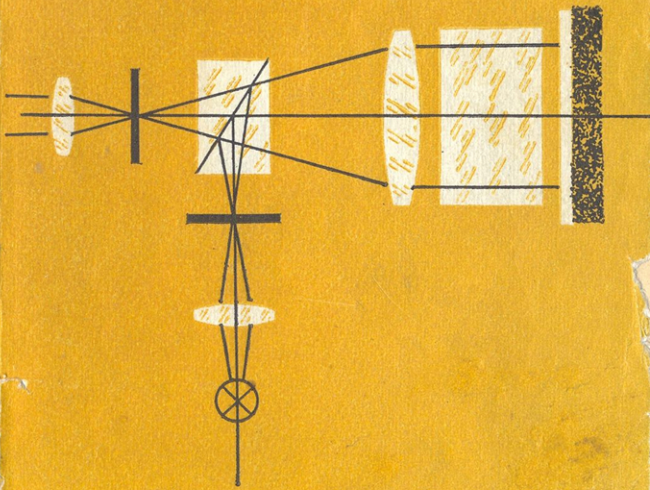
В. А. Афанасьев, А. М. Жилкин, В. С. Усов

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ



В. А. Афанасьев, А. М. Жилкин, В. С. Усов

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Под редакцией А. М. Жилкина

МОСКВА «НЕДРА» 1982

535.8:528

Афанасьев В. А., Жилкин А. М., Усов В. С. Автоколлимационные приборы. М., Недра, 1982, 144 с.

Описываются системы конструкций фотоэлектрических коллиматоров для инженерно-геодезических работ. Попутно рассматриваются теория автоколлимации пучков лучей, расчетные соотношения между габаритами труб, автоколлиматоров и отражателей. Освещаются принципы автоматизации контроля линейных и угловых измерений в инженерной геодезии. Излагаются вопросы поверок приборов контроля и измерения отдельных узлов и деталей. Затронуты и сформулированы вопросы действия автоколлиматоров и влияние рефракции луча в воздухе.

Для специалистов, работающих в области инженерной геодезии, приборостроения и машиностроения.

Табл. 6, ил. 76, список лит. — 22 назв.

Рецензент — д-р техн. наук *И. П. Заказнов* (МВТУ им. Н. Э. Баумана)

Владимир Александрович Афанасьев

Александр Михайлович Жилкин

Вадим Сергеевич Усов

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Редактор издательства Н. Т. Куприна
Обложка художника Л. Н. Курьеровой
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технический редактор Л. Я. Голова
Корректор К. С. Торопцева

ИБ № 4871

Сдано в набор 22.04.82. Подписано в печать 22.07.82 Т-09798
Формат 60×90¹/₁₆ Бумага типографская № 2
Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 9,0
Усл. кр.-отт. 9,25 Уч.-изд. л. 9,0 Тираж 2400 экз.
Заказ 136/5044—15. Цена 45 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12. Третьяковский пр., 1/19.
Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

А 1902020000—292 / 043(01)—82 90—82

© Издательство «Недра», 1982

Книга «Автоколлимационные приборы» знакомит читателя с современными автоколлимационными методами измерений в геодезии, приборостроении, машиностроении и научных исследованиях на базе серийно выпускаемых автоколлимационных средств измерений, а также содержит сведения о путях совершенствования этих средств в части расширения их функциональных возможностей и автоматизации измерений.

В первой главе кратко рассматриваются конструктивные особенности отдельных узлов визуальных автоколлиматоров. Вследствие ограниченного объема книги здесь не рассматриваются отдельно методы габаритных и аберрационных расчетов оптических систем автоколлиматоров, изложенные в различных монографиях и учебных пособиях по прикладной оптике. Из большого числа известных методов автоколлимационных измерений в этой главе, в основном, изложены методы измерений параметров оптических деталей, применяемых в оптическом приборостроении. В этих методах измерения указанных параметров производятся, по существу, путем оценки угловых положений или расходимости (расфокусировки) световых пучков, сформированных поверхностями оптических деталей или отраженных плоскими зеркалами. При этом световые пучки формируются автоколлиматорами в виде параллельных пучков на небольшие расстояния. Для осуществления таких измерений приемлемы серийно выпускаемые визуальные автоколлиматоры и автоколлимационные насадки к оптическим трубам геодезических инструментов.

Применение специальных отражателей — зеркально-призменных и зеркально-линзовых позволяет осуществлять более сложные автоколлимационные измерения, например, контроль прямолинейности, плоскостности и соосности. Во второй главе рассмотрены методы расчета таких отражателей, а также способы фокусировки автоколлиматоров, позволяющие существенно уменьшить нестабильность визирных линий. При использовании традиционных методов фокусировок зрительных труб с автоколлимационными насадками указанная нестабильность вызывает значительные погрешности измерений. Приведенные в этой главе методы расчета оптических систем автоколлимационных приборов применимы для расчета измерительных систем, позволяющих одновременно контролировать угловые и линейные величины. Такой контроль необходим, в частности, в инженерной геодезии и машиностроении.

Третья глава посвящена анализу работы фотоэлектрических автоколлиматоров. Рассмотрены основные характеристики отечественных и зарубежных серийных фотоэлектрических автоколлиматоров. Основное внимание уделено особенностям формирования лазерного излучения в фотоэлектрических автоколлимационных измерительных системах и работе фотоэлектрического анализатора корреляционного типа, обладающего определенными преимуществами перед другими анализаторами. В конце главы даны примеры оптимизации отдельных параметров автоколлиматоров с корреляционными анализаторами, расчета сканирующих устройств и проведена оценка эффективности работы цифровых и аналоговых фотоэлектрических автоколлиматоров.

Книга предназначена для разработчиков оптических измерительных систем, геодезистов и специалистов измерительных лабораторий и участков цехов машиностроительной и приборостроительной промышленности. Разделы книги, посвященные методам расчета отдельных узлов автоколлиматоров, могут быть использованы студентами и аспирантами приборостроительных специальностей вузов.

Первая глава написана проф. В. А. Афанасьевым, вторая — проф. В. С. Усовым. Материалы обеих глав содержат, в основном, оригинальные результаты исследований авторов. А. М. Жилкиным написаны предисловие, введение и третья глава. Параграфы 3 и 7 третьей главы написаны совместно с инженерами А. Е. Здобниковым и А. Б. Шерешевым.

При подготовке рукописи к печати активное участие приняли Л. П. Мешалина и В. М. Афанасьева.

Технический прогресс в области инженерной геодезии, машиностроении и приборостроении во многом зависит от степени внедрения новых технических средств и методов контроля. К одним из таких средств относятся автоколлимационные приборы, дальнейшее совершенствование которых позволит поднять эффективность производств, связанных с прецизионными измерениями. В основу автоколлимационных методов измерений положено формирование светового пучка в прямом и обратном ходах (посылаемого на измеряемый объект и возвращенного) одним объективом коллиматора. При использовании в качестве отражателей плоских зеркал автоколлимационный метод сохраняет преимущества коллимационного: отсутствие необходимости перефокусировки и изменения линейного увеличения изображения индекса во время измерений и, кроме этого, позволяет существенно уменьшить габариты измерительных установок. Например, при измерениях углового положения зеркала, закрепленного на объекте, коллиматорным методом должно использоваться два коллиматора, один из которых формирует изображение индекса в параллельных пучках, а второй — само изображение на измерительной сетке. В этом случае чувствительность к повороту объекта будет удвоенной в плоскости расположения обоих коллиматоров и зеркала и уменьшенной в перпендикулярной плоскости в зависимости от угла между оптическими осями коллиматоров. При использовании же автоколлимационного метода чувствительность в обеих плоскостях будет одинаковой, что является также его преимуществом.

Одновременно с развитием автоколлимационных методов с использованием параллельных световых пучков развивались аналогичные методы в сходящихся пучках. Последний метод до настоящего времени применяется, в основном, для измерений продольных смещений. Благодаря предложению проф. М. М. Русинова использовать нерасстраиваемые отражатели в 60-е годы этот метод получил развитие применительно к измерениям поперечных смещений. В результате развития этой идеи проф. В. С. Усовым была разработана методика анализа оптических автоколлимационных систем для измерения поперечных смещений и предложен ряд новых технических решений по усовершенствованию нерасстраиваемых отражателей. Указанные работы существенно расширили область использования автоколлимационных методов и позволили в ряде случаев заменить ими визирные методы, используемые при измерениях непрямо-

линейности. Такая замена привела к существенному увеличению точности измерений за счет постоянства масштаба автоколлимационных изображений индексов и удвоенной чувствительности по сравнению с визирным методом.

Развитые в последние десятилетия фотоэлектрические методы анализа автоколлимационных изображений индексов позволили весьма сильно повысить точность и скорость измерений автоколлимационными методами, а также расширить оптический диапазон их работы. Поскольку в разработанных фотоэлектрических автоколлиматорах, в основном, используются оптические схемы визуальных, то они также сохраняют отмеченные преимущества последних. Кроме этого, возможность дистанционной передачи измерительной информации в виде электрических сигналов и обработки их на ЭВМ позволяет использовать автоколлимационные методы в информационно-измерительных системах.

Использование в современных фотоэлектрических автоколлиматорах лазерных источников света позволило, в свою очередь, увеличить их помехозащищенность и дальность действия.

При использовании визуальной или фотоэлектрической регистрации автоколлимационный метод измерения, как правило, включает следующие операции, осуществляемые в средствах измерений:

формирование световой марки путем освещения индекса, который может быть выполнен, например, в виде темного или прозрачного штриха, сетки, диафрагм различной формы и т. д.; в случае использования в качестве осветителя лазера, в качестве световой марки может быть также использовано сечение сформированной конденсором каустики лазерного излучения или светящаяся площадка полупроводникового лазера;

формирование автоколлимационного изображения световой марки в плоскости анализа объективом коллиматора или микроскопа в обратном ходе световых пучков, при этом сформированные в прямом ходе объективами световые пучки отражаются от измеряемой поверхности или специальных отражателей; в зависимости от вида измерений световые пучки могут иметь при этом угловые, поперечные или продольные смещения, что приводит к смещению или расфокусировке автоколлимационного изображения световой марки; угловые измерения производятся при параллельных световых пучках на выходе объектива, поперечные и продольные смещения нерасстраиваемых отражателей, а также продольные смещения отражающих поверхностей — путем формирования на них промежуточных изображений световых марок, т. е. в сходящихся световых пучках;

определение значений смещений автоколлимационных изображений в плоскости анализа по сеткам, с помощью оптических микрометров или степени расфокусировки по смещению окулярной выдвижки; в случае использования специальных фото-

электрических анализаторов — преобразование измерительной информации в электрические сигналы и их дальнейшая обработка.

Отметим, что для получения реальной эффективности работы постоянно усложняющихся фотоэлектрических автоколлимационных приборов при их расчете и конструировании необходим тщательный анализ оптимальности параметров отдельных узлов с учетом их взаимодействия. Основным фактором при этом, как и при конструировании других измерительных приборов, являются их технико-экономические факторы. Например, использование в автоколлиматорах газовых лазеров, стоимость которых намного превышает стоимость тепловых источников света, должно быть оправдано экономически только путем улучшения технических параметров: увеличения точности, производительности, надежности и др.

Глава 1.

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

1.1. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ОКУЛЯРЫ, РАСЧЕТ СЕТОК И ШКАЛ

Одним из основных элементов автоколлимационных приборов является автоколлимационный окуляр, главное назначение которого состоит в формировании световой марки и создании необходимого увеличения для наблюдений ее автоколлимационного изображения в плоскости сетки. Для этого автоколлимационные окуляры в отличие от обычных снабжаются светоделительными устройствами в виде полупрозрачных пластинок, светоделительных призм-кубиков или призм других видов.

Большинство автоколлимационных окуляров получило наименование по фамилиям авторов, предложивших их конструкцию, например, известны автоколлимационные окуляры: Аббе, Гаусса, Линника, Тудоровского, Захарьевского, Монченко и др. Наиболее широкое применение в практике получили автоколлимационные окуляры Аббе, Гаусса, Монченко и окуляры с куб-призмой.

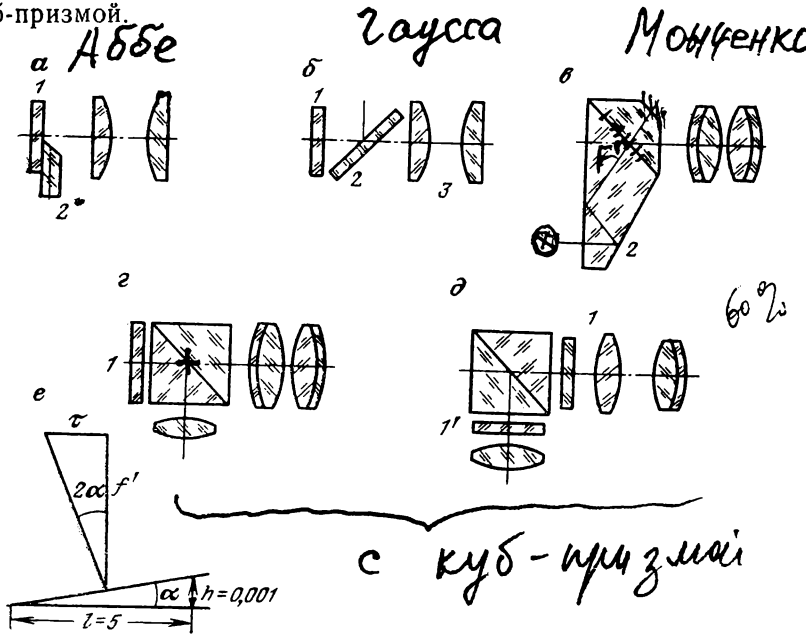


РИС. 1

Автоколлимационный окуляр Аббе, применяемый, например, в зрительных трубах рефрактометров ИРФ-23, гониометров, оптиметров и других приборов (рис. 1,*а*), представляет собой обычный окуляр, к шкале или сетке *1* которого приклеена прямоугольная призма *2* с зеркальным покрытием гипотенузной грани. Одним из недостатков окуляра Аббе является экранирование призмой до половины углов поля и смещение автоколлимационного изображения марки от центра поля.

В автоколлимационном окуляре Гаусса (рис. 1,*б*) светоделительным элементом служит полупрозрачная пластинка *2*, установленная под углом 45° к оптической оси, чем устраняются вышеупомянутые недостатки окуляра Аббе, однако пластинка создает двоение изображения и большую потерю света (до 85%). Кроме того, пластинка *2*, установленная между окуляром *3* и сеткой *1*, не позволяет применить короткофокусный окуляр.

Автоколлимационный окуляр Монченко (рис. 1,*в*) имеет призму *2*, склеенную из двух отдельных призм, а плоскость склейки образует с оптической осью угол 45°. На одной из склеиваемых поверхностей призмы, обращенной в сторону объектива, нанесены зеркальные штрихи сетки. Ее наклон к оптической оси позволяет более точно установить положение резкого изображения и фокальной плоскости объектива трубы. Пучок лучей от лампы после отражения от зеркальной поверхности призмы освещает зеркальные штрихи сетки, а прошедшая часть пучка выходит через срезанный край другой призмы. Благодаря этому потери света в окуляре Монченко уменьшены до 60—65%.

Автоколлимационный окуляр с куб-призмой, склеенной из двух одинаковых равнобедренных прямоугольных призм, на гипотенузной грани одной из которых нанесен полупрозрачный светоделительный слой, выполняется с двумя видами расположения сеток. В первом случае (рис. 1,*г*) сетка *1* размещается у грани куб-призмы, обращенной к объективу (или наносится на этой грани), во втором (рис. 1,*д*) — используются две сетки: одна *1′* расположена между источником света и призмой и другая *1* — между призмой и окуляром. В первом случае, как и для окуляра Гаусса, требуется применять более длиннофокусный окуляр и оптический расчет вести с учетом толщины и показателя преломления стекла призмы.

Во втором случае могут быть использованы короткофокусные окуляры. Сетка *1′* является окулярной автоколлимационной маркой и часто заменяется щелевой диафрагмой, отсчетной шкалой или любой формой штрихов, удобной для измерений. Потери света автоколлимационных приборов с куб-призмами достигает 90%.

Автоколлимационные приборы с окулярами Монченко и с куб-призмой обеспечивают удовлетворительные автоколлимационные изображения сеток или марок при удалении плоского зеркала от трубы до 40—50 м.

Большинство автоколлимационных труб снабжено оптическими или винтовыми микрометрами с ценой деления барабанов, выраженной в угловой или линейной мере.

При расчете цены деления отсчетной шкалы или барабана микрометра должны быть строго известны фокусные расстояния и угловые поля объектива и окуляра. В большинстве случаев фокусные расстояния объективов, установленных в автоколлиматорах, имеют диапазон от 200 до 2000 мм и окуляров — от 17 до 30 мм. Углы поля объективов обычно находятся в пределах 1—2°. Окуляры с указанными фокусными расстояниями имеют выходные зрачки на удалении, удобном для ведения наблюдения в трубу. Диаметр выходного зрачка должен быть не более 2 мм.

Толщина d штриха сетки, шкалы или их автоколлимационные изображения при рассмотрении через окуляр должны быть не менее

$$d = \frac{0{,}1}{\Gamma}, \tag{1.1}$$

где 0,1 мм — разрешающая сила глаза в линейной мере, или толщина штриха, рассматриваемая невооруженным глазом; Γ^{x} — увеличение окуляра, равное $\frac{250}{f'_{ок}}$, где $f'_{ок}$ — фокусное расстояние окуляра.

Например, при $f_{ок}=20$ мм толщина штриха должна быть не менее $d=0{,}008$ мм.

Для повышения точности наведения на штрих или перекрестие часто пользуются биссектором на сетке, представляющим два параллельных штриха с расстоянием между ними, равным двум-трем толщинам штриха.

Размер окулярной сетки D определяется, исходя из углового поля 2ω и фокусного расстояния f' объектива,

$$D = 2f' \operatorname{tg} \omega. \tag{1.2}$$

Цена деления τ отсчетной шкалы в линейной мере рассчитывается по формуле

$$\tau = f' \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

или

$$\tau = \frac{\alpha f'}{\rho''}, \tag{1.3}$$

где α — цена деления в угловой мере, определяемая выражением

$$\alpha = \frac{\tau}{f'} \rho'', \quad \text{где} \quad \rho'' = 206\,265''.$$

Для удобства отсчета по шкале или барабану микрометра подбирают цену деления в линейной или угловой мере, выра-

женную целым значением. Например, если $\tau = 0{,}01$ мм при $f' = 500$ мм, то в угловой мере $\alpha = 4''$.

Чтобы рассчитать цену деления барабана микрометра в угловой мере, например, равной $\alpha = 1''$, нужно задаться числом делений на барабане и шагом винта. Допустим, что шаг винта 1 мм и число делений на барабане 100. При этом поворот барабана на одно деление вызовет смещение сетки на 0,01 мм, тогда необходимое фокусное расстояние объектива определится из выражения (1.3)

$$f' = \frac{\tau}{\alpha}\rho''. \qquad (1.4)$$

При выбранных значениях τ и α $f' = 2063$ мм.

Рассмотрим другой пример: в трубках оптиметров (§ 1.6) автоколлимационное изображение отсчетной шкалы от плоского зеркала перемещается в поле окуляра при наклоне зеркала, связанного с мерительным стержнем прибора, касающимся поверхности контролируемой детали.

Отсчетная шкала имеет 200 делений с ценой деления $\tau = 0{,}08$ мм. При перемещении мерительного стержня на $h = 0{,}001$ мм автоколлимационное изображение шкалы по отношению к неподвижному индексу смещается на одно деление, равное 0,001 мм. При фокусном расстоянии объектива автоколлимационной трубки оптиметра $f' = 200$ мм и длине плеча зеркала $l = 5$ мм угол наклона последнего будет

$$\alpha = \frac{h}{l}\rho'',$$

а угол смещения автоколлимационного изображения шкалы 2α

Из рассмотрения рис. 1,*е* можно написать

$$\frac{\tau}{h} = \frac{2f'}{l} = k,$$

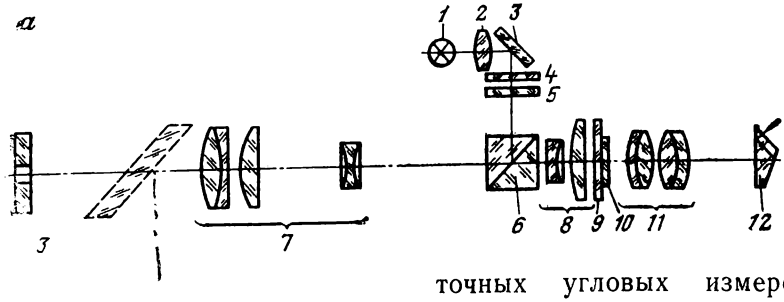
где k — передаточное отношение между перемещением мерительного стержня и смещением автоколлимационного изображения шкалы, равное 80.

С учетом увеличения окуляра Γ передаточное отношение становится равным $k\Gamma$. Рассмотренные элементы являются типичными для автоколлиматоров, остальные элементы, например осветители, объективы и др., могут не отличаться от аналогичных элементов других оптических приборов.

Требования на допустимые остаточные аберрации объективов автоколлиматоров, разъюстировки их узлов и неплоскостности зеркал достаточно подробно рассмотрены в литературе

1.2. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В табл. 1 приведены основные параметры автоколлиматоров с визуальным отсчетом, выпускаемых отечественной промышленностью. Все автоколлиматоры, кроме АКУ, предназначены для



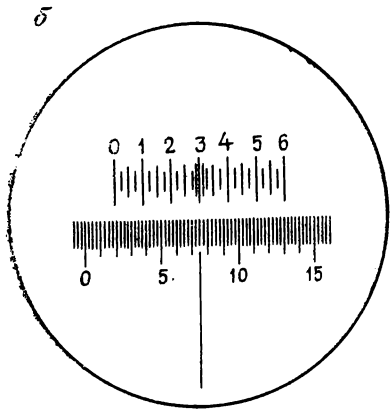


РИС. 2

точных угловых измерений, проверки неплоскостности и непрямолинейности направляющих, для исследования лимбов угломерных приборов с применением многогранных призм и для других измерений. Автоколлиматор АКУ предназначен специально для контроля угловых мер и углов призм способом сравнения контролируемой детали с образцовой.

Автоколлиматоры с шифром АК-1У, АК-0,5У и АК-0,25У являются серийными и имеют улучшенные характеристики по сравнению с подобными шифрами без «У».

На рис. 2,*а* показана оптическая схема автоколлиматора АК-0,25. Пучок лучей от источника света *1* при помощи конденсора *2*, зеркала *3* и светофильтра *4* освещает марку *5*, находящуюся в фокусе объектива *7*, из которого лучи выходят параллельным пучком. Куб-призма *6* со светоделительным слоем на склейке служит для направления пучка лучей, идущего от марки к объективу *7*, и пропускания пучка, отраженного плоским зеркалом *13* в обратном следовании к оптическому окулярному микрометру, состоящему из линзового компенсатора *8*, секундной шкалы *9* и минутной *10*. Далее пучок лучей идет в окуляр *11* и полупентапризму *12*, которая изменяет ход лучей на 45° и создает удобства для наблюдений. Оптические схемы автоколлиматоров АК-0,5 и АК-1 аналогичны этой.

К автоколлиматору прилагается диагональное зеркало, изменяющее направление визирной линии на 90°. На рис. 2,*а* оно показано штрихами.

На рис. 2,*б* показано поле автоколлиматора, рассматриваемое через окуляр. Отсчет в данном случае соответствует 3′7, 5″.

Малогабаритный автоколлиматор МГА (рис. 3) имеет весьма компактную конструкцию с ломаным ходом лучей в трубе и в

ТАБЛИЦА 1

Параметры	Шифр прибора							
	АК-1	АК-1У	АК-0,5	АК-0,5У	АК-0,25	АК-0,25У	МГА	АКУ
Фокусное расстояние объектива, мм	250	250	400	500	1000	1000	500	500
Диаметр входного отверстия объектива, мм	30	25	40	40	55	60	50	22
Увеличение трубы, крат	20	16	30	33	50	65	25	33,6
Поле зрения, градус	2	4	1	2	0,75	1	1,1	1,15
Предел измерения при расстоянии до зеркала 2 м, угл. мин	12	40	10	20	6	10	6	10
Цена деления секундной шкалы компенсатора, угл. с	1	1	0,5	0,5	0,25	0,25	1	0,5
Цена деления минутной шкалы, угл. с	60	60	30	30	15	15		30
Погрешности показаний, угл. с	$\pm\left(1+\frac{\varphi}{100}\right)$	—	$\pm\left(0{,}5+\frac{\varphi}{100}\right)$	—	$\pm\left(0{,}25+\frac{\varphi}{100}\right)$	—	$\pm\left(1+\frac{\varphi}{100}\right)$	$\pm\left(0{,}5+\frac{\varphi}{100}\right)$
Масса прибора на низком штативе, кг	5	—	10	—	16	—	8,5	10
Габариты прибора, мм:								
длина	320	488	450	545	545	530	245	320
ширина	120	175	170	175	225	175	200	140
высота	150	185	170	185	170	185	230	340

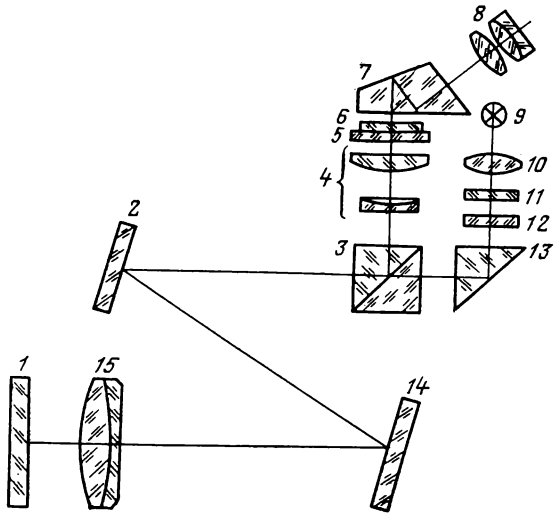


РИС. 3

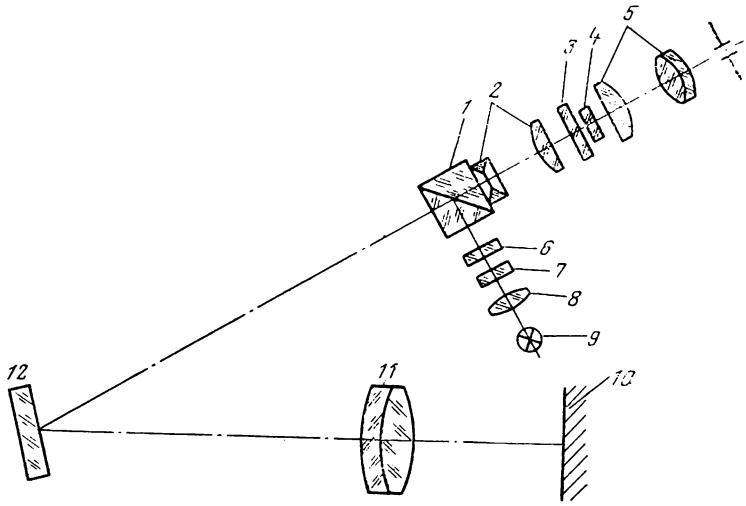


РИС. 4

окулярном устройстве. Пучки световых лучей, исходящих из световой марки *12*, освещенной источником света *9* с помощью конденсора *10* и светофильтра *11*, направляются прямоугольной призмой *13* на светоделительный кубик *3*, проходят его и, после отражения от двух зеркал *2* и *14*, попадают в объектив *15*. Параллельный пучок лучей, вышедший из объектива, отражается от плоского зеркала *1* и идет обратно до светоделительного

слоя кубика. Отраженный кубиком пучок проходит компенсатор *4* и строит автоколлимационное изображение в плоскости отсчетных шкал (минутной *6* и секундной *5*). Наблюдение автоколлимационного изображения световой марки и снятие отсчетов производится с помощью окуляра *8* и полупентапризмы *7*.

На рис. 4 представлена оптическая схема автоколлиматора АКУ. Основное отличие ее от оптических схем АК-1, АК-05 и А-0,25 состоит в ломаном ходе лучей, измененном зеркалом *12* на 30°. Этим самым созданы более компактная конструкция прибора и удобство работы для наблюдателя.

Пучок лучей в этом автоколлиматоре от источника *9* после прохождения конденсора *8* и светофильтра *7* освещает автоколлимационную марку *6*, находящуюся в фокальной плоскости объектива *11*. Марка представляет собой биссектор, нанесенный на стеклянной пластинке. Отразившись от светоделительного слоя куб-призмы *1* и зеркала *12*, пучок лучей попадает в объектив и, пройдя его, падает на контролируемую зеркальную поверхность *10*, которая отражает пучок и посылает его обратно через объектив, куб-призму и оптический компенсатор *2* на шкалы *3* и *4*, помещенные в фокальной плоскости объектива. Автоколлимационное изображение марки строится на шкале. Оптический окулярный микрометр состоит из линзового компенсатора *2*, секундной *3* и минутной шкал *4* и окуляра *5*. Положительная линза компенсатора, так же как и в других автоколлиматорах, жестко связана с секундной шкалой и может перемещаться. Контролируемая деталь и образцовая мера устанавливаются перед объективом на вращающемся столике.

При массовом контроле угловых мер поступают следующим образом: на столик прибора устанавливают образцовую меру и вращают столик до появления автоколлимационного изображения марки в центре поля. При таком положении по шкалам микрометра берут отсчет. Затем, удалив образцовую меру, устанавливают на столик контролируемую деталь и вторично берут отсчет, приводя автоколлимационное изображение в центр поля. Разность отсчетов определяет значение угла отклонения контролируемой меры от образцовой. Путем суммирования или вычитания этой разницы из известного размера образцовой находят действительный угол контролируемой меры. Для контроля оптических делительных устройств, зуборезных станков и других видов контроля в машиностроении отечественная промышленность изготовляет автоколлимационные теодолиты марки ЮС-40 и ЮС-41, которые представляют собой теодолиты типа ТБ-1, снабженные автоколлимационными окулярами.

В табл. 2 приведены основные параметры автоколлиматоров с визуальным отсчетом, выпускаемых английской фирмой «Хильгер и Ваттс» и предназначенных для контроля прямолинейности, плоскостности и малых линейных или угловых смещений.

В автоколлиматорах ТА-60 и ТА-130 отсчет производится по

ТАБЛИЦА 2

Шифр	Максимальная длина трассы, м	Цена деления микрометра, угл. с	Предел измерения, угл. мин	Максимальная погрешность измерения	
				во всем диапазоне, угл. с	в пределах 1″, угл. с
ТА-1	15	6	10	2	0,5
ТА-50	30	6	10	2	0,5
ТА-51	30	6	10	2	0,5
ТА-60	36	60	60	30	—
ТА-121	24	30	20	5	1,0
ТА-130	12	30	60	6	—

окулярной сетке, рассматриваемой в поле зрения. В остальных автоколлиматорах с визуальным отсчетом имеются микрометры.

Народное предприятие «Карл Цейсс», Йена (ГДР) серийно выпускает автоколлиматор АКF=0—0,5. Фокусное расстояние его объектива 430 мм, диаметр входного зрачка объектива 50 мм, увеличение трубы $34{,}5^{x}$, максимальное удаление зеркала от объектива автоколлиматора 20 м, цена деления отсчетного устройства 0,5″ и предел измерения ±10′. Средняя квадратическая погрешность измерений составляет ±2″.

Оптическая схема автоколлиматора АКF-0—0,5 с упрощенной осветительной системой показана на рис. 5. Крест световой марки *9* освещается от источника *13* через светофильтр *12*, кон-

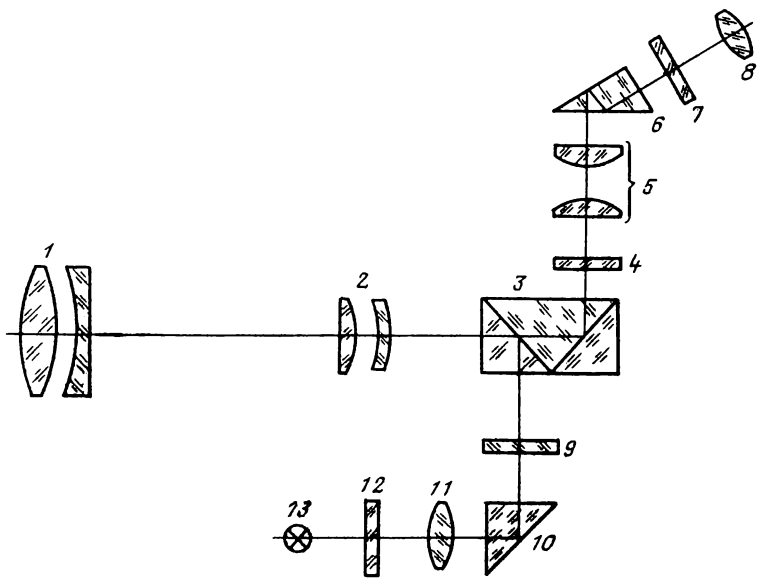


РИС. 5

денсор *11* и призму *10*. Марка расположена в фокальной плоскости объектива *1, 2*. Пучок лучей, идущих от марки, падает на светоделительную призму *3* и направляется ею в объектив трубы.

После отражения от зеркала пучок возвращается обратно, проходит светоделительный слой призмы, отражается ее зеркальной поверхностью и строит автоколлимационное изображение на шкале *4*, находящейся в фокальной плоскости объектива. Оборачивающая система *5* и полупентапризма *6* передают автоколлимационное изображение марки на окулярную сетку *7*, которое рассматривается в окуляр *8*.

Фирма «Коллморген» (США) серийно выпускает автоколлиматоры К122, К221, К222.

Автоколлиматор К122 снабжен объективом с фокусным расстоянием 560 мм и диаметром 45,7 мм. Увеличение трубы 44^{x}, диапазон измерений $\pm 2{,}5'$, цена деления отсчетной шкалы — $0{,}1''$, масса прибора 4,3 кг.

1.3. ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ДИСПЕРСИИ СТЕКЛА

Метод автоколлимации, использованный впервые Аббе в 1874 г. для измерения показателя преломления и дисперсии стекла, является одним из широко принятых методов в оптико-механической промышленности. Точность измерения методом автоколлимации во многом зависит от качества полировки и плоскостности отражающих рабочих граней призмы, подготавливаемой к проверке, от точности применяемого гониометра-спектрометра и квалификации исполнителя работ.

Сущность метода состоит в том, что при помощи автоколлимационной зрительной трубы гониометра-спектрометра последовательно получают два автоколлимационных изображения креста окулярной сетки: от передней грани призмы AC и от задней — AB (рис. 6).

При отражении от грани AB пучок лучей претерпевает преломление на грани AC. Разность отсчетов по лимбу спектрометра при двух положениях трубы *1* и *2* составит угол отклонения ε_λ. Угол преломления ε', построенный взаимно перпендикулярными направлениями к граням AB и AC, становится равным преломляющему углу призмы θ, который должен быть известен из предварительных измерений на том же приборе и также методом автоколлимации.

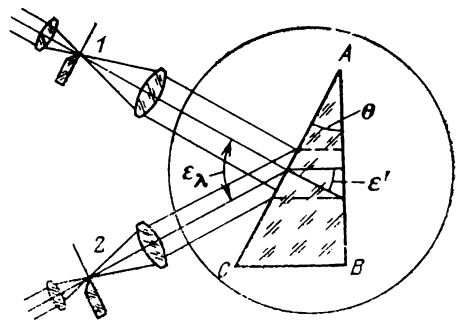


РИС. 6

Имея известные углы ε_λ и θ, определяют показатель преломления по формуле

$$n_\lambda = \frac{\sin \varepsilon_\lambda}{\sin \theta} \qquad (1.5)$$

Параметры дисперсии оптических стекол (коэффициенты дисперсии, частная дисперсия и др.) вычисляются с использованием показателей преломления, полученных на основе измеренных величин углов отклонения монохроматических световых пучков, имеющих длины волн, предусмотренные действующим ГОСТ 3514—76.

Для увеличения яркости автоколлимационного изображения креста нитей от задней грани *AB* (см. рис. 6) последняя может иметь отражающее покрытие.

1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Однородность оптического материала можно характеризовать отношением угла φ разрешения объектива автоколлиматора, в параллельный пучок которого введена заготовка, к углу φ_0 разрешения объектива без влияния заготовки. Для совершенного объектива угол разрешения должен быть равен $\varphi_0 = \frac{140''}{D}$, где D — диаметр входного зрачка объектива, выраженный в мм.

Определение неоднородности может быть осуществлено на автоколлимационной установке, представленной на рис. 7.

Исследуемый материал в форме куска *5* (заготовки) с двумя полированными поверхностями с отклонениями от параллельности до 2′ помещается между объективом *4* трубы и плоским зеркалом *6*. Размер зеркала должен несколько превышать диаметр объектива. Через окуляр *1* рассматривают на сетке *2* автоколлимационное изображение штриховой миры *7*, формируемой с помощью светоделительного куба *3*. Штриховая мира освещается от источника *9* через конденсор *8*.

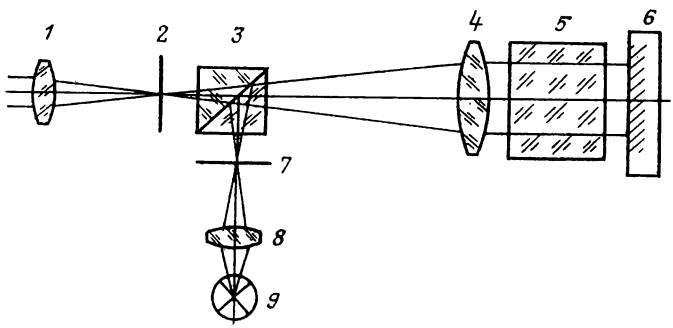


РИС. 7

По предельно разрешаемому квадрату миры, когда все четыре направления штрихов в данном квадрате видны раздельно, определяют угол разрешения φ. Удалив заготовку, таким же путем находят угол разрешения φ_0 свободного объектива. Из отношения $\frac{\varphi}{\varphi_0}$ устанавливают коэффициент, характеризующий степень однородности материала, по которому можно уже дать предварительную оценку его качества.

1.5. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ ПРИЗМ

Автоколлимационный метод измерения углов призм широко известен в оптической технике и осуществляется, главным образом, на гониометрах-спектрометрах. При наличии автоколлимационной трубы углы призмы могут быть измерены на любом углоизмерительном приборе, а некоторые виды призм — только при помощи автоколлиматора.

Отечественная промышленность выпускает гониометры следующих марок: ГС-30, ГС-10, ГС-5 и ГС-1М. Числа 30, 10, 5 и 1 показывают номинальную погрешность в угловых секундах.

В табл. 3 представлены характеристики гониометров-спектрометров.

Каждый гониометр-спектрометр снабжен двумя трубами — зрительной трубой и коллиматором. При установке в зрительную трубу автоколлимационного окуляра она становится автоколлимационной, пригодной к различным видам измерений. Помимо измерения углов призм на этих приборах можно про-

ТАБЛИЦА 3

Параметры	Марки			
	ГС-30	ГС-10	ГС-5	ГС-1М
Фокусное расстояние объектива, мм	250	250	400	674
Световой диаметр объектива, мм	40	40	50	70
Увеличение зрительной трубы с окуляром 9,8 мм	25,5[x]	25,5[x]	40,9[x]	69[x]
Угловое поле			50′	40′
Цена деления лимба	1°	20′	20′	10′
Цена деления отсчетного устройства	1′	1″	1″	0,5″
Расстояние между объективами зрительной трубы и коллиматора, мм	160	160	250	540
Высота прибора, мм	330	330	470	1000
Масса прибора, кг	14,5	20	49,3	350

изводить спектроскопические исследования прозрачных материалов.

В зависимости от требуемой точности определения углов призм выбирают соответствующий гониометр-спектрометр. Перед измерением угла призмы необходимо правильно установить ее на предметном столике прибора. Для этого призму устанавливают на столике так, чтобы смежные грани контролируемого угла были бы параллельны вертикальной оси вращения прибора, а автоколлимационные изображения креста сетки окуляра находились на одном уровне. Путем вращения столика с призмой при неподвижном положении автоколлимационной трубы или трубы при неподвижном положении столика с призмой производят последовательно наведения автоколлимационных изображений креста, полученных от обеих граней, и совмещают их с перекрестием сетки окуляра. Соответствующие отсчеты берут по лимбу при помощи отсчетного микроскопа с оптическим микрометром. Вращением маховичка оптического микрометра совмещают верхние и нижние диаметрально противоположные штрихи лимба и рассматривают в поле зрения положение вертикального индекса. Влево от индекса до ближайшего оцифрованного штриха будет число градусов, а число интервалов между верхним штрихом, по которому взято число градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180°, составит число десятков минут у ГС-5 и число полудесятков минут у ГС-1М.

На рис. 8 показано поле отсчетного микроскопа ГС-1М. Число минут отсчитывают по левому вертикальному ряду, секунды и доли секунд — по правому. На рис. 8 показан случай отсчета, соответствующий 76° 23′ 12,1″. Искомый угол призмы находится из выражения $\theta - 180 - \beta$, где β — угол, полученный из разности отсчетов по лимбу при наведении на две грани призмы.

Погрешность измерения угла определяется выражением

$$m_\theta = \sqrt{m_c^2 + m_л^2 + m_{уп}^2},$$

где m_c — средняя квадратическая погрешность совмещения автоколлимационного изображения креста с перекрестием сетки окуляра; $m_л$ — средняя квадратическая погрешность совмещения штрихов лимба; $m_{уп}$ — средняя квадратическая погрешность установки призмы на столике гониометра.

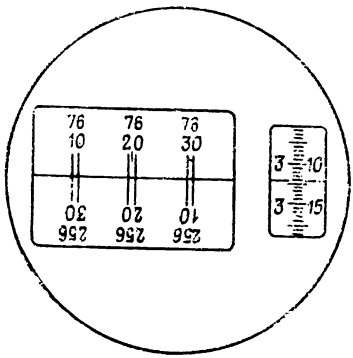


РИС. 8

В производстве автоколлимационный метод имеет широкое применение при использовании способа

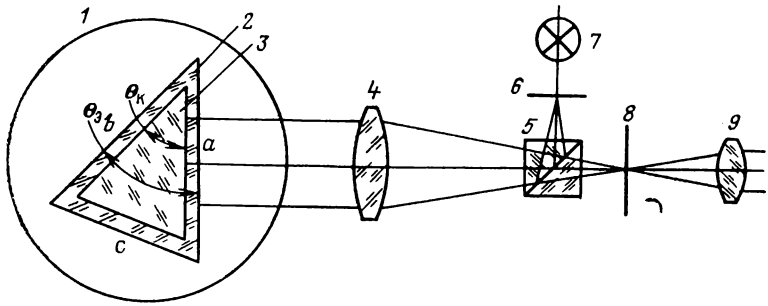


РИС. 9

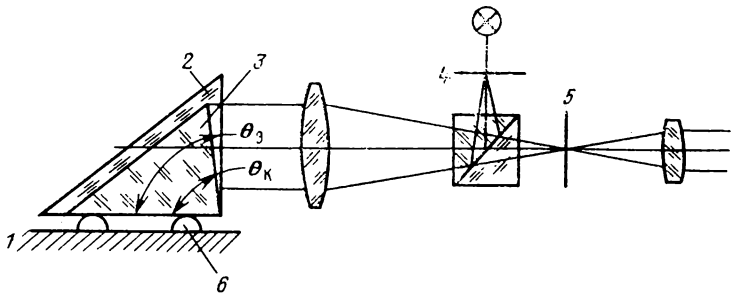


РИС. 10

сравнения углов контролируемой призмы или угловой меры с эталонной (или образцовой) призмой, углы которой определены с большей точностью на других приборах. Сравнение этих углов может быть осуществлено двумя способами: наложением призмы на призму (рис. 9) и путем установки грани контролируемой призмы строго параллельно грани эталонной (рис. 10).

В первом случае эталонная призма *2* (см. рис. 9) устанавливается на вращающийся столик *1*, а на нее накладывается контролируемая призма *3* параллельно соответствующими гранями граням эталонной. Эти грани освещаются световыми пучками, исходящими от источника света *7* и отраженными светоделительной гранью кубика *5*. При вращении столика через окуляр *9* в поле зрения трубы в плоскости окулярной шкалы *8* будут наблюдаться два автоколлимационных изображения марки *6*, образованных отраженными пучками лучей: один — от грани эталонной призмы и второй — от грани контролируемой (например грань *а*). То же самое будет повторяться после поворота столика другими гранями к объективу *4* автоколлиматора (грани *в* и *с*). Поворачивая столик, по окулярной шкале *8* измеряют углы α и β между смежными гранями эталонной и контролируемой призмой и по формуле $\theta_к = \theta_э + (\alpha - \beta)$ вычисляют искомый угол $\theta_к$ контролируемой призмы. Здесь $\theta_э$ — известный угол эталонной призмы.

