Гильберта [38-40], аппроксимации интерференционных полос нелинейными полиномами [41, 42]. В последнее время получены результаты восстановления фазы на основе нелинейной фильтрации Калмана [43-45]. Все перечисленные методы имеют различные недостатки.

Методы на основе выделения координат полос характеризуются относительно низкой точностью восстановления фазы и требуют предварительного подавления помех. Методы на основе преобразования Фурье-Гильберта неэффективны при обработке картин полос с помехами, близкими по частоте с сигналом полос. Кроме того, в случаях малого числа полос в поле интерферограммы при применении таких методов возникают проблемы с краевыми эффектами. Методы на основе аппроксимации полос полиномами сложны в настройке, недостаточно помехоустойчивы и требуют значительных вычислительных ресурсов. Методы на основе нелинейной фильтрации Калмана требуют значительного объема априорной информации и характеризуются недостаточной помехоустойчивостью при обработке сильно зашумленных картин интерференционных полос в случае использования упрощенных моделей эволюции параметров сигнала и помех.

Перечисленные методы восстановления фазы эффективны при обработке картин полос, полученных методами классической интерферометрии, которые характеризуются относительно низким уровнем помех. При обработке картин полос, искаженных значительными помехами, в голографической, муаровой или спекл-интерферометрии, перечисленные методы восстановления фазы сложны в настройке и часто оказываются совершенно неэффективными из-за невозможности разделения сигнала и помех.

Проблему обработки сильно зашумленных картин полос позволяет разрешить разработанный метод нелинейной локально-адаптивной фильтрации. Метод основан на итерационном оценивании параметров картин полос, синтезировании адаптивной импульсной реакции фильтра на основе этих параметров и подавлении помех на каждом шаге итерационной обработки. После подавления помех и получения оценок параметров сигнала полос, значения полной фазы полос могут быть получены либо на основе выделения линий интерференционных экстремумов, либо на основе минимизации среднего квадратичного отклонения локальной модельной картины полос, синтезированной по вычисленным параметрам, и обрабатываемой картины полос.

В отличие от методов подавления помех и восстановления фазы на основе преобразования Фурье-Гильберта, рассмотренный метод позволяет подавлять помехи, близкие по частоте с сигналом полос. В отличие от метода нелинейной фильтрации Калмана, разработанный метод не требует

значительной априорной информации, так как основан на итерационном адаптивном оценивании параметров сигнала полос. По сравнению с методами на основе аппроксимации полос полиномами, разработанный метод фильтрации характеризуется более высокими быстродействием и помехоустойчивостью. Проведенные исследования показали высокую эффективность разработанных методов подавления помех и восстановления фазы сильно зашумленных картин полос, полученных методами голографической, муаровой и спекл-интерферометрии.

Контрольные вопросы по введению и главе1:

1. Какие ограничения по области применения характерны для методов классической интерферометрии?
2. В чем состоит основное предназначение интерферометров, что является целью измерения, что является результатом измерения и как обеспечивается разрешение противоречия?
3. Перечислите отличия в методах классической, голографической, муаровой и спекл-интерферометрии.
4. Какие преимущества при интерферометрических измерениях дает использование лазерного источника?
5. Почему в ряде интерференционных измерений используются малокогерентные источники вместо лазеров?
6. Перечислите области применения спекл-интерферометрии.
7. Перечислите основные источники помех при интерференционных измерениях.
8. Почему наиболее распространены системы с двухлучевой интерференцией?
9. Какие преимущества дает применение методов многоволновой интерферометрии? В чем недостатки таких систем?
10. Перечислите основные методы обработки интерферометрической информации в виде двумерных картин интерференционных полос.
11. Почему значительное распространение получили интерференционные системы на основе внесения управляемого фазового сдвига?
12. Перечислите основные методы расшифровки фазы при использовании интерференционных систем с управляемым фазовым сдвигом.
13. В каких случаях применение систем на основе управляемого фазового сдвига невозможно, и фазу приходится восстанавливать по единственной картине интерференционных полос?
14. В чем состоят недостатки методов обработки интерференционных полос на основе выделения координат полос?

15. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе преобразования Фурье-Гильберта?
16. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе аппроксимации интерференционных полос нелинейными полиномами?
17. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе двумерной фильтрации Калмана?

Глава 2. ОБРАБОТКА ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

2.1. Адаптивная фильтрация с определением локальной частоты сигнала

Пусть одномерный интерферометрический сигнал $\xi(x_k)$ определяется моделью:

$$\xi(x_k) = s(x_k) + n(x_k) = B(x_k) + A(x_k) \cos \varphi(x_k) + n(x_k), \quad (2.1)$$

где $s(x_k)$ – идеальный сигнал, $B(x_k)$, $A(x_k)$ соответственно фон и амплитуда сигнала, $\varphi(x_k) = \varphi(x_{k-1}) + 2\pi\Delta x[(f(x_k) + f(x_{k-1}))/2]$ – полная фаза сигнала, при этом известно $\varphi(x_0)$, $f(x_k)$ – локальная пространственная частота сигнала, $n(x_k)$ – аддитивный шум с нулевым средним, $\langle n(x_k) \rangle = 0$, $x_k = k\Delta x$ – точки дискретизации сигнала, Δx – шаг дискретизации.

Задачи определения частоты подобных квазигармонических сигналов решаются, в частности, Доплеровской оптической когерентной томографией [46-48]. В этом случае частота сигнала содержит информацию о скорости движения рассеивающей среды, и если скорость различна в различных точках, что характерно для многих сред, то частота сигнала является случайно изменяющейся и характеризует динамические свойства среды. При обработке интерферометрических сигналов значения локальной частоты используются в задачах подавления помех и восстановлении фазы.

В настоящей работе предложен метод итерационного определения оценки $T^q(x_c)$ локального периода $T(x_c)$ идеального сигнала в точке x_c по зашумленному сигналу $\xi(x_k)$, где q – номер шага итерационной обработки. Под термином “локальный период сигнала” будем понимать величину $T(x_k) = 1/|f(x_k)\Delta x|$, обратную модулю локальной частоты сигнала. При постоянной частоте сигнала локальный период сигнала эквивалентен количеству шагов дискретизации между точками сигнала с разностью фаз $|\Delta\varphi(x_i, x_j)| = |\varphi(x_j) - \varphi(x_i)| = 2\pi$. Оценки $T^q(x_k)$ могут быть корректно определены только на отрезках сигнала с постоянным знаком частоты, и все рассмотренные ниже методы обработки одномерных сигналов справедливы только для таких сигналов.

Предлагается следующий способ вычисления локального периода одномерного сигнала. На нулевом шаге обработки задается начальное приближение локального периода $T^0(x_c) = T_{\min}$, соответствующее максимальной локальной частоте сигнала. На каждом последующем q -ом шаге итерационной обработки производится вычисление оценок $T^q(x_c)$

локального периода по значениям сигнала и значениям оценки локального периода $T^{q-1}(x_k)$ на предыдущем шаге обработки. Сходимость оценки $T^q(x_c)$ к реальному значению $T(x_c)$ локального периода обеспечивается локальной периодичностью сигнала, то есть малой разностью значений сигнала для точек с разностью фаз $\Delta\varphi(x_i, x_j) = 2\pi$.

Для каждой точки сигнала x_c определяется $M \geq 11$ точек с координатами $x(m)$, соответствующими различным предполагаемым фазовым отклонениям от $\varphi(x_c)$,

$$x(m) : \Delta\varphi(x_c, \mu, m) = \varphi(x(m)) - \varphi(x_c) = \text{signf } \mu[-\pi + 2\pi(m-1)/(M-1)], \quad (2.2)$$

$m = 1, \dots, M$, $x([M/2] + 1) = x_c$, $\mu > 1$ – коэффициент итерационной устойчивости. Предполагаемая максимальная разность фаз для построенного набора точек составляет $|\Delta\varphi(x(1), x(M))| = 2\pi\mu$, но достигается лишь при получении корректной оценки локального периода $T^{q-1}(x_k) \approx T(x_k)$. Координаты точек с предполагаемыми фазовыми отклонениями вычисляются по известным значениям локального периода $T^{q-1}(x_k)$ на предыдущем шаге итерационной обработки,

$$x(m) = x(m, \mu) = x_c + r(n(m), m, \mu), \quad (2.3)$$

$$r(n1, m, \mu) = \text{sign}(m - (M + 1)/2) \sum_{i=0}^{n1-1} \frac{\mu \Delta x T^{q-1}(x_c + r(i, m, \mu))}{M - 1}, \quad (2.4)$$

где $r1(0, m, \mu) = 0$, $n(m) = |m - (M + 1)/2|$ – формула пересчета номеров точек для рекурсивного вычисления смещения координат, $\text{sign}(\cdot)$ – функция, возвращающая знак выражения (-1 или 1).

При этом для определения значений локального шага полос в точках с произвольными координатами следует воспользоваться формулой, позволяющей определить значение любой медленно изменяющейся дискретизированной функции $I(x_k)$ с шагом дискретизации Δx в точке с произвольной координатой y ,

$$I(y) = [I(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x)(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x + \Delta x - y) + I(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x + \Delta x)(y - \text{int}[y/\Delta x]\Delta x)]/\Delta x, \quad (2.5)$$

где $\text{int}[\cdot]$ – функция, возвращающая целую часть числа. До вычисления значений $T^{q-1}(x_k) \approx T(x_k)$, координаты точек $x(m)$ не соответствуют координатам точек с заданными фазовыми отклонениями.

По полученному набору точек вычисляются оценки амплитуды сигнала

$$A^q(x_c) = 0.5[\max_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)))], \quad (2.6)$$

и модулей приращений сигнала,

$$D^q(x_c) = \sum_{m=2}^M |\xi(x(m)) - \xi(x(m-1))|, \quad (2.7)$$

при вычислении значений сигнала для произвольных координат, используется формула (2.5). Значения локального периода $T^q(x_c)$ в точке x_c на q -ом шаге обработки определяются по следующей формуле:

$$T^q(x_c) = (1 - \mu_1)T^{q-1}(x_c) + \mu_1 \max(T_{\min}; \mu T^{q-1}(x_c) 4A^q(x_c)/D^q(x_c)), \quad (2.8)$$

где коэффициент $\mu_1 \in [0, 1]$ определяет скорость возрастания оценки локального периода и характер сходимости при значениях, близких к $T(x_c)$. Так как значения производных сигнала зависят от фазы, точное значение локального периода $T(x_c)$ для всех точек x_c сигнала устанавливается лишь при значениях коэффициента μ кратных 0.5. Полученное отношение $4A^q(x_c)/D^q(x_c)$ принимает значение, примерно равное единице, если $\mu T^{q-1}(x_c) \approx T(x_c)$, значение меньше единицы, если $\mu T^{q-1}(x_c) > T(x_c)$ и значение в диапазоне $[1, 2]$, если $\mu T^{q-1}(x_c) < T(x_c)$. В любом случае формула (2.8) при значениях коэффициента $\mu \in (1, +\infty)$ обеспечивает сходимость оценки $T^q(x_c)$ от T_{\min} к истинному значению локального периода $T(x_c)$.

