

6
А 67

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

В. А. НИКИТИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ
СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

спец. 05.258. Оптические приборы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Город ЛЕНИНГРАД — год 1970

На правах рукописи

В. А. НИКИТИН

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИУСОВ
СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

спец. 05.258. Оптические приборы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Город ЛЕНИНГРАД — год 1970



681.4
67

Работа выполнена в Ленинградском оптико-механическом объединении.
Официальные оппоненты:

д-р техн. наук Б. М. ЛЕВИН,
канд. техн. наук Т. Г. ПОРОХОВА.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева.

Автореферат разослан « 30 » *декабря* 1970 г.

Защита диссертации состоится « *февр.* » *март* . 1970 г.

на заседании Совета оптического факультета Ленинградского института точной механики и оптики (Ленинград, Центр, пер. Гривцова, 14).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы и замечания по автореферату (в 2-х экземплярах) просим направлять в адрес института.

Ученый секретарь Совета
оптического факультета

(В. А. РУДИН)

Оптические детали со сферическими поверхностями являются важными и широко распространенными конструктивными элементами оптических систем. Качество изображения, даваемого оптическими системами, при прочих равных условиях во многих случаях определяется тем, насколько точно радиусы сферических поверхностей изготовленных оптических деталей соответствуют значениям, полученным при расчете и указанным в чертеже.

Бурное развитие в Советском Союзе оптико-механической промышленности потребовало организации производства высокоточных приборов для измерения радиусов сферических поверхностей. Значительное увеличение объема астрономического приборостроения обусловило необходимость разработки и производства средств измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей большого габарита и веса.

Для измерения таких деталей раньше приходилось применять либо импортные приборы, либо самостоятельно на каждом предприятии собирать различные приспособления и установки, что приводило к непроизводительным затратам времени и средств.

В послевоенные годы перед оптической промышленностью была поставлена задача разработать и организовать производство отечественных конструкций сферометров, которые отвечали бы повышенным требованиям оптического производства.

В Ленинградском оптико-механическом объединении были разработаны и выпущены ряд моделей контактных кольцевых сферометров типов СНО, СНМ, ССО. Последние модели этих приборов по своим техническим и эксплуатационным характеристикам находятся на уровне лучших зарубежных образцов, а по некоторым параметрам превосходят их.

Одна из задач данной диссертации — теоретический анализ и экспериментальное исследование контактных кольцевых сферометров.

Повышение требований к точности пробных стекол повысило и требования к точности средств для их измерения. В 1962 г. был введен в действие ГОСТ 2786—62 «Стекла пробные для проверки радиусов кривизны оптических поверхностей». По сравнению с предшествующим ГОСТ 2786—54 этот стандарт установил более жесткие допуски на радиусы сферических поверхностей в пределах от 37,5 до 1000 мм. Если раньше для указанных пределов по классу «А» был установлен допуск на радиусы $\pm 0,03\%$, то новым стандартом в первом классе точности установлены следующие допуски: $\pm 0,01\%$ — для радиусов сфер в пределах от 37,5 до 250 мм и $\pm 0,02\%$ — для радиусов сфер в пределах от 250 до 1000 мм.

В соответствии с этим погрешность измерения радиусов пробных стекол должна быть не ниже $\pm 0,003\%$ — для радиусов от 37,5 до 250 мм и $\pm 0,007\%$ — для радиусов от 250 до 1000 мм.

Для обеспечения измерений пробных стекол первого класса под руководством автора были разработаны коинцидентный метод и установка для измерения радиусов сферических поверхностей. Для измерения радиусов от 37,5 до 250 мм предложен фотоэлектрический время-импульсный метод и схема установки.

Диссертация состоит из пяти глав.

В первой главе рассмотрено современное состояние методов и средств измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей.

На основе обзора и анализа работы различных методов и средств измерения автором предложена их классификация. В качестве главного признака классификации принят вид физических явлений, положенных в основу принципа действия того или иного метода. По этому признаку все методы разбиты на следующие группы: а) контактно-кольцевые методы; б) методы с применением специальных контактных элементов; в) интерференционные методы; г) теневые методы; д) коллимационные методы; е) автоколлимационные методы; ж) методы зеркального отражения; з) методы, основанные на непосредственном измерении диаметра шариковых сфер при помощи контактных измерительных приборов.

Во второй главе содержится теоретический анализ метода и средств измерения радиусов сферических поверхностей путем сравнения высоты шарового сегмента с размером блока плоско-параллельных концевых мер, а также результаты экспериментальных исследований этого метода.

В третьей главе приведен теоретический анализ кольцевого контактного метода измерения радиусов сферических поверхностей путем измерения высоты шарового сегмента методом непосредственной оценки. В главе рассмотрен метод измерения пар пробных стекол.

Четвертая глава диссертации содержит теоретический анализ коинцидентного метода и установки для измерения радиусов сфер, а также результаты экспериментальных исследований макетов и опытных образцов.

В пятой главе рассмотрен предложенный фотоэлектрический метод и схема установки. Дан анализ ожидаемой точности фотоэлектрической установки.

Метод измерения радиусов сферических поверхностей путем сравнения высоты шарового сегмента с блоком концевых мер

Высокая точность и стабильность плоско-параллельных концевых мер позволяют применить их в качестве рабочих мер сравнения при измерении высоты шарового сегмента относительным методом посредством кольцевых сферометров. Сущность метода при работе с накладным сферометром заключается в следующем. К плоской пластине притирают набор концевых мер расчетного значения. На пластину устанавливают сферометр и приводят наконечник измерительного стержня до контакта с концевой мерой, после чего снимают первый отсчет. Затем сферометр устанавливается на измеряемую сферу и снимают второй отсчет.