Второй случай обеспечивает более высокую точность измерений. Для его осуществления на неподвижном столике *1* (рис. 10) необходима установка нескольких штифтов *6* со сферическими упорами, расположенными в одной плоскости. На эти упоры устанавливаются эталонная *2* и контролируемая *3* призмы. Так же как и в первом случае, по окулярной шкале *5* измеряют угол между двумя автоколлимационными изображениями марки *4*, полученными с помощью граней эталонной и контролируемой призм.

Искомый угол контролируемой призмы $\theta_к$ вычисляется по формуле

$$\theta_к = \theta_э + (\alpha_э - \alpha_к),$$

где $\alpha_э$ и $\alpha_к$ — отсчеты для эталонной и контролируемой призм по окулярной шкале.

При массовом контроле призм столик и автоколлиматор устанавливают по эталонной призме и фиксируют по окулярной шкале положение автоколлимационного изображения световой марки. На место эталонной призмы затем помещают контролируемые призмы и следят за тем, чтобы смещение автоколлимационного изображения марки по шкале не превышало установленный допуск.

1.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ

Для определения размеров деталей и калибровки концевых мер в производстве широко применяются вертикальные и горизонтальные оптиметры, снабженные автоколлимационными трубками [20].

Вертикальные оптиметры предназначены, главным образом, для измерения наружных размеров, а горизонтальные — для наружных и внутренних измерений размеров.

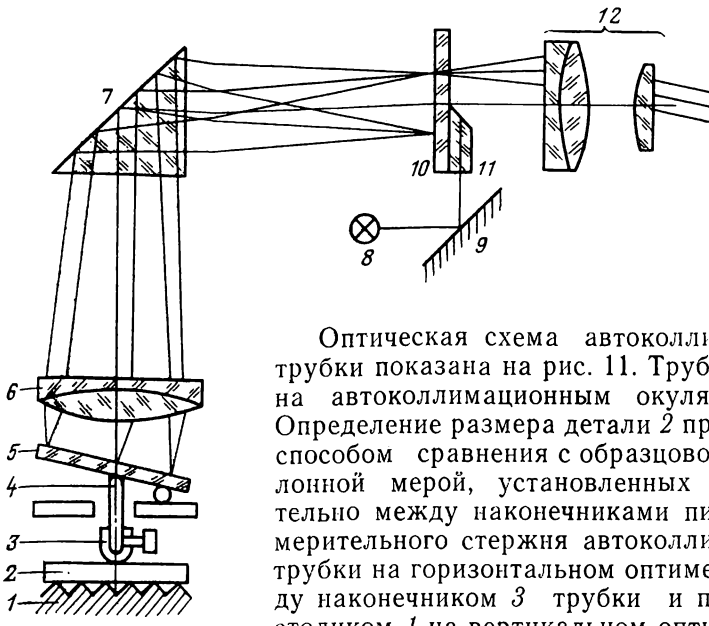
В табл. 4 приведены основные характеристики оптиметров.

Автоколлимационная трубка является основным узлом прибора. У вертикальных оптиметров она расположена вертикально, а у горизонтальных — горизонтально.

ТАБЛИЦА 4

Параметры	Вертикальный оптиметр ИКВ	Горизонтальный оптиметр ИКГ
Предельные наружные размеры:		
диаметр, мм	150	225
длина, мм	180	350
Расход шкалы, мм	±0,1	±0,1
Цена деления шкалы, мм	0,001	0,001
Габариты прибора, мм	300×300×500	600×400×340
Масса, кг	18	40

РИС. 11



Оптическая схема автоколлимационной трубки показана на рис. 11. Трубка снабжена автоколлимационным окуляром Аббе. Определение размера детали *2* производится способом сравнения с образцовой или эталонной мерой, установленных последовательно между наконечниками пиноли и измерительного стержня автоколлимационной трубки на горизонтальном оптиметре и между наконечником *3* трубки и предметным столиком *1* на вертикальном оптиметре (см. рис. 11). Отсчеты берутся по автоколлимационному изображению шкалы, находящейся обычно под осветительной призмой *11,* относительно неподвижного индекса, видимого в свободной части поля зрения окуляра *12.* Подсветка отсчетной шкалы на сетке *10* производится от лампы *8* или дневным светом, направленным зеркалом *9* на торец осветительной призмы *11.* Пучок лучей призмы *11* и *7* направляется на объектив *6,* который формирует его в виде параллельного. После отражения пучка от плоского зеркала *5,* закрепленного на измерительном стержне *4,* он формируется объективом в виде автоколлимационного изображения отсчетной шкалы на свободной части сетки *10,* где нанесен индекс.

Вследствие перемещения измерительного стержня автоколлимационной трубки оптиметра, вызванного отклонением размера контролируемой детали *2* от образцовой, зеркало *5* наклоняется на некоторый угол, что вызывает, в свою очередь, сдвиг автоколлимационного изображения отсчетной шкалы относительно неподвижного индекса.

Разность отсчетов по шкале, соответствующих образцовой и контролируемой деталям на предметном столе, дает возможность определить значение отклонения в размерах. Прибавляя или вычитая это значение из размера образцовой детали, получают действительный размер контролируемой детали. Определение размеров деталей на оптиметрах, как видно из вышеизложенного, производится обязательно при контак-

тировании измерительного наконечника с измеряемыми деталями, что не всегда допустимо.

Стремясь устранить этот недостаток, А. Ш. Шахвердов предложил пользоваться бесконтактным оптическим толщемером, состоящим из двух автоколлимационных микроскопов, установленных друг к другу навстречу объективами, визирные оси которых совмещены. При этом один из микроскопов закреплен и находится в неподвижном положении, а другой — снабжен индикатором и перемещается в заданных пределах Используя концевые меры и предельный расход индикатора, можно измерять детали различных размеров, получая их истинную величину или относительную, путем сравнения с образцовой деталью.

1.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Автоколлимационный метод позволяет успешно определить радиусы кривизны сферических поверхностей в широком диапазоне, начиная от 1 мм и кончая сотнями метров и даже несколькими километрами и более. Диапазон зависит от параметров автоколлимационных приборов и устройств, находящихся в распоряжении наблюдателя. Большие радиусы кривизны, соизмеримые с километром, соответствуют остаточной сферичности поверхности после обработки плоскопараллельных пластин: светофильтров, прижимных стекол, призм и других деталей.

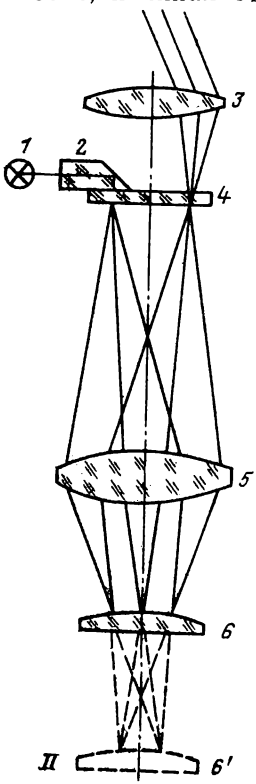


РИС. 12

Для сферических поверхностей с малыми радиусами кривизны (от 1 до 100 мм) применяют автоколлимационные микроскопы со сменными объективами. Автоколлимационный окуляр может быть использован любой конструкции, однако наилучший контраст автоколлимационного изображения марки получается при использовании окуляра типа Аббе. Некоторая децентрировка изображения, образуемая при этом, мала и ее можно не принимать во внимание.

На рис. 12 показана схема автоколлимационного микроскопа с контролируемой линзой *6*, имеющей сферическую поверхность. Измерение радиуса кривизны поверхности вогнутой или выпуклой сводится к получению двух изображений: одного — самой поверхности линзы и другого — автоколлимационного изображения марки от поверхнос-

ти линзы, для чего требуется изменить положение линзы или тубуса микроскопа по высоте. Разность отсчетов для этих двух положений составит величину радиуса кривизны. Если микроскоп снабжен измерительным винтом, то радиус кривизны можно измерить с погрешностью $\pm 0{,}01$ мм. Как видно из рис. 12, пучок лучей от источника *1* через осветительную призму *2* освещает марку, нанесенную на окулярную сетку *4* под призмой. От марки пучок лучей направляется через объектив *5* микроскопа на контролируемую поверхность линзы *6*. При первом положении *I* линзы в поле зрения окуляра *3* наблюдают автоколлимационное изображение марки, образованное отраженным пучком лучей от выпуклой поверхности, и при втором положении *II* — поверхность линзы. Чтобы лучше рассмотреть поверхность, отыскивают царапину или пылинку на ней, а при отсутствии таковых поверхность запыляют мелом или покрывают красящим веществом.

На рис. 12 нетрудно видеть, что измерение радиуса кривизны выпуклых сферических поверхностей ограничивается рабочим расстоянием — от предметной плоскости микроскопа до первой поверхности фронтальной линзы объектива. Поэтому, в зависимости от размера радиуса кривизны, требуется каждый раз подбирать соответствующий объектив. Для измерения радиусов кривизны вогнутых сферических поверхностей такого подбора объективов не требуется.

Измерение радиусов кривизны сферических поверхностей от 10 до 100 мм и больше может быть осуществлено на установке по схеме Франке и Розенталя, в которой пучок лучей делится на два, образуя два автоколлимационных изображения щели, и совмещение их в одно изображение может происходить в двух случаях: при отражении от контролируемой поверхности, находящейся в фокусе объектива коллиматора, и при совпадении центра кривизны сферической поверхности с фокусом того же объектива.

Оптическая схема установки показана на рис. 13. Пучок лучей от щели *4*, расположенной в фокальной плоскости объектива *6*, освещенной источником *1* через светофильтр *2* и конденсор *3*, проходит через объективы *6* и *7* автоколлиматоров. После выхода из объектива *7* сходящийся пучок лучей разбивается на две части разделительной призмой *9* и обе части направляются на зеркала *8* и *11*, после отражения от которых идут на контролируемую поверхность *10*. Отраженные контролируемой поверхностью оба пучка идут обратно по взаимно измененным путям, попадают в объективы *7* и *6* и, отразившись от полупрозрачного зеркала *5*, строят два размытых автоколлимационных изображения щели, рассматриваемых в поле зрения окуляра *12*. При совмещении контролируемой поверхности с фокальной плоскостью объектива *7* оба автоколлимационных изображения сливаются в одно. При перемеще-

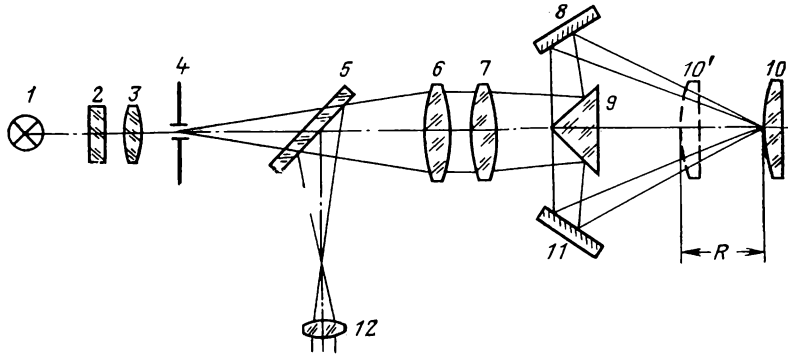


РИС. 13

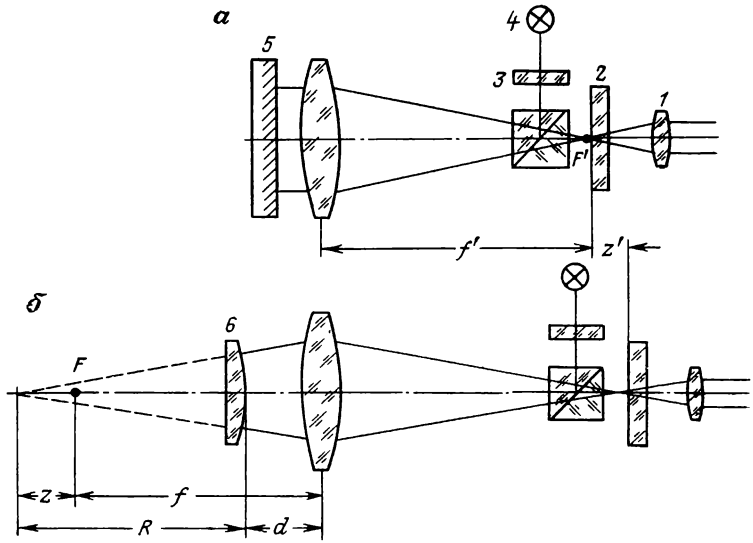


РИС. 14

нии контролируемой детали в положение *10'* лучи обоих пучков будут падать на контролируемую поверхность нормально. В этом случае также формируется автоколлимационное изображение щели. Разность отсчетов по шкале направляющих установки для двух положений детали *10* и *10'* составит величину радиуса кривизны *R*.

Определение больших радиусов кривизны, значения которых достигают нескольких километров, осуществляется также при помощи автоколлиматора (рис. 14) с фокусным расстоянием объектива 2000—3000 мм.

Плоское зеркало *5* (рис. 14,*а*) служит для контрольной установки автоколлимационной трубы на бесконечность, что

определяется по резкому автоколлимационному изображению марки *3*, освещенной лампой *4*, сформированному в плоскости окулярной сетки *2* и наблюдаемому через окуляр *1*. Соответствующее такой установке положение окулярной выдвижки фиксируется по шкале и нониусу отсчетного устройства.

После замены зеркала контролируемой деталью *6* (рис. 14,*б*) производят перефокусировку трубы до получения автоколлимационного изображения марки, образованного с помощью измеряемой сферической поверхности (выпуклой или вогнутой), и берут отсчет по шкале окулярной выдержки. Разность отсчетов составит величину перефокусировки z' трубы.

Как видно из рис. 14,*б*, искомый радиус R равен

$$R = f + z - d. \tag{1.6}$$

По формуле Ньютона $z \cdot z' = (+f')^2$ находят $z = \frac{(f')^2}{z'}$, поэтому

$$R = \frac{(f')^2}{z'} + f - d \tag{1.7}$$

— для выпуклой поверхности
и

$$R = \frac{(f')^2}{z'} + f + d \tag{1.8}$$

— для вогнутой поверхности.

1.8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Измерение параметров несферических поверхностей осуществляется различными методами [16, 17], среди которых автоколлимационный занял достойное место. Рассмотрим некоторые автоколлимационные методы.

Для контроля линз с выпуклыми параболическими поверхностями используется автоколлимационный асферометр, основанный на следующем свойстве поверхностей: пучок лучей, направленный в один из фокусов поверхности, после отражения проходит через второй фокус, находящийся в бесконечности.

На рис. 15 приведена оптическая схема автоколлимационного асферометра для контроля выпуклых параболоидов. Щель *3*, освещенная источником *1* через конденсор *2*, проецируется системой, состоящей из зеркала *5*, объективов *6* и *7* и полупрозрачного зеркала *9*, в фокус контролируемой поверхности *8*, который совпадет с осью вращения *0* проекционной системы *1—9*. Пучок лучей, отраженный от поверхности *8*, проходит объектив *10* зрительной трубы, который формирует его в виде автоколлимационного изображения щели на сетке *11*. Это изображение рассматривается через окуляр *12*. До-

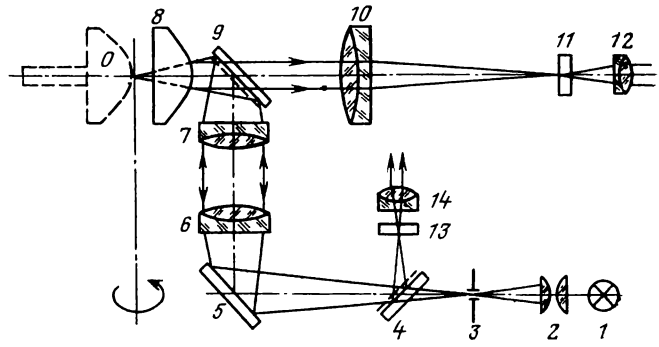


РИС. 15

полнительное автоколлимационное устройство: полупрозрачное зеркало *4*, сетка *13* и окуляр *14* — служит для центрировки контролируемой линзы на столике прибора и совмещения ее фокуса с осью вращения проекционной системы. Столик прибора имеет два взаимно перпендикулярных перемещения в горизонтальном направлении и возможность изменения высоты. Проверку центрировки линзы производят по трем участкам — по вершине и двум симметрично расположенным участкам относительно вершины. При правильной юстировке от всех трех участков автоколлимационное изображение щели должно совпадать с перекрестием сетки *11* зрительной трубы. После этого, вращая проекционную систему, направляют пучок лучей по диаметральному сечению поверхности и наблюдают в зрительную трубу за положением автоколлимационного изображения щели на сетке, фиксируя его отклонения относительно центра перекрестия. Сетка может быть отградуирована в угловой или линейной мере, и тогда допустимые отклонения можно отсчитывать непосредственно по сетке.

Превышение h конечной точки участка над начальной (нулевой) вычисляется по формуле

$$h = \Delta l\, \alpha = \frac{p\, \pi\, m^\circ}{\cos^3 \varphi / 2\ 360^\circ}\, \alpha, \qquad (1.9)$$

где Δl — длина участка; α — угловое отклонение участка от его идеального положения, выраженное в радианах; p — параметры параболы; m° — величина угла в градусной мере; φ — координатный угол контролируемого участка поверхности. Расстояние H от оси линзы до точки контролируемого участка поверхности Q (рис. 16) определяется выражением

$$H = p \sin \varphi = p \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}. \qquad (1.10)$$

Для контроля формы глубокой несферической поверхности

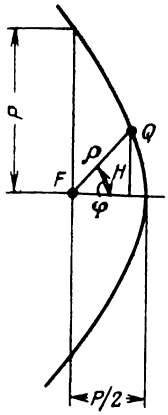


РИС. 16

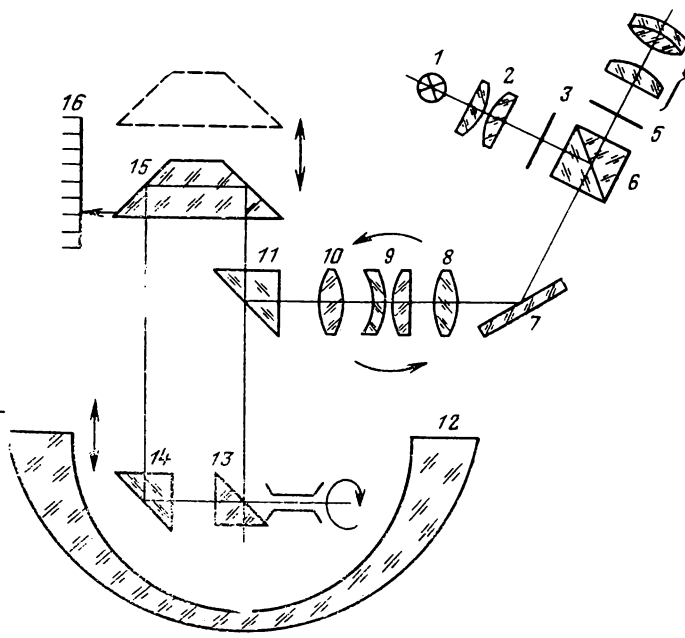


РИС. 17

методом определения положений меридиональных и саггитальных фокусов (или радиусов) предложена [14] автоколлимационная установка, оптическая схема которой показана на рис. 17.

Пучок лучей от источника *1* через конденсор *2* освещает марку в виде круглого отверстия в диафрагме *3,* находящейся в фокусе объектива *8.* Куб-призма *6* и зеркало *7* направляют пучок лучей в объектив, из которого выходит параллельный пучок, идущий через компенсатор *9* и объектив *10.* Далее сходящийся пучок лучей проходит прямоугольные призмы *11, 15, 14, 13* и фокусируется на контролируемом участке поверхности линзы *12.* Отраженный от поверхности пучок лучей на обратном пути проходит куб-призму *6* и строит автоколлимационные изображения марки на сетке *5* окуляра *4* в меридиональном и саггитальном фокусах. Для фокусировки автоколлимационных изображений служит призма *15* с углом отклонения луча, равным 180°, перемещающаяся по направлению визирной оси при помощи винта с фиксацией отсчета по шкале *16.*

Чтобы проверить форму всей поверхности линзы, требуется линию визирования направлять каждый раз нормально к контролируемому участку поверхности. Для этого предусмотрены поворот призмы *13* вокруг горизонтальной оси и перемещение по вертикали вместе с призмой *14,* показанные на рис. 17

стрелками. Величина перемещения по вертикали фиксируется по барабану наводящего устройства. В результате получают значения меридиональных и саггитальных радиусов кривизны, по которым строят графики и сличают с расчетными данными. Для наблюдения автоколлимационных изображений в широких апертурных пучках в оптическую схему установки между объективами *8* и *10* введен качающийся компенсатор *9*.

Контроль формы поверхностей вогнутых параболических зеркал большого диаметра (от 100 мм и больше) автоколлимационным методом может быть осуществлен при помощи двух пентапризм, перемещающихся навстречу друг другу по диаметру испытуемой поверхности, и дополнительного плоского зеркала.

Параллельный пучок лучей, выходящих из объектива автоколлиматора *4* (рис. 18), направляется на две пентапризмы и *2′* и после них разделенные пучки падают на два симметричных участка кольцевой зоны поверхности испытуемого зеркала *1*. Отраженные пучки лучей от поверхности зеркала падают на дополнительное плоское зеркало *3*, от которого снова отражаются и идут обратным путем через пентапризмы в объектив автоколлиматора. При совмещении поверхности плоского зеркала с фокусом испытуемого зеркала в поле зрения окуляра автоколлиматора будет наблюдаться одно автоколлимационное изображение штриха марки. При наличии отклонения поверхности испытуемого зеркала от параболической при перемещении пентапризм из одной зоны в другую образуется два автоколлимационных изображения штриха марки, расхождение Δ между которыми может быть измерено винтовым окулярным микрометром или скомпенсировано перемещением плоского зеркала *3* вдоль оси *OF* на величину $\Delta f'$. Величина перефокусировки плоского зеркала $\Delta f'$ определяется по формуле

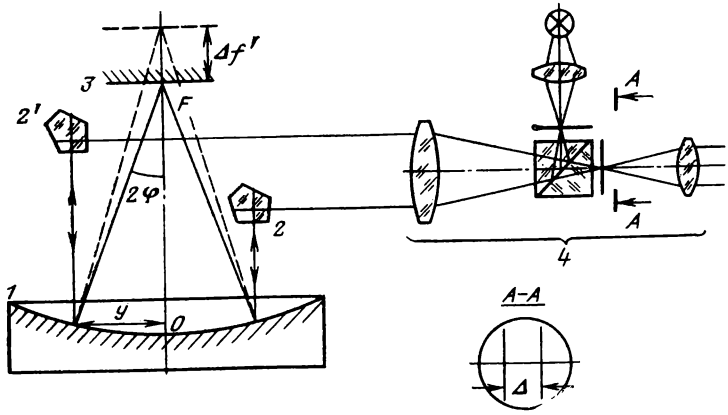


РИС. 18

$$\Delta f' = \frac{p \sin 2\Delta\varphi}{\sin 2\varphi\ (1 + \cos 2\varphi)}, \qquad (1.11)$$

где p — параметр контролируемой параболической поверхности; 2φ — угол контролируемой зоны y; $\Delta\varphi$ — угол отклонения нормали на зоне шириной Δy.

При перемещении пентапризм в соседнюю зону, где нормаль поверхности отклоняется от расчетной на угол $\Delta\varphi$, пучки лучей, идущих обратно в объектив автоколлиматора, отклонятся от параллельного направления в разные стороны на угол $\delta = 8\Delta\varphi$, разделяющий автоколлимационные изображения в поле зрения окуляра на величину

$$\Delta = 8 f' \Delta\varphi,$$

где f' — фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

Равные значения $\Delta\varphi$ в различных зонах у зеркала приводят к различным значениям Δf, увеличивающимся при переходе от краевых зон к центральным.

Приступая к контролю поверхности параболического зеркала, очень важно сделать выбор начальной зоны и соответствующее ей положение плоского зеркала, которое в дальнейшем принимается базовым. Обычно выбирают такое положение пентапризм и плоского зеркала, когда на всем диапазоне перемещения пентапризм по диаметру контролируемой поверхности расхождение автоколлимационных изображений штриха марки будет минимальным.

Контроль линз с гиперболическими поверхностями, применяемых в телескопических системах типа Кассегрена, по предложению Д. Т. Пуряева [16] может быть произведен также автоколлимационным методом с охватом всей поверхности по схеме, показанной на рис. 19. Оценка качества поверхности проводится по дифракционному изображению точки.

Для осуществления автоколлимационного метода контроля требуется использовать в качестве вспомогательного зеркала вторую нерабочую поверхность линзы, обработанную с необходимой точностью и покрытую зеркальным слоем. Эта поверхность может быть плоской или сферической с хорошей центрировкой. Так как пучок лучей проходит дважды толщину

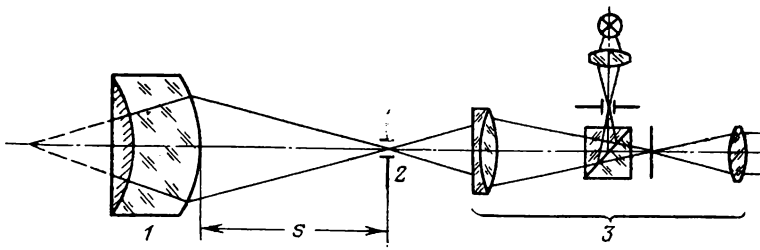


РИС. 19

линзы, отражаясь от вспомогательного зеркала, то при расчете положения предметной точки, находящейся на расстоянии s от контролируемой поверхности, строго учитывают показатель преломления стекла, толщину линзы, радиус сферической поверхности и эксцентриситет асферической поверхности.

В оптической схеме на рис. 19 нерабочая поверхность линзы *1* имеет сферическую форму. Лучи света, исходящие из точечного источника света, пройдя круглое отверстие в диафрагме *2*, попадают на контролируемую поверхность, преломляются ею и проходят до сферической вспомогательной зеркальной поверхности. После отражения от последней они направляются обратно и строят автоколлимационное изображение точки в плоскости той же диафрагмы, рассматриваемое через окуляр автоколлимационного микроскопа *3*. Несовпадение автоколлимационного изображения точки с плоскостью диафрагмы вдоль оси укажет на недостаточную точность изготовления формы гиперболической поверхности.

1.9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Автоколлимационный метод определения фокусного расстояния окуляров и других оптических систем, предложенный М. М. Русиновым, основан на принципе получения двух автоколлимационных изображений световой марки микроскопа или телескопической лупы: одного с получением промежуточного изображения в задней главной точке H' оптической системы *2* при отражении от вогнутого сферического зеркала (рис. 20,*а*) другого — в заднем фокусе F' при отражении от плоского зеркала *1* (рис. 20,*б*). Значение разности отсчетов при наведения автоколлимационного микроскопа *3* в двух указанных случаях является фокусным расстоянием измеряемой оптической системы. Радиус кривизны вогнутого сферического зеркала не имеет значения, важно только, чтобы оно имело достаточное угловое поле, обеспечивающее необходимую яркость автоколлимационного изображения. В начале измерений необходимо вогнутое зеркало установить в положение, при котором образуется автоколлимационное изображение, расположенное в центре поля микроскопа, для чего приходится регулировать зеркало и микроскоп. После этого между зеркалом и микроско-

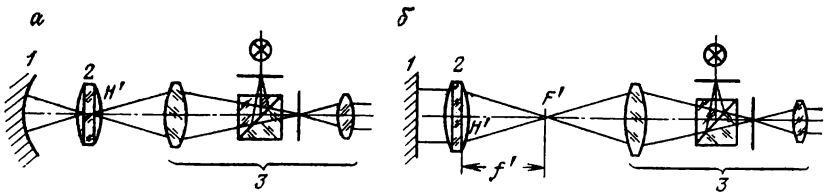


РИС. 20

пом вводят испытуемую систему и, перемещая ее вдоль оптической оси, находят автоколлимационное изображение, расположенное в задней узловой точке. Заменив вогнутое зеркало плоским и переместив микроскоп на расстояние f', получают автоколлимационное изображение в заднем фокусе системы.

Для систем с различными фокусными расстояниями и с небольшими относительными отверстиями удобно применять автоколлимационные фокометры с коинцидентным способом наведения на резкость изображения вместо обычной фокусировки, что позволяет существенно уменьшить погрешности измерений. Такие приборы получили наименование коинцидент-фокометры.

Оптическая схема фокометра с коинцидентной наводкой приведена на рис. 21,*а*.

В данной схеме испытуемый объектив *4* выполняет роль объектива автоколлиматора. В фокальной плоскости этого объектива установлена прозрачная шкала *8* с тремя параллельными щелями, прорезанными в алюминированном слое. Шкала с прозрачными щелями освещается от источника *5* через зеленый светофильтр *6* и раздвижную щель *7*. После отражения от гипотенузной грани кубика пучок лучей проходит испытуемый объектив, два разделяющих клина *3* и, отразившись от плоского зеркала *1* (пентапризма *2* в это время выключена), направляется обратно и собирается на границе раздела между клиньями *9*, расположенными в фокусе испытуемого объектива и окуляра *10*. При измерениях необходимо клинья *9* в плоскости автоколлимационных изображений и клинья *3*, расположенные в плоскости входного зрачка, установить взаимно перпендикулярно. Углы клиньев *11* выбраны такими, чтобы при наблюдении в окуляр выходной зрачок не раздваивался. Перемещением испытуемого объектива вдоль оптической оси находят наиболее резкое изображение двух ще-

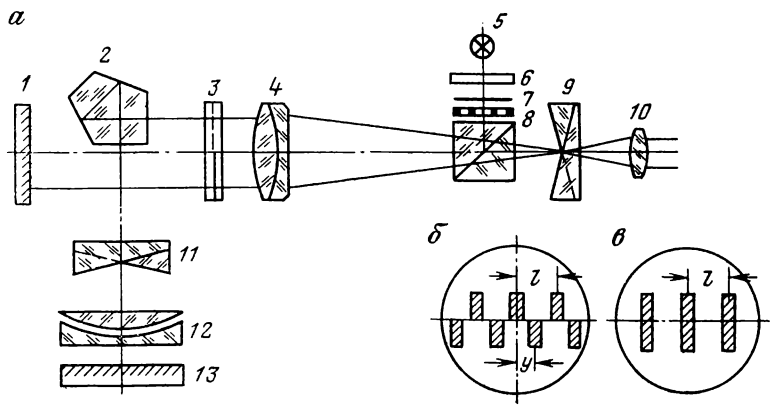


РИС. 21

лей, расположенных друг над другом. Чтобы определить фокусное расстояние испытуемого объектива, в одну из половин параллельного пучка лучей между клином *3* и плоским зеркалом *1* (рис. 21,*а*) вводится пентапризма *2*, направляющая пучок лучей через клинья *11*, и линзовый компенсатор *12* на второе плоское зеркало *13*. После отражения от последнего пучок лучей идет обратным путем и собирается в фокусе объектива, образуя на клиньях *9* вторую группу автоколлимационного изображения щелей, которая будет сдвинута относительно первой группы на некоторую величину y (*рис.* 21,*б*) Клинья *11*, отклоняющие световые пучки на угол δ, при совместном действии с линзовым компенсатором позволяют измерить угол u, соответствующий величине смещения двух автоколлимационных изображений друг относительно друга Поворотом этих клиньев на 180° и смещением отрицательной линзы компенсатора до положения совмещенных концов двух групп изображений щелей, как показано на рис. 21,*в*, измеряют величину сдвига y в угловой мере ω, отсчитываемую по шкале компенсатора.

Фокусное расстояние объектива f' определяется по формуле

$$f' = \frac{l}{\operatorname{tg} u}, \tag{1.12}$$

где $u = 4\delta \pm 2\omega$ — угол между двумя соседними щелями с интервалом, равным l.

Погрешность определения вычисляется по формуле

$$m_{f'} = \frac{f'}{l} \sqrt{m_l^2 + f'^2 m_\xi^2}, \tag{1.13}$$

где m_ξ — нониальная острота глаза, равная $5 \cdot 10^{-5}(10'')$.

Определение больших фокусных расстояний оптических деталей в виде плоскопараллельных пластинок с остаточной сферичностью поверхностей производится подобно измерению больших радиусов кривизны при помощи автоколлимационных труб с длиннофокусными объективами.

Метод автоколлимации при определении фокусного расстояния детали может быть осуществлен двумя способами путем измерения величины перефокусировки трубы при наводке на автоколлимационные изображения марки, полученные от первой и второй поверхностей детали [16], и с применением плоского зеркала также путем измерения значения перефокусировки трубы при наводке на автоколлимационные изображения. полученные от плоского зеркала без детали и с де-

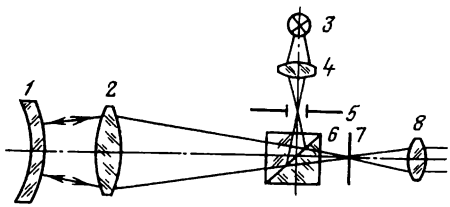


РИС. 22

талью, помещенной между зеркалом и объективом автоколлимационной трубы.

Оптическая схема установки определения фокусного расстояния по первому способу показано на рис. 22. Щель в диафрагме *5* через конденсор *4* освещается от источника *3*. Пучок лучей от щели падает на светоделительный кубик *6* и направляется им в объектив *2* автоколлиматора и на контролируемую деталь *1*. После отражения от одной из поверхностей детали пучок лучей идет обратно через объектив и кубик, строя автоколлимационное изображение в плоскости сетки *7*, которое рассматривается в окуляр *8*. Чтобы получить резкое изображение щели, требуется произвести фокусировку трубы перемещением окулярной выдвижки. Такие же действия выполняются и при фокусировке трубы на автоколлимационное изображение щели от другой поверхности детали. Полученная разность зафиксированных отсчетов Δ между двумя положениями окулярной выдвижки подставляется в формулу

$$f' = \frac{2 n f'^{2}_{\text{ак}}}{(n-1)\ \Delta}\ , \tag{1.14}$$

которая дает возможность подсчитать фокусное расстояние испытуемой детали. Остальные данные: n — показатель преломления стекла детали и $f'_{\text{ак}}$ — фокусное расстояние объектива автоколлиматора должны быть известны.

Если принять $n \approx 1{,}5$, то

$$f'_1 = \frac{6\ (f'_{\text{ак}})^2}{\Delta}\ . \tag{1.15}$$

Погрешность определения фокусного расстояния характеризуется выражением, полученным дифференцированием формулы (1.15):

$$d f' = \frac{6\ (f'_{\text{ак}})^2}{\Delta}\ d\Delta .$$

На рис. 23 показаны схемы установок для определения фокусного расстояния детали по второму способу с применением плоского зеркала *1*.

В начале работы автоколлимационную трубу *2* при помощи плоского зеркала, от которого получают автоколлимационное изображение щели, устанавливают на бесконечность (рис. 23,а) и фиксируют это положение по шкале окулярной выдвижки. Затем между плоским зеркалом и объективом автоколлимационной трубы вводят испытуемую деталь «*и*» и перемещением окулярной выдвижки снова получают автоколлимационное изображение щели на сетке окуляра с фиксацией второго отсчета по шкале. Разность отсчетов образует величину z' расфокусировки трубы. Если испытуемая деталь представляет положи-

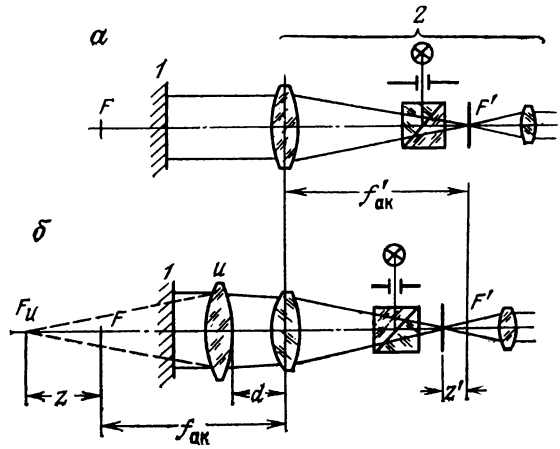


РИС. 23

тельную линзу, то смещение окулярной выдвижки от положения на бесконечность производят к объективу и смещают от объектива, если деталь представляет отрицательную линзу.

На рис. 23,*б* показана схема с положительной линзой «*и*», из которой видно, что искомое фокусное расстояние равно

$$f' = z + f'_{ак} - d, \tag{1.16}$$

где z — расстояние от передней фокальной плоскости объектива трубы до фокальной плоскости испытуемой детали; d — расстояние между главной плоскостью объектива трубы и поверхностью измеряемой детали.

Применяя формулу Ньютона $z \cdot z' = (f'_{ак})$, находят значение $z = \dfrac{(f'_{ак})^2}{z'}$, которое подставляют в выражение (1.16), и получают формулу для вычисления искомого фокусного расстояния

$$f' = \frac{(f'_{ак})^2}{z'} + f'_{ак} - d. \tag{1.17}$$

При очень больших фокусных расстояниях значениями d и $f'_{ак}$ можно пренебречь, и тогда пользуются упрощенной формулой

$$f' = \frac{(f'_{ак})^2}{z'}. \tag{1.18}$$

Точность определения f' находится из выражения

$$df' = \frac{(f'_{ак})^2}{(z')^2}\, dz'. \tag{1.19}$$

Фокусное расстояние зеркал с поверхностями, близкими к плоскостям, также определяется измерением величины расфокусировки при двух положениях автоколлимационного изображения щели — одного от плоского зеркала и второго от поверхности испытуемого зеркала.

Для вычислений фокусного расстояния зеркала $f_з'$ служит формула

$$f_з' = \frac{(f_{ак}')^2}{2z'} . \qquad (1.20)$$

1.10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОЙ ТОЧКИ АЭРОФОТОКАМЕРЫ

Аэрофотокамеры, предназначенные для топографических целей, снабжаются координатными метками на прикладных рамках. Эти координатные метки служат для определения положения точек снимков, используемых при составлении топографических карт. В аэрофотокамерах, имеющих прижимные стекла для выравнивания пленки., указанные метки наносятся с внешней стороны этих стекол в виде крестов, фиксируемых в момент экспозиции на снимках [4].

Под главной точкой снимка или камеры понимают след оптической оси объектива на плоскости формирования аэрофотоизображения.

При сборке и юстировке аэрофотокамеры для правильного размещения координатных меток на прикладной рамке, или совмещения метки на прижимном стекле с главной точкой камеры, применяют автоколлимационный метод. Для этого корпус камеры *6* (рис. 24) с фотообъективом *7* устанавливают опорной плоскостью *8* на поверхность плоского зеркала *9*, расположенного на юстировочном столе *10*, затем с помощью подъемных винтов *11* это зеркало устанавливают горизонтально по уровню *1*. На прикладную рамку, обработанную параллельно опорной плоскости камеры, накладывается стеклянная пластинка *5* с нанесенной на ней решеткой (типа решетки Готье) с ценой деления стороны квадрата 5 или 10 мм. Решетка также устанавливается горизонтально с помощью уровня *1*. На решетку, над центральным перекрестием помещают куб-призму *3* с полупрозрачной гипотенузной гранью и сбоку освещают лампой *4*. С помощью лупы *2* или микроскопа небольшого увеличения (15^x—20^x) рассматривают автоколлимационное изображение

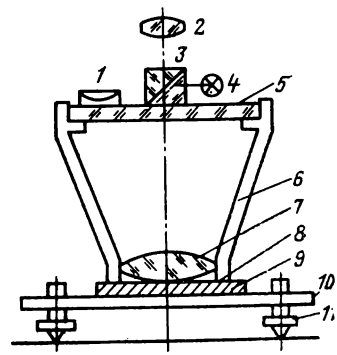


РИС. 24

центрального перекрестия решетки, сформированное фотообъективом 7 и зеркалом 9, и совмещают его с перекрестием путем осторожного перемещения решетки в плоскости прикладной рамки камеры. После этого координатные метки, изготовленные в виде треугольников или небольших пластинок с отверстиями, закрепляют на прикладной рамке, совмещая их острия или отверстия с главными взаимно перпендикулярными направлениями штрихов решетки, образующими центр перекрытия.

Если аэрокамера снабжена прижимным стеклом с маркой в центре, то достаточно совместить автоколлимационное изображение марки с самой маркой и в таком положении стекло или пластинку закрепить на прикладной рамке.

Погрешность совмещения изображений, а следовательно, и определение положения главной точки камеры не должна превышать $\pm 0{,}02$ мм.

1.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

До настоящего времени еще широко применяется метод оценки качества изображения оптической системы по разрешающей способности, определяемой по штриховой или радиальной мере. Развитый в последние десятилетия более универсальный метод — по оптической передаточной функции, оцениваемый частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) и фазово-контрастной (ФКХ), еще не отработан в достаточной степени. В частности, средства для получения указанных характеристик не освоены промышленностью для серийного выпуска.

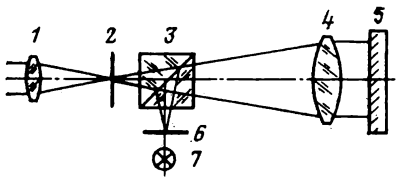


РИС. 25

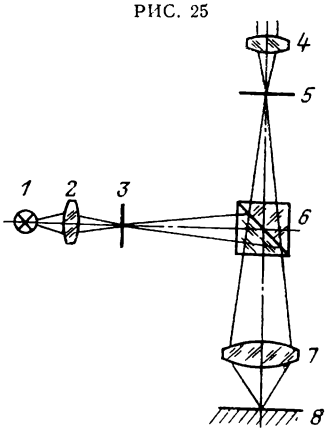


РИС. 26

Разрешающая способность объективов зрительных труб и микроскопов обычно оценивается визуально и выражается в угловой или линейной мере, а фотообъективов — фотографически с применением рабочих фотоматериалов. Разрешающая способность фотообъективов выражается только в линейной мере (количество разрешенных пар линий на 1 мм длины фотоматериала).

Для визуального определения разрешающей способности объективов зрительных труб и микроскопов может быть приме-

нен автоколлимационный метод, исключающий использование дополнительного коллиматора. Для этого исследуемые объективы зрительной трубы и микроскопа должны быть соответственно установлены в автоколлимационную трубу или автоколлимационный микроскоп.

На рис. 25 представлена схема установки определения разрешающей способности объектива *4* зрительной трубы. Штриховая мира *6* расположена в фокальной плоскости исследуемого объектива на месте автоколлимационной марки и освещается от источника *7*. После отражения от плоского зеркала *5* параллельный пучок лучей на обратном пути проходит объектив, светоделительный кубик *3* и строит автоколлимационное изображение миры на сетке *2* окуляра *1*, через который и рассматривается изображение. По номеру квадрата разрешаемых штрихов в пределе по всем четырем направлениям оценивается разрешающая сила в угловой мере. Окуляр, применяемый для рассмотрения изображения миры, должен иметь увеличение около 20^x или заменен микроскопом. Если выходной зрачок трубы больше зрачка глаза, то необходимо за окуляром поставить дополнительную диоптрийную трубку с диаметром объектива, превышающим размер выходного зрачка, и увеличением 4^x—5^x.

Для оценки предельной разрешающей способности φ'' объектива может быть использована формула

$$\varphi'' = \frac{140''}{D}, \tag{1.21}$$

где D — диаметр действующего отверстия объектива в мм.

На рис. 26 приведена схема установки определения разрешающей способности объективов микроскопа, которая несколько отличается от установки определения разрешающей силы объектива зрительной трубы. Штриховая мира *3* помещается в плоскости изображения исследуемого объектива и освещается через конденсор *2* от источника *1*. Светоделительный кубик *6* направляет пучок лучей через объектив *7* на плоское зеркало *8*, расположенное в предметной плоскости микроскопа. После отражения от зеркала пучок лучей проходит объектив, светоделительный кубик и строит автоколлимационное изображение миры в плоскости окулярной сетки *5*, рассматриваемое через окуляр *4*.

Зная разрешающую способность объектива r' в линейной мере в плоскости изображения и его увеличение β, находят разрешающую способность объектива для пространства предметов по формуле

$$r = \frac{r'}{\beta}.$$

Контрольной формулой для оценки разрешающей способности объектива микроскопа служит

$$r = \frac{0{,}61\,\lambda\,\beta}{A}, \qquad (1.22)$$

где A — числовая апертура объектива в пространстве предметов; λ — длина волны света.