Точность определения оценки локального периода $T(x_c)$ в каждой точке x_c сигнала зависит от изменений фона и амплитуды сигнала на отрезке (y_1, y_2) , границы которого определяются максимальными разностями фаз $|\Delta\varphi(y_1, x_c)| = |\varphi(x_c) - \varphi(y_1)| = \pi\mu$ и $|\Delta\varphi(x_c, y_2)| = |\varphi(y_2) - \varphi(x_c)| = \pi\mu$. Коэффициент μ определяет размер области вычисления локального периода и обычно выбирается в пределах $\mu \in (1, 3]$.

При $\mu T^{q-1}(x_c) \leq 0.5T(x_c)$ значение $T^q(x_c)$ зависит от производной идеального сигнала в окрестности точки x_c . В экстремумах сигнала, где производная близка к нулю, $4A^q(x_c)/D^q(x_c) \approx 1$, в максимумах функции модуля производной сигнала оценка периода возрастает в два раза быстрее, $4A^q(x_c)/D^q(x_c) \approx 2$. Таким образом, сходимость $T^q(x_c)$ к $T(x_c)$ можно ускорить и без увеличения коэффициента μ , влияющего на точность.

Пусть для всех точек сигнала x_i по формуле (2.8) вычислены значения $T^q(x_i)$. Для того, чтобы увеличить значения $T^q(x_i)$ в окрестностях экстремумов сигнала, нужно для всех точек сигнала x_k и для

всех $x_i \in [x_k - \Delta x T^q(x_k)/\chi, x_k + \Delta x T^q(x_k)/\chi]$ переопределить значения $T^q(x_i)$, а именно,

$$T^q(x_i) = \max[T^q(x_i), T^q(x_k) - \chi|i - k|], \quad (2.9)$$

где $\chi \geq \max_{x_k} |T(x_k) - T(x_{k+1})|$ – коэффициент, определяющий максимально допустимое изменение локального периода сигнала в соседних точках. Увеличение оценок $T^q(x_i)$ за счет ограничения изменения функции локального периода позволяет значительно повысить эффективность обработки зашумленных сигналов.

Другим решением проблемы зависимости оценки периода сигнала от фазы является вычисление усредненных значений периода $\hat{T}^q(x_i, \hat{T}^q(x_k))$, как это реализовано при усреднении значений сигнала в (2.11). Подобное усреднение не приводит к искажению оценки локального периода даже для сигналов с быстро изменяющейся частотой.

При обработке сигналов с близкой к нулю частотой, для получения оценок локального периода, в (2.11) следует усреднять значения локальной частоты, а значения локального периода определять по следующей формуле:

$$\hat{T}^q(x_i) = 1 / [\Delta x |\hat{f}(x_i, T^q(x_k))|]. \quad (2.10)$$

Если в исходном сигнале содержатся высокочастотные аддитивные помехи, то точное определение периода возможно только после полного подавления помех. Влияние высокочастотных помех при обработке зашумленных сигналов приводит к значительному возрастанию суммы модулей приращений сигнала $D^q(x_c)$ и незначительному увеличению оценки амплитуды $A^q(x_c)$. Следовательно, оценка $T^q(x_c)$ становится значительно меньше $T(x_c)$. Условием увеличения $T^q(x_c)$ является хотя бы частичное подавление высокочастотных помех на каждом шаге итерационной обработки.

Предлагается на каждом шаге итерационной обработки подавлять высокочастотные помехи усреднением значений сигнала $\xi^{q-1}(x_k)$, $\xi^0(x_k) = \xi(x_k)$, по набору точек (2.2) с предполагаемыми максимальными фазовыми отклонениями $\Delta\varphi(x_c, \delta, m)$,

$$\xi^q(x_c) = \sum_{i=1}^M \xi^{q-1}(x(m, \delta)) g(m) / \sum_{i=1}^M g(m), \quad (2.11)$$

где $g(m) = (M + 1) / 2 - |m - (M + 1) / 2|$ является весовой функцией, а в формулы (2.6), (2.7) подставлять значения $\xi^{q-1}(x(m))$. Коэффициент

$\delta \in (0, 0.5]$ задает степень подавления высокочастотных помех и влияет на уменьшение амплитуды выходного сигнала.

По мере подавления высокочастотных помех оценка периода $T^q(x_c)$ увеличивается от T_{\min} до $T(x_c)$. Соответственно, приблизительный размер области фильтрации изменяется от δT_{\min} до $\delta T(x_c)$. Так как для построенного набора точек $\sum_{i=1}^M \Delta\phi(x_c, x(m, \delta))g(m) \approx 0$, то взвешенное усреднение (2.11) сигнала (2.1) не приводит к значительному смещению значений фазы. Изменяется только амплитуда сигнала.

На рис. 2.1-2.4 показаны результаты компьютерного моделирования рассмотренного метода подавления помех, основанного на определении локального периода сигнала.

На рис. 2.1 приведены идеальный сигнал с изменяющимися частотой и фоном, сигнал с равномерным шумом и сигнал с импульсными помехами (импульсные помехи в интерференционных сигналах обычно связаны с повреждениями поверхности исследуемого объекта или дефектами оптической системы). Приведены также результаты оценивания локального шага полос для каждой точки сигнала, при этом графики модельного сигнала и результата оценивания шага полос совмещены, а нулевое значение (положение оси) задано только для значений шага полос.

Оценка локального периода идеального сигнала рис. 2.1, *a* построена при $\mu = 1$ и $\chi = 0.25$.

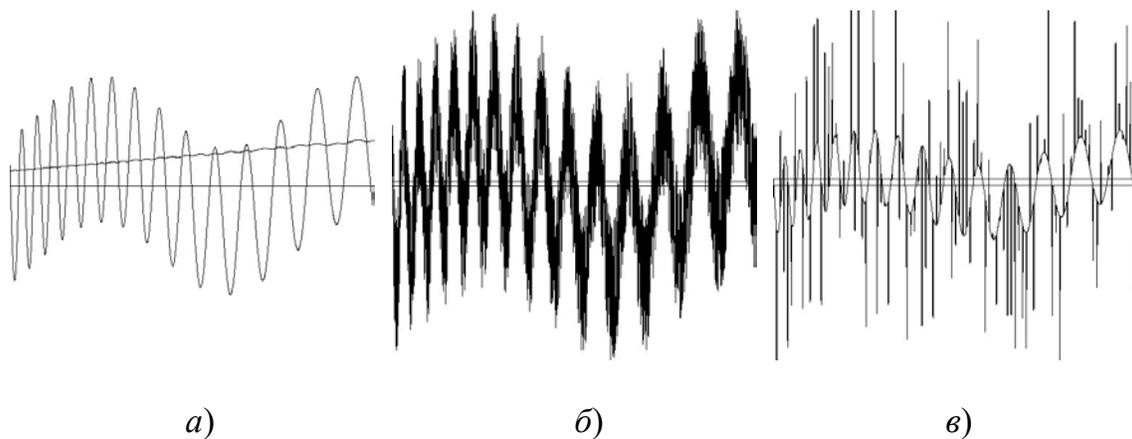


Рис. 2.1. Идеальный сигнал (*a*), сигнал с аддитивным шумом (*б*), сигнал с импульсными помехами (*в*)

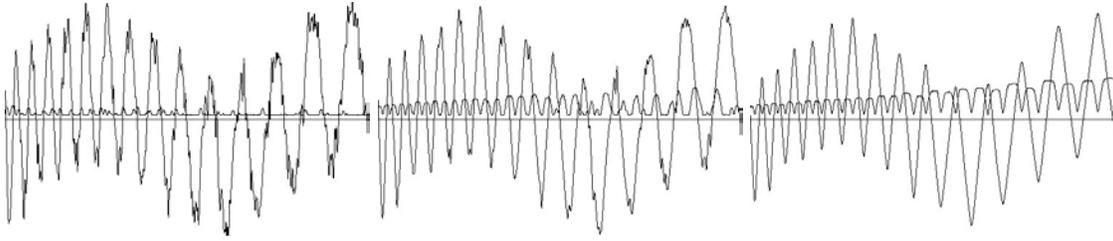


Рис. 2.2. Оценки сигнала и его локального периода после 5, 10 и 25 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 8$, $\delta = 0.25$

На рис. 2.2 иллюстрируются результаты обработки зашумленного сигнала, рис. 2.1, б, с параметрами, при которых оценка периода $T^q(x_c)$ в окрестностях экстремумов сигнала равна начальному приближению периода T_{\min} , и не зависит от q . При таких параметрах количество шагов итерационной обработки, гарантирующее подавление помех, определяется начальным приближением периода T_{\min} . Снижение амплитуды сигнала на одном шаге обработки определяется отношением $T_{\min} / T(x_c)$. Недостатками подобного подхода являются большое число шагов обработки и фазовые искажения выходного сигнала.

На рис. 2.3 приведены результаты обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) с параметрами, позволяющими получить достаточно точную оценку локального периода за 9 шагов обработки. Из рисунка видно, что дальнейшая обработка приводит к одинаковому снижению амплитуды для всех точек сигнала, независимо от локальной частоты. Но снижение амплитуды при наличии фоновой составляющей влечет завышение оценки локального периода, и дальнейшая обработка приведет к полному подавлению сигнала и потере информации о фазе. Усредненная погрешность вычисления оценки локального периода приведенного на рисунке сигнала для 9-го шага обработки составила 2%, а для 20-го шага обработки – 6%. Увеличение погрешности связано со снижением амплитуды сигнала при наличии значительной фоновой составляющей.

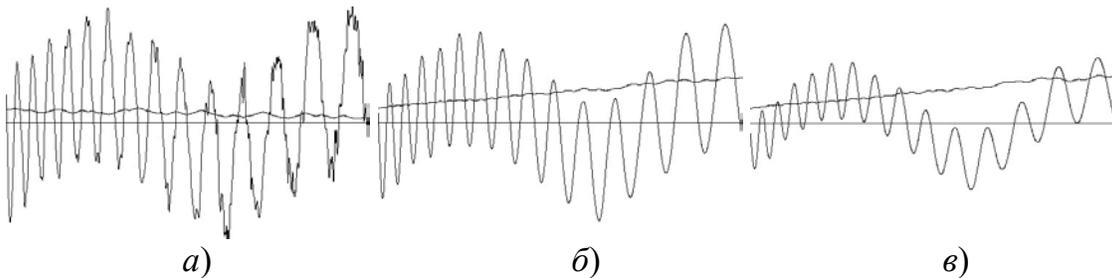


Рис. 2.3. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 0.3$, $\delta = 0.25$

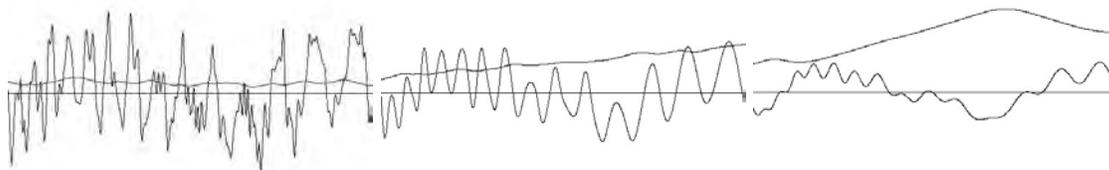


Рис. 2.4. Оценки сигнала и его локального периода после 3, 7 и 15 шагов итерационной обработки сигнала с импульсными помехами (рис. 2.1, в) при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 0.3$, $\delta = 0.35$

Основным недостатком рассмотренного метода подавления помех является снижение амплитуды сигнала на каждом шаге обработки. Метод характеризуется недостаточной помехоустойчивостью при подавлении импульсных помех (рис. 2.1, в) как это видно из рис. 2.4. Рассмотренный в последующем разделе метод нелинейной фильтрации позволяет преодолеть указанные недостатки.

2.2. Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала

Недостатком рассмотренного выше метода подавления помех является снижение амплитуды сигнала на каждом шаге обработки. При большом количестве шагов обработки амплитуда сигнала уменьшается значительно (рис. 1.4), и влияние изменяющегося фона сигнала может привести к завышению оценки локального периода сигнала, что влечет еще большее снижение амплитуды сигнала.

Для сохранения амплитуды сигнала при подавлении полос можно воспользоваться тем свойством, что сигнал (2.1) является локально-выпуклой функцией на отрезках с разностями фаз $|\Delta\varphi(y_1, y_2)| < 2\pi\delta$, $\delta \in (0, 0.25]$. Повысить эффективность подавления помех и обеспечить сохранение амплитуды сигнала можно за счет уменьшения относительного веса части минимальных и максимальных значений сигнала. Уменьшение относительного веса более отдаленных от среднего значений сигнала позволяет увеличить амплитуду выходного сигнала.

Пусть в процессе обработки сигнала для некоторой точки x_c получен набор точек (2.2) с предполагаемыми максимальными отклонениями фазы $\Delta\varphi(x_c, \delta, m)$, известны значения $\xi^{q-1}(x(m, \delta))$ и $g(m)$.

Пары $(\xi^{q-1}(x(m)), g(m))$ сортируются по возрастанию значений сигнала. Отсортированные значения сигнала обозначаются $\xi_1^{q-1}(i)$, соответствующие значения весовой функции – $g_1(i)$, $i = 1, \dots, M$.

Вычисляются средние значения сигнала по полному набору значений и по частичным наборам для минимальных и максимальных значений сигнала,

$$M_0 = \sum_{i=1}^M \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) / S,$$

$$M_{min} = \left[\xi_1^{q-1}(i_{min} + 1)(S_0 - S_{min}(i_{min})) + \sum_{i=1}^{i_{min}} \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) \right] / S_0,$$

$$M_{max} = \left[\xi_1^{q-1}(i_{max} - 1)(S_0 - S_{max}(i_{max})) + \sum_{i=i_{max}}^M \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) \right] / S_0, \quad (2.12)$$

где $S_0 = 0.5\varepsilon_0 S$, $S = \sum_{i=1}^M g_1(i)$, коэффициент $\varepsilon_0 \in (0, 1)$ определяет сумму весовых функций для вычисления асимметричности сигнала, $i_{min} = \max(i): S_{min}(i) < S_0$, $i_{max} = \min(i): S_{max}(i) < S_0$, $S_{min}(k) = \sum_{i=1}^k g_1(i)$,

$S_{max}(k) = \sum_{i=k}^M g_1(i)$. Суммы изменяемых весовых функций для минимальных

и максимальных значений сигнала определяются следующими формулами:

$$S_{min0} = \varepsilon S (M_0 - M_{min})^\eta / ((M_{max} - M_0)^\eta + (M_0 - M_{min})^\eta),$$

$$S_{max0} = \varepsilon S (M_{max} - M_0)^\eta / ((M_{max} - M_0)^\eta + (M_0 - M_{min})^\eta), \quad (2.13)$$

где коэффициент $\varepsilon \in [0, 1)$ задает общую сумму изменяемых весовых функций, коэффициент $\eta \in [0, +\infty)$ влияет на нелинейность и позволяет регулировать отношение сумм уменьшаемых весовых функций для минимальных и максимальных значений сигнала в зависимости от асимметричности сигнала на отрезке. После этого по полученным значениям S_{min0} и S_{max0} вычисляются новые пороговые значения $i_{min} = \max(i): S_{min}(i) < S_{min0}$, $i_{max} = \min(i): S_{max}(i) < S_{max0}$, определяющие границы уменьшаемых весовых функций. Весовая функция переопределяется следующим образом ($\nu \in [0, \infty)$):

$$\left\{ \begin{array}{l} g_2(i) = g_1(i) [(S_{max}(i) - g_1(i) / 2) / S_{max0}]^\nu, \quad i \in [i_{max}, M]; \\ g_2(i) = g_1(i) - [g_1(i) + S_{max0} - S_{max}(i)] \times \\ \quad \times (1 - [(S_{max}(i) - g_1(i) + S_{max0}) / (2S_{max0})]^\nu), \quad i = i_{max} - 1; \\ g_2(i) = g_1(i), \quad i \in (i_{max} - 1, i_{min} + 1); \\ g_2(i) = g_1(i) - [g_1(i) + S_{min0} - S_{min}(i)] \times \\ \quad \times (1 - [(S_{min}(i) - g_1(i) + S_{min0}) / (2S_{min0})]^\nu), \quad i = i_{min} + 1; \\ g_2(i) = g_1(i) [(S_{min}(i) - g_1(i) / 2) / S_{min0}]^\nu, \quad i \in [1, i_{min}]. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Коэффициенты $\nu \in [0; +\infty)$ и $\eta \in [0; +\infty)$ влияют на изменение формы и амплитуду выходного сигнала. При $\nu > 10$ практически для всех $i \in [1, i_{min})$ и $i \in (i_{max}, M]$ $g_2(i) \approx 0$, и соответствующие значения $\xi_1^{q-1}(i)$ не оказывают влияния на выходной сигнал, что приводит к искажениям выходного сигнала. Для уменьшения искажений сигнала рекомендуется выбирать $\nu \approx 1$, это позволяет учитывать положение подавляемых значений сигнала $\xi_1^{q-1}(i)$ на оси x . С учетом новых значений весовой функции $g_2(i)$ вычисляется очередная оценка сигнала,

$$\xi^q(x_c) = \frac{\sum_{i=1}^M \xi_1^{q-1}(i) g_2(i)}{\sum_{i=1}^M g_2(i)}. \quad (2.15)$$

При многошаговой обработке происходит изменение формы сигнала, так как уменьшается относительный вес значений сигнала, более удаленных от экстремумов. Изменение формы сигнала приводит к увеличению асимметрии значений сигнала для построенных наборов точек и, согласно (2.13), к уменьшению снижения амплитуды сигнала на каждом шаге обработки, как это видно из рис. 2.3-2.7. Следует учитывать, что нелинейное искажение формы сигнала является причиной незначительного завышения оценки локального периода.

Как и в методе (2.11), коэффициент δ одновременно определяет соотношение между степенью подавления высокочастотных помех на каждом шаге обработки и сохранением амплитуды сигнала после подавления помех. В случае, когда для размера области фильтрации выполняется неравенство

$$(x(M) - x(1)) \approx \delta T^q(x_c) \Delta x < 0.4 T(x_c) \Delta x,$$

или

$$T^q(x_c) < T(x_c) 0.4 / \delta, \quad (2.16)$$

остальные параметры данного метода ε_0 , ε , η , ν , могут быть настроены так, что амплитуда сигнала после подавления помех и деформации сигнала не будет изменяться. Нелинейная деформация сигнала позволяет с помощью коэффициента δ задать допустимые значения оценки локального периода (2.16), при которой сигнал перестанет изменяться после подавления помех. Следует учитывать, что при таком режиме обработки, в отличие от метода линейного усреднения (2.11), при занижении коэффициента δ из-за локальных погрешностей вычисления оценки $T^q(x_c)$, подавление помех может также прекратиться.

Таким образом, можно сохранить амплитуду сигнала даже при значительных погрешностях вычисления локального периода. Например, при $\delta = 0.25$, параметры метода ε_0 , ε , η , ν , могут быть настроены так, что после подавления помех сигнал перестанет изменяться даже при завышении оценки локального периода в полтора раза, $T^q(x_c) / T(x_c) = 1.5$.

Применение нелинейного метода позволяет значительно повысить эффективность обработки неравномерно зашумленных сигналов и определить в качестве критерия окончания обработки прекращение изменения сигнала на очередном шаге обработки.

Метод нелинейной фильтрации позволяет эффективно подавлять импульсные помехи за счет уменьшения относительного веса значений сигнала, более удаленных от среднего. Эффективность подавления импульсных помех, рис. 2.1, в, с помощью рассмотренного метода нелинейной фильтрации можно оценить при сравнении рис. 2.4 и рис. 2.7.