1.12. ИЗМЕРЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Применение автоколлимационного метода измерения аберраций оптических систем позволяет проводить испытания систем как в лабораторных условиях при нормальной температуре, так и в термобарокамере при различных изменениях температуры и давления воздуха (о чем см. ниже).

Наиболее простым и доступным для измерений аберраций является метод визуальных фокусировок, предложенный акад. В. П. Линником, основанный на совмещении двух групп интерференционных полос, образованных дифрагированными пучками лучей от узкой щели и двух симметричных зон в диафрагме.

Оптическая схема установки для измерения осевых аберраций: сферической, хроматической и астигматизма объектива показана на рис. 27,*а*. Раздвижная щелевая диафрагма *5*, расположенная в фокусе объектива *7* автоколлимационной трубы, освещается через светофильтр *4* от источника *3*. Пучок лучей от щели, направленный светоделительным кубиком *6* в объектив трубы, проходит его и отверстия зональной диафрагмы *8*, установленной в параллельном пучке лучей между объективом трубы *7* и испытуемым объективом *9*. Проходит испытуемый объектив и собирается в фокусе F' последнего, где совпадает с плоскостью поверхности зеркала *10*. После отражения от зеркала пучок лучей в обратном ходе строит на сетке *2* окуляра *1* две группы автоколлимационных изображений интерференционных полос (рис. 27,*б*), которые наблюдатель перемещением окулярной выдвижки трубы сводит в одну группу (рис. 27,*в*). В зональной диафрагме (рис. 27,*г*) при смене зон выделяется каждый раз две пары прямоугольных отверстий, размещенных симметрично относительно оптической оси испытуемого объектива.

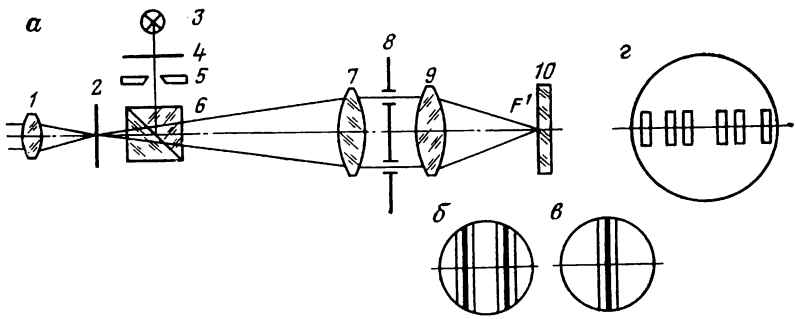


РИС. 27

Снятием отсчетов по шкале окулярной выдвижки в моменты совмещения интерференционных полос для каждой зоны фиксируются положения фокусов объектива автоколлимационной трубы. Разности отсчетов между первоначальным (нулевым), принятым, например, для первой зоны, и последовательно для каждой зоны, умноженные на отношение фокусных расстояний объективов испытуемого и автоколлимационной трубы в квадрате, составят значения сферической аберрации:

$$\delta s_h = \Delta A \left(\frac{f'}{f'_{\text{ак}}} \right)^2, \qquad (1.23)$$

где ΔA — разности отсчетов по шкале окулярной выдвижки.

Измерения сферической аберрации производят, как правило, при одном из светофильтров: зеленом или желтом, измерения же хроматической аберрации — при нескольких светофильтрах, соответствующих по пропускаемой длине волны расчетным. Астигматизм на оси определяется из измерений сферических аберраций при двух взаимно перпендикулярных положениях линии зон зональной диафрагмы.

Измерение дисторсии и астигматизма объектива автоколлимационным методом, разработанным в оптической лаборатории ЦНИИГАиК, основано на том свойстве, что при вращении объектива вокруг оси, проходящей через заднюю узловую точку его, изображение бесконечно удаленного предмета сохраняет неподвижное положение в точке фокуса. При измерениях этим методом угол поворота объектива определяется по лимбу угломерного прибора, с вертикальной осью вращения которого совмещается задняя главная точка H'. Это совмещение производится путем вращения лимба *7* (рис. 28) на небольшие углы с испытуемым объективом *2* и перемещением его вдоль оптической оси до положения, соответствующего случаю, когда в поле зрения микроскопа *3—6* автоколлимационное изображение окулярной марки *4* будет неподвижным. При этом плоское зеркало *1* помещается за объективом в параллельном ходе пучка лучей.

Наличие дисторсии в объективе при вращении вокруг узловой точки вызовет смещение автоколлимационного изображения — марки, которое легко измерить при помощи окулярной шкалы *5* или винтового окулярного микрометра. Вращение лимба с объективом ведут через 5 или 10° в обе стороны от осевого (начального) положения. Величину дисторсии Δy вычисляют по формуле

$$\Delta y = \frac{a}{4 \cos \omega \beta}, \qquad (1.24)$$

где a — смещение автоколлимационного изображения, полученное из разности отсчетов в двух симметричных положениях, по полю, умноженное на цену деления шкалы или винтового микрометра, $\pm\omega$ — угол поворота лимба с объективом в одну и

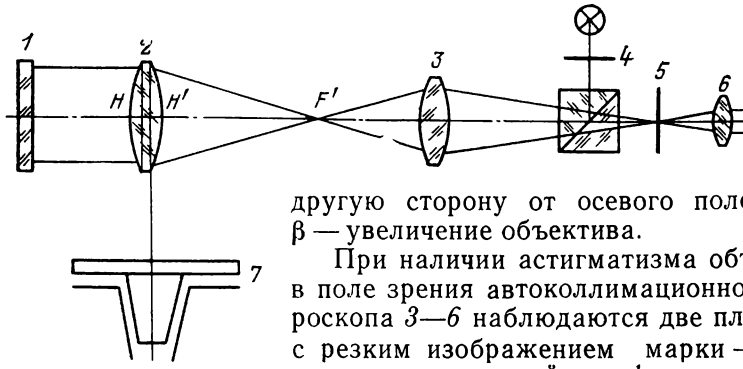


РИС. 28

другую сторону от осевого положения, β — увеличение объектива.

При наличии астигматизма объектива в поле зрения автоколлимационного микроскопа *3—6* наблюдаются две плоскости с резким изображением марки — фокус сагиттальных лучей и фокус меридиональных лучей. В этом случае, как и при измерении дисторсии, объектив вращают также вокруг узловой точки в обе стороны от осевого положения на те же углы. Наводят микроскоп на меридиональный и сагиттальный фокусы, фиксируя отсчеты по шкале направляющих перемещения микроскопа. Эта величина перемещения и будет составлять астигматическую разность (астигматизм).

По отсчетам для различных углов поворота можно построить график кривых меридиональных и сагиттальных фокусов и, кроме этого, получить данные для оценок кривизны поля изображения объектива.

1.13. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИБОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРЕ И ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА

Перепады температур и давления воздуха вызывают изменение параметров оптических приборов, например, изменение положения фокальной плоскости объектива, нарушение центрировки, понижение качества изображения и др. Такие явления особенно нежелательны для топографических аэрофотокамер, в которых параметры элементов внутреннего ориентирования должны быть весьма стабильны.

Для определения величин деформаций отдельных узлов аэрофотокамеры и изменения положения фокальной плоскости объектива необходимо исследования проводить в термобарокамере. Использование для измерений автоколлимационного метода позволяет разместить автоколлимационную трубу вне термобарокамеры и осуществлять контроль через иллюминатор в виде плоскопараллельной пластины.

Оптическая схема расположения автоколлимационной трубы *1—6*, иллюминатора *7* и аэрофотокамеры *8—9* показана на рис. 29.

В фокальной плоскости объектива *8* аэрофотокамеры устанавливают плоское зеркало *9*. Понижая или повышая температуру воздуха в термобарокамере, с помощью автоколлимацион-

ной трубы наблюдают изменение положения фокальной плоскости объектива. Фокусируя трубу на резкое автоколлимационное изображение окулярной марки *4* (или щели), регистрируют отсчеты по шкале окулярной выдвижки. Разности отсчетов между начальным (полученным при нормальной температуре) и последующих отсчетах при различных температурах составят значения смещения окулярной выдвижки. Действительное изменение положения фокальной плоскости аэрофотокамеры или фокусного расстояния $\Delta f'$ объектива определяется по формуле

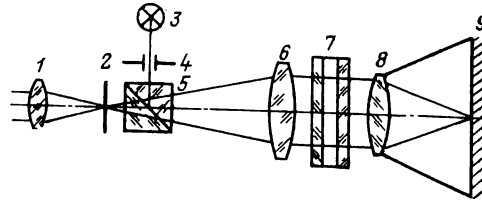


РИС. 29

$$\Delta f' = z' \left(\frac{f'}{f'_{ак}}\right)^2, \qquad (1.25)$$

где f' — фокусное расстояние объектива камеры, $f'_{ак}$ — фокусное расстояние объектива автоколлимационной трубы.

Подобный процесс наблюдений и вычислений $\Delta f'$ производят при исследовании аэрофотокамеры в условиях изменения давления воздуха.

1.14 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИМБОВ ТЕОДОЛИТОВ

Исследование лимбов теодолитов состоит, главным образом, из определения погрешностей делений, учет которых позволяет повысить результаты измерения углов. Одним из простых и производительных методов исследования лимбов является автоколлимационный метод, осуществляемый при помощи многогранной кварцевой призмы и автоколлиматора.

Очень важно, что автоколлимационным методом можно исследовать лимбы как самостоятельные детали, так лимбы и на теодолите с целью определения погрешностей его работы. В обоих случаях многогранная призма закрепляется на специальном регулируемом столике, допускающем установку всех граней призмы нормально к оптической оси автоколлиматора. При исследовании лимба на теодолите столик с призмой крепится на алидаде прибора, при исследовании отдельно от прибора столик с призмой закрепляется на лимбе.

Исследования погрешностей делений лимба могут быть произведены способами сравнения или калибровки.

При способе сравнения многогранная призма используется в качестве образцовой меры. Отклонения измеренных углов на лимбе от соответствующих известных углов на многограннике образуют погрешности делений лимба. Способом сравнения рекомендуется пользоваться в тех случаях, когда погрешности уг-

лов образцового многогранника малы по отношению к ожидаемым погрешностям измерений.

При способе калибровки используется один постоянный угол между двумя смежными гранями призмы и измерения ведут по специальной программе на различных участках лимба.

Для исследования одного лимба применяют несколько многогранных призм, например, с постоянными углами $\alpha=36$, 45 и 60°. Необходимо, чтобы эти углы укладывались в круге или полукруге целое число раз и были бы кратными выбранному интервалу исследования.

При исследовании лимба на теодолите столик с многогранной призмой закрепляют на алидаде так, чтобы грани призмы были бы перпендикулярны к оптической оси автоколлиматора и параллельны оси вращения алидады. Вращая алидаду с призмой, устанавливают автоколлимационное изображение марки, полученное от первой грани, в центр отсчетной шкалы окуляра, а лимб — на исходный (нулевой) отсчет. После этого по шкале окуляра берут два отсчета и четыре отсчета по двум микроскопам лимба и снова два отсчета по шкале окуляра. Отсчетами по шкале окуляра автоколлиматора до и после отсчетов по лимбу контролируется стабильность положения алидады с призмой. В таком же порядке берутся отсчеты и от второй грани, стремясь получить отсчеты по шкале окуляра на том же участке, что и от первой грани. Отсчеты по двум микроскопам исключают погрешность эксцентриситета лимба.

Переставляя лимб на постоянный выбранный угол, например, через 5° по ходу часовой стрелки до 180°, производят измерения в прямом ходе, а затем против хода часовой стрелки — в обратном ходе для каждого положения лимба. Этим заканчивается серия измерений с одной призмой, после чего в таком же порядке ведут измерения со второй и третьей призмами:

$\alpha=36°$	$\alpha=45°$	$\alpha=60°$
$0°+\varphi$	$0°+\varphi$	$0°+\varphi$
$36+\varphi$	$45+\varphi$	$60+\varphi$
$72+\varphi$	$90+\varphi$	$120+\varphi$,
$102+\varphi$	$135+\varphi$	
$144+\varphi$		

где

$$\varphi=\Delta\varphi,\ 2\Delta\varphi,\ 3\Delta\varphi,\ldots,\left(\frac{\alpha}{\Delta\varphi-1}\right)\Delta\varphi.$$

Если используется призма с постоянным углом $\alpha=60°$ и выбранный интервал установки лимба $\Delta\varphi=3°$, то производится 20 серий измерений, с $\alpha=45°$—15 серий и с $\alpha=36°$—12 серий.

Из полученных данных по окулярной шкале автоколлиматора вычисляют разности среднеарифметических значений Δ между первой a_1 и второй a_2 гранями призмы: $\Delta=a_1-a_2$, а также раз-

ности среднеарифметических отсчетов по лимбу между старшим b_1 и младшим b_2 диаметрами.

Вероятнейшее значение постоянного угла α находят из разности отсчетов по шкале автоколлиматора и теодолита при прямом и обратном ходах, взяв из них среднее арифметическое значение

$$A = \frac{A' - A''}{2},$$

где A' и A'' — значения угла из прямого и обратного ходов.

Среднее арифметическое значение постоянного угла из одной серии измерений определяется как

$$C = \frac{A_1 + A_2 + \ldots + A_n}{n},$$

где n — число измерений.

Средняя квадратическая погрешность определения постоянного угла в одной серии измерений вычисляется по формуле

$$m_A = \sqrt{\frac{\Sigma \delta^2}{2(n-1)}}, \qquad (1.26)$$

где $\delta_i = d_i - \frac{\Sigma d}{n}$ — разность двойного измерения постоянного угла A из прямого и обратного ходов с поправкой средней систематической погрешности, n — число двойных измерений.

Для строгого определения поправок диаметров лимба необходимо решать уравнения погрешностей. Гораздо проще вычисление погрешностей лимба выполняется по способу С. В. Елисеева [12].

В случае отсутствия многогранных эталонных призм исследования лимбов могут быть произведены с помощью приспособления, состоящего из автоколлиматора *6*, двух дисков *1* и *4* и двух плоских зеркал *2* и *3* (рис. 30). Зеркало *2* укреплено на нижнем диске *1* и зеркало *3* — на верхнем *4*. Верхний диск диаметром несколько мень-

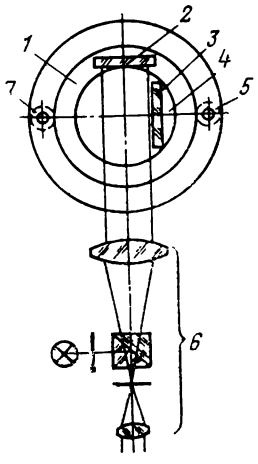


РИС. 30

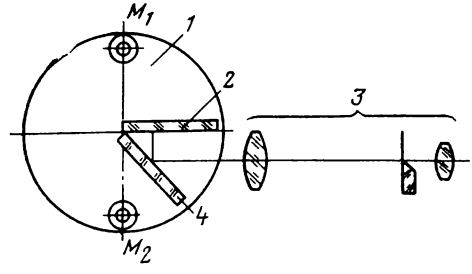


РИС. 31

ше нижнего и может быть повернут с зеркалом относительно нижнего на заданный угол и закреплен. Размер зеркал должен быть больше, чем диаметр объектива автоколлиматора.

Такое приспособление крепится на алидаде теодолита. Измерения угла начинают с вращения алидады до такого положения первого зеркала, когда в центре поля зрения автоколлиматора появится автоколлимационное изображение окулярной марки, и при помощи двух микроскопов *5* и *7* берут отсчеты по лимбу. Затем вращают алидаду на заданный угол до получения автоколлимационного изображения марки от второго зеркала и также берут отсчеты по лимбу. Разность отсчетов образует постоянный угол. Для повышения точности отсчета производят несколько смещений штрихов лимба. Измерения постоянного угла ведут в прямом и обратном ходах с перестановкой каждый раз лимба. Постоянный угол, выбираемый между зеркалами, может быть взят в 5, 10, 30° и т. д.

В Ленинградском Оптико-механическом объединении разработано устройство в виде зеркального умножителя для исследования погрешностей диаметров лимбов автоколлимационным методом. Это устройство позволяет изменять положение между двумя зеркалами и устанавливать выбранный постоянный угол измерения. На рис. 31 показана принципиальная схема этого устройства, состоящего из двух плоских зеркал *2* и *4* и автоколлиматора *3*. Зеркало *2* может быть повернуто вокруг вертикальной оси на небольшой угол относительно неподвижного автоколлиматора *3*. Второе зеркало *4* вращается относительно первого от 0 до 90°.

Пучок лучей, выходящий из объектива автоколлиматора, падает на зеркало *4* и, отразившись несколько раз между зеркалами, возвращается обратно в объектив и далее строит автоколлимационное изображение на сетке окуляра. Исследуемый лимб *1* и зеркало *4* могут быть соединены или разъединены и повернуты раздельно. Отсчетные микроскопы M_1 и M_2 служат для измерения шаговых поворотов лимба.

При работе зеркало *2* устанавливается под углом 6—8° к оси автоколлиматора. Измерение шагового (постоянного) угла φ между зеркалами производится в пределах до $90° + (\alpha - \beta)$, где α — угол между выходящим и входящим пучками лучей в автоколлиматор; β — угол между осью автоколлиматора и зеркалом *2*. Взаимосвязь между углами φ, α и β и числом отражений n представляется выражением

$$\varphi = \frac{180° - 2\beta - \alpha}{n - 1}$$

или

$$\varphi = \frac{90° + \frac{\alpha}{2} - \beta}{\frac{n+1}{2}}.$$

Число n всегда будет нечетным, поэтому $\frac{n-1}{2}$ будет составлять целое число. Если n увеличивать так, что $(90°-\varphi) < \beta + n\varphi \leqslant \leqslant 90°$, то выходящий пучок лучей изменит свое направление и выйдет за пределы пространства между зеркалами.

Для калибровки многогранных призм в ЧССР в соответствии с комплексной программой развития социалистической экономической интеграции в области метрологии разработана специальная установка ЭЗБ-1.

Калибровочная установка представляет собой полукруглую литую чугунную плиту с тремя регулируемыми опорами. На верхней поверхности плиты смонтированы два автоколлиматора под постоянным выбранным углом, поворотное теодолитное устройство со столиком, на который устанавливается многогранник, и механизм дистанционного управления.

Калибровочная установка общей массой около 11 т установлена на изолированном фундаменте, заложенном на глубину 2,2 м, и находится в помещении с искусственным климатом.

Глава 2.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ (ЗПС) — ОТРАЖАТЕЛИ ДЛЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Преимущества автоколлимационных методов измерений углов могут быть расширены для линейных и комплексных измерений при замене отражающих зеркал нерасстраиваемыми призмами. Рассмотрим особенности таких оптических систем при использовании диэдров и триэдров.

Для измерения смещений призм необходимо перефокусировать автоколлиматор таким образом, чтобы изображение марки совпадало с ребром диэдра или вершиной триэдра. При смещении этих элементов призм с визирной оси автоколлимационное изображение марки смещается на величину, вдвое бóльшую. Указанное свойство позволяет увеличить чувствительность измерений при использовании призм также в качестве визирных целей по сравнению с чувствительностью визирного метода.

Естественно, что погрешности изготовления призм, в частности, погрешности изготовления прямых двугранных углов между отражающими гранями, приведут к погрешностям измерений. Проведенные теоретические исследования и вычисления с помощью матриц, определяющих координаты автоколлимационных изображений марок при последовательном отражении световых пучков от граней призм, показали, что указанные погрешности призм не влияют на точность измерений при использовании нулевого метода.

Основной причиной, снижающей точность измерений визирным методом, является погрешность из-за колебания визирной линии трубы при перефокусировке. Оценим влияние этой погрешности на точность измерения линейных смещений автоколлимационным методом трубой с фокусировкой окулярным коленом. Применяя понятие промежуточной линии визирования, полученные результаты легко обобщить и для более сложного случая трубы с внутренней фокусировкой.

На рис. 32 показана схема автоколлимационной трубы с фокусировкой окулярным коленом. При отсутствии погрешностей изготовления фокусирующего механизма перекрестие сетки перемещается вдоль прямой, строго параллельной оптической оси объектива. Пусть имеется пара сопряженных точек P и P' и проходящие через них перпендикулярно к оптической оси

объектива соответствующие плоскости, определяемые расстояниями a и a'. Если производится измерение смещения вершины триэдра $T-\Delta H_0$ с линии створа H_0F', то оно изображается в плоскости сетки трубы соответствующим отрезком. Так как перекрестие S_{10}, изображаемое объективом трубы в точке S'_{10}, изображается триэдром в точке S''_{10}, то изображение точки S_{10} в трубе (точка S'''_{10}) будет отстоять от перекрестия на расстоянии $\delta H'_0 = 2\Delta H_0$. Эта величина будет служить критерием действительного смещения ΔH_0 точки T с линии створа H_0F'. При поперечном увеличении в сопряженных точках P и P'—β_a, имеем

$$\delta H'_0 = \beta_a\, 2\,\Delta H_0 = -2\,\Delta H_0\,\frac{a'}{a} = 2\,\Delta H_0\,\frac{f'}{a-f'}\,. \tag{2.1}$$

При наличии различного рода погрешностей измерения смещение точки с оси створа (ΔH) определяется по смещению автоколлимационного изображения $\delta H'$ формулой

$$\Delta H = \frac{\delta H'}{2}\cdot\frac{a-f'}{f'}\,. \tag{2.2}$$

Пусть фокусировка трубы обеспечивает сопряжение плоскостей P и P', но вследствие погрешностей фокусирующего механизма перекрестие сместится на величину η_0 относительно идеального положения, заняв вместо S_{10} положение S_1. При этом его автоколлимационное изображение будет формироваться в плоскости P в точке S'''_1, и смещение автоколлимационного изображения относительно перекрестия S_1 будет определяться формулой

$$\delta H' = 2\,\Delta H_{\text{т}}\,\frac{f'}{a-f'}\,. \tag{2.3}$$

В свою очередь, как следует из чертежа (см. рис. 32)

$$\Delta H_{\text{т}} = \Delta H_0 + \eta'_0 = \Delta H_0 + \eta_0\,\frac{a-f'}{f'} \tag{2.4}$$

На основании (2.3) для $\delta H'$ находим

$$\delta H' = 2\,\Delta H_0\,\frac{f'}{a-f'} + 2\,\eta_0. \tag{2.5}$$

Вместо истинного значения смещения ΔH_0 его измеренная величина будет в соответствии с (2.2)

$$\Delta H = \Delta H_0 + \eta_0\,\frac{a-f'}{f'}\,. \tag{2.6}$$

Погрешность в определении смещения точки T с оси створа равна

$$\delta\,(\Delta H) = \Delta H - \Delta H_0 = \eta_0\,\frac{a-f'}{f'}\,. \tag{2.7}$$

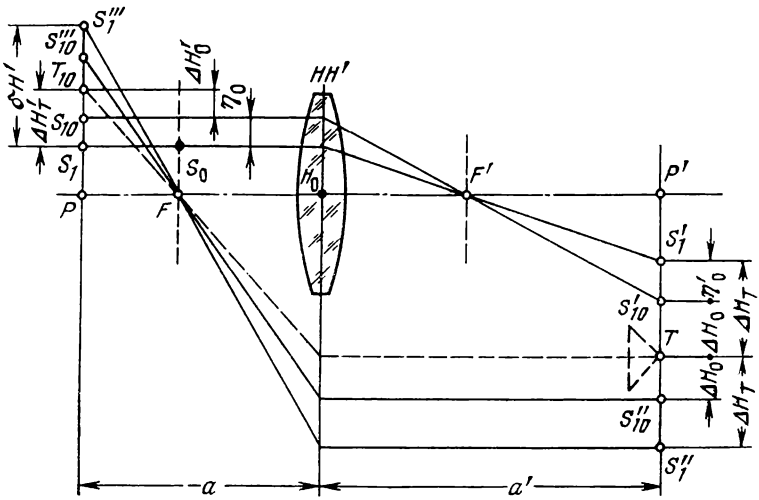


РИС. 32

Из этого выражения следует, что погрешность измерения нестворности при использовании автоколлимационного метода измерений с ЗПС такая же, как и при обычном визирном методе.

2.2. СВОЙСТВА ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ (ЗЛО) КАК ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Известно, что рядом свойств триэдра обладает зеркально-линзовый отражатель, применяющийся в работе в параллельных пучках лучей под названием «кошачий глаз».

При образовании изображений в сходящихся пучках лучей при помощи ЗЛО также можно измерять линейные смещения. В поле зрения трубы с автоколлимационным изображением, полученным от ЗЛО, отсутствуют изображения-помехи. Это создает возможности для применения ЗЛО в автоматизированных фотоэлектрических автоколлимационных приборах.

Рассмотрим особенности ЗЛО как элементов оптических систем.

ЗЛО (рис. 33) представляет собой объектив, за которым перпендикулярно к его оптической оси располагается плоское зеркало, совпадающее в частном случае с задней фокальной плоскостью объектива. Из рис. 33 следует, что луч, параллельный оптической оси объектива, пойдет после отражения также параллельно оси симметрично ей. Это позволяет сделать вывод, что ЗЛО представляет собой телескопическую (афокальную) систему с поперечным увеличением, равным $\beta = -1$.

Выбирая в качестве точки отсчета отрезков передний фокус F объектива ЗЛО, нетрудно получить по формуле Ньютона для

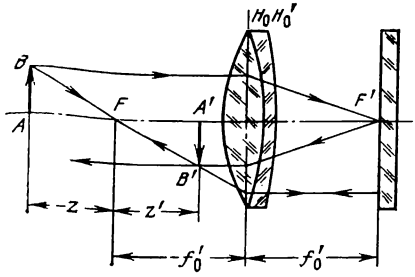


РИС. 33

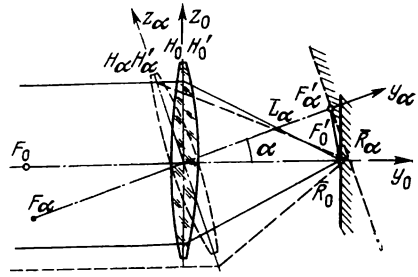


РИС. 34

координат точек изображения и предмета z' и z следующее выражение:

$$z' = -z. \tag{2.8}$$

Это выражение определяет все основные свойства ЗЛО.

1. При $z=-\infty$, $z'=\infty$ параллельный пучок лучей преобразуется ЗЛО также в параллельный пучок лучей, как и телескопической системой.

2. При $z=0$, $z'=0$ предмет, находящийся в передней фокальной плоскости объектива, изображается ЗЛО также в этой плоскости, но полностью обернутым, так как $\beta=-1$.

3. При $z=-f'$, $z'=f'$ предмет, находящийся в плоскости, удаленной на величину двойного фокусного расстояния, изображается ЗЛО в главной плоскости его объектива.

4. При $z=f'$, $z'=-f'$ предмет, находящийся в главной плоскости объектива ЗЛО, изображается в плоскости, находящейся от объектива на двойном фокусном расстоянии.

С учетом выше сформулированных положений и принимая во внимание, что $\beta=-1$, можно утверждать, что точки предмета и изображения располагаются симметрично передней фокальной плоскости объектива ЗЛО.

Следовательно, по своему действию ЗЛО и триэдр эквивалентны, причем роль вершины триэдра играет передний главный фокус объектива ЗЛО.

Известно, что триэдр отражает, независимо от его поворотов и линейных смещений, параллельные пучки лучей в обратном направлении. Нетрудно показать, что этим же свойством обладает и ЗЛО.

Как видно из рис. 34, направление пучков, параллельных оптической оси объектива, после отражения в ЗЛО не изменяется, если повернуть его на какой-нибудь угол по отношению к первоначальному положению. Пусть одностолбцовые матрицы координат радиусов-векторов точек предмета и точки зеркала до поворота ЗЛО соответственно R и L. После поворота ЗЛО на угол α вокруг оси X, что равносильно повороту координатной системы вместе с зеркалом на тот же угол, получим

$$R_\alpha = f' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -\operatorname{tg}\alpha \end{pmatrix}, \tag{2.9}$$

$$L_\alpha = f' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{2.10}$$

$$M_\alpha = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{2.11}$$

где M_α — матрица отражения в зеркале после поворота.

В соответствии с формулой отражения для зеркала будем иметь

$$R_\alpha = M_\alpha\, R_\alpha + [E - M_\alpha]\, L_\alpha\,. \tag{2.12}$$

Подставляя значения R_α, L_α и M_α, находим, что $R'_\alpha = R_\alpha$.

До поворота имеем соответственно

$$R = L = f' \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{2.13}$$

$$M = M_\alpha\,, \tag{2.14}$$

и на основании формулы (2.12), примененной к новым значениям R, L и M, получим также, что $R' = R$. Следовательно, при поворотах ЗЛО направления отраженных им пучков лучей не изменяются, т. е. и в этом отношении ЗЛО полностью эквивалентен триэдру и его можно применять для измерения линейных смещений автоколлимационным методом.

Для различного рода габаритных расчетов целесообразно иметь формулы, связывающие между собой координаты лучей,

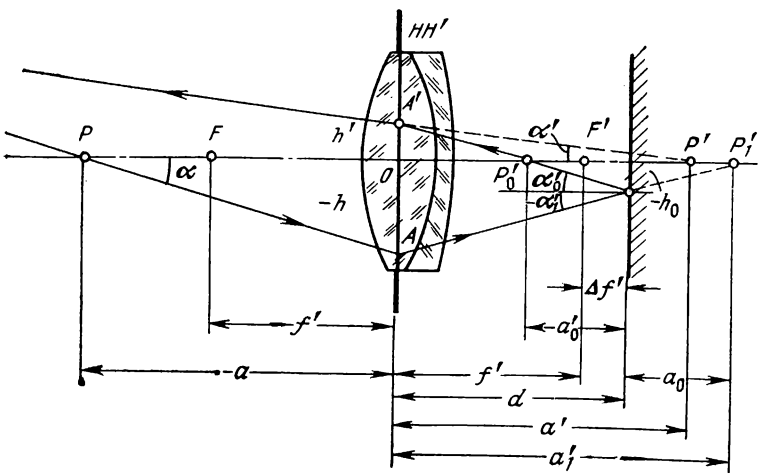


РИС. 35

входящих в ЗЛО и выходящих из него. Выведем эти формулы, воспользовавшись рис. 35.

Пусть положение входящего луча, пересекающего ось в точке P, задается углом α, расстоянием a до совпадающих главных плоскостей объектива ЗЛО — HH' и высотой h, на которой он их пересекает.

Знаки всех отрезков и углов берутся, как принято в геометрической оптике. Зеркало ЗЛО перпендикулярно к оптической оси объектива и находится на расстоянии d от главных плоскостей объектива, т. е. зеркало смещено относительно заднего главного фокуса объектива на величину $\Delta f'$. После прохождения объектива ЗЛО луч пересекает ось в точке P_1' под углом α_1'. Отразившись в зеркале, луч образует с оптической осью угол α_0', пересекая ее в точке P_0', сопряженной с точками P_1' и P. Высота точки зеркала, в которой происходит отражение, равна h_0, а расстояния точек P_1' и P_0' от зеркала равны соответственно a_0 и a_0'. После отражения в зеркале луч встречает объектив ЗЛО в точке A' на высоте h' и образует после преломления в нем с осью угол α'. Изображение P' точки P будет находиться на расстоянии a' от совпадающих главных плоскостей. Поставим себе целью по известным a, α и h определить величины a', α' и h'. Применяя формулы углов, находим

$$\operatorname{tg}\alpha_1' = \operatorname{tg}\alpha + \frac{h}{f'}, \tag{2.15}$$

но

$$h = a\operatorname{tg}\alpha, \tag{2.16}$$

следовательно,

$$\operatorname{tg}\alpha_1' = \operatorname{tg}\alpha\left(1 + \frac{a}{f'}\right), \tag{2.17}$$

где f' — фокусное расстояние объектива ЗЛО и

$$h_0 = h - d\operatorname{tg}\alpha_1' = \operatorname{tg}a\left[a - d\left(1 + \frac{a}{f'}\right)\right]. \tag{2.18}$$

Для отражения в зеркале найдем

$$\operatorname{tg}\alpha_0' = -\operatorname{tg}\alpha_1' = \operatorname{tg}\alpha\left(1 + \frac{a}{f'}\right). \tag{2.19}$$

После отражения высота луча на объективе ЗЛО будет с учетом того, что в обратном ходе лучей $d<0$,

$$h' = h_0 + d\operatorname{tg}\alpha_0' = \operatorname{tg}\alpha\left[a - 2d\left(1 + \frac{a}{f'}\right)\right]. \tag{2.20}$$

Для $\operatorname{tg}\alpha'$ имеем с учетом обратного направления хода лучей

$$\operatorname{tg}\alpha' = \operatorname{tg}\alpha_0' - \frac{h'}{f'} = -\operatorname{tg}\alpha\left[1 + \frac{2a}{f'} - \frac{2d}{f'}\left(1 + \frac{a}{f'}\right)\right]. \tag{2.21}$$

Для отрезка на оси a' получим

$$a' = \frac{h'}{\alpha'} = \frac{2d\left(1+\frac{a}{f'}\right)-a}{1+\frac{2a}{f'}-\frac{2d}{f'}\left(1+\frac{a}{f'}\right)}. \tag{2.22}$$

В самом общем случае расположения зеркала имеется дефокусировка, так как по условию

$$d = f' + \Delta f'. \tag{2.23}$$

Иногда удобнее иметь вместо величины d величину дефокусировки $\Delta f'$, подставляя d из (2.23) в формулы (2.18) (2.20), (2.21) и (2.22), получим

$$h_0 = -\operatorname{tg}\alpha\left[f' + \Delta f'\left(1+\frac{a}{f'}\right)\right], \tag{2.24}$$

$$h' = -\operatorname{tg}\alpha\left\{a + 2\left[f' + \Delta f'\left(1+\frac{a}{f'}\right)\right]\right\}. \tag{2.25}$$

или иначе для h' можно написать

$$h' = -(h + 2h_0), \tag{2.26}$$

$$\operatorname{tg}\alpha' = \operatorname{tg}\alpha\left[1 + 2\frac{\Delta f'}{f'}\left(1+\frac{a}{f'}\right)\right], \tag{2.27}$$

$$a' = \frac{a - 2\left[f' + \Delta f'\left(1+\frac{a}{f'}\right)\right]}{1+2\frac{\Delta f'}{f'}\left(1+\frac{a}{f'}\right)}. \tag{2.28}$$

Формулы (2.25), (2.27) и (2.28) непригодны для определения соответствующих величин в случае, когда $\alpha = 0$ и $a = -\infty$, т. е. когда предмет находится в бесконечности. Для этого случая из рассмотрения простейших геометрических соотношений между величинами h, h', f', a и α находим при дефокусировке зеркала $\Delta f'$

$$\operatorname{tg}\alpha'_\infty = \frac{h}{f'}, \tag{2.29}$$

$$\operatorname{tg}\alpha'_{0_\infty} = \operatorname{tg}\alpha'_1 = -\frac{h}{f'}, \tag{2.30}$$

$$h_{0_\infty} = -h\frac{\Delta f'}{f'}, \tag{2.31}$$

$$h'_\infty = -h\left(1 + 2\frac{\Delta f'}{f'}\right), \tag{2.32}$$

$$\operatorname{tg}\alpha'_\infty = 2\frac{h}{f'}\frac{\Delta f'}{f'}. \tag{2.33}$$

В данном случае точка пересечения луча с оптической осью после отражения в ЗЛО будет являться его главным фокусом

F'. Величины главного фокусного расстояния ЗЛО $f'_{зло}$ и его вершинного отрезка $a'_{F'}$ в зависимости от дефокусировки $\Delta f'$ определятся выражениями

$$f'_{зло} = \frac{h}{\operatorname{tg} \alpha'_\infty} = \frac{f'}{2\frac{\Delta f'}{f'}} = \frac{f'^2}{2\Delta f'}, \tag{2.34}$$

$$a'_{F'} = \frac{h'_\infty}{\operatorname{tg} \alpha'_\infty} = -f' \frac{1 + \frac{2\Delta f'}{f'}}{2\frac{\Delta f'}{f'}}. \tag{2.35}$$

У ЗЛО будет одна главная плоскость или, правильнее сказать, обе его главные плоскости совпадают. Поэтому, определив положение этой плоскости относительно совпадающих главных плоскостей объектива ЗЛО величиной $a'_{H'}$, найдем

$$a'_{H'} = a'_{F'} - f'_{зло} = \frac{f'}{\Delta f'}\left(1 + \frac{\Delta f'}{f'}\right) = \frac{f'^2}{\Delta f'}\left(1 + \frac{\Delta f'}{f'}\right). \tag{2.36}$$

Если назвать величину $\Delta f'/f'$ относительной дефокусировкой зеркала ЗЛО и обозначить ее k

$$k = \frac{\Delta f'}{f'}, \tag{2.37}$$

то можно написать для ряда величин, характеризующих действие ЗЛО как идеальной системы,

$$\operatorname{tg} \alpha' = \operatorname{tg} \alpha \left[1 + 2k\left(1 + \frac{a}{f'}\right)\right], \tag{2.38}$$

$$a' = \frac{a - 2\left[f' + \Delta f'\left(1 + \frac{a}{f'}\right)\right]}{1 + k\left(1 + \frac{a}{f'}\right)}, \tag{2.39}$$

$$h_{0\infty} = -hk, \tag{2.40}$$

$$h'_\infty = -h(1 + 2k), \tag{2.41}$$

$$\alpha'_\infty = 2k\frac{h}{f'}, \tag{2.42}$$

$$f'_{зло} = \frac{f'}{2k}, \tag{2.43}$$

$$a'_{F'} = -f'\frac{(1 - 2k)}{2k}, \tag{2.44}$$

$$a'_{H'} = -\frac{f'}{k}(1 + k). \tag{2.45}$$

Можно показать, что все свойства главных плоскостей, главных и фокальных точек полностью относятся к кардинальным

элементам ЗЛО. А именно, увеличение в главной плоскости ЗЛО равно $+1$, изображения бесконечно удаленных объектов находятся в фокальной плоскости, а их величины l'_∞ определяются выражением

$$l'_\infty = f'_{\text{ЗЛО}} \operatorname{tg} u, \tag{2.46}$$

где u — угловая величина предмета, находящегося в бесконечности.

Если применить к ЗЛО как идеальной оптической системе понятия углового ν, линейного β и продольного α увеличений, то получим

$$\nu = \frac{\operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha} = 1 + 2\,\frac{\Delta f'}{f'}\left(1 + \frac{a}{f'}\right). \tag{2.47}$$

В соответствии с формулами идеальной оптики имеем для β и α соответственно (считая, что пространства предметов и изображений находятся в воздухе)

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{1 + 2\,\dfrac{\Delta f'}{f'}\left(1 + \dfrac{a}{f'}\right)}, \tag{2.48}$$

$$\alpha = \beta^2 = \frac{1}{\left[1 + 2\,\dfrac{\Delta f'}{f'}\left(1 + \dfrac{a}{f'}\right)\right]^2}. \tag{2.49}$$

В частных случаях, когда дефокусировка зеркала $\Delta f' = 0$, ЗЛО представляет собой телескопическую систему однократного увеличения, для которой имеем $\nu = 1$, $\beta = -1$, $\alpha = 1$.

Полученные формулы позволяют, оперируя со ЗЛО как элементом, подчиняющимся законам идеальной оптической системы, рассчитать в габаритном отношении любую систему, в состав которой он входит. При этом нет надобности каждый раз находить изображение для объектива ЗЛО, затем для зеркала и вновь для объектива. Применяя выведенные формулы и отсчитывая положения предметов и изображений от главных плоскостей объектива ЗЛО либо непосредственно от главной плоскости эквивалентной ему системы, можно определить все необходимые величины.

При аберрационном анализе ЗЛО следует различать два случая:

1. Предмет совпадает с передней фокальной плоскостью объектива ЗЛО, что соответствует применению его при автоколлимации сходящихся пучков лучей. ЗЛО действует здесь как симметричная оборачивающая система, являясь вместе с тем телескопической системой однократного увеличения.

2. Предмет находится на бесконечно большом расстоянии от объектива ЗЛО. Этот случай имеет место, когда ЗЛО применяются, например, в качестве элементов концевых отражателей светодальномеров [12].

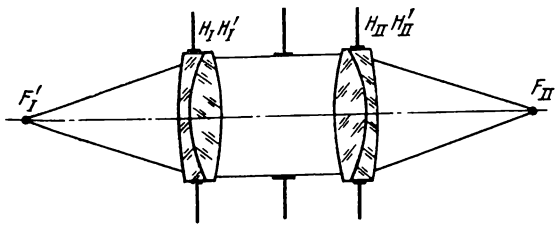


РИС. 36

В первом случае аберрации ЗЛО могут быть получены алгебраическим суммированием аберраций первого и второго компонентов эквивалентной ЗЛО симметричной оборачивающей системы (рис. 36).

Для монохроматических аберраций ЗЛО здесь будут иметь: сферическую аберрацию

$$\delta s'_{\text{ЗЛО}} = \delta \overleftarrow{s'_{\text{I}}} + \delta s'_{\text{II}}, \tag{2.50}$$

кому

$$K_{\text{ЗЛО}} = \overleftarrow{K}_{\text{I}} + K_{\text{II}}, \tag{2.51}$$

меридиональную и сагиттальную кривизны поверхности изображения

$$z'_{m\text{ЗЛО}} = \overleftarrow{z'_{m\text{I}}} - z'_{m\text{II}}, \tag{2.52}$$

$$z'_{s\text{ЗЛО}} = \overleftarrow{z'_{s\text{I}}} - z'_{s\text{II}}, \tag{2.53}$$

астигматизм

$$(z'_s - z'_m)_{\text{ЗЛО}} = (\overleftarrow{z'_s} - \overleftarrow{z'_m})_{\text{I}} + (z'_s - z'_m)_{\text{II}}, \tag{2.54}$$

дисторсию

$$\delta l_{\text{ЗЛО}} = \delta \overleftarrow{l_{\text{I}}} - \delta l_{\text{II}}. \tag{2.55}$$

Для хроматических аберраций положения и увеличения будут иметь место следующие формулы:

$$d s'_{\text{ЗЛО}} = \overleftarrow{d s'_{\text{I}}} + d s'_{\text{II}}, \tag{2.56}$$

$$\left(\frac{d l'_{\text{ЗЛО}}}{l'}\right) = \left(\frac{d l'}{l'}\right)_{\text{I}} + \left(\frac{d l'}{l'}\right)_{\text{II}}. \tag{2.57}$$

При совпадении плоскостей выходного зрачка первого и входного зрачка второго компонентов эквивалентной ЗЛО системы, что имеет место при совпадении их с плоскостью зеркала ЗЛО ($s'_{\text{зр}_{\text{I}}} = -s'_{\text{зр}_{\text{II}}}$), имеем

$$\delta \overleftarrow{s'_{\text{I}}} = \delta s'_{\text{II}}, \tag{2.58}$$

$$\overleftarrow{K}_{\text{I}} = K_{\text{II}}, \tag{2.59}$$

$$\overleftarrow{z'_{m_{\text{I}}}} = z'_{m_{\text{II}}}, \tag{2.60}$$

$$\overleftarrow{z'_{s_{\text{I}}}} = z'_{s_{\text{II}}}, \tag{2.61}$$

$$(\overleftarrow{z'_s} - \overleftarrow{z'_m})_{\text{I}} = (z'_s - z'_m)_{\text{II}}, \tag{2.62}$$

$$\delta \overleftarrow{l}_{\text{I}} = -\delta l_{\text{II}}, \tag{2.63}$$

$$\overleftarrow{d s}_{\text{I}} = d s_{\text{II}}, \tag{2.64}$$

$$\left(\frac{\overleftarrow{d l'}}{l'}\right)_{\text{I}} = -\left(\frac{d l'}{l'}\right)_{\text{II}}. \tag{2.65}$$

С учетом выражений (2.50) ÷ (2.57) находим

$$\delta s'_{\text{ЗЛО}} = 2\,\delta \overleftarrow{s'_{\text{I}}}, \tag{2.66}$$

$$K_{\text{ЗЛО}} = 0, \tag{2.67}$$

$$z^{\text{I}}_{m_{\text{ЗЛО}}} = 2\overleftarrow{z'_{m_{\text{I}}}}, \tag{2.68}$$

$$z^{\text{I}}_{s_{\text{ЗЛО}}} = 2\overleftarrow{z^{\text{I}}_{s_{\text{I}}}}, \tag{2.69}$$

$$\delta l'_{\text{ЗЛО}} = 0, \tag{2.70}$$

$$d s'_{\text{ЗЛО}} = 2\,\overleftarrow{d s'_{\text{I}}}, \tag{2.71}$$

$$\left(\frac{d l'}{l'}\right)_{\text{ЗЛО}} = 0. \tag{2.72}$$

Следовательно, независимо от степени коррекции объектива и величины его поля зрения ЗЛО будет свободен от ряда аберраций наклонных пучков: комы, дисторсии и хроматизма увеличения. На качество изображения будут оказывать влияние лишь сферохроматическая аберрация, астигматизм и кривизна поля изображения, величины которых вдвое больше аберраций объективов ЗЛО в обратном ходе лучей. Это позволяет рекомендовать применение в качестве объективов ЗЛО двухлинзовых склеенных систем с хорошим исправлением сферической аберрации и хроматизма изображения. Астигматизм может быть устранен правильным выбором положения зрачков компонентов эквивалентной ЗЛО системы, совпадающих в рассматриваемом случае с зеркалом. Положение зеркала относительно объектива в силу изложенного заметно сказывается на величине астигматической разности и должно быть определено из условия минимального значения последней.