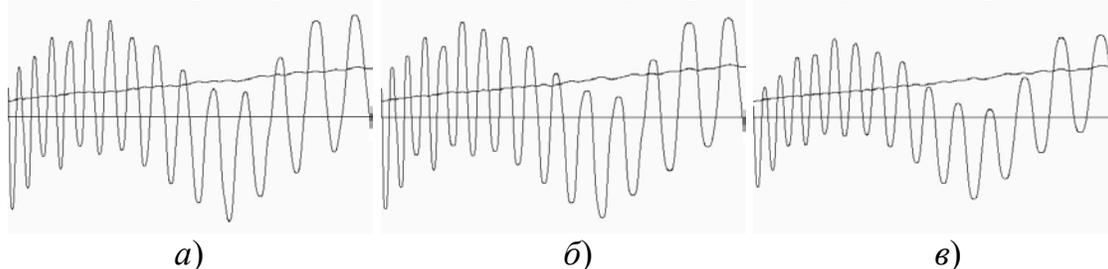


Рис. 2.5. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала, рис. 1.1, б, при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 0.3$, $\delta = 0.25$, $\varepsilon_0 = 0.5$, $\varepsilon = 0.5$, $\eta = 1$, $\nu = 3$

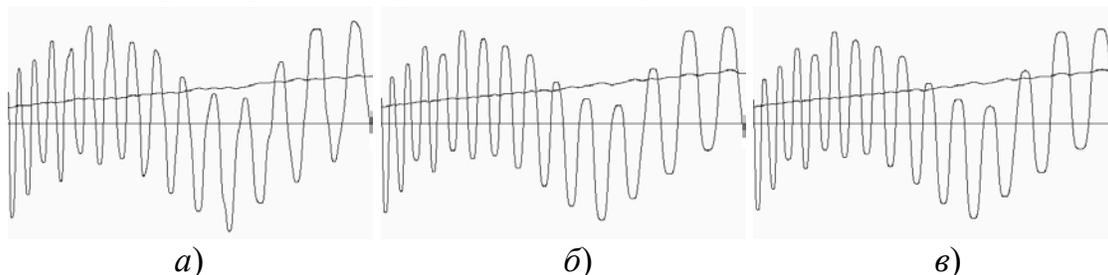


Рис. 2.6. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала, рис. 1.1, б, при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 0.3$, $\delta = 0.25$, $\varepsilon_0 = 0.5$, $\varepsilon = 0.9$, $\eta = 1$, $\nu = 3$

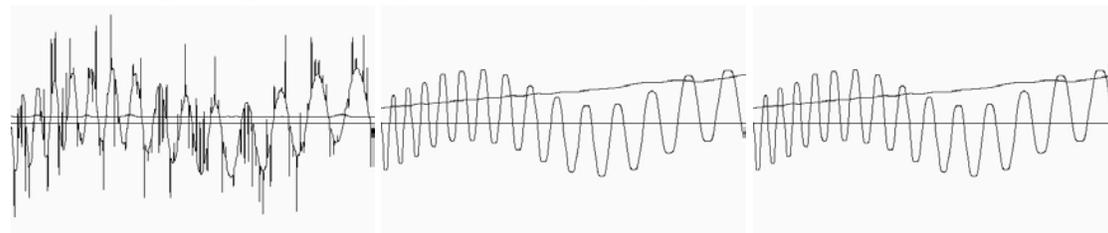


Рис. 2.7. Оценки сигнала и его локального периода после 1, 4 и 15 шагов итерационной обработки сигнала с импульсными помехами, рис. 1.1, в, при значениях параметров $\mu = 1$, $\chi = 0.3$, $\delta = 0.3$, $\varepsilon_0 = 0.5$, $\varepsilon = 0.9$, $\eta = 1$, $\nu = 3$

В отличие от предложенного ранее метода фильтрации на основе модификации локальных гистограмм [49-54], разработанный метод нелинейной фильтрации не требует квантованности значений сигнала. Это позволяет избежать погрешностей округления при многошаговой

обработке сигнала. Недостатком разработанного метода является необходимость сортировки значений сигнала, так как это довольно медленная операция. В предельном случае ($g(m) = \text{const}$, $v > 10$, $\eta = 0$ и $\varepsilon = 1$) разработанный фильтр аналогичен адаптивному медианному фильтру.

2.3. Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала при исключении фоновой составляющей

Известно, что обработка картин полос с малой видностью представляет сложную задачу. Рассмотренный ранее нелинейный метод позволяет лишь сохранить амплитуду сигнала при начальном соотношении производных сигнала и фона, достаточном для получения корректных оценок локального периода. В случае обработки сигнала со значительно изменяющейся фоновой составляющей, оценки локального периода, вычисленные по формулам (2.6) - (2.8) при фиксированном коэффициенте $\mu = 1.5$, могут значительно превышать истинное значение периода сигнала, и условие сохранения амплитуды сигнала (2.16) может быть выполнено лишь за счет уменьшения коэффициента δ . Но при этом из-за нелинейности метода невозможно гарантировать полное подавление помех по всему полю.

Решение проблемы достигается исключением фоновой составляющей при вычислении локального периода сигнала в (2.6) – (2.8) на каждом шаге обработки, а именно:

$$A^q(x_c) = 0.5 \left[\max_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)) - B^q(x(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)) - B^q(x(m))) \right], \quad (2.17)$$

$$D^q(x_c) = \sum_{m=2}^M \left| \xi(x(m)) - B^q(x(m)) - \xi(x(m-1)) + B^q(x(m-1)) \right|, \quad (2.18)$$

при этом оценки фона $B^q(x_k)$ вычисляются методом усреднения (2.11) значений сигнала $\xi^{q-1}(x_k)$ на предыдущем шаге обработки с учетом оценок локального периода $T^{q-1}(x_k)$ на предыдущем шаге обработки с весовой функцией $g(m) = \text{const}$ по набору точек с максимальным фазовым отклонением $|\Delta\varphi(x_c, 1, m)| = \pi$.

При применении метода оценки локального периода на основе устранения фоновой составляющей (2.17), (2.18), количество шагов обработки, необходимое для полного локального подавления помех сильно зависит от локальной частоты сигнала. Метод линейного усреднения (2.11) при этом неэффективен, так на первых шагах обработки происходит полное подавление помех для участков сигнала с большей частотой, и дальнейшая обработка приводит к значительному снижению амплитуды сигнала на этих участках. Из-за того, что точность вычисления оценок

локального периода сигнала также зависит от изменений амплитуды сигнала, такая обработка может привести к потере информации о фазе. Локальное снижение амплитуды сигнала из-за помех может привести к завышению оценок локального периода сигнала полос и, соответственно, к большему снижению амплитуды. Значительное локальное снижение амплитуды видно при сравнении сигналов, приведенных на рис. 2.11 б, в.

В то же время, параметры нелинейного метода (2.15) могут быть настроены так, что оценки локального периода при всех погрешностях вычисления будут соответствовать условию (2.16), и обработка сигнала после подавления помех не приведет к снижению амплитуды. При предположении, что фон значительно отличается от сигнала по частоте, можно ускорить подавление помех за счет дополнительных проходов усреднения фона перед вычислением локального периода сигнала.

Исключение фоновой составляющей $B^q(x_k)$ и на этапе подавления помех (2.12) - (2.15) позволяет уменьшить влияние нелинейных искажений сигнала при восстановлении фазы. Очередная оценка сигнала при этом определяется как сумма фоновой составляющей $B^q(x_k)$ и значения, вычисленного по формуле (2.15). При такой обработке нелинейная деформация сигнала происходит относительно фоновой составляющей $B^q(x_k)$, а не вдоль оси x_k .

2.4. Выравнивание фона и амплитуды сигнала

Как уже было отмечено ранее, изменение фона и амплитуды сигнала приводит к погрешности вычисления локального периода. Исключить влияние этих параметров можно за счет выравнивания фона и амплитуды сигнала. Выравнивание амплитуды и фона сигнала, не приводящее к существенным фазовым погрешностям, может быть произведено после предварительного подавления помех даже при приближительных оценках шага полос $T^q(x_c)$,

$$\xi_{BA}(x_c) = (\xi^q(x_c) - B(x_c))A_{\text{const}} / A(x_c), \quad (2.19)$$

при этом фоновая составляющая $B(x_k)$ вычисляется усреднением в (2.11) значений сигнала с весовой функцией $g(m) = \text{const}$ по набору точек с максимальным фазовым отклонением $|\Delta\varphi(x_c, 1, m)| = \pi$, а амплитуда сигнала $A(x_c)$ определяется следующей формулой,

$$A(x_c) = \max_{m=1, \dots, M} (|\xi(x(m, 0.75)) - B(x(m, 0.75))|). \quad (2.20)$$

При необходимости верхняя и нижняя огибающая сигнала могут быть получены независимо друг от друга. Дополнительное усреднение оценок амплитуды сигнала также позволяет снизить влияние помех.

Полное выравнивание фона и амплитуды сигнала за один проход

обработки из-за погрешностей вычисления локального периода, фона и амплитуды часто оказывается невозможным, однако повторное выравнивание сигнала после определения очередных оценок локального периода позволяет разрешить данную проблему.

2.5. Восстановление фазы сигнала

Приблизительные оценки локального периода сигнала, полученные в процессе предварительного подавления помех позволяют восстановить оценки фона $B(x_k)$ и амплитуды $A(x_k)$ сигнала, сформировать для каждой точки x_c сигнала набор точек $x(m, \mu_\varphi)$ с известным максимальным фазовым отклонением $|\Delta\varphi(x_c, \mu_\varphi, m)| = \pi\mu_\varphi$, $m = 1, \dots, M$, и построить модельный сигнал

$$\begin{aligned} \widehat{\xi}(m, \varphi_r(x_c)) = B(x(m)) + A(x(m))\cos(\varphi_r(i, j) + \\ + \text{sign}(m - (M + 1)/2)\Delta\varphi(x(m), x_c)), \end{aligned} \quad (2.21)$$

зависящий от значения фазы $\varphi_r(x_c)$ в исходной точке. Параметр μ_φ определяет баланс точности и помехоустойчивости восстановления фазы. В большинстве случаев рекомендуется выбирать значение $\mu_\varphi = 1$.

Таким образом, значение приведенной фазы $\varphi(x_c)$ в рассматриваемой точке может быть восстановлено с заданной точностью $\Delta\varphi$ по критерию минимума среднего квадратичного отклонения между реальным и модельным сигналами как

$$\varphi(x_c) = \varphi_r(x_c) = r\Delta\varphi \in [0, 2\pi):$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M [|\widehat{\xi}(m, \varphi_r(x_c)) - \xi^q(x(m))| / A(x(m))]^2 = \\ = \min_{v=0, \dots, \text{int}[2\pi/\Delta\varphi]} \sum_{m=1}^M [|\widehat{\xi}(m, v\Delta\varphi) - \xi^q(x(m))| / A(x(m))]^2. \end{aligned} \quad (2.22)$$

После вычисления приведенной фазы с достаточной точностью возможно развертывание полной (непрерывной) фазы $\varphi_p(x_k)$,

$$\varphi_p(x_k) = \begin{cases} \text{signf}(x_k) \varphi(x_k) + 2\pi n(\varphi_p(x_{k-1})) & k > i \\ \varphi_p(x_i) & k = i, \\ \text{signf}(x_k) \varphi(x_k) + 2\pi n(\varphi_p(x_{k+1})) & k < i \end{cases} \quad (2.23)$$

при этом в некоторой точке x_i должно быть известно значение полной (непрерывной) фазы $\varphi_p(x_i)$ и должен быть определен знак частоты $\text{signf}(x_k)$.