При выполнении всех сформулированных выше условий ЗЛО в сходящихся пучках лучей, строящих изображение в его передней фокальной плоскости (для ЗЛО оно является предметом), будет обладать лишь одной аберрацией, способной снизить качество изображения. Этой аберрацией является кривизна поля изображения. Однако при небольшой величине полевых углов, что собственно имеет место при практическом использовании ЗЛО, примеры которого будут даны ниже, влияние кривизны поля на качество изображения будет незначительным.

2.3. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛОСКОСТНОСТИ, ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ И СООСНОСТИ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Оценим погрешности измерения неплоскостности и непрямолинейности, вызванные неправильной сборкой ЗЛО, а именно: смещением плоскости зеркала относительно фокальной плоскости объектива и ее неперпендикулярностью к его оптической оси.

Предположим, что (рис. 37) плоскость зеркала перпендикулярна к оптической оси объектива ЗЛО, но не совпадает с его задней фокальной плоскостью на величину $\Delta f'$. При этом, как следует из рисунка и формулы (2.8), изображение предмета, находящегося в передней фокальной плоскости объектива ЗЛО, строится в этой же фокальной плоскости. Смещение $\Delta f'$ приводит к изменению величины диаметра объектива ЗЛО, необходимой для прохождения без виньетирования отраженного зеркалом пучка лучей. Пусть величина объекта l, пучок лучей опирается на диаметр CD объектива ЗЛО, который представлен на рисунке тонкой линзой с главными плоскостями HH'. Если принять условие отсутствия виньетирования пучков, то диаметр выходящего пучка лучей для правильно собранного ЗЛО (зеркало находится в фокальной плоскости объектива и $\Delta f'=0$) равен диаметру объектива ЗЛО $C'D'$. Приращение поперечного

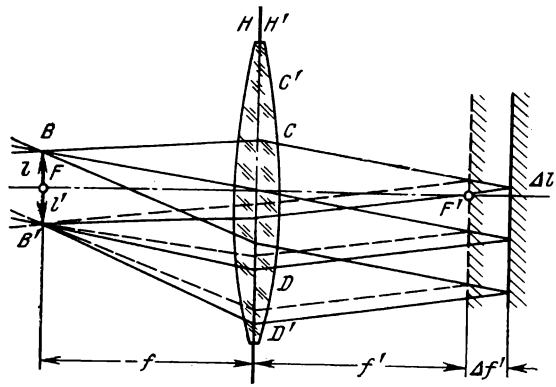


РИС. 37

размера диаметра для сохранения отраженных пучков лучей без виньетирования будет

$$\Delta D = \frac{D}{2}. \tag{2.73}$$

Величина же самого диаметра в этом случае равна

$$D_{\Delta f'=0} = 2D. \tag{2.74}$$

Из чертежа следует, что при дефокусировке плоскости зеркала на величину $\Delta f'$ приращение диаметра составит

$$\delta D = 2\Delta l' \tag{2.75}$$

или

$$\delta D = 2\frac{\Delta f'}{f'} l. \tag{2.76}$$

Полная величина диаметра объектива при отсутствии виньетирования определяется выражением

$$D_{\Delta f'} = 2\left(D + \frac{\Delta f'}{f'} l\right), \tag{2.77}$$

где D — величина диаметра объектива ЗЛО, на который опирается входящий в ЗЛО пучок лучей от точки вне оси.

Из формулы (2.77) следует, что при отрицательной величине дефокусировки ($\Delta f' < 0$) диаметр объектива, необходимый для пропускания отраженных лучей без виньетирования, уменьшается, и минимальное значение его диаметра будет при реально возможной величине $\Delta f' = -f'$.

В этом случае имеем

$$D_{\Delta f'=-f'} = 2(D + l). \tag{2.78}$$

Таким образом, ЗЛО конструктивно можно выполнять в виде двухлинзового склеенного объектива с последней плоской поверхностью, покрытой отражающим слоем и выполняющей роль зеркала. Это значительно упрощает изготовление и удешевляет стоимость ЗЛО.

Для уменьшения сечения световых пучков, возвращающихся после отражения ЗЛО в автоколлимационную трубу, и, следовательно, для уменьшения диаметра ее входного зрачка можно применить коллектив, поместив его в передней фокальной плоскости объектива ЗЛО.

Схематически ЗЛО с коллективом показан на рис. 38, служащем для вывода формул, определяющих величину фокусного расстояния коллектива $f_к$ в зависимости от значений остальных параметров элементов схемы. Пусть в коллективную линзу входит луч под углом $u_{к1}$, пересекающий ось отражателя на расстоянии a от совпадающих главных плоскостей коллектива. Высота падения на эти главные плоскости будет равна l', причем

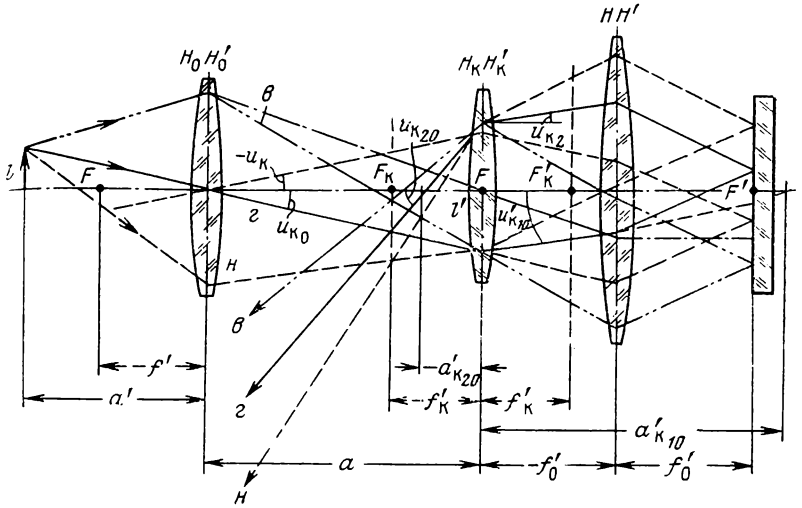


РИС. 38

$$l' = l\,\frac{(f' - a)}{f'}, \tag{2.79}$$

где f' — фокусное расстояние объектива автоколлимационной трубы; l — величина половины линейного поля автоколлимационной трубы.

После преломления пучок пересечет ось под углом $u'_{к_1}$ на расстоянии $a'_{к_1}$ от главных плоскостей коллектива $H_кH'_к$. После ЗЛО луч будет входить в коллектив, образуя с осью угол $u'_{к_2}$ равный по величине углу $u_{к_1}$. Для этих углов на основании формул раздела (2.2) можно написать, учитывая, что при втором преломлении лучи пересекут главные плоскости $H_кH'_к$ на высоте l,

$$\operatorname{tg} u'_{к_1} = \operatorname{tg} u_{к_1} - l\,\frac{(f' - a)}{f'\,f'_к}, \tag{2.80}$$

$$\operatorname{tg} u'_{к_2} = \operatorname{tg} u_{к_1} - 2\,l\,\frac{(f' - a)}{f'\,f'_к}. \tag{2.81}$$

Для расстояния точки пересечения луча с оптической осью $a'_{к_2}$ получим

$$a'_{к_2} = \frac{l\,f'_к\,(f' - a)}{f'\,f'_к \operatorname{tg} u_{к_1} - 2\,l\,(f' - a)}.$$

Главный луч пересекает оптическую ось, образуя с ней угол $u'_{к_{10}}$, причем

$$\operatorname{tg} u_{\text{к}_{10}} = l\frac{f' - a}{f' a}.$$

В соответствии с этим для главного луча будем иметь

$$\operatorname{tg} u'_{\text{к}_{10}} = \frac{l\,(f' - a)\,(f'_{\text{к}} - a)}{a f' f'_{\text{к}}},$$

$$\operatorname{tg} u'_{\text{к}_{20}} = \frac{l\,(f' - a)\,(f'_{\text{к}} - 2a)}{a f' f'_{\text{к}}},$$

$$a'_{\text{к}_{20}} = \frac{f'_{\text{к}} a}{f'_{\text{к}} - 2a}. \qquad (2.82)$$

Полученные формулы позволяют выбрать фокусное расстояние коллективной линзы, исходя из визирного расстояния и допускаемой степени виньетирования световых пучков. Если принять, что виньетирование недопустимо, то на основании (2.82) можно получить формулу для определения фокусного расстояния коллектива $f'_{\text{к}}$. Отсутствие виньетирования предполагает соблюдение условия

$$a'_{\text{к}_{20}} = -a.$$

В свою очередь, это приводит к выражению

$$f'_{\text{к}} = a. \qquad (2.83)$$

Представляет интерес случай, когда после отражения в ЗЛО главный луч возвращается в автоколлимационную трубу параллельно оптической оси и в автоколлимационной трубе будет телецентрический ход главных лучей. Для его получения необходимо положить $a'_{\text{к}_{20}} = \infty$ или на основании (2.82)

$$f'_{\text{к}} - 2a = 0$$

Отсюда находим, что телецентрический ход лучей имеет место для системы труба — ЗЛО, когда

$$f'_{\text{к}} = 2a. \qquad (2.84)$$

Следовательно, в зависимости от значимости тех или иных условий можно выбирать фокусное расстояние коллектива по одной из формул (2.83), (2.84) или в самом общем случае из формулы (2.82).

Соблюдение поставленных при выбранном $f'_{\text{к}}$ условий возможно, строго говоря, для определенного визирного расстояния a. Поэтому под ним следует понимать среднее или большее для данного диапазона визирное расстояние.

Для удобства пользования отражателем на различных дистанциях и регулирования виньетирования можно перемещать зеркало, изменяя степень дефокусировки $\Delta f'$, что, как следует

из (2.77), приводит к изменению степени виньетирования. Во избежание погрешностей зеркало должно быть перпендикулярным к оптической оси объектива ЗЛО, а его перемещение параллельно самому себе, однако выполнение этих условий — сложная задача, которая может быть решена применением специальных фокусирующих систем, образующих прямую визирную линию.

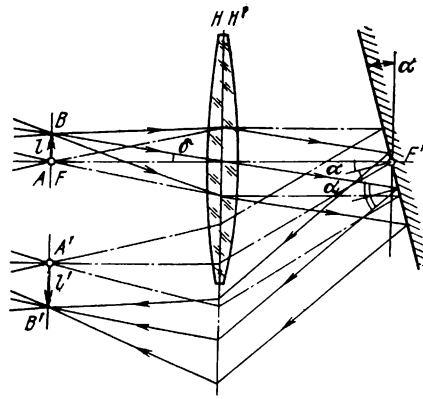


РИС. 39

Проанализируем погрешность, возникающую из-за неперпендикулярности плоскости зеркала к оптической оси объектива ЗЛО.

Предположим, что эта плоскость проходит через точку заднего главного фокуса объектива, образуя с фокальной плоскостью угол α (рис. 39). В этом случае ЗЛО уже не будет представлять собой систему однократного увеличения для всех точек предметной плоскости.

Рассмотрим меридиональное сечение системы ЗЛО, считая, что плоскость зеркала перпендикулярна к плоскости чертежа.

Для осевой точки предметной плоскости, совпадающей с передней фокальной плоскостью объектива ЗЛО, главный луч (совпадающий с осью) выйдет после отражения параллельно оси на расстоянии от нее l'_A, равном

$$l'_A = f' \operatorname{tg} 2\alpha. \tag{2.85}$$

Если провести через точку B вне оси системы ЗЛО луч, параллельный оси, то он выйдет из ЗЛО также параллельно оси, но пересечет предметную плоскость на высоте l'_B:

$$l'_B = f' \operatorname{tg} (2\alpha + \delta), \tag{2.86}$$

где δ — угол поля объектива ЗЛО (угол, под которым виден предмет из центра объектива ЗЛО).

Назовем коэффициентом трансформации изображения величину β_α, выражая ее формулой

$$\beta_\alpha = \frac{l'_B - l'_A}{l}. \tag{2.87}$$

С учетом (2.85) и (2.86) β_α будет определяться выражением

$$\beta_\alpha = \frac{f' (1 - \operatorname{tg}^2 2\alpha)}{f' - l \operatorname{tg} 2\alpha}. \tag{2.88}$$

В сагиттальном сечении масштаб останется прежним и рав-

ным 1, т. е. изображение, создаваемое ЗЛО с наклонным зеркалом, трансформируется.

При наклоне зеркала ЗЛО на угол α изображение осевой точки будет видно смещенным с оси на величину l'_A и при измерении непрямолинейности появляется погрешность, для уменьшения которой необходимо уменьшать фокусное расстояние объектива ЗЛО, ограничивая тем самым диапазон измеряемых отклонений от прямой. Поэтому при измерении непрямолинейности следует жестко выдерживать допуск на перпендикулярность плоскости зеркала к оптической оси объектива ЗЛО, определяемый формулой

$$\alpha_{\text{доп}} = \frac{l'_{\text{доп}}\rho''}{2f'}. \qquad (2.89)$$

Для объектива с фокусным расстоянием $f' = 100$ мм и допустимой погрешностью измерения непрямолинейности $l'_{\text{доп}} = 1$ мкм найдем, что $\alpha_{\text{доп}} \approx 1''$.

Однако, так же как и при использовании триэдров с погрешностями изготовления углов, погрешность из-за наклона зеркала ЗЛО исключается, если не измерять отклонений точек от прямой, а выставлять их на прямую, т. е. использовать нулевой метод.

Создание отражателя для измерения линейных и угловых величин одновременно при различной фокусировке одной и той же автоколлимационной трубы является весьма заманчивой. Опишем некоторые устройства с использованием ЗЛО, позволяющие решить эту задачу.

Для измерения угловых и линейных величин одним и тем же отражателем типа ЗЛО можно изготовить его, как и в приборе фирмы «Хет», поворачивающимся вокруг вертикальной оси. Для угловых измерений при этом должна использоваться задняя плоскость зеркала ЗЛО. Однако, как уже отмечалось, такое решение нельзя признать целесообразным.

Комбинированный отражатель в виде автоколлимационной марки (АКМО) был разработан в МИИГАиК. Эта марка (рис. 40,*а*) состоит из двух расположенных друг за другом ЗЛО, причем передняя фокальная плоскость объектива *3* второго ЗЛО совпадает с плоскостью полупрозрачного зеркала *2* и задней фокальной плоскостью объектива *1* первого ЗЛО. Для измерения линейных смещений используется первый ЗЛО, а угловых — оба ЗЛО, образующие телескопическую систему с зеркалом *4* в задней фокальной плоскости ее окуляра (объектив *3*).

Ход параллельных оптической оси пучков лучей, соответствующий измерению АКМО угловых величин, показан на рис. 40,*а*.

Если пучок параллельных лучей имеет такое же направление, как и оптическая ось АКМО, то он отразится в нем обратно

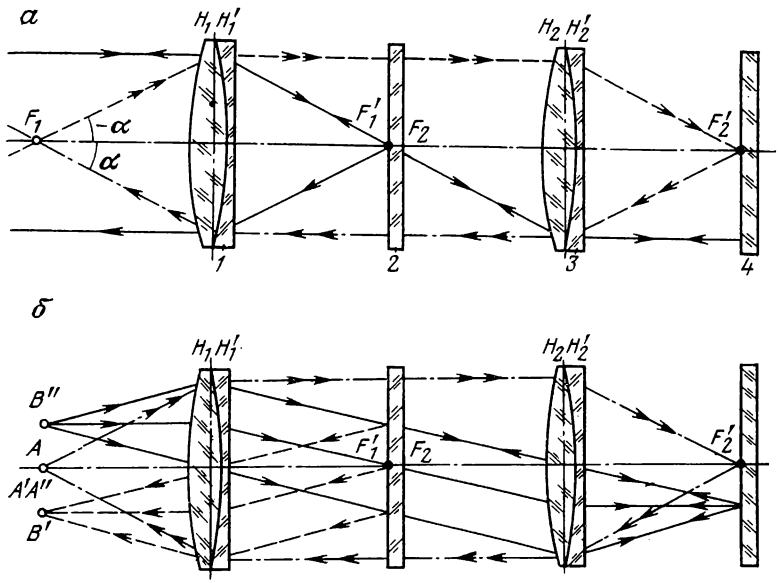


РИС. 40

по этому же самому направлению. При угле α пучка с осью пучок света после отражения выходит из АКМО под углом 2α к падающему пучку лучей независимо от того, образуется ли угол между осью падающего пучка лучей и оптической осью АКМО вследствие наклона АКМО или автоколлимационной трубы. Если рассматривать действие только первого ЗЛО, то направление отраженных им пучков лучей (пунктирная линия) не будет меняться как при поворотах АКМО, так и трубы.

Таким образом, в автоколлимационную трубу будут видны два изображения: одно — образованное одним, а второе — обоими ЗЛО. Изображение, создаваемое первым ЗЛО, обратное и неподвижное, может служить в качестве отсчетного индекса при измерениях.

Второе изображение, образуемое обоими ЗЛО, прямое, а его смещение относительно неподвижного пропорционально двойному углу наклона ЗЛО или автоколлимационной трубы. Наличие неподвижного изображения избавляет от необходимости иметь отсчетный индекс в плоскости сетки нитей автоколлимационной трубы, создавая определенные удобства при изготовлении и эксплуатации автоколлимационной трубы.

Рассмотрим ход лучей от точек на и вне оси передней фокальной плоскости объектива первого ЗЛО в соответствии с рис. 40,*б*. Здесь также образуются два изображения, одно — одним ЗЛО, второе — обоими. Если точка находится на оптической оси АКМО, то оба изображения сливаются в одно, так-

же находящееся на оптической оси ($A — A' — A''$). При смещении точки с оптической оси (точка B) первый ЗЛО образует, как известно, перевернутое изображение B, располагающееся на таком же расстоянии от оптической оси, что и сама точка B, но по другую ее сторону.

При измерении углов автоколлимационная труба фокусируется на бесконечность, а при измерении линейных смещений фокусировка трубы должна быть осуществлена на плоскость переднего фокуса объектива первого ЗЛО. В качестве автоколлимационной трубы можно использовать трубы для контроля плоскостности и соосности ППС-11 или ППС-12. При этом не потребуется существенных конструкторских разработок и перестройки указанных труб.

Производство АКМО — также процесс несложный, не требующий больших конструкторских и технологических разработок.

Область применения АКМО весьма узка и ограничивается большим виньетированием световых пучков при измерении углов. Однако существуют другие пути решения задачи угловых и линейных измерений при помощи ЗЛО.

Можно установить в передней фокальной плоскости объектива ЗЛО для измерения угловых величин частично отражающее зеркало с нанесенным на его поверхность целевым знаком, которым может служить плоская поверхность линзы-коллектива. Конструкция такой марки ЗЛО показана на рис. 41, где цилиндрическая ось *4* служит для сопряжения ее с треножником при измерениях углов. В корпусе *5* крепятся в оправах коллектив *1*, объектив *2* и зеркало *3*, имеющее возможность юстировочного перемещения относительно коллектива для обеспечения правильной сборки ЗЛО.

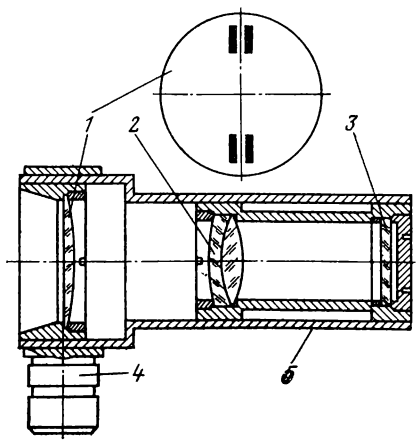


РИС. 41

Трубой, сфокусированной на бесконечно удаленный предмет, измеряют положение полученного отражением от зеркала автоколлимационного изображения, оценивая угол его поворота. Зеркальное покрытие на плоскости плоско-выпуклой колективной линзы должно отражать примерно 65—70% световой энергии.

При измерении линейных смещений автоколлимационная труба фокусируется на переднюю фокальную плоскость объектива ЗЛО. В данном случае она совмещена с плоской

поверхностью коллективной линзы.

Дальность действия марки при измерении угловых величин определяется рядом факторов: диаметром зеркала и коллектива, относительным отверстием и фокусным расстоянием объектива автоколлимационной трубы и коэффициентом отражения ρ зеркального покрытия.

Целевой знак на плоской поверхности коллектива также может служить для измерения угловых и линейных смещений, так как при смещениях переднего фокуса объектива ЗЛО автоколлимационное изображение смещается на вдвое бóльшую величину, чем изображение целевого знака, и их совпадение будет свидетельствовать об отсутствии угловых смещений ЗЛО.

Этот способ измерения углов и линейных смещений с помощью ЗЛО был применен для закрепления направления истинного меридиана, провешенного в закрытом производственном помещении. Задача определения и закрепления меридиана наиболее сложна во второй своей части, так как короткие визирные расстояния требуют высоких точностей визирования на марки. Поэтому азимут, определенный гиротеодолитом типа GiB-2 с автоколлимационной трубой, передавался на опорное направление, реализованное описанными марками — ЗЛО, укрепленными на стенах помещения. Для передачи азимута на другое направление применялся теодолит с автоколлимационной трубой, устанавливаемый в створе марок ЗЛО.

Эксперименты по исследованию точности измерений описанным способом, проведенные с помощью теодолита ТБ-1 с автоколлимационным окуляром, позволили получить следующие погрешности измерения угловых m_δ и линейных $m_{\Delta l}$ величин:

$$m_\delta = \pm \frac{5'' \div 3{,}9''}{\Gamma},$$

$$m_{\Delta l} = \pm (0{,}008 + 0{,}003\, L),$$

где L — расстояние визирования в м.

2.4. АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ЦЕНТРИРОВКИ ЛИНЗ И ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ

При контроле центрировки линз и линзовых компонентов широко применяются коллимационные и автоколлимационные методы [5, 11]. Наибольшую точность может обеспечить оптическая система прибора контроля центрировки с фокусирующей системой, образующей прямую линию визирования.

В этой схеме используется автоколлимация сходящихся пучков лучей, получаемых отражением от сферических поверхностей центрируемых деталей.

В соответствии со схемой рис. 42 источник света *1* посредством конденсора *2* освещает перекрестие сетки *3*, находящейся в фокальной плоскости объектива *7*. Пучки лучей от перекре-

стия проходят призму-куб *4*, отражаясь частично на ее светоделительной грани *а*, и, отразившись в полупрозрачном зеркале *5*, поступают в фокусирующую призму БкР — 180°. После фокусирующей призмы пучки лучей отражаются в опорном зеркале *6*, возвращаются в фокусирующую призму и проходят полупрозрачное зеркало *5* и объектив *7*, образуя изображение креста сетки в плоскости центра кривизны *С* контролируемой поверхности *8*. При ее децентрировке изображение креста, создаваемое объективом, фокусирующей системой и зеркалом *5*, смещается с центра биссекториального креста сетки *9*, а смещение, наблюдаемое в окуляр *10*, измеряется микрометром *11*.

В ряде автоколлимационных схем для возвращения отраженных пучков лучей в трубу используется система зеркала и контролируемой линзы, образующих телескопическую систему.

Разработанная в США автоколлимационная схема (рис. 43) состоит из источника света *1* и конденсора *2*, освещающих сетку *3* в фокальной плоскости объектива *4*. Источник, конденсор и сетка с объективом образуют коллиматор, посылающий параллельные пучки лучей. Полупрозрачное зеркало *5* направляет его на сменный объектив *6*, фокальная плоскость которого совмещена с центром кривизны *С* испытуемой поверхности *7*. При ее децентрировке изображение сетки смещено на величину, соответствующую вдвое большему смещению центра кривизны с оптической оси коллиматора. Изображения рассматривают в плоскости сетки *9* трубы, состоящей из объектива *8* и окуляра *10*, и по измеренному смещению изображения делают суждение о величине децентрировки.

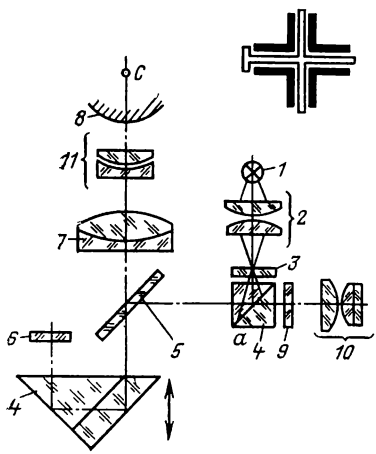


РИС. 42

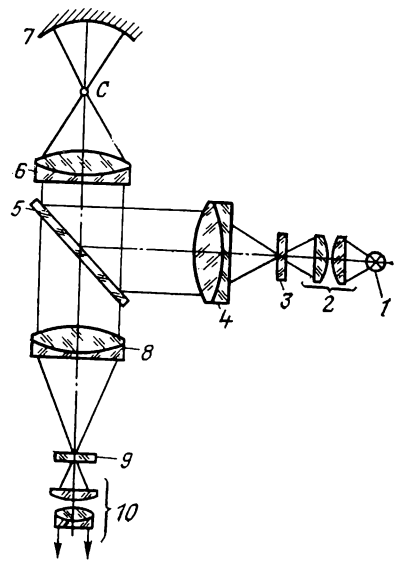


РИС. 43

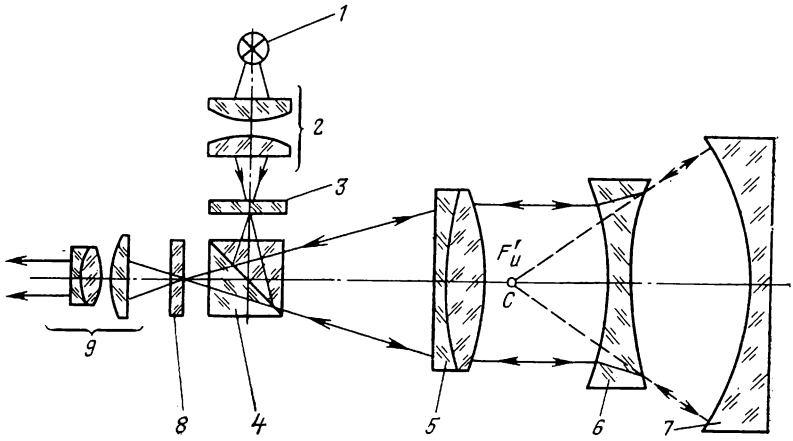


РИС. 44

Другая схема представлена на рис. 44 и применяется не только для контроля центрировки, а и для измерения вершинных расстояний линз. В отличие от рассмотренной схемы, где опорная точка задается задним главным фокусом сменного объектива *6* (см. рис. 43), здесь роль опорной точки играет центр кривизны сферического вогнутого зеркала *7*. Прибор представляет собой автоколлиматор, состоящий из объектива *5* и двухсеточного окуляра [с источником света *1*, конденсором *2*, коллиматорной сеткой *3*, светоделительной деталью *4* (на рис. 44 — призма-куб), визирной сеткой *8*, и окуляром *9*]. Объектив автоколлиматора посылает пучок параллельных лучей на испытуемую линзу *6*, задняя фокальная плоскость которой совпадает с плоскостью центра кривизны сферического зеркала. При этом образуется телескопическая система, и пучок лучей выйдет из нее параллельным, а при децентрировке линзы — наклонным к оси на угол, пропорциональный ее величине. Изображение, создаваемое телескопической системой, наблюдается в плоскости сетки нитей визирной сетки *8* через окуляр *9*. Как и во всех других рассмотренных ранее схемах, коллимационных и автоколлимационных, линзу вращают в оправе.

Для измерения вершинных расстояний оправка с линзой может перемещаться вдоль оптической оси автоколлиматора, и ее перемещение измеряется тем или иным способом.

ЗЛО, оптические свойства которых исследованы нами в предшествующих разделах, могут служить основой для построения оптических систем автоколлимационных приборов контроля центрировки линз. Ниже рассматривается простая и надежная схема контроля, создание которой возможно на базе имеющихся на большинстве оптико-механических предприятий трубок Забелина. Схема представлена на рис. 45 и состоит из автоколлимационной трубы *1* с фокусирующим устройством того или иного типа (на рис. 45 труба имеет внутреннюю фокусировку

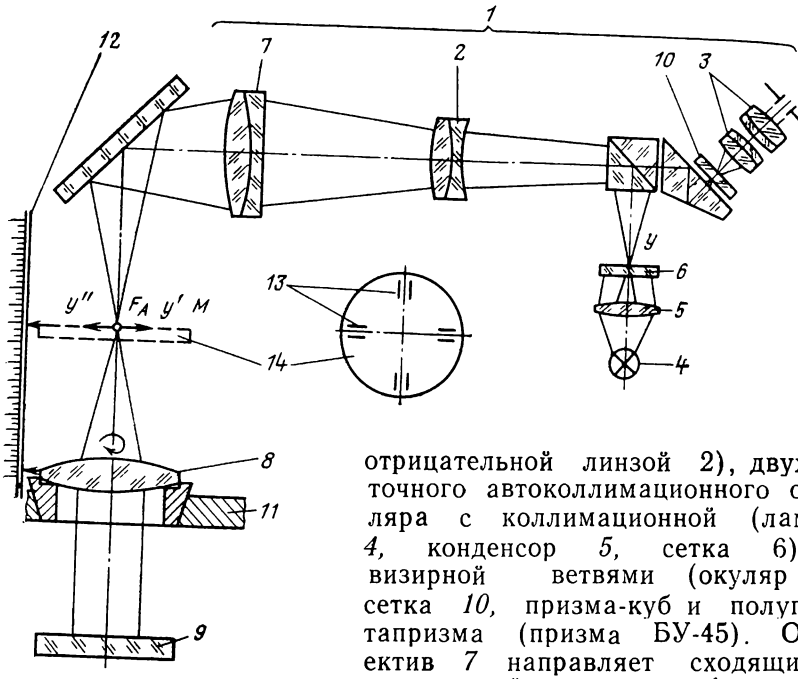


РИС. 45

отрицательной линзой 2), двухсеточного автоколлимационного окуляра с коллимационной (лампа *4*, конденсор *5*, сетка 6) и визирной ветвями (окуляр *3*, сетка *10*, призма-куб и полупентапризма (призма БУ-45). Объектив *7* направляет сходящийся пучок лучей в переднюю фокальную плоскость *M* контролируемой линзы *8*, заключенной в оправу, вращающуюся вокруг оси центрированного с ней отверстия в столе 11. За центрируемой линзой находится плоское зеркало *9*, перпендикулярное к оптической оси автоколлиматора, что периодически проверяется при вынутой линзе и установке автоколлиматора на бесконечность. Положение опорной плоскости центрировочного патрона для крепления оправы с центрируемой линзой также проверяется при помощи наложенного на нее плоского зеркала.

Децентрировка линзы приводит при ее вращении к вращению изображения перекрестия сетки *6*, наблюдаемого в плоскости сетки *10* через окуляр *3* и измеряемого тем или иным способом. Так как для контроля каждой линзы нет необходимости производить фокусировку на центр кривизны каждой из поверхностей, то фокусирующее устройство в автоколлимационной трубе может быть обычного типа. Однако для повышения надежности, так как при контроле перпендикулярности зеркала к визирной оси трубы ее необходимо фокусировать на бесконечность, целесообразно применить в рассматриваемой оптической системе фокусировку по одной из рассматриваемых в последующих разделах схем, образующих прямую линию визирования.

Измерение вершинных отрезков контролируемой линзы может производиться с помощью пластинки *14* со штрихами *13*, перемещаемой вдоль оси автоколлиматора до совпадения с фо-

кальной плоскостью центрируемой линзы *8*. Момент прохождения пластинки через фокальную плоскость четко фиксируется в силу удвоенного смещения изображений нанесенных на ней штрихов при дефокусировке. Пластинка со штрихами для снятия отсчетов может быть скреплена с лупой или микроскопом слабого увеличения, перемещающимися вдоль шкалы 12.

По описанной схеме в МИИГАиК был изготовлен макет прибора для контроля центрировки линз и линзовых систем автоколлимационным методом. Проведенные исследования подтвердили целесообразность применения оптических систем с ЗЛО

2.5. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КОМПАРАТОРОВ С АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ НАВЕДЕНИЯ И ОТСЧЕТА

В данном разделе рассматриваются вопросы практического осуществления ЗЛО в приборах компарационного типа.

Наиболее распространенным прибором метрологических лабораторий можно считать компаратор ИЗА-2, с помощью которого производят компарирование концевых и штриховых мер, а также измерение размеров деталей, в том числе и диаметров отверстий.

При компарировании, как известно, визирным микроскопом наводят на края измеряемого отрезка, производя одновременно отсчет по образцовой шкале с помощью отсчетного микроскопа. Измеряемая величина определяется разностью отсчетов по образцовой шкале. Общая точность измерений слагается, таким образом, из точности наведения и точности отсчета по образцовой шкале.

Повышение точности измерений может быть достигнуто как в результате повышения точности выполнения каждой из этих операций в отдельности, так и совокупным повышением точности обеих операций. Рассмотрим, как решаются эти задачи различными авторами, а в заключение остановимся на рассмотрении схем с использованием ЗЛО.

Для повышения точности наведения визирным микроскопом горизонтального компаратора Е. Лейтц предложил в 1952 г. схему перфлектометра, нашедшего широкое применение для различного рода измерений, в том числе и диаметров малых отверстий. Отечественная промышленность выпускает перфлектометр по этой схеме в качестве дополнительного приспособления к инструментальным микроскопам под шифром ИЗО-2.

Оптическая система перфлектометра, заменяющего в компараторе Лейтца визирный микроскоп, представлена на рис. 46 и состоит из проекционного и визирного микроскопов с объективами *4* и *6*, между которыми помещается на каретке компаратора измеряемая деталь *5*.

Нижний проекционный микроскоп имеет сетку *3* с маркой S, подсвечиваемой через конденсор *2* лампой накаливания *1*. Его объектив образует изображение светящейся марки в точке S_1'

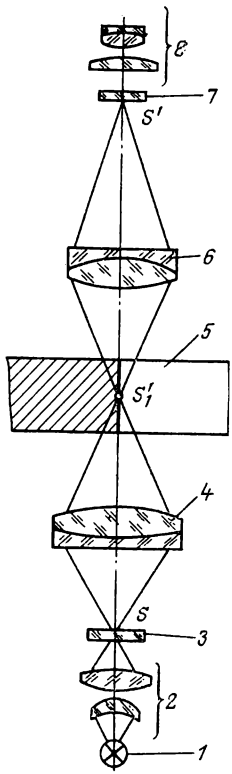


РИС. 46

поверхности измеряемой детали, а объектив *6* проектирует его в точку фокальной плоскости окуляра *8* верхнего микроскопа, в которой находится сетка *7*. Перемещая каретку с деталью, поочередно совмещают с изображением S_1' марки *S* проекционного микроскопа левую и правую границы изделия или концевой меры. В обоих случаях вторичные изображения марки *S*, полученные в результате отражения пучка от изделия, должны совпадать с ее прямым изображением *S'*, образованным пучками, не претерпевшими отражения от поверхности измеряемой детали.

Измеряемый интервал равен величине перемещения столика с деталью. Совмещение ограничивающих измеряемую величину поверхностей происходит с высокой степенью точности (0,1—0,2 мкм). Для контроля параллельности поверхностей измеряемой детали и общей оси микроскопов деталь перемещают вверх или вниз, при правильной ее установке зеркальное изображение марки остается неподвижным.

Главной частью общей погрешности измерений компараторами с перфлектометрами считают погрешность измерения перемещения столика, равную 1—2 мкм, и принимают для ее уменьшения высокоточные методы и устройства типа интерферометров и др. Однако повышение точности и чувствительности наведения на граничные поверхности измеряемых деталей и линии штриховых мер также является актуальной задачей.

Это объясняется тем, что вместо абсолютного метода можно применять при измерениях с перфлектометрами метод сравнения измеряемого размера с эталонным. При этом домеры можно производить с высокой степенью точности с помощью различных компенсаторов, введенных в схему верхнего микроскопа, или окулярных микрометров. Такой путь решения отчасти использован в двойном перфлектометре Ю. В. Коломийцова, где в оптическую схему введено отсчетное устройство с линзовым компенсатором В. Н. Чуриловского.

В двойном перфлектометре диаметр контролируемого отверстия сравнивается с диаметром образцового кольца или с блоком концевых мер. Принципиальная схема двойного перфлектометра дана на рис. 47, где показан ход главных лучей *a* и *b*, выходящих из центров марок *A* и *B*. Объективы *2* и *3* проецируют марки *A* и *B* с помощью пластины *1* в точки *A'* и *B'* на противо-

положные стенки контролируемого отверстия. После прохождения объектива *4* пучки лучей *a* и *b* попадают на зеркало *9* и полупрозрачную пластину *6*, которая разделяет каждый из них на два пучка (a_1 и a_2; b_1 и b_2), а пластина *7* их соединяет. Пластина *7* и зеркало *8* установлены так, что пучки a_1 и b_2 перед объективом *10* параллельны друг другу. При этом вторичные изображения A'' и B'' марок, наблюдаемые в фокальной плоскости F этого объектива, примерно совмещены, а их точное совмещение достигается одной подвижной из линз компенсатора *11*. Пучки a_2 и b_1 образуют значительные углы с осью зрительной трубы, и создаваемые ими изображения не попадают в поле зрения.

При работе вначале устанавливают блок концевых мер *5*, размер которого примерно равен измеряемому размеру, затем совмещают изображения марок и снимают отсчет по шкале компенсатора. Для повышения точности совмещения марка *A* имеет две близко расположенные щели, создающие биссектор.

После этого блок мер заменяют контролируемой деталью с цилиндрическим отверстием, при помощи компенсатора приводят изображения в соответствующее положение и снимают второй отсчет. Измеряемая величина разности отсчетов, умноженной на цену деления шкалы компенсатора.

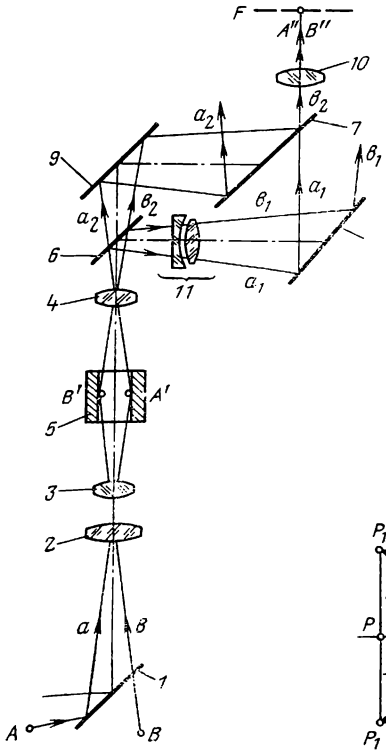


РИС. 47

По данным литературных источников известно, что на макете двойного перфлектометра при сравнении двух блоков концевых мер с номинальными длинами 1 и 1,01 мм, а также блока мер с номинальным размером 1 мм с двумя кольцами одинакового диаметра погрешности совмещения щели с биссектором не превышали 0,1 и 0,13 мкм, а погрешности сравнения находились в пределах 0,13—0,20 мкм.

Анализ схемы перфлектометра Лейтца показывает, что она также представляет собой оптичес-

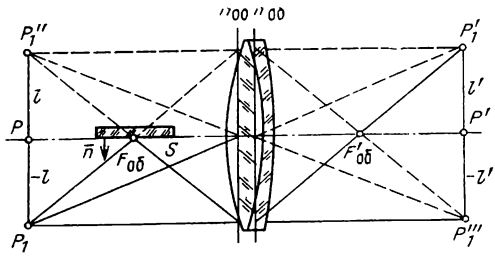


РИС. 48

кую систему двойного изображения. Для математической трактовки принципа действия этой схемы примем, что граничная поверхность детали является плоскостью, при цилиндрической поверхности — касательной к цилиндру.

Для вывода формулы обратимся к рис. 48, где визирная ось микроскопа с объективом $H_{об}$ $H'_{об}$ и точками фокусов $F_{об}$ и $F'_{об}$ горизонтальна. Перед объективом расположено зеркало с ортом нормали n, параллельное оптической оси объектива.

Если точка P и плоскость зеркала находятся на оптической оси объектива, то изображения предметной точки P, образуемые пучками лучей, отразившимися от зеркала и попавшими в объектив без отражения, совпадают друг с другом в точке P'. При смещении точки P на величину l в плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива, пучки лучей, не отражающиеся в зеркале, образуют изображение точки P в точке P'_1, а отраженные им — изображения P''_1 и P'''_1.

Расстояние между двумя изображениями P'_1 и P'''_1 будет равно удвоенной величине изображения l' отрезка l. Аналогичный эффект получится и при смещении зеркала в направлении нормали.

Пусть начало координатной системы 0 совпадает с одной из узловых точек объектива, а одна из осей — с его оптической осью. Обозначая радиусы-векторы точек предмета и изображения, соответственно, $\bar{R}$ и $\bar{R}'$, получим для изображения в системе зеркало — объектив ($\bar{R}'$) и в системе одного объектива ($\bar{R}'_0$).

$$\bar{R}' = \bar{R} - 2\bar{n}(\bar{R}\bar{n}) + 2\bar{Q}, \tag{2.90}$$

$$\bar{R}'_0 = \bar{R}. \tag{2.91}$$

Образуя разность (2.91) и (2.90) для $\Delta\bar{R}'$, найдем, заменив $\bar{Q}$ через $\bar{n}$ $(\bar{L}n)$:

$$\Delta\bar{R}' = 2\bar{n}(\bar{R}\bar{n}) - 2\bar{n}(\bar{L}\bar{n}). \tag{2.92}$$

Дифференцируя (2.92) по $\bar{L}$ и заменяя дифференциалы конечными приращениями, приходим к выражению

$$\delta\Delta\bar{R}'_{\Delta L} = -2\bar{n}(\Delta\bar{L}\bar{n}). \tag{2.93}$$

Для случая когда перемещение зеркала происходит по нормали к его плоскости, имеем

$$\Delta\bar{L} = \bar{n}\Delta L. \tag{2.94}$$

После подстановки ΔL из (2.94) в (2.93) получим

$$\delta\bar{R}' = -2\bar{n}\Delta L, \tag{2.95}$$

т. е. перемещение зеркала по направлению нормали к его плоскости приводит к удвоенному смещению изображения объекта.

Принцип двойного изображения широко используется в различных оптических приборах. При этом в визирных трубах система раздвоения изображения помещается либо вне трубы перед ее объективом, либо внутри трубы. Но при измерениях обычно объектив смещается относительно плоскости зеркала, эквивалентного раздваивающей системе, которая может быть весьма сложной. Для доказательства смещения изображения при смещении самого предмета продифференцируем (2.92) по $\bar{R}$ и заменим дифференциалы конечными приращениями

$$\delta\Delta\bar{R}'_{\Delta R} = 2\bar{n}\,(\Delta\bar{R}\bar{n}). \tag{2.96}$$

Если предположить, что перемещение совершается по нормали к плоскости зеркала, то

$$\Delta\bar{R} = \bar{n}\Delta S \tag{2.97}$$

и после подстановки (2.97) в (2.96) получим

$$\delta\bar{R}'_{\Delta R} = 2\bar{n}\Delta S. \tag{2.98}$$

Формулы (2.92), (2.93) и (2.96) являются главными для анализа принципа действия и основных погрешностей измерений в системах двойного изображения.

Принцип двойного изображения в сочетании с изученными свойствами ЗЛО может быть применен в оптической системе микроскопа наведения компаратора с перфлектометром. Принципиальная схема такого автоколлимационного перфлектометра приведена на рис. 49, а ход некоторых лучей в ней — на рис. 50.

Схема включает в себя автоколлимационный микроскоп с объективом *1* и сеткой *6* с индексом S, освещаемым посредством конденсора *4* от источника *3*. Объектив микроскопа образует изображение S_1' (см. рис. 49) индекса S_1 в плоскости, совмещенной с передней фокальной плоскостью объектива *10* ЗЛО с зеркалом *11*, заключенными в корпус *8*. Для наблюдения изображений S', образующихся в плоскости сетки *9* визирной ветви микроскопа, служит окуляр *2*. Разделение пучков коллимационной и визирной ветвей микроскопа производится кубиком *5* с полупрозрачной диагональной гранью.

Если деталь *7* находится вне хода пучков лучей между объективом микроскопа и ЗЛО, то существует только одно автоколлимационное изображение, закон образования которого представляется в матричной форме так:

$$R'_0 = -R + 2Q_0, \tag{2.99}$$

здесь R'_0 и R — одностолбцовые матрицы координат точек изображения и предмета, Q_0 — одностолбцовая матрица координат точки переднего фокуса объектива ЗЛО, соответствующей вершине триэдра.

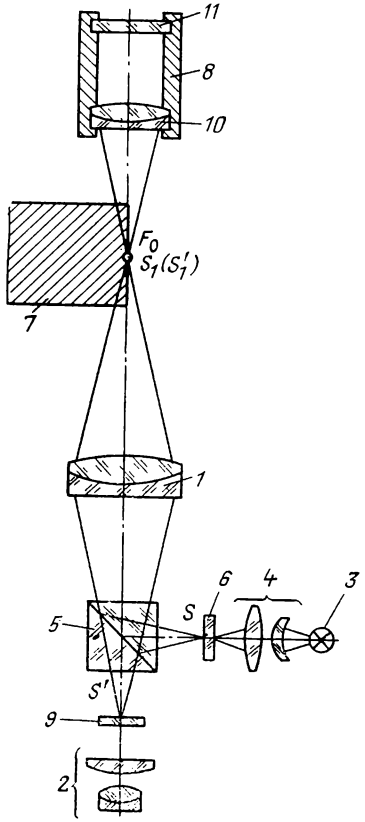


РИС. 49

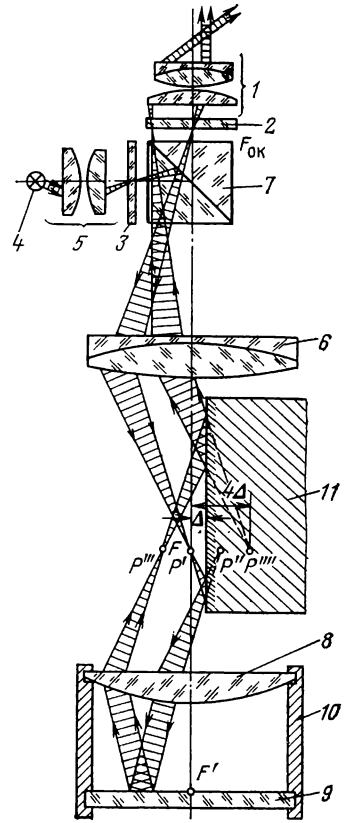


РИС. 50

По мере пересечения деталью пучков лучей в автоколлимационном устройстве наведения (АУН) в поле зрения будут наблюдаться еще три автоколлимационных изображения. Первое будет образовываться пучками лучей, отразившихся перед тем, как вернуться в микроскоп, от поверхности и затем от ЗЛО (R_I'). Второе получается в результате отражения от ЗЛО, а затем уже от поверхности (R_{II}'). Третье изображение образуется пучками лучей, отразившихся от поверхности и ЗЛО и вновь от поверхности детали (R_{III}'). Для каждого из получившихся изображений можно написать

$$R_I' = -MR + (E-M)Q + 2MQ_0, \tag{2.100}$$

$$R_{II}' = -MR - (E-M)Q + 2Q_0, \tag{2.101}$$

$$R_{III}' = -R + 2(E-M)Q + 2MQ_0, \tag{2.102}$$

где M — матрица отражения в плоскости зеркала, касательной к образующей поверхности детали, Q — одностолбцовая матри-

ца координат точки плоскости зеркала, лежащей на перпендикуляре, опущенном на нее из начала координат.

Уже отмечалось, что для правильной работы схемы АУН необходимо, чтобы

$$Q_0 = R. \tag{2.103}$$

Подстановка (2.103) в формулы (2.99) ÷ (2.102) приводит к выражениям:

$$R'_0 = R, \tag{2.104}$$

$$R'_{\mathrm{I}} = M R + (E - M) Q, \tag{2.105}$$

$$R'_{\mathrm{II}} = (2E - M) R - (E - M) Q, \tag{2.106}$$

$$R'_{\mathrm{III}} = (2M - E) R + 2 (E - M) Q. \tag{2.107}$$

Нетрудно видеть, что, выбирая соответствующие пары изображений, можно получить интервал между ними, вшестеро больший видимого смещения границы детали с визирной оси АУН. На самом деле, разность $\Delta R'_{3,2}$ (2.107) и (2.106) будет равна

$$\Delta R'_{3,2} = (M - E) R + 3 (E - M) Q. \tag{2.108}$$

Дифференцируя (2.108) по Q и заменяя дифференциалы конечными приращениями $\delta\Delta R_{3,2}$ и ΔQ, находим

$$\delta \Delta R'_{3,2} = 3 (E - M) \Delta Q. \tag{2.109}$$

Нетрудно видеть, что когда нормаль граничной поверхности детали перпендикулярна к визирной оси АУН, получаем

$$\delta \Delta R'_{3,2} = 6 \Delta l, \tag{2.110}$$

где Δl — перемещение детали в указанном направлении.

Можно использовать для измерений и другую пару автоколлимационных изображений, так для разности R'_{III} и R'_0 при оговоренных выше условиях найдем

$$\delta \Delta R'_{3,0} = 4 \Delta l. \tag{2.111}$$

Ход лучей, образующих изображения этого последнего случая показан на рис. 50.

Разумеется, в каждом случае измерения могут сопровождаться погрешностями, вызываемыми, в частности, наклоном граничной поверхности. Исключение этих погрешностей, так же, как и в перфлектометре Лейтца, достигается первоначальной установкой изделия.

Уже упоминалось о возможности применения ЗЛО для повышения точности визирования отсчетным микроскопом компаратора. Схема представляет собой устройство для отсчета по прозрачным шкалам, обеспечивающее более высокую точность

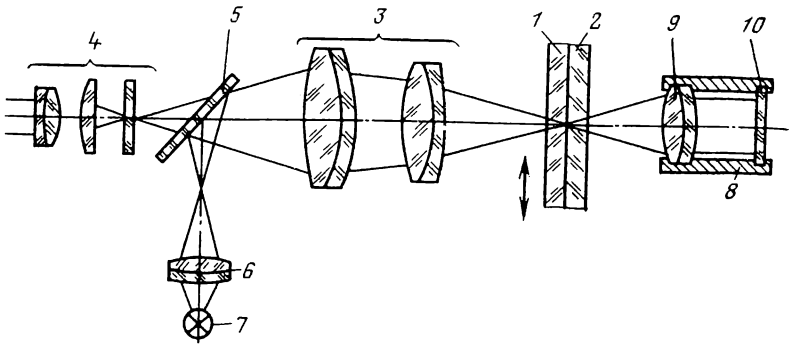


РИС. 51

благодаря большой чувствительности к поперечным установкам (наведение на штрих прозрачной шкалы).

На рис. 51 показана схема устройства отсчета по шкалам компаратора ИЗА-2. Она состоит из автоколлимационного микроскопа с объективом *3*, конденсором *6*, источником света *7*, разделительной пластинкой *5* и окуляром *4*, ЗЛО — из объектива *9* и зеркала *10*, заключенных в общем корпусе *8* и отсчетных шкал *1* и *2*. В схеме вместо автоколлимационного может быть применен и обычный микроскоп, а для освещения шкалы могут быть использованы устройства для освещения непрозрачных объектов (например опак-иллюминатор). При смещении штриха шкалы с визирной оси отсчетного устройства ее изображение сместится на вдвое бо́льшую величину, чем при обычном способе наведения на штрих.

2.6. ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫЕ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ ФОКУСИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

В разделах 2.1—2.4 показано, что основной вклад в погрешности линейных измерений автоколлимационными приборами вносит нестабильность пространственного положения визирной линии при перефокусировке. Теория и расчет фокусирующих систем с отрицательными и положительными оптическими компонентами разработаны достаточно полно [2, 3, 12]. В результате установлено, что такие системы не обеспечивают визирование от «нулевого» расстояния и стабильности визирной линии даже при тщательном изготовлении и юстировке направляющих оптических фокусирующих элементов и в большинстве случаев не обеспечивают требований по точности измерений. При этом наибольшие указанные нестабильности имеют место при малых расстояниях визирования. Другим отрицательным свойством таких фокусирующих систем является изменение фокусного расстояния объектива автоколлиматора при перефокусировках.

Отмеченные недостатки стимулировали разработки фокуси-

рующих систем, позволяющих сохранить стабильное положение визирной линии.

Работы по созданию таких устройств ведутся в разных направлениях. Весьма перспективными являются разработки устройств визирования, основанных на явлениях дифракции и интерференции света с использованием схемы опыта Юнга [22].

В ряде оптических систем приборов для исключения погрешностей при перефокусировке используется принцип двойного изображения с устройствами раздвоения изображения, помещенными вне и внутри трубы.

Для устранения рассматриваемого недостатка разработаны фокусирующие устройства зрительных труб с ЗПС в качестве фокусирующих компонентов.

Первой оптической системой фокусировки, обеспечивающей прямую визирную линию, с применением ЗПС в виде триэдра в качестве фокусирующего компонента является система Ивона. Она была применена в ряде оптических приборов контроля прямолинейности, разработанных за рубежом и в СССР [17]. Несмотря на ряд положительных качеств системы и ее сравнительно широкое распространение, в литературных источниках отсутствует анализ ее свойств, поэтому рассмотрим погрешности, возникающие при неточном изготовлении триэдра и неправильной сборке трубы с этой фокусирующей системой.

Оптическая схема фокусирующего устройства (рис. 52) состоит из фокусирующего компонента *3* и опорного зеркала *4*. Поступающие в объектив *1* трубы или другого визирного устройства пучки лучей отражаются в призме БкР-180°, являющейся фокусирующим компонентом. Затем после отражения в опорном зеркале они вновь проходят через фокусирующий компонент, но уже в обратном направлении. Для направления пучков лучей в плоскость сетки нитей *5* применяют призму *2* или зеркало со светоделительным покрытием. Образующееся изображение рассматривается наблюдателем в окуляр *6*. Для обеспечения постоянного совпадения плоскости изображения с плоскостью сет-

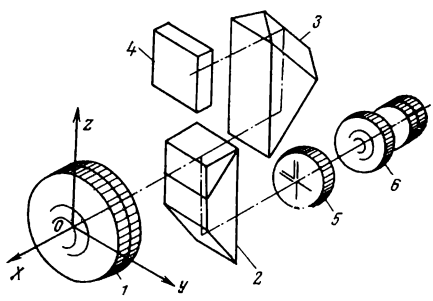


РИС. 52

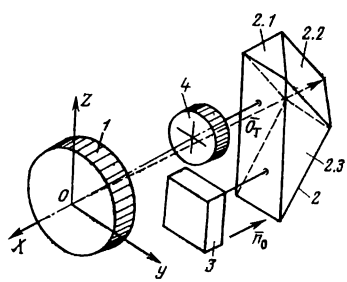


РИС. 53

ки *5* фокусирующий компонент перемещается вдоль оптической оси объектива.

Для более подробного исследования системы фокусировки обратимся к упрощенной схеме, представленной на рис. 53, где не показана призма, не участвующая непосредственно в работе самого фокусирующего устройства.

Фокусировка осуществляется триэдром БкР-180° *2*, вершина которого задана вектором $\bar{Q}_т$ с одностолбцовой матрицей координат $Q_ф$. Опорное зеркало с единичным вектором нормали $\bar{n}_0$ имеет матрицу отражения M. Радиусу-вектору точки зеркала (в частности, лежащей на перпендикуляре, опущенном из начала координат *0*) $\bar{Q}$ соответствует одностолбцовая матрица его координат Q. Сетка нитей *4* условно располагается на оптической оси объектива *1*, что вызвано, как уже говорилось, стремлением не перегружать схему дополнительными деталями, типа светоделителей.

Применяя формулы векторно-матричного метода расчета зеркальных систем, найдем формулу отражения пучков лучей в исследуемой фокусирующей системе. Для зеркала и триэдра имеем соответственно

$$R'_m = M R + (E - M) Q, \tag{2.112}$$

$$R'_ф = -E R + 2 E Q_ф, \tag{2.113}$$

где R'_m и $R'_ф$ — одностолбцовые матрицы координат точки изображений в опорном зеркале и триэдре соответственно.

На основе формул (2.112) и (2.113), считая, что изображение в триэдре служит предметом для зеркала, а образуемое им изображение является предметом для триэдра, находим

$$R' = M R + (E - M)(2 Q_ф - Q). \tag{2.114}$$

При рассмотрении идеального случая с триэдром, не имеющим погрешностей углов и являющимся эталоном для оценки различного рода погрешностей системы, будем считать, что нормаль к опорному зеркалу располагается вдоль оптической оси объектива. Оптическая ось объектива является осью симметрии, поэтому именно ее целесообразно совместить с какой-либо из координатных осей, в данном случае с осью X.

Понятие визирной оси относится к случаю фокусировки трубы на бесконечно удаленный предмет, при этом радиус-вектор $\bar{R}_\infty$ будет иметь своим концом точку задней фокальной плоскости объектива, а его изображение в фокусирующей системе $\bar{R}'_\infty$ задает точку перекрестия сетки нитей. От нее в дальнейших исследованиях следует вести отсчет смещений изображений в плоскости, перпендикулярной к визирной оси, определяющих погрешности визирования.

Пусть при визировании на бесконечность создаваемое объективом изображение смещено в его фокальной плоскости с

оптической оси на отрезки L_∞ и H_∞ вдоль координатных осей Y и Z соответственно. При этом вершина триэдра также смещена с оптической оси объектива на отрезки l_∞ и h_∞, будучи удаленной от объектива на величину S_∞. Одностолбцовые матрицы координат при этом будут:

$$R_\infty = \begin{pmatrix} -f' \\ L_\infty \\ H_\infty \end{pmatrix}, \tag{2.115}$$

$$Q_\infty = \begin{pmatrix} -S_\infty \\ l_\infty \\ h_\infty \end{pmatrix}. \tag{2.116}$$

Опорное зеркало пусть располагается перпендикулярно к оси, т. е.

$$M_0 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{2.117}$$

$$Q = \begin{pmatrix} -S_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{2.118}$$

Применение формулы (2.114) с учетом соответствующих выражений для составляющих ее матриц дает для одностолбцовой матрицы координат радиуса-вектора перекрестия сетки нитей $\bar{R}'_\infty$

$$R'_\infty = \begin{pmatrix} f' - 2\,[2\,S_\infty - S_0] \\ L_\infty \\ S_\infty \end{pmatrix}. \tag{2.119}$$

Направление вектора R'_∞, задаваемое ортом, $\bar{\rho}_\infty$, определяет направление визирной оси трубы в пространстве объектов, а вектора $\bar{R}'_\infty$ с ортом $\bar{\rho}'_\infty$ — направление визирной оси в пространстве изображений.

Из формулы (2.114) следует очень важный вывод, что визирная ось трубы с фокусировкой по Ивону будет прямой линией только тогда, когда опорное зеркало перпендикулярно к оптической оси ее объектива. Именно в этом случае второй член формулы (2.114) не будет иметь в плоскости сетки нитей составляющих, зависящих от положения фокусирующего компонента. В этом и только в этом случае они будут целиком определяться положением изображения, создаваемого объективом, а следовательно, в конечном итоге, положением самого объекта.

При юстировке оптической системы с этим фокусирующим устройством необходимо добиваться перпендикулярности пло-

скости опорного зеркала к оптической оси объектива или другого оптического элемента, формирующего изображение. Верхняя строка матрицы-столбца (2.119) есть величина постоянная, называемая обычно в трубах с внутренней линзовой фокусировкой длиной трубы. Оставим для этой величины такое же название и введем для нее обозначение S_c. При визировании на различно удаленные объекты вместо величин S_∞ и f' соответствующие отрезки обозначим S и S'. Следовательно,

$$S_c = f' - 2\,(2\,S_\infty - S_0) \tag{2.120}$$

или

$$S_c = S' - 2\,(2\,S_\infty - S_0). \tag{2.121}$$

При введении величины S_c в формулу (2.119) последняя примет вид

$$R'_\infty = \begin{pmatrix} S_c \\ L_\infty \\ H_\infty \end{pmatrix}. \tag{2.122}$$

Ведя отсчет положения плоскостей изображений, создаваемых объективом, от его заднего фокуса, а соответствующих расстояний плоскостей вершины триэдра от ее положения при фокусировке на бесконечно удаленный предмет, имеем

$$\Delta S' = S' - f', \tag{2.123}$$

$$\Delta S = S - S_\infty. \tag{2.124}$$

Подставляя (2.123) и (2.124) в (2.121), получим

$$S_c = f' - 2\,(2\,S_\infty - S_0) + \Delta S' + 4\,\Delta S. \tag{2.125}$$

Сравнивая выражение для S_c с аналогичным ему выражением из формулы (2.120), находим

$$\Delta S = -\frac{\Delta S'}{4}. \tag{2.126}$$

Следовательно, перемещение фокусирующего компонента — триэдра вчетверо меньше перемещения изображения, создаваемого объективом, что является ценным качеством рассматриваемой фокусирующей системы.

Объектив системы передает в определенном масштабе соответствующие поперечные смещения объекта без искажений, если не принимать в расчет аберраций. Рассмотрим вопрос о том, какими будут эти смещения в плоскости сетки нитей системы с учетом влияния на них фокусирующего устройства.

Пусть при фокусировке на какой-либо объект, находящийся на конечном расстоянии от объектива, последний создает в плоскости, находящейся на расстоянии S' от задней главной плоскости объектива, изображение, смещенное с визирной оси вдоль координатных осей Y и Z на отрезки L и H, причем

$$L = L_\infty + \Delta L, \tag{2.127}$$

$$H = H_\infty + \Delta H. \tag{2.128}$$

Для получения резкого изображения объекта на сетке необходимо поместить вершину триэдра в плоскость, находящуюся от главной задней плоскости объектива на расстоянии S, причем вершина триэдра в самом общем случае смещена вдоль осей Y и Z на отрезки l и h:

$$l = l_\infty + \Delta l, \tag{2.129}$$

$$h = h_\infty + \Delta h. \tag{2.130}$$

В идеальном случае, когда опорное зеркало перпендикулярно к оптической оси объектива, одностолбцовая матрица координат радиуса-вектора точки изображения будет такой же, как и матрица (2.122),

$$R_s' = \begin{pmatrix} S_c \\ L \\ H \end{pmatrix}. \tag{2.131}$$

Полученное выражение свидетельствует, что взаимные положения различно удаленных объектов передаются в плоскость сетки фокусирующим устройством без искажений. Разность выражений (2.131) и (2.122) дает формулу для определения перемещений изображений объекта в плоскости сетки нитей, в данном случае, в силу идеальности схемы, не искаженную погрешностями

$$\Delta R_0' = R_s' - R_0' = \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta L \\ \Delta H \end{pmatrix}. \tag{2.132}$$

Таким образом, анализ идеальной схемы фокусирующей системы позволил определить два ценных качества, выгодно отличающих ее от известных схем фокусировки:

1. При перпендикулярности плоскости опорного зеркала к оптической оси объектива любые перемещения фокусирующего компонента вызывают только дефокусировку изображения.

2. Перемещение фокусирующего компонента вдоль оптической оси объектива с целью перефокусировки вчетверо меньше перемещения изображения, создаваемого объективом трубы.

В заключение рассмотрения идеальной схемы отметим, что из выражения (2.114) можно сделать еще один важный вывод, а именно: для получения не расстраивающейся при наклонах объектива системы необходимо поместить опорное зеркало так, чтобы его плоскость совпадала с задней главной плоскостью объектива ($Q_0 = 0$), и жестко связать его с объективом, закрепив их в одной и той же оправе. При этом плоскость зеркала всегда будет перпендикулярна к оптической оси объектива, и никакие изменения положения фокусирующего компонента не вызовут смещений изображения в плоскости сетки при перефокусировке. Это свойство имеет большое зна-

чение для разработки нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования и использовано в нивелире фирмы МОМ.

Исследуем теперь влияние ряда погрешностей изготовления элементов и сборки фокусирующей системы на точность визирования.

1. Погрешность визирования вследствие неперпендикулярности плоскости зеркала к оптической оси объектива.

Исследование погрешности будем вести, руководствуясь принципом независимости действия поворотов вокруг двух координатных осей Y и Z на углы Θ и φ соответственно.

Вначале выведем формулу отражения в системе с учетом поворотов опорного зеркала, описываемых обобщенной матрицей поворота K. Действенными, очевидно, будут, как это следует непосредственно из рис. 53, повороты вокруг оси Y на угол Θ (матрица поворота T) и вокруг оси Z на угол φ (матрица поворота Φ). В первом случае $K=T$, во втором — $K=\Phi$.

Для вывода формулы отражения в фокусирующей системе воспользуемся формулой (2.113) отражения в триэдре. Для отражения в опорном зеркале применим формулу, учитывающую его поворот, определяемый матрицей K (Θ или Φ),

$$R_k' = M_k R + K (E - M_0) Q_0, \tag{2.133}$$

где M_k — матрица отражения в зеркале после его поворота, задаваемого матрицей K

$$M_k = K M_0 K^{-1}. \tag{2.134}$$

В самом общем случае на основании выражений для отражения в фокусирующей системе имеем

$$R_k' = M_k R + K (E - M_0) (2Q_0 - Q). \tag{2.135}$$

Для радиусов-векторов точек изображения в объективе и вершины триэдра одностолбцовые матрицы будут на основании (2.127), (2.128), (2.129) и (2.130) следующими:

$$R = \begin{pmatrix} -S' \\ L \\ H \end{pmatrix}, \tag{2.136}$$

$$Q_\phi = \begin{pmatrix} -S \\ l \\ h \end{pmatrix}. \tag{2.137}$$

Одностолбцовая матрица координат Q_0 по-прежнему определяется выражением (2.118).

а) Поворот опорного зеркала вокруг оси Y на угол Θ. По формуле (2.135) с учетом (2.130), для T и T^{-1}, (2.117) и несложных геометрооптических выкладок находим

$$R_\theta' = \begin{pmatrix} S\cos 2\theta - 2(2S - S_0)\cos\theta + H\sin 2\theta \\ L \\ -S'\sin 2\theta + 2(2S - S_0)\sin\theta + H\cos 2\theta \end{pmatrix}. \tag{2.138}$$

Из получившегося выражения следует, что погрешность в положении зеркала приведет к несовпадению изображения с плоскостью сетки. Появится продольный параллакс, для устранения которого нужно перефокусировать трубу, найдя такое положение фокусирующего компонента, при котором параллакса не будет. Математически это означает, что величина S должна удовлетворять уравнению, полученному приравниванием к ее верхней строке матрицы R'_0.

$$S\cos 2\theta - 2\ (2S - S_0)\ \cos\theta + H\sin 2\theta - S = 0. \qquad (2.139)$$

Определив из этого уравнения S и подставив его значение в нижнюю строку, получим

$$R'_{\theta_c} = \begin{pmatrix} S_c \\ L \\ H - (S' - S_c)\ \mathrm{tg}\theta \end{pmatrix}. \qquad (2.140)$$

Разность выражений $R'_{s'}$ (2.131) и R'_{θ_c} (2.140) дает погрешность определения высоты из-за наклона зеркала

$$\Delta R'_\theta = R'_{s'} - R'_{\theta_c} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S' + S_c \end{pmatrix} \mathrm{tg}\,\theta. \qquad (2.141)$$

Эта погрешность пропорциональна расстоянию от объектива до создаваемого им изображения S' и углу поворота зеркала, т. е. в конечном счете она пропорциональна визирному расстоянию. Так как отрезки S' и S_c, отсчитываемые от задней главной плоскости объектива, имеют один и тот же знак, то компенсация достигнута быть не может.

б) Поворот опорного зеркала вокруг оси Z на угол φ. По формуле (2.131) для $\Phi|K=\Phi|$ с учетом (2.117), (2.118) и (2.136), проведя ряд необходимых преобразований для R'_φ, находим

$$R'_\varphi = \begin{pmatrix} S\cos 2\varphi - L\sin 2\varphi - 2\ (2S - S_0)\ \cos\varphi \\ S'\sin 2\varphi + L\cos 2\varphi - 2\ (2S - S_0)\ \sin\varphi \\ H \end{pmatrix}. \qquad (2.142)$$

Применяя к полученному выражению высказанные выше соображения о преобразовании для R'_θ на основании (2.139), найдем

$$R'_{\varphi_c} = \begin{pmatrix} S_c \\ L + (S' + S_c)\ \mathrm{tg}\,\varphi \\ H \end{pmatrix}. \qquad (2.143)$$

Для погрешности определения величины l, образовывая разность $R'_{s'}$ и R'_{φ_c}, получим

$$\Delta R'_\varphi = -\begin{pmatrix} 0 \\ S' + S_c \\ 0 \end{pmatrix} \mathrm{tg}\,\varphi. \qquad (2.144)$$

Все высказанное о погрешности $\Delta R'_\gamma$ относится и к погрешности $\Delta R'_\gamma$. Целесообразно объединить действие этих погрешностей, выразив их общей формулой

$$\Delta R'_{\theta,\varphi} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\operatorname{tg}\varphi \\ \operatorname{tg}\theta \end{pmatrix} (S' + S_c). \tag{2.145}$$

Для перехода к пространству предметов, где находятся визируемые точки, следует воспользоваться формулой Ньютона

$$\Delta R'_{\theta,\varphi} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\operatorname{tg}\varphi \\ \operatorname{tg}\theta \end{pmatrix} \left(\frac{af'}{a+f'} + S_c \right). \tag{2.146}$$

Проведенный анализ убеждает в необходимости тщательного соблюдения условия перпендикулярности плоскости опорного зеркала оптической оси объектива системы.

2. Погрешности из-за неточного изготовления углов фокусирующего триэдра.

В ряде работ отечественных [2] и зарубежных авторов исследовалось влияние погрешностей изготовления углов триэдра на смещение изображения. Непосредственное применение результатов этих исследований для наших целей невозможно вследствие специфики работы триэдра в фокусирующей системе, который, во-первых, находится в сходящихся пучках лучей, а во-вторых, эти пучки проходят через него дважды: один раз в прямом и второй — в обратном направлении. При анализе погрешностей будем исходить из выводов, полученных в первой главе работы.

Прежде всего отметим, что в данной фокусирующей системе при погрешностях изготовления прямых углов будет четыре изображения независимо от последовательности отражения пучков лучей. Падает ли пучок лучей от объектива на одно из зеркал *2.1* или *2.2* крыши, как это показано на рис. 53, или на третье зеркало *2.3* триэдра, одно отражение в зеркалах триэдра образует два изображения. При отражении в триэдре пучков лучей, идущих в обратном направлении от опорного зеркала *3*, также образуется от каждой точки два изображения. Следовательно, каждая светящаяся точка образует после триэдра два изображения, являющихся предметами для опорного зеркала, а изображения, создаваемые опорным зеркалом, будут служить предметами для триэдра при отражении в нем пучков лучей в обратном направлении, когда для каждой точки опять получается два изображения. В силу расположения этих изображений в различно удаленных от объектива плоскостях они одновременно наблюдаться не могут.

При погрешностях изготовления углов триэдра можно

ожидать в самом общем случае следующие погрешности измерений:

а) погрешности вследствие смещений триэдра в плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива;

б) погрешности вследствие наличия нескольких изображений и фокусировки при одной дальности на одно, а при другой дальности — на другое из них.

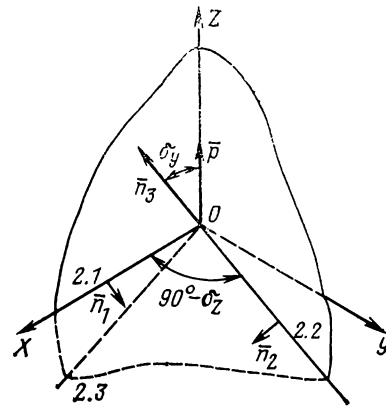


РИС. 54

Для анализа влияния этих погрешностей следует вывести формулу отражения в фокусирующей системе с триэдром, отличающимся от идеального, и исследовать погрешности для какой-либо одной последовательности отражений. На основании этого анализа можно получить данные о влиянии на точность измерений погрешности по п. «а». Затем следует получить формулу отражения, для второй последовательности построения изображений. Разность в координатах этих изображений в плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива, определит погрешность по п. «б».

Для исследований предположим, что зеркала *2.1* и *2.2* с ортами нормалей n_1 и n_2 находятся в вертикальных плоскостях и плоскость зеркала *2.1* совпадает с координатной плоскостью *XOZ*, а зеркало *2.2*, плоскость которого также вертикальна, повернуто к ней на угол 90° — δ_z (рис. 54). Зеркало *2.3* с ортом нормали его плоскости n_3 пусть образует с плоскостью *XOУ* угол δ_y. Следовательно, зеркала *2.1* и *2.2* составляют диэдр с ребром $\bar{p}$, которое, в свою очередь, образует с нормалью n_3 к третьему зеркалу триэдра угол δ_y.

Сделанные допущения не влияют на общность результатов исследований, облегчая вместе с тем его проведение. Примем, что отражение происходит в последовательностях расположения зеркал *2.1—2.2—2.3—3—2.3—2.2—2.1* (R_{I}') и *2.2—2.1—2.3—3—2.3—2.1—2.2* (R_{II}'). Матрицы отражения в зеркалах триэдра и опорном зеркале пусть будут M_1 (*2.1*), M_2 (*2.2*), M_3 (*2.3*), M_0 (*3*).

Примем, что отражение происходит в последовательностях лучаем формулу отражения в общем виде для обеих выбранных последовательностей чередования зеркал

$$R_{\text{т}}' = M_{\text{т}}^{-1} M_0 M_{\text{т}} R + (E - M_{\text{т}}^{-1} M_0 M_{\text{т}})\, Q_{\phi} +$$

$$+ M_{\text{т}}^{-1} (E - M_0)\, (Q - Q_{\phi}), \qquad (2.147)$$

где $M_т$ и $M_т^{-1}$ — матрицы отражения в триэдрах с погрешностями углов для выбранной последовательности чередования зеркал в прямом и обратном ходе лучей.

При этом для одной $|R_I'|$ и другой последовательностей $|R_{II}'|$ отражений под $M_т$ следует понимать $M_{т_1}$ и $M_{т_2}$ определяемые формулами

$$M_{т_1} = M_3 M_2 M_1, \tag{2.148}$$

$$M_{т_2} = M_3 M_1 M_2. \tag{2.149}$$

Остановимся на исследовании погрешности по пункту «а».

Для определения величины этой погрешности образуем разность величин, определяемых выражениями (2.114) и (2.142), обозначив ее $\Delta R_т'$,

$$\Delta R_т' = R_0' - R_т' = (M_0 - M_т^{-1} M_0 M_т)\ R - (E - M_0)\ (E + M_т^{-1})\ Q + \\ + [(M_т^{-1} + 2E)\ (E - M_0) - (E - M_т^{-1})\ M_0 M_т]\ Q_ф. \tag{2.150}$$

Предположим, что в системе ничего не изменяется, и только лишь фокусирующий компонент совершил линейные перемещения вдоль всех трех координатных осей. Для определения величины возникающей при этом погрешности $\delta\Delta R_т'$ необходимо продифференцировать выражение (2.150) по $Q_ф$ и заменить дифференциалы конечными приращениями

$$\delta\Delta R_т' = [(M_т^{-1} + 2E)\ (E - M_0) - (E - M_т^{-1} M_0 M_т)]\ \Delta Q_ф. \tag{2.151}$$

При выбранных положениях зеркал, заданных ортами $\bar{n}_1$, n_2 и n_3, пренебрегая погрешностями второго порядка малости, найдем

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{2.152}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} -1 & \sin 2\delta_z & 0 \\ \sin 2\delta_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{2.153}$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin 2\delta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin 2\delta_y & 0 & -1 \end{pmatrix}. \tag{2.154}$$

Величину рассматриваемой погрешности для первой, а затем и второй последовательностей отражения определим по (2.148), пренебрегая величинами второго и выше порядков малости,

$$M_{т_1} = \begin{pmatrix} -1 & -\sin 2\delta_z & -\sin 2\delta_y \\ -\sin 2\delta_z & -1 & 0 \\ \sin 2\delta_y & 0 & -1 \end{pmatrix}, \tag{2.155}$$

$$M_{T_1}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & \sin 2\delta_z & \sin 2\delta_y \\ -\sin 2\delta_z & -1 & 0 \\ -\sin 2\delta_y & 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (2.156)$$

Положим, что перемещение фокусирующего компонента задано одностолбцовой матрицей следующего вида:

$$\Delta Q_\phi = \begin{pmatrix} \Delta S \\ \Delta h \\ \Delta l \end{pmatrix}. \qquad (2.157)$$

Подстановка M_0 из (2.117), M_{T_1} и $M_{T_1}^{-1}$ из (2.155) и (2.156) и ΔQ_ϕ из (2.157) в (2.151) приводит к следующему выражению для $\delta \Delta R'_{T_1}$:

$$\delta \Delta R'_{T_1} = -\begin{pmatrix} \Delta l \sin 4\delta_z + \Delta h \sin 4\delta_y \\ \Delta S \sin 2\delta_z \\ \Delta S \sin 2\delta_y \end{pmatrix}. \qquad (2.158)$$

Полученное выражение является не окончательным, так как верхняя строка матрицы (2.158), представляющая собой смещение изображения вдоль оптической оси объектива, должна быть вчетверо больше соответствующего смещения ΔS фокусирующего компонента. Следовательно, можно составить уравнение

$$\Delta S = -(\Delta l \sin \delta_z + \Delta h \sin \delta_y). \qquad (2.159)$$

Подстановка значения ΔS в соответствующие строки матрицы приводит к выражению

$$\delta \Delta R'_{T_1} = 4 \begin{pmatrix} -\Delta S \\ \Delta l \sin^2 2\delta_z + \Delta h \sin 2\delta_y \sin \delta_y \\ \Delta l \sin 2\delta_y \sin \delta_z + \Delta h \sin^2 \delta_y \end{pmatrix}. \qquad (2.160)$$

Из этого выражения следует, что погрешности измерений при перефокусировке в рассматриваемой схеме с триэдром, имеющим погрешности изготовления углов, будут величинами второго порядка малости, которыми практически можно пренебречь. Поэтому нет необходимости исследовать аналогичную погрешность для другой последовательности зеркал при отражении в триэдре.

Теперь оценим влияние угловых подвижек триэдра на смещение изображения. Из литературных источников известно и выше использовалось положение, что при повороте ЗПС ее матрица отражения подобна исходной и получается из нее умножением слева на матрицу поворота, а справа на обратную ей матрицу, а постоянное смещение умножается слева на эту матрицу. Обозначив матрицу поворота вокруг оси Y на угол Q, а этот поворот в нашем случае будет наиболее действенным, через T, получим для фокусирующей системы с триэдром, имеющим погрешности изготовления прямых углов, следующее выражение:

$$M_{\tau_\theta} = M_{\tau_\theta}^{-1} M_0 M_{\tau_\theta} R + T\,[(E - M_\tau^{-1}) + M_\tau^{-1} T^{-1} M_0 T\,(E - M_\tau)\,Q_\phi +$$

$$+ T M_\tau^{-1} T^{-1}\,(E - M_0)\,Q]. \qquad (2.161)$$

Причем для матриц $M_{\tau_\theta}^{-1}$ и M_{τ_θ} имеем

$$M_{\tau_\theta}^{-1} = T M_\tau^{-1} T^{-1}, \qquad (2.162)$$

$$M_{\tau_\theta} = T M_\tau T^{-1}. \qquad (2.163)$$

Значения матриц T и T^{-1} задаются формулами (2.130) и (2.131). Видно, что величина погрешности, вызванной поворотом триэдра, углы которого отличаются от прямых, пренебрежимо мала. Величина погрешности из-за наличия нескольких изображений может быть найдена как разность выражений (2.147), вычисленных для одной (M_{τ_1} и $M_{\tau_1}^{-1}$) и другой (M_{τ_2} и $M_{\tau_2}^{-1}$) последовательностей отражения в зеркалах триэдра. При этом, так как изображения находятся в разных плоскостях, то необходимо привести их к плоскости сетки нитей. Это означает, что верхние строки матриц для R'_{τ_1} и R'_{τ_2} должны равняться величине S_c, определяемой формулами (2.120) и (2.121).

Для матриц M_{τ_2} и $M_{\tau_2}^{-1}$ имеем

$$M_{\tau_2} = \begin{pmatrix} -1 & \sin 2\delta_z & -\sin 2\delta_y \\ -\sin 2\delta_z & -1 & 0 \\ \sin 2\delta_y & 0 & -1 \end{pmatrix}, \qquad (2.164)$$

$$M_{\tau_2}^{-1} = \begin{pmatrix} -1 & -\sin 2\delta_z & \sin 2\delta_y \\ \sin 2\delta_z & -1 & 0 \\ -\sin 2\delta_y & 0 & -1 \end{pmatrix}. \qquad (2.165)$$

Для изображений при отражении в зеркалах триэдра в последовательностях, определяемых матрицами M_{τ_1} и M_{τ_2} ($M_{\tau_1}^{-1}$ и $M_{\tau_2}^{-1}$), находим для этих изображений в плоскости сетки

$$R'_{\tau_{10}} = \begin{pmatrix} S_c \\ L + (S' + S_c)\,\sin 2\delta_z \\ H + (S' + S_c)\,\sin 2\delta_y \end{pmatrix}, \qquad (2.166)$$

$$R'_{\tau_{20}} = \begin{pmatrix} S_c \\ L - (S' + S_c)\,\sin 2\delta_z \\ H + (S' + S_c)\,\sin 2\delta_y \end{pmatrix}. \qquad (2.167)$$

Погрешность в положении изображения будет равна разности выражений $R'_{\tau_{10}}$ и $R'_{\tau_{20}}$, т. е. с учетом замены синусов малых углов самими углами

$$\Delta R'_\tau = R'_{\tau_{10}} - R'_{\tau_{20}} = \begin{pmatrix} 0 \\ S' + S_c \\ 0 \end{pmatrix} \operatorname{tg} 4\delta_z. \qquad (2.168)$$

В угловой мере величина этой погрешности равна

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{S' + S_0}{S_c} \operatorname{tg} 4\delta_z = \left(1 + \frac{S'}{S_c}\right) \operatorname{tg} 4\delta_z . \qquad (2.169)$$

Для удобства пользования этой формулой выразим S' через S_c и f', используя (2.120) и (2.121),

$$\operatorname{tg}\varphi = \left(1 + \frac{f'}{S_c} - 4\,\frac{\Delta S}{S_c}\right) \operatorname{tg} 4\delta_z . \qquad (2.170)$$

По аналогии с трубами, где фокусировка осуществляется отрицательной линзой, вводя величину Q (коэффициент телесокращения), получим

$$Q = \frac{S_c}{f'} , \qquad (2.171)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \left(1 + \frac{1}{Q} - 4\,\frac{\Delta S}{S_c}\right) \operatorname{tg} 4\delta_z . \qquad (2.172)$$

Если сравнить результаты для двух других последовательностей отражений, то получим аналогичные результаты. Исследуемая погрешность пропорциональна шестнадцатикратной величине продвижки фокусирующего компонента при перефокусировке и погрешности изготовления угла триэдра.

В итоге проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Деление пучка входящих в систему лучей ребром крыши приводит к падению разрешающей способности в направлении перпендикуляра к этому ребру вдвое.

2. Наличие нескольких изображений может привести к большим погрешностям в силу того, что при визировании могут наблюдаться попеременно различные изображения.

3. Большие потери световой энергии за счет наличия светоделительных элементов, через которые свет проходит в прямом и обратном ходе лучей, достигают 75—80%.

4. Погрешности, вызванные неточным изготовлением углов триэдра при обеспечении визирования на изображение, получаемое при одной и той же последовательности отражений, можно частично скомпенсировать соответствующими поворотами опорного зеркала.

Для устранения недостатков, присущих рассмотренной фокусирующей системе, необходимо выполнить следующее.

1. Применить в качестве фокусирующего компонента призму, ребро которой не делило бы пополам пучок отраженных ею лучей.

2. Необходимо создать в фокусирующей призме ход лучей, исключающий возможность появления нескольких изображений и связанных с этим погрешностей.

3. Фокусирующий компонент и опорный элемент должны обеспечивать разделение входящего и выходящего пучков лучей

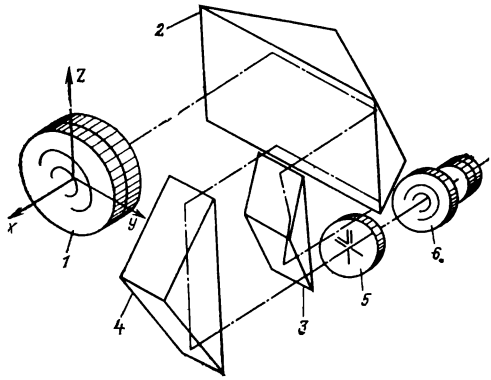


РИС. 55

с минимальными световыми потерями, для чего следует заменить опорное зеркало эквивалентной ему призмой, осуществляющей разделение входящего и отраженного пучков лучей.

Оптическая схема зеркально-призменной фокусирующей системы, решающей эти вопросы, приведена на рис. 55. Роль опорного зеркала в ней выполняет призма ВР-180°. Благодаря разнесению осей входящего в фокусирующий компонент и выходящего из него пучков лучей на величину базы призмы ВР-180° или системы призм отпадает необходимость в светоделительных поверхностях, вносящих потери света. Кроме того, пучок не делится ребром крыши призмы БкР-180°, что позволяет сохранить разрешающую способность и устраняет двоение изображения.

Фокусирующее устройство состоит из фокусирующего компонента — призмы БкР-180° *2* и опорной призмы *3*. Пучок лучей от объектива трубы *1* входит в призму БкР-180°, вписываясь в одну четверть ее входной грани, а после отражения в ней выходит симметрично входящему пучку относительно вершины призмы.

После отражения в опорной призме ВР-180° пучок вновь входит в фокусирующий компонент и, отразившись в нем, направляется призмой или призменной системой *4* в плоскость сетки *5*, где полученное изображение рассматривается наблюдателем через окуляр *6*.

Призма ВР-180° эквивалентна по своему действию плоскому зеркалу. Поэтому, как и в системе Ивона, здесь фокусирующим компонентом служит призма, но в ней не происходит деления пучка. Следовательно, разрешающая способность здесь призмой БкР-180° не изменяется.

Следует отметить, что клиновидность пластинки, в которую может быть развернута призма ВР-180° или другая, аналогичная ей по действию призма или призменная система, вызванная погрешностями изготовления углов, равноценна по своему действию повороту опорного зеркала в рассмотренной ранее системе. Остальные погрешности фокусирующей системы будут такими же, как и в системе Ивона, за исключением погрешности из-за двоения изображения, отсутствующей в данной системе.

Оптическая система трубы проверялась на установке и было подтверждено, что погрешности визирования из-за перефокусировки практически отсутствуют. В целом

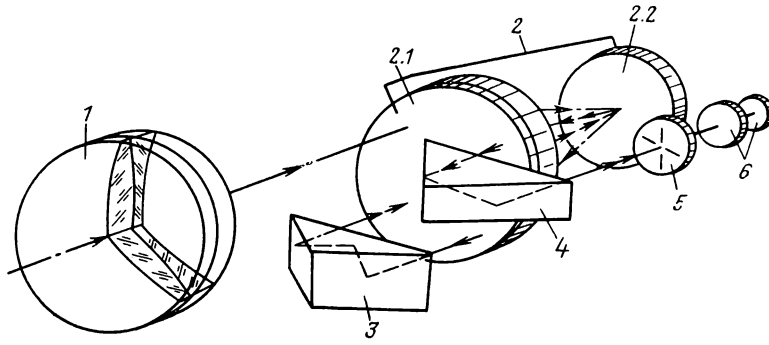


РИС. 56

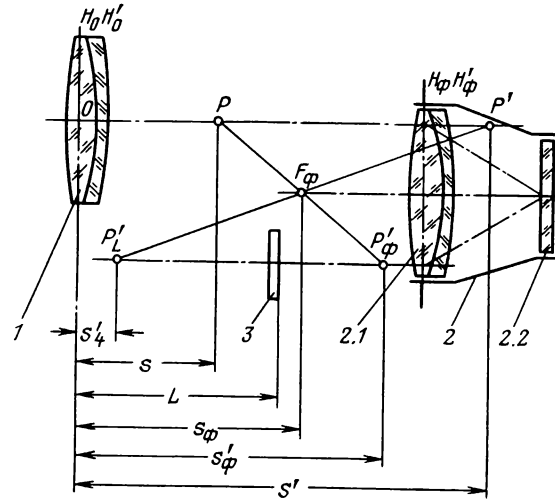


РИС. 57

исследования макета подтвердили теоретические соображения о преимуществах предложенной схемы фокусировки по сравнению со схемой Ивона. Целесообразно предложенную схему фокусировки применять с зеркальным триэдром, а не с призмой БкР-180°, что значительно снижает массу всей трубы в целом и повышает качество изображения за счет исключения большой длины хода луча в стекле.