Глава 3. ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

3.1 Метод устранения помех и дефектов картин интерференционных полос

В работах [49-54] рассмотрен метод подавления помех, основанный на независимой обработке одномерных сигналов в различных сечениях картины полос. Проведенные исследования показали, что такая обработка неэффективна для случаев сильно искривленных полос. Разработан новый метод подавления помех интерференционных полос, в котором оценка сигнала полос определяется значениями сигнала внутри двумерной области, формируемой адаптивно для каждой точки по локальным характеристикам полос. Новый метод позволяет эффективно подавлять помехи в картинах полос со сложной топологией, обработка которых исходным методом приводила к заметной потере контраста на участках со значительными искривлениями полос.

Разработанный метод подавления помех многошаговый. На каждом шаге обработки в каждой точке картины полос определяются значения локального направления, локального шага полос, формируется двумерная область фильтрации и по значениям сигнала внутри области с помощью разработанного метода нелинейной фильтрации определяется новая оценка сигнала полос. Определение локальных характеристик полос на каждом шаге обработки позволяет сохранить контраст полос при подавлении помех.

Блок-схема метода приведена на рис. 3.1. На каждом q -ом шаге обработки, $q \geq 1$, новые значения сигнала полос $\xi^q(i, j)$ определяются по значениям сигнала полос на предыдущем шаге обработки $\xi^{q-1}(i, j)$ в пределах областей фильтрации, сформированных для каждой точки адаптивно с учетом оценок локального направления полос $\alpha_f^q(i, j)$ и локального шага полос $T^q(i, j)$. Оценки $\alpha_f^q(i, j)$ и $T^q(i, j)$ вычисляются по значениям $\xi^{q-1}(i, j)$ и $T^{q-1}(i, j)$, причем $\xi^0(i, j) = \xi(i, j)$, $T^0(i, j) = T_{min}$, где $\xi(i, j)$ – исходный сигнал полос, T_{min} – минимальное значение шага полос в обрабатываемой интерферограмме. Адаптивное формирование области фильтрации для каждой точки картины полос позволяет с высокой эффективностью устранять влияние различных помех, в том числе близких по частоте с сигналом полос.

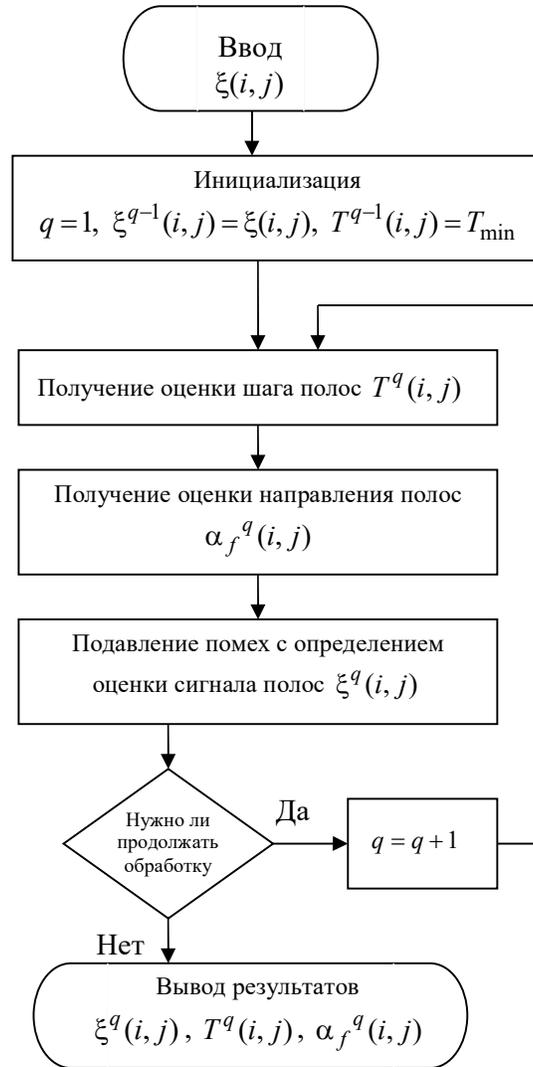


Рис. 3.1. Блок-схема метода подавления помех и определения характеристик картин полос

3.2 Определение локального шага полос

В отличие от случая обработки одномерного сигнала, при обработке двумерных интерферограмм приходится учитывать изменения локального направления полос $\alpha_f^q(i, j)$. При наличии помех в картине полос точное определение локального направления полос, и соответственно, направления максимального изменения фазы, затруднительно. Таким образом, двумерная задача определения шага полос не может быть эффективно сведена к одномерной путем определения локального периода одномерного сигнала в сечении картины полос, перпендикулярном локальному направлению полос. Предлагается вычислять очередную оценку шага полос не по отрезку, а по адаптивному замкнутому контуру,

рис. 3.2, что позволяет снять проблему неточности вычисления направлений.

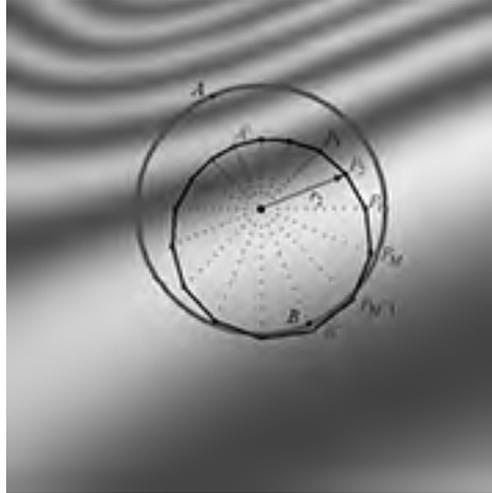


Рис. 3.2. Вычисление оценки шага полос по замкнутому контуру, не содержащему точек изменения знака частоты

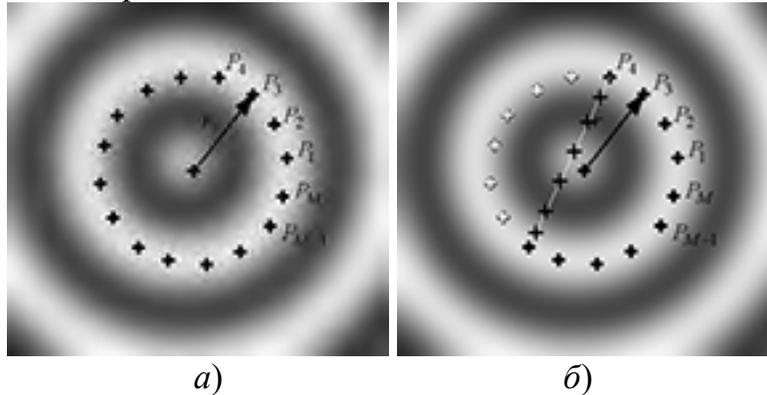


Рис. 3.3. Вычисление оценки шага полос. Исходный контур (а), и контур после исключения точек изменения знака фазы (б)

Для всей картины полос перед началом обработки в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.1, задается начальное приближение шага полос $T^0(i, j) = T_{\min}$.

Определение шага полос $T^q(i, j)$ на каждом шаге q итерационной обработки осуществляется следующим образом. Для каждой точки (i, j) выбираются $M \geq 8$ направлений $\alpha(m) = 2\pi m / M$, $m = 1, \dots, M$, и в каждом направлении определяются координаты точки $P(m)$ с предполагаемой максимальной разностью фаз $|\Delta\phi(P(m), (i, j))| = \mu\pi$, как это показано на рис. 3.2, с учетом предположений, что выбранное направление совпадает с направлением максимального увеличения фазы, и что оценка шага полос позволяет адекватно оценить разность фаз, $\mu > 1$ – коэффициент итерационной устойчивости. Точки или области изменения знака фазы,

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Л.И. КРЫНИН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.02 «ОПТОТЕХНИКА»
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

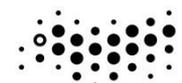
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
Санкт-Петербург
2018

Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 219 с.

Рецензент: Трегуб В.П., к.т.н., начальник конструкторского отделения
оптотехники ЦКБ ОА «ЛОМО»

Учебное пособие состоит из двух частей. В первой части рассмотрены вопросы проектирования объективов постоянного фокусного расстояния на базе использования теоретико-вероятностных методов точностного анализа. Основное внимание уделено методикам вероятностного расчёта модуля и проекции векторов децентрировок оптических элементов объектива, возникающих от технологических погрешностей изготовления и результатов статистического исследования производства объективов и их контроля. На многочисленных примерах показана методика составления уравнений, связывающих децентрировки с параметрами качества изображения, и дан их анализ. Во второй части пособия на основе анализа известных конструктивных решений отечественных и зарубежных фирм сформулированы основные принципы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния.

Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений приборостроительного профиля, а также инженерно-технических работников промышленности.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

Университет ИТМО.
Крынин Л.И.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ
**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТИВОВ
С ПОСТОЯННЫМ ФОКУСНЫМ
РАССТОЯНИЕМ**

ВВЕДЕНИЕ

Современные объективы являются важнейшей частью любого оптического прибора. В зависимости от условий эксплуатации и требований к степени коррекции качества изображения различают десятки типов и сотни вариантов конструктивного исполнения объективов.

И все же, несмотря на столь большое разнообразие выпускаемых объективов, общинженерной методики их проектирования фактически не существует. На каждом отечественном предприятии способы проектирования и подходы к ним базируются главным образом на личном опыте предшественников, чего, к сожалению, бывает недостаточно для разработки новых объективов.

В предлагаемой работе автор пытался восполнить этот пробел.

В первой части пособия основное внимание уделено вопросам, от решения которых зависит успешное освоение серийного и массового производства новых моделей объективов постоянного фокусного расстояния. К таким вопросам относятся в первую очередь вопросы выбора и точностного анализа схем базирования оптических элементов и расчет допусков на технологические погрешности изготовления, вызывающие отклонение линз от расчетных положений.

Все точностные расчеты в работе базируются на положениях теории вероятности.

Применение вероятностных методов расчета предполагает знание законов распределения технологических погрешностей изготовления, значений коэффициентов, связывающих основные характеристики законов распределения с допусками, а также степень коррелированности погрешностей. В связи с этим автором были проведены многочисленные экспериментальные исследования технологических погрешностей изготовления, вызывающих отклонения оптических элементов от расчетных положений и характеристик качества изображения: коэффициентов передачи модуляции (КПМ), функции рассеяния линии (ФРЛ), визуальной оценки дифракционного изображения точки и др.

Практическое внедрение разработанной методики проектирования конструкций объективов выявило определенные трудности при ее освоении. Поэтому в пособии изложение методики проводится последовательно от простых систем объективов к более сложным, и каждый раз на примерах из заводской практики. Автор надеется, что при таком изложении материала предлагаемая методика проектирования не вызовет больших затруднений при ее освоении как студентами, так и инженерно-техническими работниками.

Изложенная методика проектирования может быть применена не только к объективам, но и к любым оптическим приборам, в которых в качестве силовых оптических элементов используются линзы.

Во второй части пособия, на основе анализа и систематизации конструкций отечественных и зарубежных фирм с позиции обеспечения необходимой точности положения и позиционирования оптических компонентов сформулированы основные принципы проектирования и юстировки объективов переменного фокусного расстояния.

ГЛАВА 1. ДЕЦЕНТРИРОВКА – ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ФАКТОР УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Оптические элементы в собранном объективе в зависимости от погрешностей изготовления, сборки и юстировки могут занимать положения, отличные от расчетных.

В общем случае эти отклонения ведут к ухудшению качества изображения, даваемого объективом. Поэтому знание предельно допустимых отклонений на стадии проектирования конструкции объектива имеет большое значение.

Одним из основных факторов, определяющих качество изображения в современных объективах, является децентрировка линз.

1.1 Определение центрировки и децентрировки оптических элементов в конструкции объектива

Необходимость в определении понятий центрировки и децентрировки линз, к сожалению, еще существует. Связана она с тем, что до сих пор многие проектировщики в своей деятельности подходят к этим понятиям с различных, иногда труднообъяснимых позиций. Например, Р.Х. Ноубл [1] под децентрировкой понимает полусумму от децентрировок двух

поверхностей в линзе
$$\Delta C = \frac{(\Delta C_1 + \Delta C_2)}{2}.$$

Такое определение децентрировки трудно поддается логическому объяснению. В этом выражении ее величина является косвенной и непосредственному измерению и контролю не подлежит.

При расчетах допусков на децентрировки пользоваться этим выражением нерационально, т.к. влияние ΔC_1 и ΔC_2 на качество изображения, различное, и, следовательно, в расчетах будет правильным использовать их раздельно.

Известный немецкий оптик С. Хофман [2] считает, что децентрировка линзы должна определяться тремя параметрами: двумя углами ΔV_1 и ΔV_2 между линиями, соединяющими центры кривизны с точками пересечения оси цилиндрического пояска с оптическими поверхностями, и азимутальным углом τ , находящимся между перпендикуляром, опущенным из центра кривизны на ось цилиндрического пояска и заранее выбранной координатной плоскостью (рис.1.1). С таким определением децентрировки также трудно согласиться. Дело в том, что наклон оптической поверхности оценивается не относительно геометрической оси пояска линзы, а относительно оси, задаваемой базировкой линзы на две поверхности: оптическую и цилиндрический поясок. Эта ось в общем виде не совпадает с осью цилиндрического пояска.

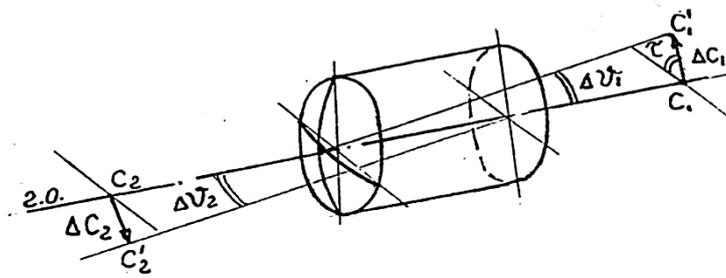


Рис.1.1. Схема децентрировки линзы по С. Хофману

Измерение азимутального угла τ в условиях серийного и массового производства заметно увеличивает трудоемкость контроля децентрировок. Эти измерения могут быть оправданы для уникальных изделий, например, таких как телескопы, для более точной юстировки которых необходимо знание расположения центров кривизны в пространстве.

Для серийного производства угол τ может и должен учитываться при вероятностных расчетах допусков на децентрировки.

Привожу цитату из книги Ф.М. Данилевича и др. [3] «Наиболее употребительной базой при центрировке оптических деталей является оптическая ось». И еще одна цитата из этой книги: «...основные виды центрировочных операций»:

1. Центрировка одиночных линз. В процессе этой операции оптическая ось линзы совмещается с ее геометрической осью.
2. Центрировки линз и блоков линз в оправках. При этой операции оптические оси линзы и блоков совмещаются с геометрическими осями оправ».

Под геометрической осью линзы авторы понимают ось цилиндрического пояса линзы. Такое совмещение является неверным и противоречит требованиям ГОСТ 2.412-81 «Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий».

Согласно этому ГОСТу при центрировке линзы происходит совмещение оптической оси линзы с осью, определяемой базировкой линзы на две поверхности, только одна из которых является цилиндрическим пояском. В общем случае, как было сказано выше, эта ось не совпадает с осью цилиндрического пояса линзы, т.е. с геометрической осью линзы.

Для исключения недопонимания излагаемого материала приведем несколько определений центрировки и децентрировки, которых в дальнейшем будем неукоснительно придерживаться.

Под центрировкой линзы при изготовлении будем понимать совмещение центров кривизны её поверхностей с осью вращения шпинделя центрировочного станка и последующую обработку цилиндрической поверхности линзы до диаметра заданного размера.

Под центрировкой линзы или оптического компонента в конструкции объектива будем понимать совмещение центров кривизны оптических

поверхностей с осью оптической системы объектива, под которой чаще всего понимают геометрическую ось основной базовой оправы объектива.

Поскольку в реальных условиях серийного производства добиться идеальной центрировки практически невозможно, в окончательно собранных объективах всегда имеет место остаточная децентрировка оптических элементов.

Под децентрировкой оптических элементов понимают их поперечное смещение или наклоны относительно оси базовой оправы [4].

Под децентрировкой линзы в оправе будем понимать смещение центров кривизны оптических поверхностей линзы с оси посадочных базовых поверхностей оправы.

Под децентрировкой оптического компонента будем понимать смещение или наклоны оси базовой поверхности оправы компонента относительно оси оптической системы объектива.

Децентрировки приводят к искажению структуры изображения за счет появления aberrаций децентрированных систем. Причем на структуру изображения в центре поля зрения и в ближайшей его окрестности влияют по существу две aberrации децентрировки: кома децентрировки и астигматизм [5].

Практика изготовления громадного большинства съёмочных и проекционных объективов показала, что при достигнутых на сегодня величинах децентрировок, основным признаком их появления является кома.

Ее величина пропорциональна децентрировке и квадрату относительного отверстия [6]. Только при значительных величинах децентрировок заметное влияние на структуру изображения приобретает астигматизм. Поэтому в большинстве известных методик расчета допустимых значений децентрировок в оптических системах широкого назначения (профессиональная и любительская фотография, кинематограф), в которых качество изображения определяются на уровне геометрических aberrаций, исходят из допустимой величины комы децентрировки на оси системы [7].

Что касается поля зрения, то децентрировки приводят к заклону плоскости изображения, дисторсии, астигматизму, кривизне в сагиттальной плоскости, и при больших величинах – к заметному хроматизму. Наиболее вредным последствием децентрировок является нарушение симметрии качества изображения относительно оси оптической системы объектива.

1.2 Анализ методов расчета децентрировок в конструкции объектива

В современном объективостроении расчет допусков представляет собой одну из сложнейших научно-инженерных задач. Связано это, по-видимому, с полным или частичным несоответствием существующих

методов расчета реальному положению оптических элементов в собранном объективе.

На сегодняшний день известно, по крайней мере, пять проектных методов расчета допусков [8]: метод попыток, метод равного качества, метод пропорционального влияния, метод равных допусков и метод экономического обоснования. Расчеты допусков в конструкциях объективов, проведенные в соответствии с требованиями этих методов, показали, что наиболее удобным и близким к условиям производства является метод попыток.

В этом случае конструктор предварительно устанавливает на технологические погрешности те допустимые величины отклонений, которые еще могут быть получены в заданных условиях производства. Затем производится расчет по соответствующим формулам.

Если в результате такого расчета отклонение выходного параметра окажется больше допустимого, то производится корректировка. На какие-то погрешности допуски ужесточаются, на другие, менее влияющие на качество, расширяются.

Если при повторном расчете окажется, что выходной параметр изменился больше чем требуется, а дальнейшее ужесточение допусков бессмысленно из-за невозможности их достижения в заданных условиях производства, то необходимо пересмотреть выбранное конструктивное решение и произвести новую базировку оптических элементов объектива.

Если и эта мера не поможет, а изменение выходного параметра по-прежнему будет велико, то следует подумать о выборе соответствующей линзы или группы линз в качестве компенсационного элемента. Такова общая схема расчета при применении метода попыток.

Точностной анализ допусков на элементы размерных цепей конструкции объективов производится чаще всего двумя методами: методом максимума-минимума и теоретико-вероятностным. При использовании первого метода допуски на составляющие размеры назначаются так, чтобы допуск замыкающего звена при любой комбинации составляющих звеньев был выдержан в любом случае, то есть при изготовлении деталей размеры имеют либо наименьшие, либо наибольшие предельные значения и погрешности всех размеров арифметически суммируются.

При этом методе расчета не требуется введения таких дополнительных операций при сборке, как подгонка деталей, их дополнительная доработка или подбор новых деталей; не требуется высокая квалификация сборщика; заметно расширяется возможности разделения труда. Но следует отметить и существенный недостаток этого метода. При его использовании требуются более жесткие допуски на составляющие звенья размерных цепей, выполнение которых не всегда возможно.

Вероятностный метод позволяет рассчитывать положения и значения допусков с учетом распределения действительных размеров и вероятности появления различных комбинаций этих размеров при запланированном

проценте выхода значения замыкающего звена за пределы поля его допуска. Но так как, в многозвенных цепях самые неблагоприятные экстремальные значения встречаются практически очень редко, то с учетом законов теории вероятности можно расширить поля допусков, рассчитанных по методу «максимум-минимум» и благодаря этому снизить требования к точности изготовления деталей, сохраняя их взаимозаменяемость. Однако при этом необходимо считаться с относительно небольшой заранее известной долей брака.

Что касается децентрировок, то современные методы их расчета базируются на следующих основных положениях. Считают, что: во-первых, децентрировки являются величинами первого порядка малости по сравнению с размерами световых отверстий и радиусов оптических поверхностей, и что между ними и изменениями поперечных аберраций существует линейная взаимосвязь; во-вторых, децентрировки происходят в одной меридиональной плоскости оптической системы и принимают при этом наибольшие значения.

Первое положение имеет большое прикладное значение. Ежедневная практическая деятельность подтвердила его обоснованность. Второе положение с точки зрения теории вероятности неправомерно, и повседневная инженерная деятельность подтвердила его несостоятельность.