Вместе с тем рассмотренная схема имеет недостаток, общий для фокусирующих устройств с призмами и заключающийся в ограничении относительного отверстия за счет большой длины хода луча в фокусирующей системе, доходящей до 6—8 диаметров сечения пучков. Оптическая схема такого фокусирующего устройства дана на рис. 56 и включает в себя фокусирующий

компонент — ЗЛО *2* (объектив *2.1* и плоское зеркало *2.2*) и опорный элемент, которым служит призма *3* (ВР-180°).

Пучок лучей из объектива *1* системы, в которой применено фокусирующее устройство, поступает в фокусирующий компонент, затем, отразившись в опорной призме, он вновь попадает в фокусирующий компонент и после второго отражения в нем вспомогательной призмой *4* направляется на сетку *5* окуляра *6*.

Докажем, что указанная система фокусировки аналогична по своим свойствам рассмотренной выше фокусирующей системе.

Обратимся к рис. 57, где изображены объектив оптической системы *1* трубы и фокусирующее устройство из фокусирующего компонента *2* и опорной призмы, замененной эквивалентным зеркалом *3*.

Ход лучей в системе объектив — фокусирующее устройство пространственный, и чертеж представляет собой проекцию точек изображений и их расстояний от соответствующих главных плоскостей на вертикальную плоскость.

Полагая, что объектив оптической системы тонкий и его узловые и главные точки, так же как и главные плоскости H_0H совпадают, примем точку O за начало координатной системы; ось абсцисс расположим горизонтально, а ось ординат — вертикально. Объектив создает изображение визируемого предмета в точке P, являющейся предметом для фокусирующего компонента — ЗЛО, находящегося на расстоянии S_Φ от начала координат. После первого отражения в фокусирующем компоненте пучки лучей образуют изображение P'_Φ точки R, находящееся на расстоянии S'_Φ от начала координат.

Отразившись в зеркале, находящемся на расстоянии L от начала координат, пучки лучей образуют изображение P'_L на расстоянии S'_L от начала. Окончательное изображение точки P в фокусирующем устройстве *2* будет иметь координату S'.

В соответствии с формулой (2.8), имеющей место при отражении в ЗЛО, напишем на основании рис. 57

$$S'_\Phi = S + 2\,(S_\Phi - S) = -S + 2\,S_\Phi. \tag{2.173}$$

В свою очередь, после отражения в зеркале получаем

$$S'_L = 2\,L - S'_\Phi = S + 2\,(L - S_\Phi), \tag{2.174}$$

а после и второго отражения в ЗЛО найдем

$$S' = 2\,L - S'_\Phi = -S - 2\,L + 4\,S_\Phi, \tag{2.175}$$

$$S' = -S - 2\,L + 4\,S_\Phi.$$

Эта формула аналогична полученной при анализе системы фокусировки с триэдром — (2.114) и, следовательно, зеркально-линзовое устройство по рис. 56 будет обладать и рядом других ее свойств.

В частности, из (2.175) находим

$$\Delta S' = 4\Delta S_{\Phi} \tag{2.176}$$

или

$$\Delta S_{\Phi} = \frac{\Delta S'}{4}. \tag{2.177}$$

Перемещение фокусирующего компонента в этой системе также вчетверо меньше величины компенсируемого перемещения изображения вдоль оптической оси зрительной трубы при перефокусировке.

По сравнению с рассмотренными системами система с ЗЛО в качестве фокусирующего компонента имеет ряд преимуществ:

1. Относительное отверстие оптической системы с фокусировкой ЗЛО ограничивается только коррекционными возможностями последнего. Практически же оно ограничивается допустимыми поперечными габаритами системы.

2. Технологичность и низкая стоимость изготовления ЗЛО в сравнении с фокусирующим триэдром.

3. Более высокое качество изображения, создаваемого оптической системой с использованием в качестве фокусирующего компонента ЗЛО, так как он не вносит больших аберраций и при его использовании отсутствует большой ход лучей в толще стекла.

Все это подтверждает целесообразность использования ЗЛО в качестве фокусирующего компонента и разработки зеркально-призменных фокусирующих систем для зрительных труб.

2.7. ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ЗРИТЕЛЬНЫХ ТРУБ С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ ВИЗИРНЫХ РАССТОЯНИЙ (ОТ 0 ДО ∞)

Оптическая схема фокусирующего устройства для визирования от 0 до ∞ представляет собой перевернутый телеобъектив с перемещающимся положительным компонентом. Отрицательный компонент неподвижен и обращен к объекту. Фокусирующий компонент перемещается таким образом, что при любом расстоянии визирования из него выходят параллельные пучки лучей, поступающие в расположенную за ним телескопическую систему. Таким образом, оптическая система визирной трубы в целом строится по схеме телескопической лупы. Для удобства анализа схемы на рис. 58 она обращена, и первым слева по ходу световых пучков располагается окуляр *1*.

Оптическая система состоит из обычной трубы с двухкомпонентным объективом *4* и *3* и сеткой нитей *2*. Фокусирующая система представлена фокусирующим компонентом *5* и отрицательным компонентом *6*.

Все элементы оптической системы трубы: окуляр, сетка, телеобъектив *3—4* и «насадочная линза» *5—6* помещены в одном корпусе, а фокусирующий компонент *5* перемещается относительно

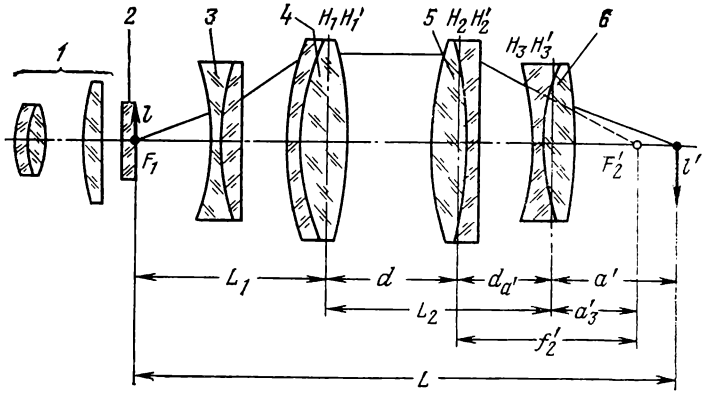


РИС. 58

компонентов *4* и *6*. Его действие заключается в изображении компонентами *4* и *3* перемещающейся точки F_2' заднего фокуса компонента *5*, совмещенного с изображением визируемого объекта, созданным компонентом *6*.

Определим положение фокусирующей линзы относительно компонента *6* отрезком d и выразим его через визирное расстояние a'. По формуле Гаусса имеем

$$a' - a_3' = \frac{f_3'(f_2' - d_{a'})}{f_2' + f_3' - d_{a'}}. \tag{2.178}$$

Решая это уравнение относительно $d_{a'}$, находим

$$d_{a'} = \frac{a' f_3'}{a' - f_3'} + f_2'. \tag{2.179}$$

Если вести отсчет положения фокусирующего компонента от первого компонента телеобъектива H_1H_1', то получим соответственно

$$d = L - f_2' - \frac{a' f_3'}{a' - f_3'}. \tag{2.180}$$

Для визирования от торца трубы следует в формуле (2.179) положить $a' = 0$, что дает для $d_{a'=0}$

$$d_{a'=0} = f_2'. \tag{2.181}$$

При визировании на бесконечно удаленный предмет ($a' = \infty$) получим

$$d_{a'=\infty} = f_2' + f_3'. \tag{2.182}$$

Положение фокусирующего компонента для обоих этих случаев показано на рис. 59, где для упрощения телеобъектив заменен однокомпонентной системой $H_1 H_1'$.

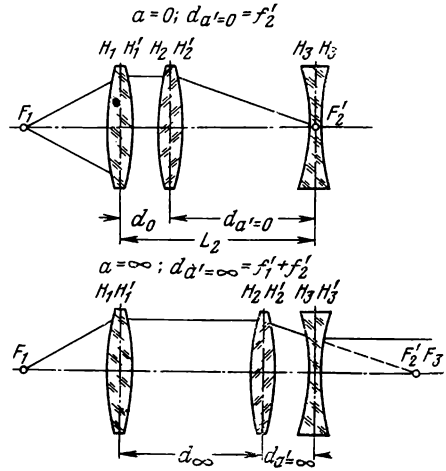


РИС. 59

В частном случае равенства по абсолютной величине фокусных расстояний отрицательного и фокусирующего компонентов имеем:

$$f_2' = f' = -f_3', \qquad (2.183)$$

$$d_{a'=0} = f', \qquad (2.184)$$

$$d_{a'=\infty} = 0. \qquad (2.185)$$

Рассмотрим теперь вопрос об одном из главнейших параметров визирной трубы — увеличении.

Оптическую систему визирной трубы в данном случае следует рассматривать как микроскоп для наблюдения объектов, находящихся на далеком расстоянии. Иначе эту систему условно можно назвать «телемикроскопом» или «микротелескопом», ибо она занимает промежуточное положение между двумя экстремальными оптическими системами микроскопа и телескопа, свойства и характеристики которых весьма четко определены. Увеличение Γ будем находить для плоскости сетки нитей трубы, т. е. в обратном для рис. 58 ходе лучей.

В этом случае имеем

$$\overline{\Gamma} = \frac{f_1'}{f_э'}\,\overline{\Gamma}_{ок}, \qquad (2.186)$$

где $\overline{\Gamma}$ — видимое увеличение окуляра или заменяющего его микроскопа, f' — фокусное расстояние объектива трубы, $f_э'$ — эквивалентное фокусное расстояние системы «насадочной линзы» телелупы.

С учетом значения $d_{a'}$, определяемого из (2.179), для $f_э'$ находим

$$f_э' = \frac{f_2'}{f_3'}(f_3' - a') = f_2'\left(1 - \frac{a'}{f_3'}\right). \qquad (2.187)$$

Для крайних значений визирных расстояний получим

при $a' = 0$ $\quad f_{э\,a'=0}' = f_2'$, $\qquad (2.188)$

при $a' = \infty \quad f'_{э\,a'=\infty} = \infty$. (2.189)

На основании формулы (2.186) для увеличения телелупы имеем

$$\overline{\Gamma} = \frac{f'_1 f'_3}{f'_2 (f'_3 - a')} \overline{\Gamma}_{ок}. \tag{2.190}$$

Эта формула пригодна только для конечных визирных расстояний. При бесконечно большом удалении объекта следует определять видимое увеличение по формуле

$$\overline{\Gamma} = \overline{\Gamma}_1 \overline{\Gamma}_2, \tag{2.191}$$

где $\overline{\Gamma}_1$ и $\overline{\Gamma}_2$ — увеличения основной трубы и «насадочной линзы».

С учетом этих выражений для $\overline{\Gamma}$ находим

$$\overline{\Gamma}_{a'=\infty} = \frac{f'_1}{f'_{ок}} \cdot \frac{f'_3}{f'_2} = \frac{f'_1}{f'_2} \cdot \frac{f'_3}{250} \overline{\Gamma}_{ок}. \tag{2.192}$$

На основании (2.190), полагая $a'=0$, получаем

$$\overline{\Gamma}_{a'=0} = \frac{f'_1}{f'_2} \overline{\Gamma}_{ок}. \tag{2.193}$$

С учетом увеличения оборачивающей системы $\overline{\Gamma}_{об}$, составленной из компонентов $H_1H'_1$ и $H_2H'_2$, получим для $\overline{\Gamma}$

$$\overline{\Gamma}_{об} = \frac{f'_2}{f'_э} \cdot \frac{f'_1}{f'_2}, \tag{2.194}$$

$$\overline{\Gamma} = -\overline{\Gamma}_{об} \overline{\Gamma}_{ок} \frac{f'_3}{f'_3 - a'}, \tag{2.195}$$

$$\overline{\Gamma}_{a'=\infty} = \overline{\Gamma}_{об} \overline{\Gamma}_{ок} \frac{f'_3}{250}, \tag{2.196}$$

$$\overline{\Gamma}_{a'=0} = \overline{\Gamma}_{об} \overline{\Gamma}_{ок}. \tag{2.197}$$

Из сравнения (2.196) и (2.197) следует, что увеличения трубы при предельных значениях визирных расстояний $a'=0$ и $a'=\infty$ разнятся только множителем $\left(-\frac{f'_3}{250}\right)$, представляющим собой по структуре формулу видимого увеличения окуляра, имеющего фокусное расстояние f'_3, отрицательного знака.

Если этот множитель равен 1 ($f'_3 = -250$ мм), то видимое увеличение оптической системы трубы будет одинаковым при визировании от торца трубы ($a'=0$) и на бесконечно удаленный объект ($a'=\infty$):

$$|\overline{\Gamma}_{a'=0}|_{250} = |\overline{\Gamma}_{a'=\infty}|_{250} = \overline{\Gamma}_{об}\overline{\Gamma}_{ок} = -\frac{f_1'}{f_2'}\cdot\frac{250}{f_{ок}'} \qquad (2.198)$$

Для сформулированного ранее условия равенства фокусных расстояний компонентов «насадочной линзы» будем иметь из (2.190)

$$\overline{\Gamma}_{f_2'=-f_3'} = \frac{f_1'}{f_1'+a'}\overline{\Gamma}_{ок}. \qquad (2.199)$$

Рассмотрим вопрос об ограничении пучков в оптической системе этой трубы. Отметим прежде всего, что ограничение апертурных пучков лучей будет производиться компонентом H_3H_3', а наклонных — полевых пучков, идущих от точки вне оси, — компонентом H_2H_2' (рис. 60).

Для высоты апертурного луча h_3 на комноненте H_3H_3', считая, что входной пучок опирается на высоту h_1, будем иметь

$$h_3 = h_1\frac{a'}{f_3'-a'}\cdot\frac{f_3'}{f_2'}. \qquad (2.200)$$

Для наклонного пучка лучей, выходящего из точки предметной плоскости, отстоящей от оптической оси на расстоянии l_1, получим для абсолютного значения высоты $y_{2н}$ нижнего луча на компоненте H_2H_2'

$$|y_{2н}| = \left|y_{1н} + (L_2 - d_{a'})\frac{l_1}{f_1'}\right|. \qquad (2.201)$$

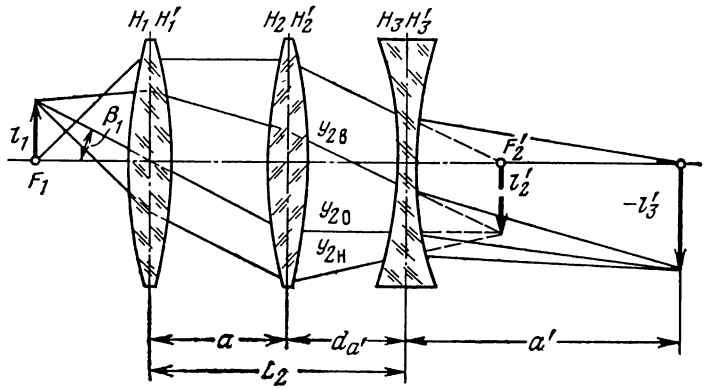


РИС. 60

Принимая одинаковыми световые диаметры компонентов «насадочной линзы», получим для их определения формулу

$$D_2 = D_3 = D_1 + 2\,(L_2 - d_{a'})\frac{l_1}{f_1'}. \qquad (2.202)$$

Очевидно, что наибольшей величина светового диаметра компонента H_1H_2' будет при $d_{a'}=0$:

$$D_{2\max}=D_2=D_1+L_2\frac{2l_1}{f_1'}. \qquad (2.203)$$

При одинаковой величине диаметров всех компонентов системы будут иметь место виньетирование наклонных пучков лучей и некоторое уменьшение апертуры. Влияние этих факторов, если это необходимо, можно оценить коэффициентом виньетирования $k_в$ — величиной, определяемой выражением

$$k_в=\frac{D_1}{D_1+L_2\dfrac{2l_1}{f_1'}}. \qquad (2.204)$$

Исследуем теперь вопрос о влиянии колебания фокусирующей линзы на смещение наблюдаемого в трубу изображения. Исследование будем вести, строя изображения сетки через всю оптическую систему трубы, определяя, таким образом, сме-

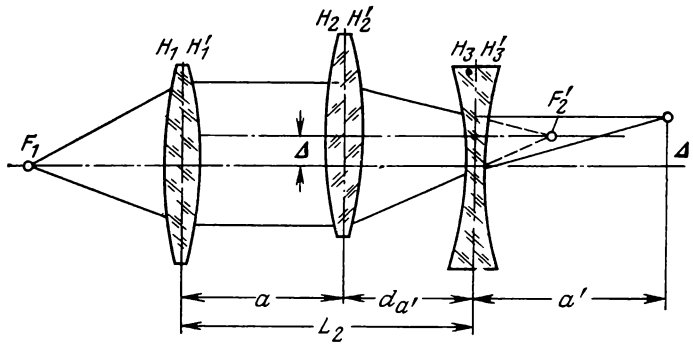


РИС. 61

щение визируемых точек со створной прямой. На рис. 61 компоненты H_1H_1' и H_3H_3' центрированы — их оптические оси совпадают, а компонент H_2H_2 смещен с этой оси на величину Δ. Для упрощения примем, что при фокусировке величины этого смещения не изменяются. Вместе с компонентом H_2H_2' сместится на ту же величину Δ с оси и его задний фокус F_2', а компонент H_3H_3' изобразит этот перпендикулярный к оси отрезок отрезком Δ'

$$\Delta_{a'}'=\frac{a'}{a}\Delta. \qquad (2.205)$$

Величина $\Delta_{a'}'$ характеризует погрешность установки точки на створную прямую для данного визирного расстояния a' и может быть записана так:

$$\Delta'_{a'} = \frac{f'_3}{f'_2 + f'_3 - d_{a'}}. \qquad (2.206)$$

Подставляя вместо $d_{a'}$ его выражение из (2.179), найдем

$$\Delta' = \frac{f'_3 - a'}{f'_3}\Delta = \left(1 - \frac{a'}{f'_3}\right)\Delta. \qquad (2.207)$$

Для определения величины смещения изображения с визирной оси в угловой мере может служить формула

$$\operatorname{tg}\delta' = \frac{\Delta'}{a'} = \left(\frac{1}{a'} - \frac{1}{f'_1}\right)\Delta. \qquad (2.208)$$

Для $a'=0$ имеем

$$\Delta' = \Delta. \qquad (2.209)$$

Понятие об угловой величине погрешности для этого конкретного случая утрачивает смысл.

При $a'=\infty$ получим

$$\operatorname{tg}\delta' = -\frac{\Delta}{f'_3}. \qquad (2.210)$$

В данном случае теряет смысл понятие линейного смещения точки относительно линии створа.

Формула (2.210) показывает, что погрешности визирования трубой, вызываемые неточной сборкой элементов ее оптической схемы, могут достигать довольно больших величин при больших визирных расстояниях.

Полученные выводы сделаны в предположении, что фокусирующий компонент перемещается параллельно оптическим осям объектива трубы $H_1H'_1$ и отрицательного компонента $H_3H'_3$, что не отражает полностью имеющего место на практике явления.

Во-первых, не только линейные, но и угловые смещения компонента приводят к появлению погрешности визирования, так как угловые перемещения также вызывают смещения заднего фокуса фокусирующего компонента в поперечном направлении.

Во-вторых, в самом общем случае фокусирующий компонент будет перемещаться вдоль какой-то наклоненной к оптическим осям компонентов $H_1H'_1$ и $H_3H'_3$ прямой или даже вдоль какой-то кривой. Предположим, что при каком-то визирном расстоянии a'_1 смещение фокуса F'_2 относительно оптической оси компонента $H_3H'_3$, вызванное линейным или угловым смещением, равно Δ_1, а при положении компонента, соответствующем визирному расстоянию a'_2, оно составляет Δ_2. Тогда, обозначая смещения изображений перекрестия сетки нитей в пространстве объектов соответственно Δ'_1 и Δ'_2 (2.207), получим, образуя их разность,

$$\Delta_2' - \Delta_1' = \Delta_2 - \Delta_1 + \frac{a_1' \Delta_1 - a_2' \Delta_2}{f_3'} . \qquad (2.211)$$

Вводя для разностей $\Delta_2'-\Delta_1'$ и $\Delta_2-\Delta_1$ обозначения $\delta\Delta_1$ и $\delta\Delta$ соответственно, найдем

$$\delta\Delta' = \delta\Delta + \frac{a_1' \Delta_1 - a_2' \Delta_2}{f_3'}. \qquad (2.212)$$

Наличие погрешностей визирования при перефокусировке, имеющих место в данной фокусирующей системе, не может служить препятствием для ее применения в оптических системах приборов. Эти погрешности могут быть устранены использованием рассмотренных ранее зеркально-призменных или зеркально-линзовых фокусирующих устройств.

Анализ приведенных результатов исследований позволяет сделать следующие выводы. Оптическая система фокусировки для визирования на расстояния от 0 до ∞ имеет ряд преимуществ: высокая апертура, мало изменяющееся увеличение и отсутствие виньетирования для всего диапазона визирных расстояний. Все эти качества в совокупности с наличием параллельного хода лучей и высоким качеством изображения, достигаемым при сравнительно простой структуре оптической схемы с максимальным использованием готовых и широко распространенных узлов, определяют большие возможности для создания новых оптических систем приборов с более высокими эксплуатационными характеристиками.

Глава 3.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

3.1. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЛИМАТОРЫ

Серийно выпускаемые отечественной промышленностью и за рубежом, а также разработанные в последние годы фотоэлектрические автоколлиматоры отличаются большим разнообразием способов обработки оптических и электрических сигналов. Оптические системы этих автоколлиматоров в основном не отличаются от визуальных.

По способам обработки сигналов фотоэлектрические автоколлиматоры можно разделить условно на две группы:

1) приборы с аналоговым способом обработки измерительной информации;

2) цифровые фотоэлектрические автоколлиматоры.

В свою очередь, приборы первой группы разделяются на автоколлиматоры с фотоэлектрическим нуль-индикатором, имеющим визуальный отсчет, и с автоматическим устройством измерения. Приборы последней подгруппы, как правило, имеют в своем составе оптический компенсатор, смещающий автоколлимационное изображение световой марки относительно фотоэлектрического анализатора его положения, управляемый блоками автоматической следящей системы, первичным преобразователем которой является фотоэлектрический анализатор положения (ФАП) автоколлимационного изображения световой марки. В приборах с визуальным отсчетом указанный компенсатор приводится в состояние, соответствующие «нулевому» сигналу ФАП (сигналу, соответствующему моменту совпадения изображения световой марки с центром ФАП). В приборах обеих подгрупп измеренная величина угла (или величина, пропорциональная углу) снимается с компенсатора.

Автоколлиматоры второй группы также можно разделить на две подгруппы. Первая подгруппа, к которой можно отнести наибольшее количество известных цифровых автоколлиматоров, характеризуется фазово-импульсным способом формирования измеренной величины угла. Упрощенная схема обработки сигналов в приборах этой группы включает, как и в приборах первой группы, оптический компенсатор и ФАП. Основной спецификой цифровой обработки сигналов является отсутствие автоматических следящих систем. Вместо этого оптический компенсатор, например зеркальный, приводится в движение (колеба-

тельное или вращательное), с помощью опорных устройств снимается электрический сигнал, соответствующий определенному пространственному положению компенсатора, а с ФАП — сигнал, соответствующий моменту совпадения изображения световой марки с центром ФАП. Оба сигнала в виде электрических импульсов подаются на измеритель интервалов времени, в котором измеряется временной промежуток между сигналами, являющийся мерой измеряемой величины угла.

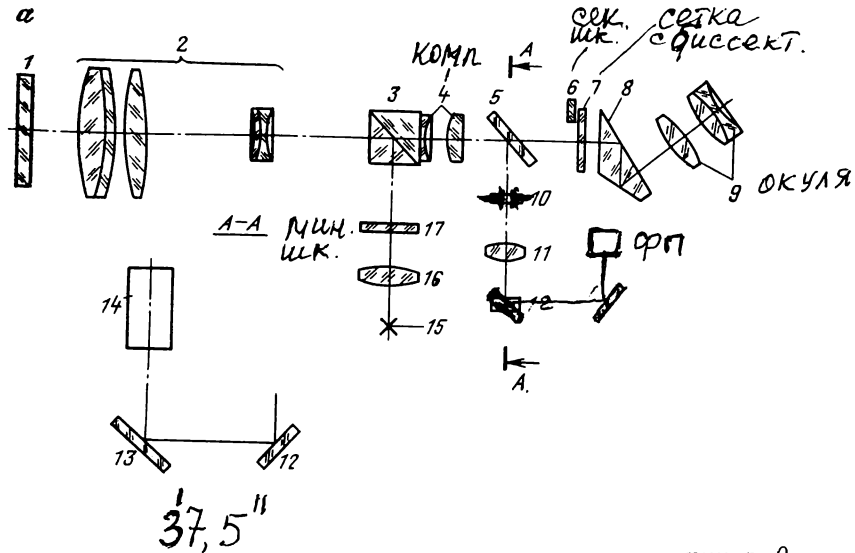
Ко второй подгруппе можно отнести автоколлиматоры, в которых в качестве ФАП используются матрицы фотоприемников или в качестве световой марки — матрицы светодиодов или заменяющие их устройства. Если вместо матриц используются координатно-чувствительные фотоприемники с аналоговым выходом, то такие автоколлиматоры следует отнести ко второй подгруппе первой группы. Следует отметить, что в случае использования аналого-цифровых преобразователей на выходе приборов первой группы их не следует относить к цифровым, поскольку первичное преобразование измерительной информации остается аналоговым.

В табл. 5 приведены основные параметры отечественных фотоэлектрических автоколлиматоров (ФЭАК).

ТАБЛИЦА 5

Параметры	Шифр прибора	
	АФ-2	АФ1Ц
Фокусное расстояние объектива, мм	1000	608
Диаметр входного зрачка объектива, мм	40	60
Увеличение трубы, крат	48,5	20
Угловое поле, угл. мин	40	90
Предел измерения, угл. мин	6	5
Цена деления секундной шкалы компенсатора, угл. с	0,1	0,1
Цена деления минутной шкалы, угл. с	15	—
Погрешности показаний, угл. с	—	±2
Масса, кг	10	18
Габариты прибора, мм:		
длина	550	580
ширина	145	340
высота	150	190

Схема автоколлиматора АФ-2 (рис. 62,*а*) относится к первой подгруппе первой группы фотоэлектрических автоколлиматоров. Пучок лучей от источника *15* через конденсор *16* освещает минутную шкалу *17* и светоделительный кубик *3*, который направляет его на объектив *2*. Минутная шкала расположена в фокальной плоскости объектива. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива, падает на зеркало *1* и, отразившись от него, идет обратно через объектив, кубик и линзовый компенсатор *4*, собираясь в фокусе объектива на секундной шкале *6* и сетке *7* с биссектором. Далее через полупентапризму *8* пучок



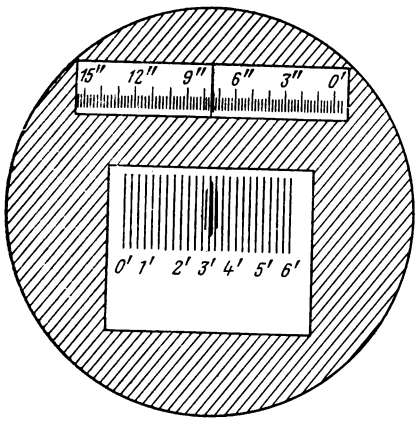


РИС. 62

направляется в окуляр *9*. Секундная шкала *6* и линзовый компенсатор *4* составляют оптический микрометр. Между компенсатором и секундной шкалой под углом 45° расположено полупрозрачное зеркало *5*, которое направляет автоколлимационное изображение штриха минутной шкалы на щель *10* вибратора, установленную в фокальной плоскости объектива и колеблющуюся с частотой 50 Гц. При помощи линзы *11* и двух зеркал *12* и *13* изображение щели передается на катод фотоумножителя *14*. В момент совмещения изображения штриха минутной шкалы с осью биссектора оно одновременно проецируется на центр щели вибратора. В этом случае микроамперметр, подключенный к выходу электронного блока, ко входу которого подключен ФЭУ, будет показывать нулевой отсчет. На рис. 62,*б* показано поле зрения АФ-2 с отсчетом, соответствующим 37,5″. Электрическая схема прибора состоит из модулятора светового потока, фотоприемника, усилителя, фазочувствительного выпрямителя и блока питания (на рис. 62,*а* не показаны).

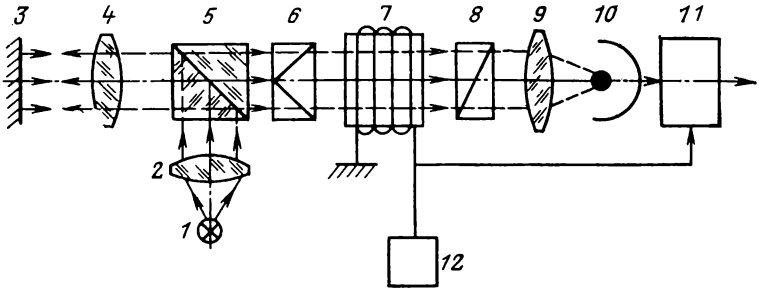


РИС. 63

Примером автоколлиматоров, относящихся ко второй подгруппе первой группы, является ФЭАК АФ1Ц, выпускаемый серийно поляризационный ФЭАК с магнито-оптическим модулятором света. Оптическая схема этого автоколлиматора показана на рис. 63. Пучок лучей от источника *1* через конденсор *2*, светоделительный кубик *5* и объектив *4* направляется на плоское зеркало *3*. После отражения от зеркала пучок лучей на обратном пути проходит объектив, кубик и падает на двойной поляризатор *6*, каждая часть которого поляризует половину пучка в различных плоскостях. Линейно поляризованный пучок света проходит магнито-оптический модулятор *7*, анализатор *8*, линзу *9* и собирается на фотоприемнике *10* (фототранзистор ФТГ-4), соединенном с измерительной схемой *11*. Источник переменного тока *12* питает модулятор и является одновременно опорным сигналом схемы *11*. Поляризатор и анализатор изготовлены в виде призм Глана — Томпсона. При делении поляризатором *6* пучка лучей на неравные части на выходе фотоприемника образуется сигнал рассогласования, соответствующий углу поворота зеркала *3* (контролируемого объекта). Фаза сигнала определяет знак (направление) угла поворота.

Средняя квадратическая погрешность измерения составляет 1″.

К этой же подгруппе относится разработанный в МИИГАиК ФЭАК. Основной особенностью данного ФЭАК является объединение функций модулятора и компенсатора в одном устройстве в виде пьезокерамического биморфа и выполнение марки и анализатора в виде одной щели.

Схема ФЭАК приведена на рис. 64. Объектив *2* строит автоколлимационное изображение щели *4*, расположенной в фокальной плоскости объектива, освещаемой источником света *5* через полупрозрачную пластину *6*. При повороте контролируемого зеркала *1* изображение смещается на величину, пропорциональную углу поворота этого зеркала. Между щелью и объективом помещен модулятор *3* — пьезокерамический биморф с

зеркалом, которые при подаче синусоидального напряжения с генератора *10* вибрируют с частотой сигнала генератора. При этом изображение щели также совершает колебательное движение. Появляющаяся при этом временная асимметрия тока фотоприемника *7* означает, что в спектре его сигнала имеются нечетные гармоники, по амплитудам которых можно судить о величине смещения центра колебаний, а по фазам — о направлении этого смещения. В качестве рабочей гармоники выбрана первая, выделяемая узкополосным усилителем *8*, после которого сигнал поступает на фазовый детектор *9*, осуществляющий ее сравнение с сигналом генератора. Фазовый детектор вырабатывает сигнал рассогласования, являющийся выходным и одновременно используемый в качестве компенсирующего. При подаче этого сигнала на модулятор он вызывает такую величину изгиба биморфа, которая соответствует смещению центра колебаний изображения щели на величину рассогласования.

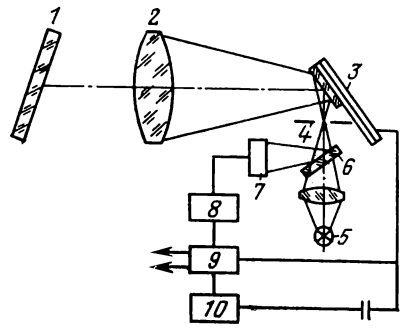


РИС. 64

Изготовленные макеты описанного ФЭАК имели следующие параметры:

Фокусное расстояние объектива трубы	~410 мм
Диаметр объектива	45 мм
Частота генератора	800 Гц
Фотоприемник	ФД-7К
Габариты	460×120× ×90 мм
Масса	4 кг
Диапазон измеряемых углов	±4′
Среднеквадратическая погрешность	2″
Быстродействие	<0,01 с
Крутизна	12 В/угл. мин

Цифровые ФЭАК являются по сравнению с аналоговыми более перспективными, поскольку в них используется минимальное количество преобразователей измерительной информации. Отметим также, что согласование таких ФЭАК с ЭЦВМ осуществляется сравнительно просто, а при последующей цифровой обработке результатов измерений дополнительные погрешности практически отсутствуют.

Рассмотрим работу типичного цифрового ФЭАК, относящегося к первой подгруппе [8]. Источник света *1* (рис. 65) освещает диафрагму с отверстием *2*, расположенную в фокальной плоскости объектива *3*. Перед объективом помещены два зер-

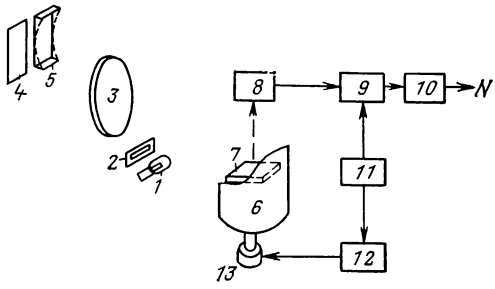


РИС. 65

кала — неподвижное *4* и подвижное *5*. При наклоне зеркала *5* соответствующее ему автоколлимационное изображение смещается относительно второго изображения, сформированного пучками лучей, отраженных от неподвижного зеркала *4*. Автоколлимационные изображения образуются в плоскости, касательной к вращающемуся барабану *7*, имеющему винтообразный срез торца. С помощью вспомогательного зеркала *6* пучки направляются на фотоумножитель *8*. Пересечение изображений срезом барабана приводит к появлению импульсов фототока, промежуток времени между которыми пропорционален углу между зеркалами. Первый импульс, поступая на электронный ключ *9*, открывает его, вследствие чего на пересчетную схему *10* начинают поступать импульсы от генератора *11* с частотой 100 кГц. Второй импульс закрывает ключ, и подсчет числа импульсов прекращается. От генератора *11* через делитель частоты *12* питается синхронный двигатель *13*, на оси которого укреплен барабан. При фокусном расстоянии объектива 300 мм погрешность измерения составляет около 2″.

Ко второй подгруппе цифровых ФЭАК можно отнести автоколлиматор, в котором в качестве световой марки используется электроннолучевая трубка, на маске которой установлено волоконное кодирующее устройство, представляющее собой уложенные вплотную друг к другу в ряд световые волокна. При измерениях определенному угловому положению измеряемого зеркала соответствует высвечивание бегущим лучом трубки торца соответствующего волокна. Момент времени появления этого светового сигнала фиксируется ФАП. Импульсы с отклоняющей системы трубки (опорные) и с ФАП направляются на измеритель интервалов времени.

В табл. 6 приведены основные параметры некоторых моделей ФЭАК, выпускаемых английской фирмой «Хильгер и Ватт».

Автоколлиматоры ТА-3, ТА-5, ТА-53 относятся к первой подгруппе аналоговых ФЭАК. Автоколлиматор ТА-53 отличается от ТА-3 наличием более совершенной конструкции трубы. Автоколлиматор Т-5 имеет по сравнению с этими модификациями более мощный осветитель и фильтр, обеспечивающий монохроматическое освещение световой марки с длиной волны 0,71 мкм. Объектив автоколлиматора скорригирован на эту длину

ТАБЛИЦА 6

Параметры	Шифр прибора					
	ТА-3	ТА-33	ТА-5	ТА-80	Т-81	ТА-82
Фокусное расстояние объектива, мм	874	874	874	874	437	86,4
Диаметр входного зрачка объектива, мм	35	48	48	44,5	40,5	21,6
Увеличение трубы, крат	43	43	43	43	21,5	4,3
Диапазон измерения, угл. мин	10	10	1,7	0,17	0,34	1,7
Цена деления секундной шкалы компенсатора, угл. с	0,1	0,1	0,05	0,5	1,0	5,0
Цена деления минутной шкалы, угл. мин	0,5	0,5	0,17	—	—	—
Погрешность показаний, угл. с	2	2	2	0,2	0,4	2
Масса, кг	7,8	4,99	5,4	3,8	3,6	1,6
Габариты прибора, мм:						
длина	476	413	438	422	361	165
ширина	140	135	146	105	86	86
высота	133	155	210	86,0	86	86
Время измерения, с	—	—	—	0,3	0,6	3

волны. Вследствие этих усовершенствований чувствительность измерений повышена в 3 раза.

На рис. 66 показана оптическая схема автоколлиматора ТА-5.

От источника *5* через конденсатор *6* и светофильтр *7* освещается автоколлимационная марка *8*, расположенная в фокальной плоскости объектива *10*. В схеме размещены две куб-призмы *9* и *3*, первая служит для направления пучка лучей к объективу

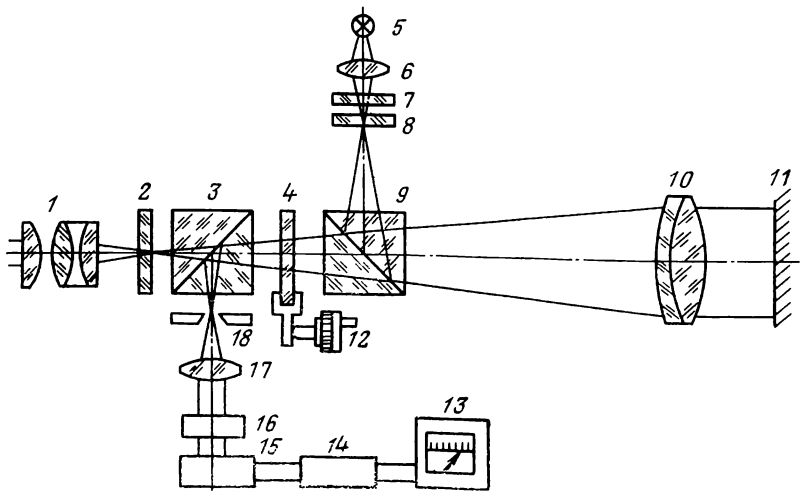


РИС 66

и пропускания отраженного пучка от зеркала *11* при обратном ходе его во вторую куб-призму и в окуляр *1*. Вторая служит для направления отраженного пучка лучей на вибрирующую щель *18*, колеблющуюся с частотой 50 Гц.

Пучок лучей после вибрирующей щели идет через конденсор *17* и поступает на фотоэлемент *16*. Сигнал с фотоэлемента поступает на усилитель *15*, далее на дискриминатор *14* и гальванометр *13* со стрелочным индикатором.

Окуляр *1* в приборе служит для контроля установки автоколлимационного изображения марки *8* на сетке *2* и получения нулевого отсчета на стрелочном измерителе путем наклона оптического микрометра *4* вращением барабана *12*. Угловые смещения отсчитываются по барабану микрометра.

Народное предприятие «Карл Цейсс», Йена (ГДР) выпускает автоколлиматор AKF-OE-0,5, относящийся по способу построения также к первой подгруппе. Основные параметры прибора одинаковы с параметрами визуального автоколлиматора AKF-OE-0,5 (см. раздел 1.1), исключение составляет погрешность измерений, которая уменьшена до 0,5″ (погрешность AKF-OE-0,5—2″).

Автоколлиматоры ТА-80, ТА-81 и ТА-82 относятся ко второй подгруппе ФЭАК. Компенсатором в них является вибрирующая щель, выполняющая одновременно роль анализатора. Сигнал (ток компенсации) с дискриминатора подается на привод щели — вибратор, вследствие чего при наклоне измеряемого зеркала центр колебаний щели совмещается с изображением световой марки. Величина тока компенсации пропорциональна величине измеряемого угла. Другой способ компенсации осуществлен, например, в моделях ТА-57 и ТА-58. Здесь центр колебаний щели приводится автоматически с помощью серводвигателя [7].

Фирма «Баргес Индженеринг» (США) разработала трехкоординатный автоколлиматор «Реал». Прибор работает на принципе поляризованного пучка лучей. ФАП служит граница двух поляризаторов, расположенных так, что проходящие световые пучки модулируются в противофазе.

Оптическая схема автоколлиматора «Реал» показана на рис. 67. Свет от источника *17* через конденсор *16* и светофильтр *15* освещает щель *14*, находящуюся в фокусе объектива автоколлиматора. Пучок лучей, отразившись от светоделительной пластинки *3*, направляется в объектив *2* и к зеркалу *1*. После отражения от зеркала пучок лучей идет обратно, проходит объектив, полупрозрачные пластинки *3* и *4*, оптический микрометр *7*, поляризатор *8*, вращаемый двигателем *12*, и строит автоколлимационное изображение щели в плоскости полутеневого анализатора *9*. Конденсор *10* собирает пучок на фотоэлементе *11*. Зеркало *13*, полупрозрачная пластинка *4*, сетка *5* и окуляр *6* составляют систему, при помощи которой рассматривается изображение це-

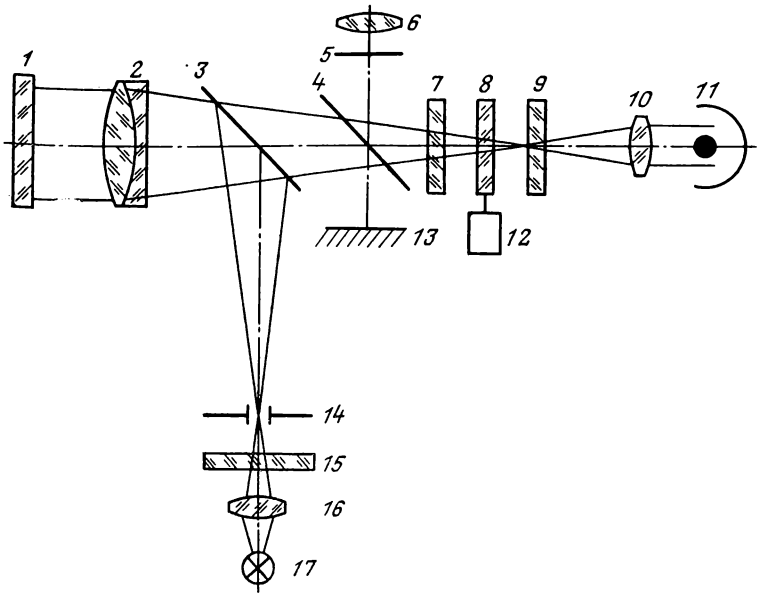


РИС. 67

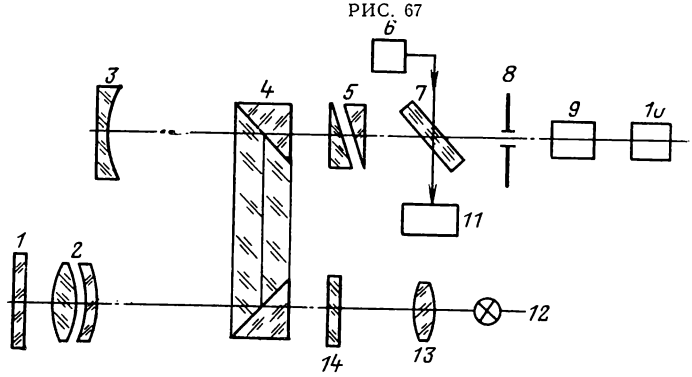


РИС. 68

ли находящейся на малом удалении от объектива. Предел измерения углов визирным устройством 7,5″ с погрешностью ~0,2″.