Рассмотрим объектив типа триплет (рис.2.8). В зазорах между корпусом и тремя линзами в оправках при сборке будет происходить поперечное смещение оправ. Известно [9], что направление смещения оправ с линзами с оси системы объектива, установленного вертикально, подчиняется закону равной вероятности. Если допустить, что оправка с одной и той же вероятностью может сместить в 360 направлениях, т.е. через 1° , то, очевидно, вероятность того, что все три оправы сместятся в одном и том же направлении будет равна $(1/360)^3 = 1/47000000$. Даже при годовом выпуске 1500000 штук потребуется не менее 30 лет, чтобы появился объектив с таким расположением оправ.

Проведение расчетов децентрировок в одной плоскости на «максимум-минимум» без учета случайного характера распределения, как величины, так и направления смещения и наклонов линз в собранном объективе, может привести к ошибкам, достигающий 60-100%, а нередко и более, причем, в направлении ужесточения допусков.

В последнее время все большее число конструкторов приходит в мысли о необходимости использования теории вероятностей при расчете допусков. Связано это с тем, что в условиях серийного производства погрешности, вызывающие децентрировки, представляют собой случайные как по модулю, так и по направлению ошибки.

В связи с чем их расчеты должны проводиться по вероятностным характеристикам рассеяния, определяемым или в процессе статистического исследования производства, или по принимаемым законам распределения соответствующий погрешностей. Необходимо подчеркнуть, что без применения теории вероятности любой метод точностного расчета может

дать только приближенные результаты, т.к. во всех этих случаях не будет соответствовать реальным условиям производства.

К одной из первых экспериментальных попыток определить характер децентрировки следует отнести работу Б.М. Корякина, опубликованную в 1935 г. [10].

В этой работе автор показал, что децентрировки линз в объективе и отклонения лучей, вызываемые ими, имеют векторный характер.

Используя это свойство, К. Щух [11] указал на возможность взаимной компенсации влияния децентрировок на качество изображения в объективе.

Впервые расчет модуля суммарного случайного вектора, определяющего положение оптического элемента в приборе относительно его оси, был рассмотрен И.М. Долинским и С.А. Сухопаровым в 1963 г. в работах [12,13] для случая, когда модули составляющих размерную цепь случайных векторов распределены по закону Релея. В этом случае для замыкающего звена будет справедливо выражение

$$P = 1 - \frac{\bar{r}^2}{e^2 \sigma^2},$$

где P – вероятность события, при котором модуль случайного вектора выходит за пределы круга радиуса r ;

σ – среднее квадратическое значение модуля вектора \bar{r} .

В фото- и кинообъективах векторные технологические погрешности, вызывающие отклонение оптических поверхностей от расчетного положения, могут иметь распределения модулей, отличные от распределений, подчиняющихся закону Релея. Вследствие этого применение формулы для результирующего вектора возможно только при условии, что число составляющих векторов в размерной цепи, по крайней мере, не менее шести.

В объективах размерные цепи, определяющие положения поверхностей линз в большинстве своем состоят из 2-4, редко 6 звеньев. Поэтому выражение для расчета интегральной функции распределения в том виде, в котором оно представлено в [12,13], не может быть применено.

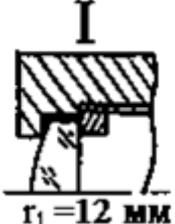
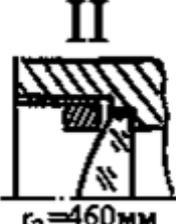
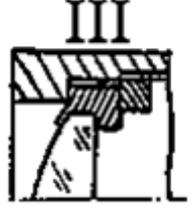
К сожалению, приходится констатировать, что даже те авторы, которые пытаются учесть случайный характер распределения технологических погрешностей, используют в расчетах чаще всего один и тот же закон распределения – нормальный [14,15]. Понять их, в общем-то, нетрудно, так как математический аппарат для вероятностных точностных расчетов разработан наиболее хорошо и полно как раз для погрешностей, имеющих нормальный закон распределения. Но, в реальных условиях производства не все погрешности в объективах подчиняются закону Гаусса. Наконец следует отметить, что все допуски на децентрировки, выдаваемые сегодня на этапе оптического расчета, могут оказаться бесполезными для конструктора объектива.

Дело в том, что допуски на децентрировки очень сильно зависят от способа базировки линз. А поскольку их число очень велико (так, например, для двух соседних линз количество конструктивных вариантов крепления

может достигать 88) и выбор наилучшего способа происходит только при наличии и после обработки оптического выпуска, то совершенно ясно, что оптик-расчетчик никак не может знать, какой вариант базировки будет в конце концов выбран. В то же время в оптическом выпуске он уже дает допуски на децентрировки отдельных поверхностей, а иногда и на развороты линз вокруг вершин оптических поверхностей. К чему это может привести?

Обратимся к таблице 1.1, в которой представлены три варианта крепления одной и той же линзы объектива Т-43 (фотоаппарат «Смена»). Для каждого варианта рассмотрим децентрировки, возникающие от технологических погрешностей изготовления.

Таблица 1.1

Тип децентрировки	 $r_1 = 12 \text{ мм}$	 $r_2 = 460 \text{ мм}$	
Заклон от торцевого биения	$\gamma_{\Delta T}$	$\gamma_{\Delta T}$	$\gamma_{\Delta T}$
Разворот в зазоре	$\gamma_1 = \frac{z}{r_1}$	$\gamma_2 = \frac{z}{r_2}$	$\Delta C_{\perp z}$
Собственная децентрировка поверхностей	ΔC_2	ΔC_1	$\Delta C_1, \Delta C_2$
Поперечные смещения от эксцентриситетов посадочных и опорных мест	Δe	Δe	Δe

Из таблицы 1.1 следует, что во всех вариантах число децентрировок одинаково – четыре. Во всех вариантах есть децентрировки от торцевого биения, а все остальные – различны как по природе, так и по величине. Так, разворот линзы в одном и том же зазоре z в первом варианте приблизительно равен $\gamma_1 = \frac{z}{12}$, что примерно в 40 раз больше, чем во втором, где $\gamma_2 = \frac{z}{460}$.

А в третьем варианте этого разворота вообще нет. В нем имеет место поперечное перемещение оправы с линзой в зазоре z .

Влияние указанных выше децентрировок на качество изображения тоже различно. Так, если коэффициент влияния разворота линзы относительно вершины ее второй поверхности равен 0,0001 мм/мин, то коэффициент влияния разворота той же линзы, но вокруг центра кривизны второй поверхности (*II вариант*), имеет величину в 540 раз большую – 0,054 мм/мин.

В тоже время, коэффициент влияния разворота линзы вокруг центра кривизны первой поверхности (*I вариант*) в 41 раз меньше, чем при развороте вокруг центра кривизны второй поверхности. Следовательно, влияние погрешностей на качество изображения очень сильно зависит от

выбора схемы базировки линз. Конечно же, оптик-расчетчик не может знать какую схему базировки выберет конструктор объектива. Поэтому допуски, которые он рассчитывает заранее, могут оказаться неверными.

Кроме того, задавая допуски на развороты линз и целых оптических компонентов, расчетчик не знает, какие линзы или группы линз будут в действительности разворачиваться и где будет находиться точка их разворота.

Отсюда следует, что расчет допусков на децентрировки необходимо проводить только для конкретной конструкции объектива.

В сложившейся ситуации возникла потребность в создании методики инженерного расчета допусков, которая базировалась бы на теории вероятностей, фактических законах распределения технологических погрешностей, вызывающих децентрировки, и учитывала бы конкретные схемы базировки линз.

Такая методика должна позволять вести расчеты децентрировок, по крайней мере, для двух случаев:

- в первом, наиболее известном и распространенном, децентрировки от всех видов технологических погрешностей сводятся только к поперечным смещениям центров кривизны оптических поверхностей;
- во втором – к поперечным смещениям и наклонам.

Первый случай, когда рассчитываются только поперечные смещения центров кривизны, в расчетном плане более трудоемок, но лучше поддается автоматизации. Им также пользуются, когда применяют программы оптических расчетов, позволяющие определить влияние поперечных смещений оптических поверхностей, а расчет влияния наклонов относительно произвольных точек разворота по каким-либо причинам произвести не удастся.

Второй вариант расчета децентрировок наиболее близок к реальному положению линз в конструкции объективов и позволяет использовать более простую схему расчетов, поэтому может представлять для проектировщика больший интерес.

Расчеты допустимых значений децентрировок, вызываемых технологическими погрешностями изготовления, могут быть проведены двумя способами. При первом способе величины смещений и наклонов оптических элементов определяется вне какого-либо определенного направления и, следовательно, при этом оценивается модуль вектора результирующего изменения поперечных аберраций в произвольном направлении. При использовании второго способа все смещения и наклоны линз проектируются в заданную меридиональную плоскость объектива с учетом наклонов распределения их модулей и направлений.

Такой подход к расчету результирующей децентрировки охватывает почти все возможные случаи, встречающиеся при проектировании оптических систем различного назначения.

ГЛАВА 2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЪЕКТИВОВ

Современные объективы, применяемые в кино-, фото- и телеаппаратуре относятся к классу точных оптических приборов. Основными ошибками конструкций этих объективов являются ошибки положения оптических компонентов. К причинам, вызывающим появление этих ошибок, относятся, главным образом, ошибки выбора схемы конструкции, технологические и эксплуатационные погрешности [16].

К первым относятся отклонения, вызванные приближенным выполнением требуемой функции выбранным устройством. Ко вторым – погрешности формы, размеров и положения деталей; к третьим – погрешности, связанные с деформацией деталей (силовой или температурной), износом, смещением в зазорах, проскальзыванием и т.д. В объективах наибольшее значение имеют технологические погрешности.

При точностном анализе конструкций объективов следует различать два типа погрешностей. К первому относятся погрешности, вызывающие продольные отклонения оптических компонентов (смещение вдоль оси объектива), ко второму – погрешности, вызывающие децентрировки оптических элементов (заклоны и поперечные смещения).

К числу технологических погрешностей, приводящих в общем случае к отклонениям оптических элементов вдоль оси, относятся:

- погрешности базовых вершинных отрезков Δh_B и воздушных промежутков Δd_B ;
- погрешности толщин линз Δd_L ;
- погрешности промежуточных оправ и прокладных колец, расположенных вдоль оси объектива Δl ;
- погрешности продольной юстировки воздушных промежутков $\Delta d_{ВП}$;
- погрешности продольной юстировки дистанционного компонента $\Delta S_{Ю}$.

Основными эксплуатационными погрешностями, вызывающими продольные отклонения оптических элементов от расчетных положений, являются:

- осевые смещения дистанционного компонента в люфте резьбового соединения ΔS_P ;
- осевые смещения кулачка в зазоре между упорами ΔS_K ;
- продольное смещение в зазоре между пальцем и пазом цилиндрического кулачка $\Delta S_{В-П}$.

К числу основных технологических погрешностей, вызывающих децентрировки оптических элементов, следует отнести:

- торцевое биение оправ ΔT ;
- эксцентриситет оправ Δe ;

- погрешность центрировки линзы ΔC_C ;
- конусность направляющих подвижных компонентов ΔK ;
- погрешность центрировки при склейке ΔC_K ;
- погрешность центрировки, возникающая при завальцовке линзы ΔC_3 ;
- погрешность центрировки, возникающая при автоколлимационном центрировании поверхностей линзы в оправе ΔC_A ;
- поперечное смещение и развороты в зазорах между оправами $\Delta C_{\perp Z}$ и γ_Z .

Основной эксплуатационной погрешностью, вызывающей децентрировки оптических элементов в объективах переменного фокусного расстояния, является заклон $\Delta \gamma_{NZ}$ подвижного компонента в зазоре направляющих.

Характер проявления выше перечисленных технологических и эксплуатационных погрешностей в основном случайный. Случайные погрешности являются неизбежными и неустранимыми. Повышая требования к отдельным факторам технологических процессов, можно лишь уменьшить их величину. Поэтому случайные погрешности изготовления учитываются путем назначения допусков на неточность изготовления. Но сделать это возможно только в том случае, если известен характер их проявления (ошибка векторная или скалярная), законы распределения плотности вероятности, параметры этих законов и коэффициенты относительного рассеивания и асимметрии k, α [17].

Поскольку, каких-либо работ, дающих по данному вопросу достоверный, близкий к реальным условиям материал, обнаружить не удалось, автором были проведены исследования, позволяющие определить фактические законы распределения большинства технологических погрешностей, вызывающих отклонения оптических элементов от расчетных положений, а в случаях, где это сделать не удавалось, оценить величины коэффициентов относительного рассеивания и асимметрии по выборкам, объем которым обязательно оговаривался.

2.1 Эксцентриситеты, торцевые биения опорных торцов и овальности оправ.

Известно [18], что закон распределения эксцентриситета (закон Релея) определяется функцией плотности, математическое выражение которой имеет вид:

$$f(\Delta e) = \frac{\Delta e}{\sigma_0^2} \cdot e^{-\frac{\Delta e^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (0 \leq \Delta e \leq \infty),$$

где $\Delta e = \sqrt{\Delta e_x^2 + \Delta e_y^2}$ - модуль случайного вектора $\bar{\Delta e}$, $\bar{\Delta e}_x$ и $\bar{\Delta e}_y$ - координаты проекции конца вектора $\bar{\Delta e}$ на оси абсцисс и ординат, математические ожидания которых равны между собой $M(\Delta e_x) = M(\Delta e_y)$, а для среднеквадратических значений справедливо $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$.

Ввиду того, что в настоящее время при изготовлении современных объективов отсутствуют какие-либо конкретные данные по параметрам, характеризующим вероятностные законы распределения эксцентриситетов, а опыт работы конструкторов показывает, что величины их находятся в пределах, заданных чертежом, примем за практические границы зоны рассеяния вектора $\bar{\Delta e}$ значения, равные $\Delta e=0$ и $\Delta e=3,44\sigma$. Вероятность того, что случайная величина Δe попадает в интервал $(0; 3,44\sigma)$, равна 0,997.

Измерения эксцентриситета внутреннего посадочного диаметра $\varnothing 14H7$ корпуса киньсъемочного объектива Т-51 относительно его наружного диаметра $\varnothing 20h7$ в 99 деталях показали (рис.2.1.), что эмпирическая кривая (1) действительно достаточно близка к кривой, описываемой законом Релея (2).

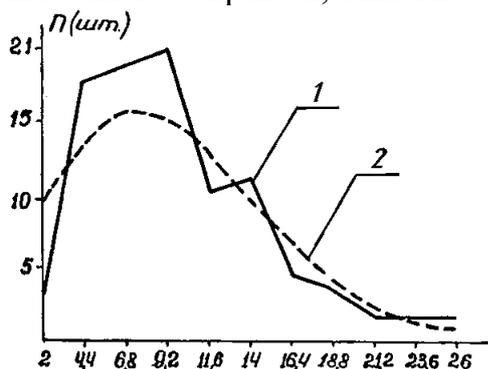


Рис. 2.1. Кривые распределения эксцентриситета; 1 – эмпирическая, 2 – теоретическая

При практических расчетах предлагается брать $k=1,14$, $\alpha=-0,27$.

Что касается торцевого биения оправ Δ_T , то и здесь можно считать, что дифференциальный закон распределения $f(\Delta_T)$ полностью описывается законом Релея [18].

Сопряженные вал и отверстие могут иметь погрешности не только размеров, но и формы. Погрешности формы вала и отверстия можно не учитывать лишь при прикидочных расчетах, а также в тех случаях, когда влияние погрешности формы по сравнению с влиянием погрешности других звеньев мало.

На практике при расчете размерных цепей можно ограничиться учетом только овальности.

В табл.2.1 представлены результаты измерений и расчетов параметров k_ϕ , α_ϕ для овальности более чем 600 оправ любительских объективов Т-51, Т-54, ОП-1,8, ПФ – 3.

Таблица 2.1

Номинальный диаметр оправы	δ , мкм	k	α
До \varnothing 30 мм	0÷2	1,60	-0,25
	3÷4	1,24	-0,20
	5÷7	1,16	-0,20
\varnothing 40 мм	10	1,7	-0,20

2.2 Направления и модули векторных технологических погрешностей

Очевидно, что в процессе сборки объективов направления всех векторных технологических погрешностей имеют произвольный характер. Поэтому для проведения экспериментов были изготовлены прозрачный полистироловый стакан и двадцать дисков из того же материала. На наружной поверхности стакана вдоль его образующих через 1 мм были нанесены продольные риски. Угловое расстояние между двумя соседними рисками соответствовало трем градусам. Высота стакана была выбрана такой, чтобы в него могло поместиться пять дисков. Выбор указанного количества дисков основывался на том, что в собранном объективе величина суммарной децентрировки оптического элемента определяется, как правило, не одной, а несколькими технологическими погрешностями. Так, децентрировка неподвижных оптических компонентов обычно определяется двух-, трехзвенной векторной размерной цепью; децентрировка подвижных компонентов – размерной цепью, состоящей из 5-6 звеньев и значительно реже - из большего числа звеньев.

На наружной поверхности каждого диска вдоль его образующей нанесена риска и заполнена непрозрачным запуском. В процессе проведения эксперимента все двадцать дисков смешивались в темноте и высыпались в технологическую тару. Затем также, произвольно, диски брались из технологической тары и вслепую устанавливались в прозрачный стакан. По угловой шкале, нанесенной на стакане, против рисок на дисках производились отсчеты углов. После снятия отсчетов диски высыпались из стакана, а на их место устанавливались новые из числа оставшихся. Измерения проводились до тех пор, пока 20 дисков не были использованы в работе. Затем все диски перемешивались, снова высыпались в технологическую тару. Последующая работа протекала аналогично описанной выше.

При определении характера ориентации векторных технологических погрешностей в полистироловый стакан по описанной методике устанавливались 5 дисков по сто раз каждый.

В процессе проведения эксперимента были измерены модули эксцентриситетов в пяти оправках $|\bar{r}_1| \div |\bar{r}_5|$, применяемых при сборке любительских объективов и углы $\varphi_1 \div \varphi_5$, задающие их направления. Затем

были построены 100 векторных размерных цепей, образец одной из которых представлен на рис.2.2.

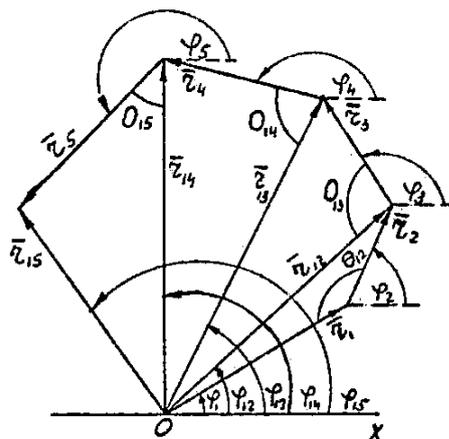


Рис.2.2. Размерная цепочка, состоящая из пяти векторов

Из построенных таким образом размерных цепей находились модули суммарных векторов эксцентриситетов $|\bar{r}_{12}|, |\bar{r}_{13}|, |\bar{r}_{14}|, |\bar{r}_{15}|$, углы $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{15}$, определяющие их направления, а также углы $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}$ между двумя последовательными складываемыми векторами.

С учетом полученных данных были построены полигоны распределений всех измеренных углов: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, определяющих направления складываемых векторов и углов $\varphi_{12}, \varphi_{13}, \varphi_{14}, \varphi_{15}$, определяющих направления суммарных векторов.

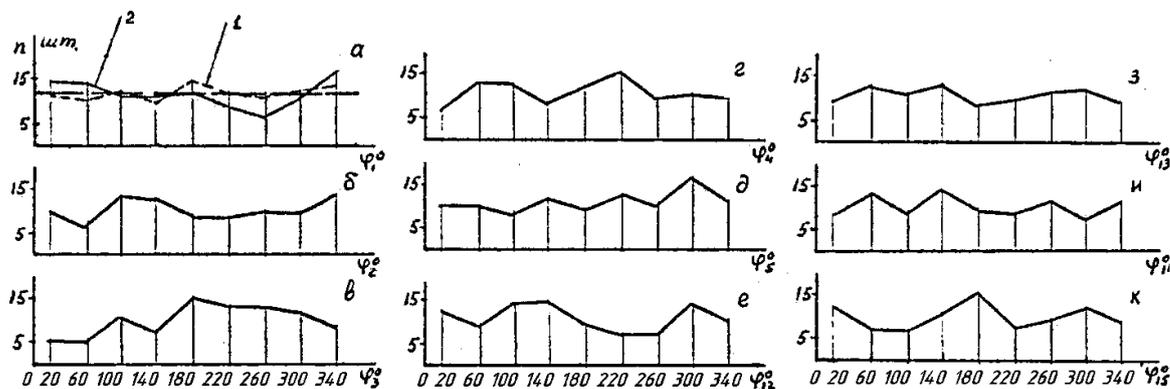


Рис.2.3. Полигоны распределений углов

Из рис.2.3 следует, что характер изменения эмпирических кривых распределений углов $\varphi_1 \div \varphi_5$ примерно одинаков. Сравнение этих кривых с теоретическим законом равномерного распределения позволяет предположить, что они вполне могут быть им описаны.

Для уточнения характера распределения углов объем выборки при определении угла φ_1 , был увеличен до 200. Из рис.2.3 видно, что случайные