Фирма «Коллморген» (США) разработала двухкоординатный фотоэлектрический автоколлиматор, в котором при измерениях автоколлимационное изображение марки вращается по окружности вокруг центра отверстия в диафрагме. На рис. 68 показана оптическая схема автоколлиматора. Пучок лучей от источника *12* через конденсор *13* освещает автоколлимационную марку *14*, расположенную в фокусе объектива *2*, проходит светоделительную призму *4*, объектив и отражается параллель-

ным пучком от зеркала *1*. При обратном ходе через объектив пучок лучей призмой *4* направляется на вогнутое зеркало *3* и, отразившись от него, проходит светоделительный слой той же призмы в другом конце ее, клинья *5* и модулирующую пластинку *7*, которая вращает автоколлимационное изображение марки вокруг отверстия в диафрагме *8*. Далее пучок падает на ФЭУ *9*, сигнал с которого поступает на катодный повторитель *10*. Пластинка *7* модулирует с помощью двигателя *6*, связанного с вращением ротора *11*, с которого идут два опорных сигнала, определяющих знак угла поворота зеркала. Клинья *5* перемещаются от двух приводов после сигнала, поступившего при повороте зеркала *1* вокруг двух осей. Перемещение клиньев приводит центр автоколлимационного изображения марки на середину отверстия в диафрагме. Измерение углов производится в пределах $\pm 2{,}5'$ с погрешностью $0{,}5''$.

Эта же фирма выпускает автоматический автоколлиматор К-342, который имеет диапазон измерений $\pm 150''$ и погрешность отсчета — $0{,}5''$.

Фирма «Перкин — Елмер» (США) разработала двухкоординатный фотоэлектрический автоколлиматор, предназначенный для слежения за работой ротора гироскопа. Фокусное расстояние объектива около 15 мм, предел измерения $\pm 1°$, чувствительность прибора — доли угл. с.

Известен патент США на ФЭАК, который можно отнести к цифровым (первой подгруппе) [7]. Работает автоколлиматор следующим образом.

Источник света *1* (рис. 69) конденсором *2* проецируется в плоскость диафрагмы *3* с квадратным отверстием. Пройдя светоделительный кубик *4* и отразившись от зеркала *5*, пучок лучей попадает на объектив *6*, в фокальной плоскости которого

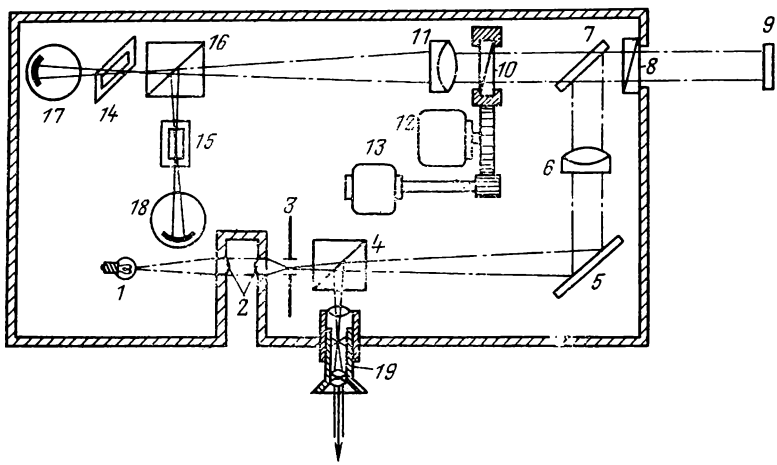


РИС. 69

расположена диафрагма *3*. Вышедший из объектива пучок лучей отражается от полупрозрачной пластины *7*, проходит клин *8*, служащий для юстировки прибора, отражается от зеркала *9*, затем проходит вращающийся клин *10* и попадает на второй объектив *11*. Вращение клину передается от двигателя *13*. Для получения опорного сигнала служит устройство *12*. Изображение квадратного отверстия в диафрагме *3* образуется в плоскости диафрагмы *14* и с помощью светоделительного кубика *16* в плоскости диафрагмы *15*. Диафрагмы имеют щелевидные отверстия, причем их длинные стороны взаимно перпендикулярны. Пучки, прошедшие щели диафрагмы, попадают на фотоприемники *17* и *18*. Для визуального наблюдения служит окуляр *19*. При наклоне зеркала *9* промежутки времени между импульсами не равны друг другу. Знак угла наклона зеркала определяется с помощью опорного сигнала. Данные об ожидаемой точности автоколлиматора не приводятся.

В цифровом автоколлиматоре, выпускаемом фирмой «Лейтц» (ФРГ), используется в качестве световой марки вибрирующая щель, ее автоколлимационное изображение строится на решетке-анализаторе с чередующимися темными и прозрачными штрихами. По положению изображения марки на известном штрихе решетки оценивается угол отклонения измеряемого зеркала. Фокусное расстояние объектива 206 мм. Порог чувствительности прибора равен 0,05″. Отнесем условно этот автоколлиматор ко второй подгруппе [7].

3.2. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА ФЭАК

Анализ конструктивных и эксплуатационных параметров фотоэлектрических автоколлиматоров, а также их сопоставление позволяет установить следующие основные характеристики ФЭАК.

1. В состав проекционных ФЭАК входит оптический угловой компенсатор [21] (в отличие от визуальных, где его присутствие необязательно), играющий роль уравновешивающего звена при аналоговой обработке или сканирующего устройства (сканатора) при цифровой обработке сигналов. Роль компенсатора может выполнять также анализатор, способный перемещаться в плоскости измеряемых углов перпендикулярно к оптической трубе.

2. Новые технические решения по усовершенствованию ФЭАК направлены на оптимизацию оптических схем.

3. Новые способы построения оптических схем обработки оптических и электронных сигналов управления компенсаторами и регистрации результатов измерений направлены на улучшение эксплуатационных качеств ФЭАК (точности, надежности, скорости измерений, снижение стоимости образцов и т. д.). В то же время ряд разработанных ФЭАК не соответствует предъявляемым к ним современным требованиям. Из большого количества

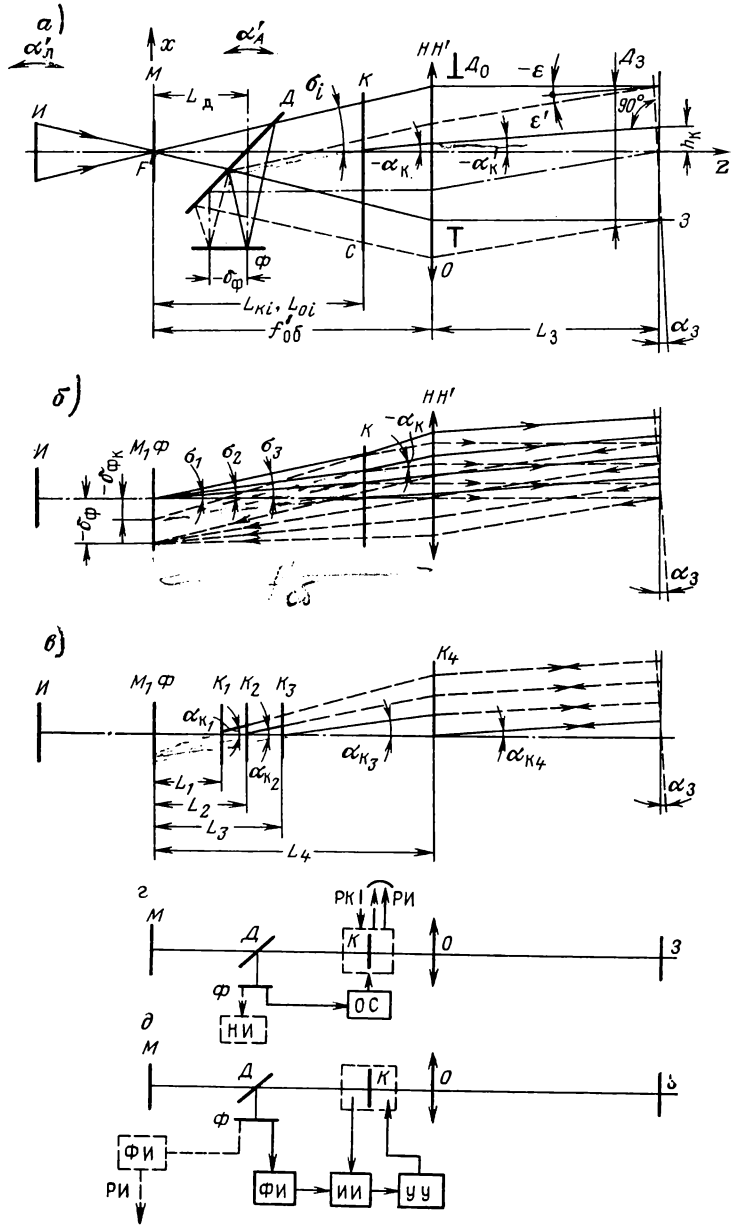

а)
$\alpha'_л$
x
α'_A
М
$L_д$
Д
σ_i
К
НН'
$\perp Д_0$
$-\varepsilon$
$Д_з$
И
F
$-\alpha_к$
$-\alpha_к$
ε'
90°
$h_к$
z
Т
З
С
О
Ф
$\sigma_ф$
$L_{кi}, L_{oi}$
$f'_{об}$
$L_з$
$\alpha_з$
б)
НН'
К
$-\alpha_к$
И
$M_1Ф$
$\sigma_{фк}$
$\sigma_ф$
σ_1
σ_2
σ_3
$\alpha_з$
в)
K_4
И
$M_1Ф$
K_1
K_2
K_3
$\alpha_{к_1}$
$\alpha_{к_2}$
$\alpha_{к_3}$
$\alpha_{к_4}$
L_1
L_2
L_3
L_4
$\alpha_з$
г
РК
РИ
М
Д
К
О
З
Ф
НИ
ОС
д
М
Д
К
О
Ф
ФИ
РИ
ФИ
ИИ
УУ

РИС. 7

разработанных ФЭАК весьма малое место занимают цифровые автоколлиматоры, имеющие наименьшее количество преобразователей измерительной информации и хорошо согласующиеся с ЭЦВМ.

Рассмотрим обобщенную схему ФЭАК (рис. 70,*а*) и проведем краткий анализ влияния его отдельных узлов на качество измерений. Будем считать, что осветителем (на рисунке не показан) сформированы оптимально световые пучки в плоскости H, создающие определенную освещенность световой марки M. Далее световые пучки, пройдя через светоделительное устройство $Д$, проходят через компенсатор K (или отражаются от него), который на рис. 70,*а* условно изображен в виде плоскости, после которого световые пучки отклоняются на угол $\alpha_к$.

Отметим, что в ФЭАК компенсатор может быть и другого типа, например в виде плоскопараллельной пластины [21], которая при повороте смещает световые пучки. Однако смещение световых пучков компенсатором приводит к их угловому отклонению после объектива. К аналогу этого явления можно прийти при анализе работы координатно-чувствительного фотоприемника, выполняющего в ФЭАК роль анализатора и компенсатора одновременно.

Световые пучки, пройдя через объектив, который показан в виде тонкой линзы HH' с совпадающими главными плоскостями, формируются в виде параллельных и падают на зеркало $З$. При нормальном расположении отражающей поверхности зеркала к коллимационной оси ФЭАК световые пучки отразятся от него и после вторичного прохождения объектива и отражения от светоделительной поверхности $Д$ сфокусируются в центре ФАП — $Ф$.

Поворот измеряемого зеркала на величину $\alpha_з$ вызовет поворот параллельных световых пучков на величину $\alpha_з = \frac{1}{2}\varepsilon$ ($\varepsilon = \varepsilon'$). При этом сфокусированные световые пучки (изображение световой марки M) при отсутствии компенсатора сместятся в плоскмости $Ф$ на величину

$$-\delta_ф = -2\alpha_з f'_{об}. \qquad (3.1)$$

Если ФАП фиксирует только «нулевое» положение изображения M, то для измерения величины $\alpha_з$ необходимо, чтобы компенсатор K отклонил световые пучки на угол $\alpha_к$, соответствующий смещению изображения M в «нулевое» положение на величину $\delta_ф$. Для определения $\alpha_к = f\alpha_з$ рассмотрим работу компенсатора в малом угловом поле. На рис. 70,*б* сплошными линиями показаны четыре луча, исходящие от световой марки M (условно M и $Ф$ объединены в одну плоскость) в случае полной компенсации наклона параллельного пучка измеряемым зеркалом. Штриховыми линиями показан ход лучей светового пучка при отсутствии компенсатора [согласно формуле (3.1)]. Если компенсатор отклоняет световой пучок только в прямом

ходе, что, например, может иметь место при его установке между M и $Д$, обратный пучок отклоняется от центра $Ф$ на величину $\delta_{\Phi_к}=0{,}5\delta_{\Phi}$. Таким образом, компенсатор при автоколлимационном ходе лучей отклоняет световые пучки на двойную величину угла.

Рассмотрим это свойство компенсатора аналитически (основные обозначения даны на рис. 70,*а* и 70,*б*). При компенсации $\alpha_в=\alpha_з$ и

$$-\alpha_э=-\sigma_i-\alpha_к-\frac{L_{к_i}(-\sigma_i)-(\sigma_i+\alpha_к)(f'_{об}-L_{к_i})}{f'_{об}}, \qquad (3.2)$$

что соответствует

$$\frac{L_{к_i}}{f'_{об}}\alpha_к=\alpha_з. \qquad (3.3)$$

Эта формула подтверждает одновременную работу компенсатора в прямом и обратном ходе лучей (так как $\alpha_з=2\varepsilon=\alpha_в$, а коэффициенты в формуле отсутствуют) и устанавливает линейную зависимость $\alpha_к$ от места установки компенсатора в ФЭАК при постоянном диапазоне измеряемых углов $\alpha_з$ Рис. 70,*в* иллюстрирует это явление. Действительно, если приближать $К$ к $Ф$, то для полной компенсации $\alpha_з$ угол $\alpha_к$ необходимо увеличивать, о чем свидетельствуют сходящиеся лучи после объектива в обратном ходе. На этом свойстве основано действие клинового компенсатора, перемещаемого вдоль оптической оси. При размещении компенсатора в плоскости $Ф$ угловая компенсация вообще невозможна. Перемещение $К$ в сторону объектива приводит к уменьшению $\alpha_к$, величина которого достигает минимума при совмещении его с объективом. При размещении $К$ перед объективом $\alpha_к$ его положение не изменяет $\alpha_к$, так как $L_{к_i}\leqslant f'_{об}$. Следует отметить также, что $\alpha_к$ не зависит от величины σ_i только при инвариантности $\alpha_к$ к углу падения и высоте луча на компенсатор.

Наиболее важным свойством компенсатора является линейная зависимость $\alpha_к$ от $\alpha_з$. Например, при использовании зеркального компенсатора и при аналоговой обработке сигналов

$$\alpha_{кз}=\frac{2f'_{об}}{L_{к_i}}\alpha_з, \qquad (3.4)$$

где $\alpha_{кз}$ — угол поворота зеркального компенсатора. Это обозначает, что для измерения $\alpha_з$ достаточно измерить $\alpha_{кз}$ и учесть постоянный коэффициент. При цифровой обработке сигналов зеркальный компенсатор (см. раздел 3.1) должен быть приведен, например, в равномерное вращательное движение со скоростью ω_0, тогда

$$t_0 \pm t_1 = \frac{2 f'_{об}}{L_{к_i}\,\omega_0}\,\alpha_з, \qquad (3.5)$$

где t_0 — момент времени, соответствующий появлению нулевого импульса, t_1 — момент времени, соответствующий повороту зеркала на угол $\alpha_{кз}$ (этот момент может опережать t_0 или отставать от него, в зависимости от знака $\alpha_з$).

На рис. 70,*г* показана упрощенная схема аналоговой обработки сигналов.

ФЭАК первой подгруппы (см. раздел 3.1) включают нуль-индикатор *НИ* и устройство ручной компенсации *РК* (штриховые линии). Для осуществления автоматических измерений должна быть включена отрицательная обратная связь между ФАП и компенсатором (сплошные линии). Наиболее простой блок обратной связи *ОС* должен содержать усилитель, выход которого подключен к компенсатору (статическая компенсация). В *ОС* может быть также включено интегрирующее устройство, например двигатель, который приводит в движение компенсатор. В этом случае может быть осуществлена астатическая компенсация измеряемого угла $\alpha_з$, величина которого во всех рассмотренных случаях снимается с компенсатора и подается на регистратор измерений *РИ*.

На рис. 70,*д* показана схема цифровой обработки сигналов. В первой подгруппе ФЭАК сигналы с ФАП подаются на формирователь импульсов *ФИ*, откуда поступают на измеритель интервалов времени *ИИ*. Сюда же подаются опорные сигналы с устройства управления *УУ* компенсатором (сплошные линии). Во второй подгруппе сигналы с координато-чувствительного фотоприемника подаются на *ФИ*, с выхода которого сигналы поступают на *РИ*.

Рассмотрим основные погрешности измерений ФЭАК, которые являются общими для любого способа обработки измерительной информации. Проанализируем две основные группы погрешностей (см. рис. 70,*а*): линейные, приведенные к погрешности ФАП, и угловые нестабильности положения ФЭАК в измеряемой плоскости. Обозначим дисперсии этих погрешностей соответственно $\sigma_{ФАП}$ и $\sigma_{ФЭАК}$. Считая эти погрешности независимыми, выразим общую погрешность

$$m_{\alpha_з} = \sqrt{\frac{\sigma_{ФАП}}{(f'_{об})^2} + \sigma_{ФЭАК}}\,. \qquad (3.6)$$

Приведем к $\sigma_{ФАП}$ следующие погрешности:
$\delta_{x_п}$ — пороговая чувствительность ФАП, определяемая выражением

$$\delta_{x_п} = \frac{K_1 X_s \Delta \Phi_{пор}}{\Phi_0}, \qquad (3.7)$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от энергетического профиля светового пучка на ФАП и способа анализа, X_s — размер светового пучка, $\Delta\Phi_{пор}$ — порог чувствительности фотоприемника, Φ_0 — световой поток.

$m_{x_{мф}}$ — среднеквадратическая величина взаимной нестабильности положений световой марки M и $ФАП — Ф$ в измеряемой плоскости (в данном случае по координате x).

$m_п$ — дополнительная среднеквадратическая погрешность ФАП, связанная со случайными искажениями энергетического профиля светового пучка в плоскости анализатора.

Вторая группа погрешностей включает погрешность, связанную с угловой нестабильностью энергетической оси лазерного излучения — $m'_{\alpha_л}$ (при использовании в качестве источника света лазера):

$$m_{\alpha_л} = \frac{2\, m'_{\alpha_л}\, f'_к}{f'_{об}}, \tag{3.8}$$

где $f'_к$ — фокусное расстояние конденсора, формирующего световую марку; погрешность, связанную с угловой нестабильностью ФЭАК — $m'_{ФЭАК}$, погрешность вызываемую угловой нестабильностью светоделительной поверхности,

$$m_{\alpha_д} = \frac{4\, m'_{\alpha_д}\, L_д}{f'_{об}}; \tag{3.9}$$

погрешность, связанную с погрешностью компенсатора в рабочем диапазоне $m'_{\alpha_к}$, определяемую в соответствии с (3.3),

$$m_{\alpha_к} = \frac{L_{к_i}}{f'_{об}}\, m'_{\alpha_к}. \tag{3.10}$$

Подставляя (3.7)—(3.10) в (3.6) (используя индексацию m для σ), получим

$$m_{\alpha_з} = \frac{1}{f_{об}} \sqrt{\frac{K_1 X_s^2 \Delta \Phi_{пор}^2}{\Phi_0} + \sigma_п + 4\,(m'_{\alpha_л})^2 f_к^2 + \sigma_{x_{мф}} + \rightarrow}$$

$$\rightarrow \overline{+ \sigma_{ФЭАК} f_{об}^2 + 16\,(m'_{\alpha_д})^2 L_д^2 + L_{к_i}^2\, 3\, \sigma'_{\alpha_к}}. \tag{3.11}$$

Отметим, что некоторые составляющие общей погрешности могут отсутствовать при измерениях в зависимости от конструктивных схем ФЭАК. Например, при использовании теплового источника света $m'_{\alpha_л} = 0$, а стабильность направления светового пучка определяется $\sigma_{x_{мф}}$. В свою очередь, при объединении световой марки и ФАП в одном узле $\sigma_{x_{мф}} = 0$, а нестабильность его положения будет определяться в этом случае величиной

$\sigma_{\text{ФЭАК}}$. Соответственно вследствие отсутствия светоделительной поверхности $m'_{\alpha_д}=0$.

Таким образом, погрешность измерений ФЭАК при минимальном количестве составляющих выразится следующим образом:

$$m_{\alpha_{\text{зм}}}=\frac{1}{f_{\text{об}}}\sqrt{\frac{K_1 X_s^2 \Delta \Phi_{\text{по}}^2}{\Phi_0}+\sigma_{\text{п}}+\sigma_{\text{ФЭАК}} f'^2_{\text{об}}+L^2_{\text{к}_i}\sigma'_{\alpha_{\text{к}}}}. \qquad (3.12)$$

Составляющие погрешности под радикалом присутствуют при измерениях с использованием практически всех известных ФЭАК.

Уменьшение каждой из них до минимально возможных величин представляет собой сложную техническую задачу. Уменьшение первой составляющей связано с выбором типов источника излучения, ФАП, оптических узлов (конденсора и объектива), способов обработки электронных сигналов и т. д.

Вторая составляющая ($\sigma_{\text{п}}$) может достигать больших величин, например, при экранировании световых пучков на измеряемом зеркале и входных зрачках объективов после отражения от измеряемого зеркала ими при использовании лазерного излучения, энергетический профиль которого нестабилен во времени. Указанное экранирование световых пучков увеличивается при увеличении диапазона измеряемых углов $\alpha_{\text{зм}}$, который связан с точностью измерений:

$$T_1=\frac{\alpha_{\text{зм}}}{m_{\alpha_{\text{з}}}+\Delta x}, \qquad (3.13)$$

где Δx — систематическая погрешность ФЭАК.

Третья составляющая не зависит, в отличие от предыдущих, от $f'_{\text{об}}$. Для ее уменьшения могут быть использованы различные конструктивные решения, позволяющие повысить стабильность положений автоколлиматоров во времени, выбрано оптимальное количество проверок во время измерений или использованы автоматические системы для стабилизации пространственного положения опорного светового пучка.

Последняя составляющая зависит от конструктивных особенностей компенсатора, выбранных способов управления им и его расположения в ФЭАК. Диапазон $\alpha_{\text{к}}$ согласно (3.3) полностью определяет $\alpha_{\text{зм}}$ (3.13).

Следует отметить, что рассматриваемые составляющие общей погрешности связаны между собой через параметры используемых в ФЭАК элементов, причем часто эти связи имеют довольно сложный характер. Рассмотрим, например, использование лазера в ФЭАК. Основным его преимуществом по сравнению с тепловыми источниками является высокая направленность излучения. Благодаря этому первая составляющая может быть су-

щественно уменьшена за счет увеличения Φ_0 и уменьшения X_s. Одновременно, как уже указывалось, может увеличиться $\sigma_п$ и $\sigma_{ФЭАК}$, а уменьшение X_s за счет увеличения диаметра объектива требует увеличения диаметра компенсатора, что, в свою очередь, приводит к уменьшению диапазона $\alpha_к$ и, соответственно, общей точности (3.13).

Поэтому минимизация $m_{\alpha_{зм}}$ в общем случае представляет собой сложную научную задачу. Более легкой задачей может быть оптимизация параметров ФЭАК, основные элементы которых определены на основе анализа предварительных исследований.

В последующих разделах рассмотрим функциональные особенности элементов ФЭАК.

3.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ФАП

Проведем в общем виде анализ работы наиболее распространенных ФАП, работающих на принципе выделения центра энергетического профиля, и корреляционного типа [6]. Основным критерием их качества будем считать влияние искажений энергетического профиля анализируемого светового пучка на величину $\sigma_п$. Нестабильность энергетического профиля возникает вследствие влияния турбулентности атмосферы [7], разъюстировок резонаторов лазеров и, как указывалось в предыдущем разделе, экранирования световых пучков на различных элементах.

Для упрощения анализа рассмотрим одномерное распределение энергии профиля светового пучка (рис. 71).

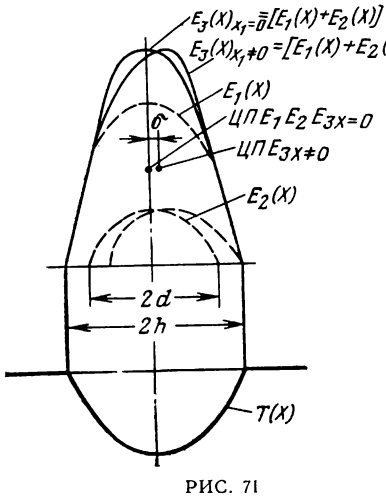


РИС. 71

$$E_1(x) = \begin{cases} A(h^2 - x^2) & \text{при } |x| \leqslant h \\ 0 & \text{при } |x| > h \end{cases}, \quad (3.14)$$

где A — энергетический коэффициент, $2h$ — ширина пучка, в пределах которой его профиль нестабилен, x — поперечная координата. Искажения энергетического профиля опишем с помощью вспомогательного светового пучка с распределением энергии $E_2(x)$, который распространяется внутри пучка с распределением $E_1(x)$ и может смещаться относительно его по координате x.

С помощью суммы энергий этих пучков в этом случае будет описываться энергетический профиль анализируемого пучка. В этом случае при

$$E_2(x) = \begin{cases} B[d^2 - (x - x_1)^2] & \text{при } |x - x_1| \leqslant d \\ 0 & \text{при } |x - x_1| > d \end{cases}, \tag{3.15}$$

где B — энергетический коэффициент, $2d$ — ширина пучка с распределением $E_3(x)$, световой поток анализируемого пучка определяется в виде

$$\Phi_3 = \int_{-y_1}^{+y_1} \int_{-h}^{+h} [E_1(x) + E_2(x)]\, dx\, dy, \tag{3.16}$$

где $|2y_1|$ — ширина пучка по координате y, в дальнейшем эту координату учитывать не будем.

При $x_1 = 0$ распределение $E_3(x)$ симметрично, а при $x_1 = 0$ симметрия нарушается и центр профиля смещается на величину δ. ФАП, выделяющий этот центр, зафиксирует нулевое значение с погрешностью $\delta_{x_п}$ (3.7) при условии

$$\int_{-h}^{\delta} [E_1(x) + E_2(x)]\, dx = \int_{\delta}^{h} [E_1(x) + E_2(x)]\, dx. \tag{3.17}$$

Подставляя (3.14) и (3.15) в (3.17) и интегрируя, получаем кубическое уравнение относительно δ:

$$-\frac{\delta^3 (A + B)}{3} + \delta^2 B x_1 + \delta (A h^2 + B d^2 - B x_1^2) + $$

$$+ B x_1 \left(\frac{x_1^2}{3} - d^2 \right) = 0. \tag{3.18}$$

Введем безразмерные параметры

$$\frac{x_1}{h} = \tilde{x}_1; \quad \frac{d}{h} = \tilde{d}; \quad \frac{B}{A} \approx \tilde{B}; \quad \frac{\delta}{h} = \Delta_ц \tag{3.19}$$

и обозначения

$$\left.\begin{aligned} K_2 &= -\frac{3 \tilde{x}_1 \tilde{B}}{2(1 + \tilde{B})}, \quad K_3 = \frac{3[1 + \tilde{B}(\tilde{d}^2 - \tilde{B}\tilde{x}_1^2)]}{1 + \tilde{B}} \\ K_4 &= \frac{\tilde{B}\tilde{x}_1(3\tilde{d}^2 - \tilde{x}_1^2)}{1 + \tilde{B}} \end{aligned}\right\}. \tag{3.20}$$

Подставив (3.19) и (3.20) в (3.18), получаем

$$\Delta_ц^3 - K_2 \Delta_ц^2 - K_3 \Delta_ц + K_4 = 0. \tag{3.21}$$

Ориентировочные графические решения показывают, что искомое значение $\Delta_ц$

$$0 < |\Delta_{\text{ц}}| < \frac{|K_2|}{2}. \tag{3.22}$$

Решение уравнения (3.21) проводилось численно на ЭЦВМ — БЭСМ-4 методом половинного деления с точностью 10^{-6}.

Графики функций $\Delta_{\text{ц}} = f(\tilde{x}_1)$ для $\tilde{B} = 0{,}6$; $\tilde{d} = 0{,}2$, 0,3, 0,4 приведены на рис. 72,*а*.

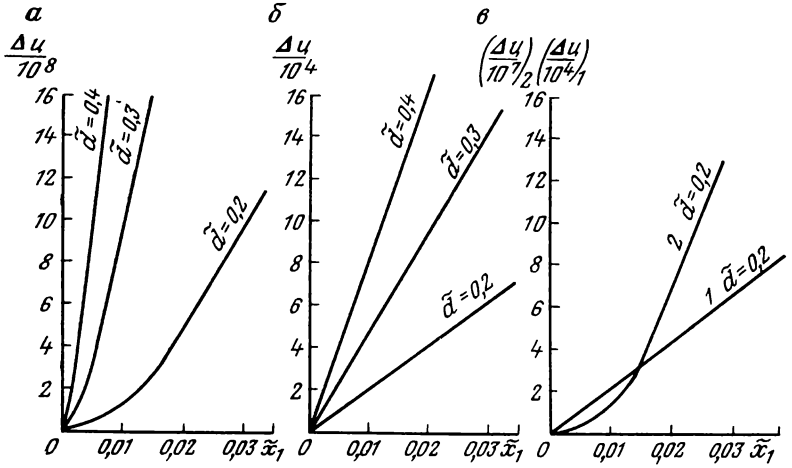


РИС. 72

Из графиков видно, что при появлении искажений в профиле пучка $\Delta_{\text{ц}}$ линейно зависит от $\tilde{x}_1$. Увеличение d и $\tilde{B}$ приводит к увеличению крутизны исследуемой зависимости. Следует отметить, что величины $\tilde{x}$ и $\tilde{d}$ выбирались таким образом, чтобы дополнительный пучок не выходил за пределы основного.

Рассмотрим анализатор корреляционного типа в виде симметричного распределения $T(x)$ в щели шириной $2h$. Пучок с профилем $E_3(x)$ сканируется по анализатору по закону

$$x' = 2h\cos\omega t - \delta, \tag{3.23}$$

где δ — смещение центра сканирования относительно центра анализатора, ω — круговая частота сканирования.

Световой поток, проходящий через анализатор, определяется выражением

$$\Phi(t) = \int_{-h}^{+h} T(x)\,[E(x + x')]\,dx. \tag{3.24}$$

Если в качестве анализатора используется щель, то

$$\Phi(t) = \int_{-h}^{+h} E(x + 2h\cos\omega t - \delta)\,dx. \tag{3.25}$$

Отметим, что эта функция является четной относительно времени. Будем далее считать, что при $\delta=0$ амплитуда первой гармоники появляется при сдвиге дополнительного пучка на величину $x_1\neq 0$, так как она является признаком асимметрии. Для исключения амплитуды первой гармоники необходимо сдвинуть центр сканирования суммарного светового пучка на величину δ в противоположную сдвигу дополнительного пучка сторону на величину x_1. Таким образом работает автоматическая следящая система или ручная компенсация. Тогда, как и в предыдущем случае, величина δ соответствует погрешности анализатора из-за смещения центра тяжести сечения светового пучка.

Определим величину δ при отсутствии первой гармоники в Фурье разложением функции (3.25):

$$a_1 = \frac{2\omega}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \Phi(t)\cos\omega t\, dt = 0. \tag{3.26}$$

Подстановка в (3.26) (3.25) и интегрирование приводят к весьма громоздкому уравнению:

$$K_1\sin\varphi_3 + K_3(\sin\varphi_6 - \sin\varphi_3) + K_2\left(\varphi_3 + \frac{\sin 2\varphi_3}{2}\right) +$$

$$+ K_4\left(\varphi_6 - \varphi_3 + \frac{\sin 2\varphi_6 - \sin 2\varphi_3}{2}\right) + 4(1+\Delta_ц)\times$$

$$\times\left(\frac{\sin^3\varphi_3}{3} - \sin\varphi_3\right) + 4(\Delta_ц - 1)\left(\sin\varphi_6 - \sin\varphi_3 -\right.$$

$$\left. - \frac{\sin^3\varphi_6 - \sin^3\varphi_3}{3}\right) + 2\varphi_3 + \frac{4}{3}\sin 2\varphi_3 + \frac{\sin 4\varphi_3}{6} -$$

$$- \varphi_6 - \frac{2}{3}\sin 2\varphi_6 - \frac{\sin^4\varphi_6}{12} + \tilde{B}\left\{b_1(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) +\right.$$

$$+ \frac{4}{3}\tilde{d}^3(\sin\varphi_4 - \sin\varphi_3) + b_4(\sin\varphi_5 - \sin\varphi_4) +$$

$$+ b_2\left(\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{\sin 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1}{2}\right) + b_5\left(\varphi_5 - \varphi_4 + \frac{\sin 2\varphi_5 - \sin 2\varphi_4}{2}\right)$$

$$+ 4b_3\left(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 + \frac{\sin^3\varphi_1 - \sin^3\varphi_2}{3}\right) +$$

$$+ 4b_6\left(\sin\varphi_5 - \sin\varphi_4 + \frac{\sin^3\varphi_4 - \sin^3\varphi_5}{3}\right) + \varphi_2 - \varphi_1 +$$

$$+ \frac{2}{3}(\sin 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1) + \frac{1}{12}(\sin 4\varphi_2 - 4\varphi_1) + \varphi_4 - \varphi_5 -$$

$$\left. - \frac{2}{3}(\sin 2\varphi_5 - \sin 2\varphi_4) - \frac{1}{12}(\sin 4\varphi_5 - \sin 4\varphi_4)\right\} = 0. \tag{3.27}$$

Здесь введены обозначения

$$K_1 = \frac{4}{3} - \Delta_ц^2 - \frac{\Delta_ц^3}{3}; \quad K_2 = \Delta_ц\,(2 + \Delta_ц);$$

$$K_3 = \frac{4}{3} - \Delta_ц^2 - \frac{\Delta_ц^3}{3}; \quad K_4 = \Delta_ц\,(2 - \Delta_ц);$$

$$b_1 = \tilde{d}^2\left(\tilde{x}_1 + \frac{2}{3}\tilde{d} + \Delta_ц + 1\right) - \frac{(1 + \tilde{x}_1 + \Delta_ц)^3}{3};$$

$$b_2 = (1 + \tilde{x}_1 + \Delta_ц)^2 - \tilde{d}^2; \quad b_3 = -1 - \tilde{x}_1 - \Delta_ц;$$

$$b_5 = \tilde{d}^2 - \left(1 - \tilde{x}_1 - \frac{2}{\Delta_ц}\right);$$

$$b_6 = \tilde{x}_1 + \Delta_ц - 1; \quad \varphi_1 = \arccos\frac{\tilde{x}_1 + \tilde{d} + \Delta_ц + 1}{2};$$

$$\varphi_2 = \arccos\frac{\tilde{x}_1 + \Delta_ц - \tilde{d} + 1}{2}; \quad \varphi_3 = \arccos\frac{\Delta_ц}{2};$$

$$\varphi_4 = \arccos\frac{\tilde{x}_1 + \tilde{d} + \Delta_ц - 1}{2}; \quad \varphi_5 = \arccos\frac{\tilde{x}_1 - \tilde{d} + \Delta_ц - 1}{2};$$

$$\varphi_6 = \arccos\frac{\Delta_ц - 2}{2}. \qquad (3.28)$$

Произвести оценку весовых соотношений отдельных членов с целью упрощения доступными методами не представилось возможным, уравнение решалось методом итераций для значений $\tilde{d}=0{,}2$; 0,3; 0,4 и $\tilde{B}=0{,}6$ на ЭЦВМ. Точность решения 10^{-6}. Результаты вычислений приведены на графиках рис. 72,*б*.

На рис. 72,*в* показаны рассматриваемые зависимости для анализаторов, работающих на принципе выделения центра тяжести энергетического профиля (кривая *1*) и выделения первой гармоники (кривая *2*). Кривая *2* проходит в основном выше кривой *1*, однако масштабы для них разные. Масштаб кривой *1* — 10^{-4}, а кривой *2* — 10^{-7}. Сравнение численных значений для одинаковых искажений светового пучка показывает, что в среднем погрешность работы анализатора первого типа $\sim 0{,}5\times 10^3$ раз больше. При других распределениях энергии в профиле светового пучка, например гауссовом, характер этих зависимостей останется прежним. Это подтверждено расчетами частных случаев на ЭЦВМ. Расчеты максимальных возможных смещений центра тяжести энергетического профиля светового пучка показывают, что даже в этих случаях использование анализатора второго типа значительно эффективнее использования анализатора первого типа в ФЭАК.

Существенно влияет на качество измерений ФЭАК размер светового пучка в плоскости анализатора. В частности, анализ формулы (3.12) позволяет установить, что при выбранных элементах источников света и компенсаторов, обеспечивающих высокое качество измерений и уменьшение величины $\sigma_{\text{ФЭАК}}$ до минимального значения путем концентрации светового пучка в плоскости анализатора, можно существенно уменьшить результирующую погрешность.

В главе 2 рассмотрено формирование автоколлимационного изображения световой марки методами геометрической оптики. Анализ результатов этих исследований позволяет установить, что в выпускаемых ФЭАК влияние аберраций объективов на указанное формирование не оказывает существенного влияния, так как их относительные отверстия выбираются небольшими (1:5—1:20).

Известно [3], что принципиальным ограничением для получения автоколлимационного изображения световой марки минимальных размеров даже при отсутствии аберраций объективов является дифракция на входном зрачке автоколлиматора. Другим ограничением является ограниченная яркость тепловых источников света, не позволяющая обеспечить необходимой величины светового потока, проходящего через световые марки (например щелевую диафрагму), имеющие минимальные размеры.

Лазерные источники обладают в этом смысле существенными преимуществами, однако формирование их излучений обладает определенной спецификой по сравнению с некогерентным светом [13]. Поэтому проведем сравнительную характеристику формирования некогерентного света и лазерного излучения, а также рассмотрим наиболее рациональный метод расчета распределения освещенности лазерного излучения в плоскости анализатора.

Рассмотрим идеализированный случай формирования света объективом автоколлиматора в плоскости анализатора. В этом случае полуширина нулевого максимума при наличии равномерной освещенности во входном зрачке объектива [3]

$$R_{\text{н}} = \frac{0{,}61\,\lambda f'_{\text{об}}}{D_{\text{об}}} = \frac{0{,}61\,\lambda f'_{\text{об}}}{2\,R_{\text{об}}}. \qquad (3.29)$$

В этом максимуме будет сосредоточено 83% светового потока.

Определим радиус сформированного лазерного излучения, в котором сосредоточена такая же часть потока. Для этого найдем распределение светового потока в плоскости анализатора при падении на входной зрачок объектива излучения с гауссовым распределением энергии.

Найдем световой поток, прошедший через объектив в обратном ходе (без учета потерь):

$$\Phi = \int_0^{R_{об}} \int_0^{2\pi} |E(R)|^2 R\, d\, R\, d\varphi, \tag{3.30}$$

где $|E(R)|^2$ — распределение энергии на входном зрачке, R — радиальная координата, φ — угловая координата. Считая распределение энергии на зрачке гауссовым, определим

$$\Phi = \frac{\Phi_0 \pi r_s^2 2\pi}{\lambda^2 f_{об}^2} \int_0^{R_{об}} e^{-\frac{2R^2 r_s^2 \pi^2}{\lambda^2 f^2}} d\left(\frac{R r_s \pi}{\lambda f} \sqrt{2}\right)^2 \frac{\lambda^2 f^2}{r_s^2 \pi^2 2}. \tag{3.31}$$

Взяв интеграл в указанных пределах, получим

$$\Phi = \Phi_0 \left(1 - e^{-\frac{2R_{об}^2 r_s^2 \pi^2}{\lambda^2 f_{об}^2}}\right), \tag{3.32}$$

где Φ_0 — полный световой поток, Φ — 83% светового потока, r_s — полуширина энергетического профиля излучения в плоскости анализатора.

После преобразования полученного выражения получим

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 0{,}83 = 1 - e^{-\frac{2R_{об}^2 r_{s(0,83)}^2 \pi^2}{\lambda^2 f_{об}^2}}$$

или

$$\exp - \frac{R_{об}^2 r_s^2 \pi^2}{\lambda^2 f^2} = 0{,}17. \tag{3.33}$$

Логарифмируя обе части этого уравнения, определим

$$r_{s(0,83)} = \sqrt{-\frac{\ln 0{,}17}{2}} \cdot \frac{\lambda f'_{об}}{\pi R_{об}}. \tag{3.34}$$

Обозначая по аналогии с (3.20) $r_{s(0,83)} = R_к$, найдем

$$R_к = \frac{0{,}94 \lambda f'_{об}}{\pi R_{об}}. \tag{3.35}$$

Сравнивая это выражение с (3.20), определяем

$$\frac{R_к}{R_и} \simeq 1. \tag{3.36}$$

Таким образом, при падении света с равномерным и гауссовым распределением энергии на безаберрационный объектив 83% световой мощности концентрируется в фокальной плоскости (плоскости анализатора) в обоих случаях на площадках с одинаковыми размерами.

Рассмотрим теперь формирование лазерного излучения (гауссова пучка) в произвольной плоскости. Для этого рассмотрим интеграл Гюйгенса — Френеля [10] для случая формирования гауссова пучка с плоским волновым фронтом и распределением энергии во входном зрачке объектива по закону $\exp -\frac{x^2}{2R^2}$ на расстоянии L при допущениях, приведенных выше. Тогда распределение энергии в произвольном сечении пучка будет также гауссово:

$$\exp\left(-\frac{x_L^2}{r_s}\right)=\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\left[-\frac{x^2}{2R^2}+i\frac{k(x-\xi)}{2L}-\frac{ikx^2}{2f_{об}}\right]dx. \qquad (3.37)$$

Здесь энергетические множители опущены, x_L — поперечная координата на расстоянии L от объектива, ξ — координата энергетического профиля пучка. Второй экспоненциальный член описывает распределение энергии в пучке в произвольном сечении, третий — коррекцию волнового фронта объективом без аберраций.

Приведя экспоненциальные члены этого выражения к общему знаменателю и вынося за интеграл множитель, не зависящий от x, получаем

$$\exp\left(-\frac{x_L^2}{r_s}\right)=\exp\frac{ik\xi^2}{2L}\int_{-\infty}^{+\infty}\exp\times$$
$$\times\left[-x^2\left(\frac{1}{2R^2}-\frac{ik}{2L}+\frac{ik}{2f_{об}}\right)-i\frac{kx\xi}{L}\right]dx.$$

После несложных преобразований подынтегрального выражения, интегрирования и выделения действительной части показателя экспоненты определим

$$r_s^2=\frac{4\left[\frac{1}{4R^4}+\frac{k^2}{4}\left(\frac{1}{L}-\frac{1}{f_{об}}\right)^2\right]}{\frac{k^2}{2R^2L^2}}. \qquad (3.38)$$

После преобразований получаем

$$r_s^2=\frac{L^2}{2k^2R^2}+2R^2L^2\left(\frac{1}{L}-\frac{1}{f_{об}}\right)^2. \qquad (3.39)$$

Анализ этого выражения показал, что при $kR^2\gg f$, что всегда осуществляется на практике, $\frac{\partial r_s}{\partial L}\simeq 0$ при $L=f_{об}$, т. е.

$$r_s\to\min, \text{ если } L\to f_{об}. \qquad (3.40)$$

Это означает, что энергетический профиль пучка имеет ми-

нимальные размеры (перетяжку) в фокальной плоскости. Тогда в плоскости анализатора

$$r_{s_a}^2 = \frac{f_{об}^2}{2k^2R^2}. \qquad (3.41)$$

С точностью до постоянного множителя это выражение (напомним, что $k = \frac{2\pi}{\lambda}$) совпадает с (3.25).

Можно показать, что при падении на входной зрачок объектива пучка с энергетическим профилем, имеющего диаметр

$$6R = D_{об}, \qquad (3.42)$$

его формирование осуществляется без заметного изменения по сравнению с использованием объектива бесконечно большого диаметра. Поэтому бесконечные пределы интеграла в (3.37) оправданы. Выражение (3.41) также совпадает с выражением для радиуса гауссова пучка, распространяющимся в регулярном лучеводе, полученного в результате решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода.

Рассмотренные особенности формирования гауссовых пучков в автоколлиматорах, на входе которых формируются параллельные пучки, устанавливают некоторую их идентичность с формированием некогерентного излучения. Следует отметить, однако, что выражения (3.36) и (3.41) получены для случая использования точечного некогерентного источника (которые по существу являются когерентными). В настоящее время используемые в автоколлиматорах источники света пока не могут обеспечить такой же освещенности световой марки, которую можно обеспечить в перетяжке лазерного излучения, формируемой конденсором автоколлиматора. Поэтому полученные выражения могут использоваться в основном для расчета формирования лазерного излучения или в случае использования в качестве световых марок дифракционных точек. При использовании световых марок ощутимых размеров учет дифракционных явлений позволяет определить разницу между размерами марок и их изображениями.

В главе 2 показаны преимущества использования автоколлимации сходящихся пучков. В этом случае анализ автоколлимационного изображения световой марки происходит вне фокальной плоскости, соответственно и процесс формирования гауссовых пучков будет более существенно отличаться от формирования изображений световых марок. Рассмотрим этот процесс.

Предварительно отметим, что при использовании в качестве световых марок диафрагм, размеры которых $h < 6r_{s_a}$, происходит экранирование части гауссовых пучков, сформированных конденсорами. В этом случае формирование изображения границ световой марки происходит так же, как и при использова-

нии тепловых источников света. В общем же случае положение перетяжки в обратном ходе когерентного излучения не соответствует положению изображения световой марки. Это явление обнаружено в результате общих исследований формирования лазерного излучения [13]. Если, например, считать за изображение источника света минимальное сечение светового пучка лазера, сформированное конденсором автоколлиматора, и совместить это сечение с задней фокальной плоскостью объектива, то вместо параллельного пучка на выходе в передней фокальной плоскости объектива автоколлиматора (что будет иметь место при некогерентном источнике излучения) будет сформирована также перетяжка.

Применяемые в настоящее время методы расчета гауссовых пучков [13] громоздки. Анализ значительно упрощается при описании распределения амплитудных и фазовых соотношений в сечениях когерентного излучения с помощью варианса [6] — комплексного числа a, которое связано с r_s и радиусом волнового фронта $R_в$ соотношением

$$Re\frac{1}{a}=\frac{1}{kr_s^2},$$

$$Im\frac{1}{a}=\frac{1}{R_в}. \qquad (3.43)$$

Это комплексное число полностью описывает структуру излучения в произвольном сечении и при распространении пучка на расстояние L в свободном пространстве варианс преобразуется по правилу

$$A=a-iL, \qquad (3.44)$$

где a — варианс в исходной плоскости, A — варианс в плоскости, находящейся на расстоянии L от исходной, а при прохождении через объектив с фокусным расстоянием $f'_{об}$

$$\frac{1}{A}=\frac{1}{a}-\frac{i}{f'_{об}}. \qquad (3.45)$$

Основной задачей будем считать определение местоположений конденсора и объектива (см. рис. 70,*а*) относительно плоскости анализатора и выбор их фокусных расстояний с целью формирования излучения лазера с минимальным r_s на объективе в обратном ходе, а в плоскости анализатора — с заданным r_s. При этом предполагается, что выполняется условие (3.42).

Рассчитаем размер пучка в плоскости анализатора, которая совмещена с фокальной плоскостью объектива. Варианс пучка, сформированный конденсором, составляет величину a:

$$\frac{1}{a}=\frac{1}{kr_s^2}+\frac{i}{R_в}. \qquad (3.46)$$

Воспользовавшись формулами (3.33)—(3.36), получим после двойного прохождения пучка через объектив и отражения от зеркальных поверхностей варианс в плоскости анализатора

$$A = \frac{a f'^2_{об}}{f'^2_1 - i L_з a}. \qquad (3.47)$$

Разделяя действительную и мнимую части, получим размер пятна и радиус кривизны волнового фронта

$$Re \frac{1}{A} = \frac{1}{k r^2_{s_a}},$$

$$Im \frac{1}{A} = \frac{1}{R_в} - \frac{L_з}{f^2_{об}}.$$

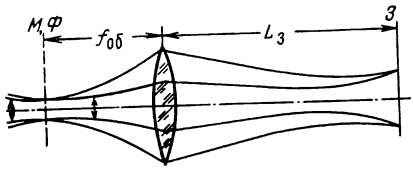


РИС. 73

Из полученных выражений видно, что размер сечения излучения в плоскости анализатора совпадает с размером сечения, сформированного объективом, хотя геометрия распространения в прямом и обратном ходе может не совпадать (рис. 73).

Следует отметить, что это явление имеет место независимо от расстояния $L_з$ от объектива до измеряемого зеркала.

Определим параметры элементов автоколлиматора, позволяющего получить минимальное r_s пучка на входном зрачке объектива. Установим конденсор таким образом, чтобы выходное зеркало лазера (на рис. 70 не показано) находилось в его передней фокальной плоскости. Учитывая, что варианс на выходном плоском зеркале резонатора лазера a_0 есть число действительное (так как перетяжка совпадает с зеркалом, то радиус кривизны бесконечен и $Im \frac{1}{a_0} = 0$), варианс пучка на объективе в обратном ходе будет

$$\frac{1}{A} = \frac{a_0 f^2_{об} (f'_к)^2}{a_0^2 (f^2_{об} - \Delta L_з) + L_з^2 f'^4_к} + i \frac{L_з (f'_к)^4 - \Delta a_0^2 (f^2_{об} - \Delta L_з)}{a_0^2 (f^2_{об} - \Delta L_з) + L_з f'^4_к}, \qquad (3.48)$$

где Δ — оптический интервал, т. е. расстояние между фокальными плоскостями конденсора и объектива.

Из действительной части полученного выражения видно, что минимум размера пятна достигается при $f^2_{об} = \Delta L_з$, т. е. при соотношении, эквивалентном формуле Ньютона. При этом размер пятна будет

$$R_s = \frac{L_з}{k r_{s_0}} \frac{1}{\Gamma^{\times}}, \tag{3.49}$$

где $\Gamma_т^{\times} = \frac{f'_{об}}{f'_к}$ — увеличение телескопической системы; r_{s_0} — $= \sqrt{\frac{a_0}{k}}$ — радиус пятна на выходе лазера.

Заметим, что несмотря на минимальную величину R_s на объективе, радиус кривизны пучка не равен бесконечности:

$$Im\frac{1}{A} = \frac{1}{L_з} \neq 0.$$

Найдем теперь оптимальную величину Δ.

Варианс A в фокальной плоскости объектива в прямом ходе будет

$$A = \frac{(f'_к)^2}{a_0} - i\Delta. \tag{3.50}$$

Отсюда размер пятна r_{s_a} в плоскости анализатора (здесь учтено, что размер пятна в плоскости анализатора равен размеру пятна в прямом ходе)

$$k r_{s_a}^2 = \frac{(f'_к)^2}{a_0} + \frac{\Delta^2 a_0}{(f'_к)^2}. \tag{3.51}$$

Полученный результат кажется на первый взгляд неправдоподобным, так как при $f'_к \to \infty$ размер пятна также стремится к бесконечности, однако на самом деле условие $f'_к \to \infty$ означает, что конденсор отсутствует.

Из соотношения (3. 51) видно, что kr_{s_a} имеет минимум. Исследуя (3.51) на минимум, получим оптимальное фокусное расстояние конденсора и размер пятна при этом

$$f'_к = \sqrt{\Delta a_0}, \tag{3.52}$$

$$k r_{s_a}^2 = 2\Delta = \frac{2 f_к^2}{}, \tag{3.53}$$

$$r_{s_a} = \sqrt{\frac{2 f_к^2}{k a_0}}. \tag{3.54}$$

Полученные формулы позволяют составить методику расчета автоколлиматора с использованием лазера.

1. Из заданной чувствительности прибора и варианса лазера (размера пятна на выходе лазера) определяется фокусное расстояние конденсора по формуле (3.54).

2. Из соотношения (3.52) определяется расстояние между фокальными плоскостями конденсора и объектива.

3. Из заданной длины трассы $L_з$ определяется фокусное расстояние объектива.

Отметим, что в расчетах нигде не использовалась расходимость лазера. Можно сказать, что расходимость однозначно определяется вариансом пучка, поэтому этот параметр лазера в подобных расчетах не используется.

3.5. ГРАДУИРОВОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФЭАК С КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ФАП

В разделе 3.3 показаны преимущества ФАП корреляционного типа. Получим для случая применения такого анализатора в ФЭАК градуировочную характеристику, определяемую зависимостью

$$C(\delta_ф) = f(t, \alpha_з), \tag{3.55}$$

где $C(\delta_ф)$ — сигнал рассогласования, t — время.

Зависимость $C(\delta_ф)$ от t объясняется тем, что для осуществления рассматриваемого ФАП необходимо периодическое сканирование изображения световой марки по анализатору (см. разделы 3.2 и 3.3). Сканирование может осуществляться сканаторами, построенными на основе различных физических принципов [21, 22].

Рассмотрим случай, когда сканатор, выполненный, например, в виде колеблющегося зеркала, установлен, так же как и компенсатор, между объективом и анализатором, на расстоянии L_{c_i} от него (см. рис. 70,*а*). Тогда при отклонении зеркала на угол $\alpha_з$ от нулевого положения в оптическом переменном сигнале, попадающем на фотоприемник, появится нечетная гармоника, величина амплитуды которой будет зависеть от величины $\alpha_з$. Сигналы с фотоприемника (см. рис. 70,*а*) направляются на фазовый детектор, где сравниваются с сигналами устройства управления сканатором. Вырабатываемый в фазовом детекторе сигнал пропорционален величине $\alpha_з$, а его знак зависит от направления поворота измеряемого зеркала.

Для обеспечения работы нуль-индикатора достаточно сигналы с фотодетектора направить на регистратор, например на микроамперметр. При соединении выхода фазового детектора с компенсатором может быть организована отрицательная обратная связь, необходимая для автоматических аналоговых измерений величины $\alpha_з$.

Определение градуировочной характеристики необходимо, в первую очередь, для определений чувствительности измерений ФЭАК и динамических характеристик при их работе в автоматическом режиме.

Рассмотрим работу сканатора. По аналогии с (3.3) определим положение автоколлимационного изображения световой марки во времени:

$$\delta_ф(t) = -2 L_{c_i} \alpha_{c_0} \sin \omega t + 2 f'_{об} \alpha_з, \tag{3.56}$$

где α_{c_0} — амплитуда угла отклонения светового пучка сканатором, ω — круговая частота устройства управления сканатором.

Сигнал фотоприемника ФЭАК может быть представлен как функция взаимной корреляции между функцией распределения плотности анализатора $T(x)$ и функцией распределения овещенности автоколлимационного изображения световой марки $V(x)$:

$$i(t) = \eta \Phi_0 \int_{-\infty}^{+\infty} T(x)\, V[\delta_\Phi(t) - x]\, dx, \tag{3.57}$$

где η — интегральная чувствительность фотоприемника, Φ_0 — световой поток, приходящий на анализатор.

При совмещении световой марки и анализатора в одном устройстве $V(x)$ пропорциональна $T(x)$, тогда

$$i(t) = \eta \Phi_0 \int_{-\infty}^{+\infty} V(x)\, V[\delta_\Phi(t) - x]\, dx, \tag{3.58}$$

т. е. сигнал фотоприемника (без учета световых потерь на анализаторе) является функцией автокорреляционной функции $V(x)$.

Воспользуемся теоремой свертки [10] и вычислим первую гармонику $i(t)$, в результате чего получим искомый сигнал рассогласования

$$C(\delta_\Phi) = \eta \Phi_0 \int_{-\infty}^{+\infty} V^2(\Omega)\, k(\Omega_1)\, e^{i\, \Omega\, 2 f_{\text{об}}\, \alpha_3}\, d\Omega, \tag{3.59}$$

где $V(\Omega)$ — пространственный спектр функции $V(x)$ [28],

$$k(\Omega_1) = \frac{\Omega_1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\Omega_1}} e^{-i\, \Omega_1\, \delta_{\Phi_1}(t)}\, e^{-i\, \Omega_1\, t}\, dt$$

— обобщенная пространственно-частотная характеристика закона развертки,

$$\delta_{\Phi_1}(t) = -2\, L_{c_i}\, \alpha_{c_0} \cos \omega t. \tag{3.60}$$

Рассмотрим функцию $V(x)$ в виде

$$V(x) = \operatorname{rect}\left(\frac{x}{h}\right). \tag{3.61}$$

Функцию $V(\Omega)$ найдем из (3.60):

$$V(\Omega) = \frac{\sin \Omega d}{\Omega d}$$

и определим

$$k(\Omega_1) = i I_1(\Omega\, 2\, L_{c_i}\, \alpha_{c_0}),$$

где I_1 — функция Бесселя.

Вычисляя интеграл (3.49) для случая $\frac{2 L_{c_i} \alpha_{c_0}}{h} < 0{,}5$, получим

$$C_1(\delta_\Phi) = -2\eta\Phi_0 \left| \frac{2 L_{c_i} \alpha_{c_0}}{h} \arcsin \frac{f_{об} \alpha_з}{L_{c_i} \alpha_{c_0}} - \right.$$

$$\left. - \frac{2 f_{об} \alpha_з}{h} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{об} \alpha_з}{L_{c_i} \alpha_{c_0}} \right)^2} \right|. \qquad (3.62)$$

Из этой формулы найдем значение крутизны

$$\left. \frac{d[C(\delta_\Phi)]}{d \alpha_з} \right|_{\alpha_з = 0} = - \frac{8 \eta \Phi_0 f_{об}}{h}. \qquad (3.63)$$

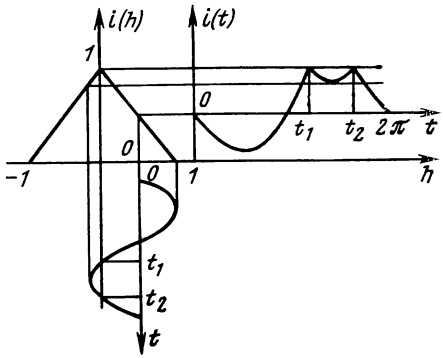


РИС. 74

Более простой путь получения градуировочной характеристики ФЭАК основан на графическом представлении получения автокорреляционной функции (3.58) (рис. 74). При исходной функции (3.61) (3.58) будет графически выглядеть в виде треугольника. Функция (3.60) изображена в качестве модулирующей синусоиды со сдвигом относительно вершины треугольника на величину $2f'_{об}\alpha_з$ (3.56). Выходным сигналом является $i(t)$.

Разделим все члены уравнения (3.56) на $\frac{h}{2}$ — полуширину щелевого анализатора и введем обозначения

$$\frac{2 \delta_\Phi(t)}{h} = \delta(t), \quad - \frac{4 L_{c_i} \alpha_{c_0}}{h} = a, \quad - \frac{4 f_{об} \alpha_з}{h} = \delta. \qquad (3.64)$$

Тогда получим

$$\delta(t) = a \sin \omega t - \delta. \qquad (3.65)$$

Вычисляя первый коэффициент Фурье разложением сигнала $i(t)$, получим градуировочную характеристику $C(\delta)$

при $a \leqslant \frac{1}{2}$

$$\begin{cases} \eta\Phi_0 \left[a \arcsin \frac{\delta}{a} + \delta \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{a} \right)^2} \right] & \text{при } 0 < |\delta| \leqslant a \\ -\frac{1}{2} \eta \pi a \Phi_0 & \text{при } a < |\delta| \leqslant 1 - a \\ -\frac{1}{2} \eta\Phi_0 \left[\frac{\pi a}{2} + a \arcsin \frac{1-\delta}{a} + \right. & \\ \left. + (1-\delta) \sqrt{1 - \left(\frac{1-\delta}{a} \right)^2} \right] & \text{при } 1 - a < |\delta| \leqslant 1 + a. \end{cases} \qquad (3.66)$$

при $\frac{1}{2} < a < 1$

$$
\begin{cases}
-\eta\Phi_0\left[a\arcsin\frac{\delta}{a}+\delta\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{a}\right)^2}\right] \\
\text{при } a<|\delta|\leqslant 1-a \\
-\frac{1}{2}\eta\Phi_0\left[\frac{\pi a}{2}-2a\arcsin\frac{\delta}{a}-2\delta\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{a}\right)^2}-\right. \\
\left.-a\arcsin\frac{1-\delta}{a}-(1-\delta)\sqrt{1-\left(\frac{1-\delta}{a}\right)^2}\right] \\
\text{при } 1-a<|\delta|\leqslant a \\
-\frac{1}{2}\eta\Phi_0\left[\frac{\pi a}{2}-a\arcsin\frac{1-\delta}{a}-\right. \\
\left.-(1-\delta)\sqrt{1-\left(\frac{1-\delta}{a}\right)^2}\right] \text{при } a<|\delta|\leqslant 1+a,
\end{cases}
\tag{3.67}
$$

при $a>1$

$$
\begin{cases}
\frac{1}{2}\eta\Phi_0\left[a\arcsin\frac{1+\delta}{a}+(1+\delta)\sqrt{1+\left(\frac{1+\delta}{a}\right)^2}-\right. \\
-a\arcsin\frac{1-\delta}{a}-(1-\delta)\sqrt{1-\left(\frac{1-\delta}{a}\right)^2}-2a\arcsin\frac{\delta}{a}- \\
\left.-2\delta\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{a}\right)^2}\right] \text{при } 0<|\quad|\leqslant a-1 \\
\frac{1}{2}\eta\Phi_0\left[\frac{\pi a}{2}-a\arcsin\frac{1-\delta}{a}-\right. \\
-(1-\delta)\sqrt{1-\left(\frac{1-\delta}{a}\right)^2}-2a\arcsin\frac{\delta}{a}- \\
\left.-2\delta\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{a}\right)^2}\right] \text{при } a-1<|\delta|\leqslant a \\
-\frac{1}{2}\eta\Phi_0\left[\frac{\pi}{a}+a\arcsin\frac{1-\delta}{a}+\right. \\
\left.+(1-\delta)\sqrt{1-\left(\frac{1-\delta}{a}\right)^2}\right] \text{при } a<|\delta|\leqslant a+1.
\end{cases}
\tag{3.68}
$$

Графики градуировочных характеристик, построенных по (3.66), (3.67) и (3.68), показаны на рис. 75.

Анализ полученных выражений позволяет сделать следующие выводы.

1. При амплитуде колебаний автоколлимационного изобра-

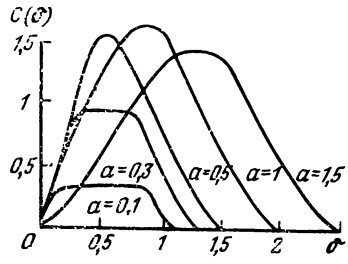


РИС. 75

жения световой марки, меньшей полуширины щели $a \leqslant 1$, крутизна характеристики в нуле не зависит от величины амплитуды колебаний. Этот вывод подтверждается также (3.63).

2. Из разложения выражения для градуировочной характеристики (3.66) в ряд Тейлора в окрестности нуля

$$C(\delta) = 2\eta\Phi_0(\delta) + \frac{2}{3}\eta\Phi_0\frac{\delta^3}{a^2}$$

следует, что при условии $\delta \leqslant 0{,}55\,a$ отклонение от линейности не превышает 10%.

3. Наибольшая зона захвата при большой крутизне наступает при $a \simeq 1$.

3.6. ОПТИМИЗАЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЭАК

После рассмотрения функциональных особенностей отдельных узлов ФЭАК может быть поставлена задача оптимизации отдельных конструктивных параметров применительно к ФАП корреляционного типа. Оптимизация параметров ФЭАК, имеющих в своем составе другие типы ФАП, достаточно хорошо представлена в известных литературных источниках.

Для рассматриваемых ФЭАК, как и для любых автоколлиматоров, основными критериями качества могут служить максимальная точность (3.13), максимальная величина $L_з$, возможность широкого варьирования величиной $\alpha_{зм}$, скорость измерения, технико-экономические параметры: габариты, масса, стоимость прибора и другие критерии.

Ввиду ограниченного объема книги рассмотрим оптимизацию только отдельных параметров ФЭАК.

Рассмотрим оптимальные расположения модулятора и компенсатора, исходя из требования $T_1 \longrightarrow \max$ (3.13). Будем рассматривать сканатор в моменты времени $(\omega t + 2n\pi) = \frac{\pi}{2}$, т. е. амплитудное значение $\delta_\Phi(t)$.

Тогда, подставляя (3.3) в (3.56), получим выражение

$$2L_{c_i}\,\alpha_{c_0} + 2L_{к_i}\,\alpha_к = -\delta_\Phi, \qquad (3.69)$$

описывающее случай полной компенсации $\alpha_з$. Известно [21], что сканаторы и компенсаторы, применяемые в ФЭАК, имеют ограниченную линейность характеристик. Поэтому коэффициенты при α_c и $\alpha_к$ должны иметь максимальные значения. Исходя из анализа схемы ФЭАК (см. рис. 70,*а*) и уравнения (3.2),

можно установить, что эти коэффициенты будут иметь максимальные значения при выполнении условий

$$L_{\text{с}} = f'_{\text{об}},\ L_{\text{к}} = f'_{\text{об}}. \tag{3.69а}$$

В общем случае, исходя из выбранных критериев, наилучшим расположением узлов будет

$$2 f'_{\text{об}} (\alpha_{c_0} + \alpha_{\text{к}}) = -\delta_{\text{ф}}. \tag{3.70}$$

Если функции сканатора и компенсатора объединены в одном устройстве, то $\alpha_{\text{зм}}$ будет определяться максимальной величиной угла этого устройства при допустимой линейности $\alpha_{\text{м}}$. С учетом (3.1) запишем

$$\alpha_{\text{м}} = \alpha_{\text{з}}. \tag{3.71}$$

Для получения оптимальной пеленгационной характеристики необходимо выполнение условий (3.64), (3.29), (3.41):

$$\alpha_{c_0} = \frac{h}{4 f'_{\text{об}}}, \tag{3.72}$$

$$h_{\text{н}} \simeq \frac{1{,}22\,\lambda\, f'_{\text{об}}}{D_{\text{об}}}, \tag{3.73}$$

$$h_{\text{к}} \simeq \frac{1{,}36\,\lambda\, f'_{\text{об}}}{D_{\text{об}}}. \tag{3.74}$$

Последние два условия относятся к случаю использования минимальных величин h при некогерентном и когерентном свете. Подставляя (3.74) (более реальный случай) в (3.72), получаем минимальное амплитудное значение

$$\alpha_{c_{\text{ом}}} = \frac{1{,}36\,\lambda}{4\, D_{\text{об}}}. \tag{3.75}$$

Подставляя это выражение в (3.70), с учетом (3.69*а*), (3.71) и (3.3) получаем

$$\left(\alpha_{\text{м}} - \frac{1{,}36\,\lambda}{4\, D_{\text{об}}}\right) = \alpha_{\text{зм}}. \tag{3.76}$$

Учитываем только первую составляющую погрешности (3.12), подставим в эту составляющую (3.74) ($h_{\text{к}} \simeq X_{\text{s}}$), а результат этого преобразования и (3.76) подставим в (3.13). В результате получим

$$T_1 = \frac{(2{,}9\, D_{\text{об}}\, \alpha_{\text{м}} - \lambda)\, \Phi_0}{k_1 k_2\, 4\, \lambda\, \Delta\, \Phi_{\text{пор}}}, \tag{3.77}$$

где k_2— коэффициент.

Из этого выражения видно, что для достижения максимальной величины T_1 необходимо увеличивать $D_{\text{об}}$ и уменьшать λ. Вли-

яние остальных параметров ($\alpha_м$, Φ_0, $\Delta\Phi_{пор}$) очевидно. Отметим, что величина $f_{об}$ не влияет на T_1.

Существенным ограничением $D_{об}$ могут быть размеры модулятора-компенсатора. В случае если выполняется условие (3.69*а*), уменьшение $L_{к_i}$ и $L_{с_i}$ приводят к пропорциональному уменьшению T_1 согласно (3.69).

Рассмотрим работу модулятора-компенсатора при $L_{к_i} < f_{об}$, что может иметь место при его ограниченном световом окне. Из рис. 70,*а* определим

$$\frac{L_{к_i}}{f_{об}} = \frac{D_к}{D_{об}}, \tag{3.78}$$

где $D_к$ — размер светового окна модулятора-компенсатора.

Подставим в это выражение (3.3):

$$\frac{D_к \alpha_к}{D_{об}} = \alpha_з. \tag{3.79}$$

Отсюда можно сделать вывод об инвариантности $D_к$ и $\alpha_к$, т. е. для сохранения величины $\alpha_м$ (3.71) уменьшение $D_к$ приводит к необходимости увеличения $\alpha_к$.

Рассмотрим работу телескопической системы, установленной перед объективом. По аналогии с (3.1) и (3.3) определим

$$-\frac{L_{с_i}}{f_{об}} \alpha_к \cdot \frac{f'_{ок.т}}{f'_{об.т}} = \alpha_з, \tag{3.80}$$

где $f'_{ок.т}$ и $f'_{об.т}$ — фокусные расстояния окуляра и объектива телескопической системы. Введем подстановку

$$f_{экв} = f_{об} \frac{f_{об.т}}{f_{ок.т}}, \tag{3.81}$$

тогда

$$-L_{с_i} \alpha_к f_{экв} = \alpha_з. \tag{3.82}$$

Это выражение свидетельствует о том, что введение телескопической системы в ФЭАК равносильно увеличению $f_{об}$ (или уменьшению при развороте телескопической системы). Так как в формулу (3.77) не входит $f_{об}$, то применение телескопической системы можно рекомендовать для изменения $\alpha_{зм}$ или чувствительности при неизменной точности работы ФЭАК.

3.7. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ФЭАК

Жесткие требования, предъявляемые к техническим характеристикам современных ФЭАК, приводят к непрерывному совершенствованию всех узлов и элементов этих приборов. В полной мере это относится и к электронным преобразователям

измерительной информации. Ниже приводится анализ влияния шумов, возникающих в электронных цепях, на точность работы ФЭАК, реализующих прямой и компенсационный методы измерения углов. В качестве примера рассмотрим ФЭАК, схема которого представлена на рис. 64. При этом будем полагать, что в приборе выполнены условия (3.69,*а*), т. е. дефлектор, совмещающий функции компенсатора и сканатора, расположен в непосредственной близости от объектива. Рассматриваемый ФЭАК является средством измерения следящего типа, поэтому анализ его работы проведем с использованием методов теории автоматического регулирования.

Для удобства анализа представим ФЭАК в виде эквивалентной схемы, отображающей только происходящие в нем процессы преобразования информации (рис. 76). Входным звеном си-

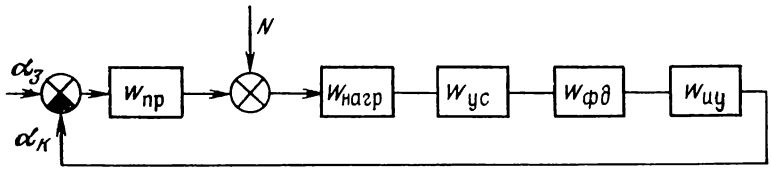


РИС. 76

стемы является приемное устройство, представляющее собой совокупность оптической системы ФЭАК, щелевого анализатора и фотоприемника. Найдем его передаточную функцию $W_{пр}(i\omega)$. Как показано в разделе 3.5, градуировочная характеристика приемного устройства в окрестности нуля может быть получена путем разложения в ряд Тейлора соотношения (3.66).

Подставляя в это разложение δ из (3.64) и пренебрегая членами высокого порядка, получим зависимость амплитуды тока первой гармоники на выходе фотоприемника от величины угла поворота контролируемого зеркала

$$C(\alpha_з) = \frac{8\eta\Phi_0 f_{об}}{h}\alpha_з, \tag{3.83}$$

откуда

$$W_{пр}(i\omega) = \frac{8\eta\Phi_0 f_{об}}{h}. \tag{3.84}$$

Передаточные функции остальных звеньев могут быть представлены следующим образом.

1. Нагрузочное сопротивление фотоприемника

$$W_{наг}(i\omega) = k_{наг}. \tag{3.85}$$

2. Узкополосный усилитель

$$W_{ус}(i\omega) = \frac{k_{ус}}{1 + i(\omega - \omega_1)T_у} \tag{3.86}$$

где $k_{\text{ус}}$ — коэффициент усиления на частоте первой гармоники ω_1, $T_{\text{ус}}$ — постоянная времени усилителя.

3. Фазовый детектор

$$W_{\text{фд}}(i\omega) = \frac{k_{\text{фд}}}{1 + i\omega T_{\text{фд}}}, \tag{3.87}$$

где $k_{\text{фд}}$ — коэффициент передачи фазового детектора, $T_{\text{фд}}$ — постоянная времени его выходных цепей.

4. Исполнительное устройство, представляющее собой пьезокерамический дефлектор, работающий в режиме компенсатора,

$$W_{\text{иу}}(i\omega) = \frac{k_{\text{иу}}}{1 + i\omega T_{\text{иу}}}, \tag{3.88}$$

где $k_{\text{иу}}$ — коэффициент передачи исполнительного устройства, $T_{\text{иу}}$ — его постоянная времени.

Проведем исследование системы на устойчивость, воспользовавшись алгебраическим критерием Рауса—Гурвица. Для этого найдем передаточную функцию замкнутой системы $F_{(p)}$. Переходя от аргумента $i\omega$ к аргументу p и учитывая соотношения (3.84) — (3.88), получим

$$F(p) = \frac{k_{\text{с}}}{(T_{\text{ус}} T_{\text{фд}} T_{\text{иу}}) p^3 + (T_{\text{ус}} T_{\text{фд}} + T_{\text{ус}} T_{\text{иу}} + T_{\text{фд}} T_{\text{иу}}) p^2 + (T_{\text{ус}} + T_{\text{фд}} + T_{\text{иу}}) p + (k_{\text{с}} + 1)}, \tag{3.89}$$

где

$$k_{\text{с}} = \frac{8\eta\Phi_0 f_{\text{об}} k_{\text{наг}} k_{\text{ус}} k_{\text{фд}} k_{\text{иу}}}{h}.$$

Из литературных источников известно, что для определения условий устойчивости необходимо рассмотреть соотношения между коэффициентами полинома знаменателя в (3.89). Система устойчива, если все коэффициенты полинома положительны (условие в данном случае выполняется) и, кроме того, удовлетворяется неравенство

$$T_{\text{ус}} T_{\text{фд}} T_{\text{иу}} (1 + k_{\text{с}}) < (T_{\text{ус}} + T_{\text{фд}} + T_{\text{иу}})(T_{\text{ус}} T_{\text{фд}} + T_{\text{ус}} T_{\text{иу}} + T_{\text{фд}} T_{\text{иу}}). \tag{3.90}$$

Отсюда следует, что

$$k_{\text{с}} < 2 + \frac{T_{\text{ус}} + T_{\text{иу}}}{T_{\text{фд}}} + \frac{T_{\text{ус}} + T_{\text{фд}}}{T_{\text{иу}}} + \frac{T_{\text{фд}} + T_{\text{иу}}}{T_{\text{ус}}}. \tag{3.91}$$

Оптические компенсаторы, в которых в качестве рабочего органа использована пьезокерамика, обладают весьма высоким быстродействием, поэтому можно считать, что

$$T_{\text{иу}} \ll T_{\text{фд}},\ T_{\text{ус}}. \tag{3.92}$$

При этом предположении правая часть выражения (3.91) может быть приведена к виду

$$k_c < 2 + \frac{T_{ус}}{T_{фд}} + \frac{T_{фд}}{T_{ус}} + \frac{(T_{ус} + T_{фд})}{T_{иу}} . \qquad (3.93)$$

При выполнении неравенства (3.93) система устойчива.

Перейдем к определению дисперсии шумовой погрешности $\sigma^2_{ш_A}$. Предположим, что помехой является белый шум с удельной спектральной плотностью N_0, приложенный к нагрузочному сопротивлению фотоприемника. Для определения дисперсии $\sigma^2_{ш_A}$ перенесем точку приложения шума на вход системы. При этом приведенная спектральная плотность мощности шума принимает вид

$$S_{ш_{вх}} = \frac{N_0}{|W_{пр}|^2} = \frac{N_0 h^2}{64 \eta^2 \Phi_0^2 f_{об}^2} . \qquad (3.94)$$

Теперь соотношение для $\sigma^2_{ш_A}$ можно найти по формуле:

$$\sigma^2_{ш_A} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(i\omega)|^2 S_{ш_{вх}}(\omega)\, d\omega. \qquad (3.95)$$

Подставляя в (3.95) выражения (3.89) и (3.94) и пренебрегая $T_{иу}$, в соответствии с условием (3.92), получаем

$$\sigma^2_{ш_A} \simeq \frac{N_0 k_c h^2}{128 \eta^2 \Phi_0^2 f_{об}^2 (T_{ус} + T_{фд})} \qquad (3.96)$$

в предположении, что $k_c \gg 1$.

Окончательное выражение для $\sigma^2_{ш_A}$ получаем, подставляя значение k_c из (3.89) в (3.96),

$$\sigma^2_{ш_A} = \frac{N_0 h k_{c_1}}{16 \eta \Phi_0 f_{об} (T_{ус} + T_{фд})} , \qquad (3.97)$$

где $k_{c_1} = k_{наг} k_{ус} k_{фд} k_{иу}$.

Определим далее квадрат относительной погрешности измерения углов $\gamma^2_{ш_A}$ как отношение величины $\sigma^2_{ш_A}$ к квадрату диапазона, перекрываемого ФЭАК. В качестве оценки диапазона используем максимальную величину углового отклонения компенсатора при допустимой линейности $\alpha_м$. В результате получим следующее соотношение для $\gamma^2_{ш_A}$:

$$\gamma^2_{ш_A} = \frac{N_0 h k_{c_1}}{16 \eta \Phi_0 f_{об} (T_{ус} + T_{фд}) \alpha_м^2} . \qquad (3.98)$$

Таким образом, погрешность $\gamma^2_{ш_A}$ растет с увеличением ин-

тенсивности шумов, ширины щели, коэффициента усиления системы и падает с ростом светового потока, фокусного расстояния объектива и постоянных времени $T_{ус}$ и $T_{фд}$. Необходимо отметить, что неограниченно увеличивать $T_{ус}$ и $T_{фд}$ с целью уменьшения $\gamma^2_{ш_A}$ нельзя, поскольку это приводит к росту динамической погрешности, являющейся следствием инерционности отдельных элементов ФЭАК. В общем случае $T_{ус}$ и $T_{фд}$ следует выбирать, исходя из минимизации обеих погрешностей.

Перейдем к анализу шумовых погрешностей ФЭАК цифрового типа.

Схема обработки сигналов электронными блоками в данном случае представлена на рис. 70,*д*. Предположим, что световой пучок, управляемый дефлектором, сканирует в пространстве с круговой частотой ω по синусоидальному закону

$$\alpha_c(t) = \alpha_{c_0} \sin \omega t. \qquad (3.99)$$

При этом текущая координата светового пучка в плоскости анализатора запишется следующим образом:

$$X_л(t) \approx \frac{2 f_{об} \alpha_{c_0}}{h} \sin \omega t, \qquad (3.100)$$

так как $\alpha_c(t) \ll 1$. (Здесь и далее с целью упрощения выражений все линейные величины нормированы к полуширине щели).

Для получения линейной зависимости между измеряемыми углами и показаниями прибора следует в качестве рабочих использовать близкие к линейным участки функции $X_л = X_л(t)$.

Можно показать, используя разложение функции $\sin\omega t$ в ряд Тейлора, что верхняя граница рабочего диапазона при нелинейности не более 10^{-3} определяется:

$$|X_{л\,раб}| \leqslant 0{,}36 \quad f_{об}\alpha_{c_0}/h. \qquad (3.101)$$

Предположим, что ширина светового пучка в плоскости анализатора, измеренная по уровню e^{-1}, равна ширине щели h. Тогда, зная величину $X_{лраб}$, можно получить скорость перемещения автоколлимационного блика в плоскости анализатора

$$v \approx 12 f_{об} \alpha_{c_0} / h T_c, \qquad (3.102)$$

где T_c — период колебаний светового пучка.

Длительность одиночного импульса на выходе фотоприемника при этом определяется выражением

$$\tau_и = h T_c / 3 f_{об} \alpha_{c_0}. \qquad (3.103)$$

Для определения среднеквадратической погрешности измерения угла поворота контролируемого зеркала нужно найти связь между величиной временного интервала и величиной $\alpha_з$

$$\tau_{инт} = \frac{2\alpha_з T_c}{3\alpha_{c_0}} + \frac{T_c}{2}. \qquad (3.104)$$

Если предположить, что частота сканирования поддерживается постоянной, то членом $T_c/2$ в (3.104) можно пренебречь.

В работе [15] показано, что среднеквадратическая погрешность определения временного положения видеоимпульса гауссовой формы (относительно опорного) определяется:

$$\sigma^2_{\tau_{инт}} = \tau^2_и / \rho^2, \tag{3.105}$$

где ρ^2 — отношение энергии электрического сигнала ε к спектральной плотности шума N_0, причем

$$\varepsilon = I_0^2 \tau_и \sqrt{\pi}, \tag{3.106}$$

где I_0 — амплитуда импульса тока.

Выражая из (3.104) $\alpha_з$ как функцию $\tau_{инт}$ и подставляя формулы (3.103), (3.105), (3.106), получаем

$$\sigma^2_{шц} \simeq \frac{\sqrt{\pi}\,\alpha_{c_0} N_0 h}{4 T_c I_0^2 f_{об}}. \tag{3.107}$$

Поделив $\sigma^2_{шц}$ на квадрат диапазона по углу $\alpha_з$, который можно найти из соотношений (3.1) и (3.101), найдем:

$$\gamma^2_{шц} \approx \frac{10 N_0 h}{T_c I_0^2 f_{об} \alpha_{c_0}}. \tag{3.108}$$

Поскольку ток на выходе фотоприемника пропорционален потоку Φ_0, то (3.108) можно представить следующим образом:

$$\gamma^2_{шц} = \frac{10 N_0 h}{T_c \Phi_0^2 \eta^2 f_{об} \alpha_{c_0} k_ц}, \tag{3.109}$$

где $k_ц$ — коэффициент, учитывающий потери света в оптическом тракте системы и анализаторе.

Соотношения (3.98) и (3.109) характеризуют только точность работы ФЭАК. Более полно их качество можно описать с помощью так называемого энергетического порога чувствительности C, являющегося совокупной характеристикой точности, потребления и быстродействия системы. Энергетический порог можно записать в следующем виде:

$$C = \gamma^2 P t_{изм}, \tag{3.110}$$

где γ^2 — относительная погрешность измерения, p — мощность, отбираемая системой от объекта измерения, $t_{изм}$ — время установления результатов измерения. Время $t_{изм}$ в системах автоматического регулирования (аналоговый ФЭАК) определяется либо экспериментально, либо теоретически, исходя из конкретного вида переходной характеристики. В рассматриваемом ниже случае $t_{изм} < 0{,}01$ с, что при частоте сканирования, равной 800 Гц, составляет приблизительно $t_{изм} \approx 10\ T_c$. Для цифрового ФЭАК для оценки $t_{изм}$ можно принять период сигнала T_c.

Как видно из соотношений (3.98) и (3.109), $\gamma^2_ш$ для обоих типов ФЭАК нелинейным образом зависит от мощности,

отбираемой ими от объекта измерения. Поэтому для получения объективной оценки этих измерительных средств с помощью критерия (3.110) необходимо поставить их в идентичные условия (например, положив, что параметр P для обоих приборов одинаков). При этом, подставляя (3.98) и (3.109) в (3.110) и учитывая замечания,сделанные относительно $t_{изм}$, можно получить следующее отношение энергетических порогов чувствительности аналогового и цифрового ФЭАК:

$$\frac{C_A}{C_ц} = \frac{k_{с_1} k_ц T_с \Phi_0 \eta \alpha_{с_0}}{16 (T_{фд} + T_{ус}) \alpha_м^2} . \qquad (3.111)$$

Анализируя выражение (3.111), можно отметить, что уменьшение отношения $\frac{C_A}{C_ц}$ при изменении какого-либо параметра свидетельствует о преимуществах аналогового ФЭАК по сравнению с цифровым, и наоборот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдулов А. Н., Табенкин Д. Н.* Современные приборы для контроля прямолинейности и плоскостности в станкостроении. М., НИИМАШ, 1968.
2. *Апенко М. И., Араев И. П., Афанасьев В. А.* Оптические приборы в машиностроении. М., Машиностроение, 1974.
3. *Апенко М. И., Дубовик А. С.* Прикладная оптика. М., Наука, 1971.
4. *Аржанов Е. П., Васильев Р. Т., Ильин В. Б.* Практикум по исследованию аэрофотоаппаратуры. М., Недра, 1978.
5. *Белоглазов А. А., Орнис А. Н.* Коллимационные и автоколлимационные устройства для контроля центрирования линз. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 10, с. 59—62.
6. *Волков А. А., Дяченко А. А., Шушпанов О. Е.* — В сб. Аэротермооптика и лучеводы, Минск, 1970, с. 174.
7. *Голубовский Ю. М.* Фотоэлектрические автоколлиматоры. Оптико-механическая промышленность, 1970, № 5, с. 55—63.
8. *Горбань А. М., Афанасьев В. А.* Методы повышения точности цифровых фотоэлектрических автоколлиматоров фазово-импульсного типа. — Измерительная техника, 1973, № 2, с. 22—26.
9. *Гришин Б. С.* Юстировка сложных оптических систем приборов. М., Машиностроение, 1976.
10. *Гудмен Д.* Введение в Фурье — оптику. М., Мир, 1970.
11. *Гукайло Я. М.* Автоколлимация. М. — К., Машгиз, 1968.
12. *Ельсеев С. В.* Геодезические инструменты и приборы. М., Недра, 1973.
13. *Климков Ю. М.* Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. М., Советское радио, 1978.
14. *Кривошлэ Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А.* Практика оптической измерительной лаборатории. М., Машиностроение, 1974.
15. *Куликов Е. И., Грифонов А. П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех. М., Советское радио, 1978.
16. *Пуряев Д. Т.* Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., Машиностроение, 1976.
17. *Розенберг Э. И.* Новые контрольные установки для исследования зрительных труб с фокусировкой. Труды НИИТМАШ, Л., Машиностроение, 1967, вып. 3, с. 178—188
18. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М., Недра, 1973.
19. *Справочник* по производственному контролю в машиностроении. Под ред. А. К. Кутая. М., Машиностроение, 1974.
20. *Тищенко О. Ф., Валединский А. С.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М., Машиностроение, 1977.
21. *Якушенков Ю. Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов М., Советское радио, 1980.
22. *Ямбаев Х. К.* Высокоточные створные измерения. М., Недра, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Глава 1. **Автоколлимационные методы контроля параметров оптических материалов, элементов и систем** 8

1.1. Автоколлимационные окуляры, расчет сеток и шкал . . . 8
1.2. Автоколлимационные приборы отечественного и зарубежного производства 11
1.3. Измерение показателя преломления и дисперсии стекла . 17
1.4. Определение оптической неоднородности прозрачных материалов 18
1.5. Измерение углов призм 19
1.6. Определение линейных размеров деталей 22
1.7. Определение радиуса кривизны сферических поверхностей 24
1.8. Определение формы несферических поверхностей 27
1.9. Определение фокусного расстояния оптических систем . . 32
1.10. Определение положения главной точки аэрофотокамеры 37
1.11. Определение разрешающей способности оптических систем 38
1.12. Измерение аберраций оптических систем 40
1.13. Исследование деформации приборов при низких температуре и давлении воздуха 42
1.14. Исследование лимбов теодолитов 43

Глава 2. **Оптические системы автоколлимационных приборов для угловых и линейных измерений** 48

2.1. Зеркально-призменные системы (ЗПС) — отражатели для автоколлимационных измерений 48
2.2. Свойства зеркально-линзовых отражателей (ЗЛО) как элементов оптических систем 50
2.3. Оптические системы контроля плоскостности, прямолинейности и соосности на основе зеркально-линзовых отражателей 59
2.4. Автоколлимационные методы и приборы контроля центрировки линз и линзовых систем 67
2.5. Оптические системы компараторов с автоколлимационными устройствами наведения и отсчета 71
2.6. Зеркально-призменные и зеркально-линзовые фокусирующие системы 78
2.7. Фокусирующая система зрительных труб с большим диапазоном визирных расстояний (от 0 до ∞) 95

Глава 3. **Фотоэлектрические автоколлимационные измерительные системы** 103

3.1. Фотоэлектрические автоколлиматоры 103
3.2. Обобщенная схема ФЭАК 113
3.3. Сравнительный анализ работы основных типов ФАП . . 120
3.4. Формирование лазерного излучения объективами ФЭАК . 125
3.5. Градуировочная характеристика ФЭАК с корреляционным ФАП 132
3.6. Оптимизация отдельных параметров ФЭАК 136
3.7. Анализ влияния шумов электронных цепей на качество работы ФЭАК 138

Список литературы 146