Разность отсчетов по шкале измерительного устройства дает значение разности высоты шарового сегмента измеряемой сферы и размера блока концевых мер.

Радиус измеряемой поверхности $R_{\text{изм}}$ определяется по формулам:

для выпуклой поверхности —

$$R_{\text{изм}} = \frac{r^2}{2(h_{\text{к м}} + \Delta h)} + \frac{h_{\text{к м}} + \Delta h}{2} - \rho,$$

для вогнутой поверхности —

$$R_{\text{изм}} = \frac{r^2}{2(h_{\text{к м}} - \Delta h)} + \frac{h_{\text{к м}} - \Delta h}{2} + \rho,$$

где $h_{\text{к м}}$ — действительный размер применяемого блока концевых мер (подбирается возможно ближе к расчетному значению);

Δh — разность между действительным размером концевой меры и высотой шарового сегмента, измеряемой сферической поверхности по хорде, соответствующей радиусу опорных колец с учетом знака;

r — радиус опорного кольца;

ρ — радиус шарика опорного кольца.

Номинальный размер h блока (набора) концевых мер вычисляется по формуле

$$h = (R \pm \rho) - \sqrt{(R \pm \rho)^2 - r^2},$$

где R — приближенное или заданное значение радиуса измеряемой сферы.

Для измерения сфер относительным методом в Ленинградском оптико-механическом объединении был разработан накладной сферометр типа СНМ.

Предел допускаемой основной относительной погрешности при измерении относительным методом в общем случае определяется по формуле

$$\delta R_{\text{изм}} = \pm \sqrt{(\delta R_{\text{пр}})^2 + (\delta R_{\text{т}})^2},$$

в которой $\delta R_{\text{пр}}$ — наибольшая ожидаемая относительная погрешность прибора и размера блока концевых мер, $\delta R_{\text{т}}$ — наибольшая относительная температурная погрешность.

Наибольшая относительная погрешность сферометра

$$\delta R_{\text{пр}} = \frac{dR_{\text{пр}}}{R} 100\%,$$

где $dR_{\text{пр}}$ — абсолютное значение погрешности измерения радиуса сферы.

Значение $dR_{\text{пр}}$ определяется из выражения

$$dR_{\text{пр}} = \pm \sqrt{\left[\frac{r}{h_{\text{к м}} \pm \Delta h} \right]^2 (dr)^2 + \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{h_{\text{к м}} \pm \Delta h} \right) \right]^2 (dh_{\text{к м}})^2 + \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r^2}{(h_{\text{к м}} \pm \Delta h)} \right) \right]^2 (dh)^2 + (d\rho)^2}$$

Здесь dr — наибольшая абсолютная погрешность измерения радиуса кольца;

$d\rho$ — предел допускаемой погрешности измерения радиуса шарика;

$dh_{\text{к м}}$ — погрешность применяемой концевой меры;

dh — погрешность измерения разности Δh .

Согласно проведенным расчетам и экспериментальным исследованиям, погрешность dr для опорных колец радиусом 45 и 75 мм составляет $\pm 0,0012$ мм, а для колец радиусом 110 и 150 мм равна $\pm 0,015$ и $\pm 0,03$ мм.

Расчетные значения относительной погрешности $\delta R_{\text{изм}}$ при определении радиусов сфер посредством сферометра с механическим отсчетным устройством типа СНМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Радиус измеряемой сферы	$r = 45 \text{ мм}$		$r = 75 \text{ мм}$		$r = 110 \text{ мм}$		$r = 150 \text{ мм}$	
	$h_{\text{к м}}$	$\delta R_{\text{изм}}$	$h_{\text{к м}}$	$\delta R_{\text{изм}}$	$h_{\text{к м}}$	$\delta R_{\text{изм}}$	$h_{\text{к м}}$	$\delta R_{\text{изм}}$
мм	мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
80	14,56	0,05	—	—	—	—	—	—
250	4,10	0,12	11,62	0,05	—	—	—	—
1 000	1,00	0,51	2,92	0,17	6,32	0,09	11,12	0,08
5 000	0,20	0,53	0,55	0,93	1,95	0,22	2,90	0,20
10 000	0,12	3,51	0,29	1,91	0,32	0,88	1,13	0,44
20 000	0,06	7,02	0,15	3,06	0,29	1,48	0,56	0,90
40 000	0,03	14,06	0,07	7,12	0,15	3,37	0,29	2,00

Как видно из табл. 1, погрешность $\delta R_{\text{изм}}$ существенно зависит от радиуса опорного кольца. С увеличением радиуса опорного кольца и с уменьшением радиуса измеряемой сферы $\delta R_{\text{изм}}$ уменьшается. С ростом величины применяемой концевой меры погрешность $\delta R_{\text{изм}}$ также уменьшается, но значение $h_{\text{к м}}$ зависит от радиуса измеряемой сферы и от радиуса опорного кольца.

При измерениях с помощью накладного сферометра необходимо в зависимости от радиуса измеряемой поверхности выбрать опорное кольцо такого диаметра, чтобы относительная погрешность измерения была минимальной. При этом диаметр опорного кольца должен как можно меньше отличаться от диаметра измеряемой сферы.

Экспериментальные исследования метода проводились по образцовым пробным стеклам, действительные радиусы которых были определены во ВНИИГК.

В зависимости от значения радиуса и диаметра изделия выбирались соответствующие опорные кольца.

Экспериментальные исследования показали, что относительная погрешность определения радиусов сферических поверхностей с помощью сферометров методом сравнения с концевыми мерами не выходит за пределы расчетных ожидаемых погрешностей измерения.

Преимуществами метода являются:

1. Универсальность применяемого (сравнительно небольшого) набора концевых мер.
2. Более высокая точность аттестации набора концевых мер по сравнению с аттестацией эталонной сферической поверхности.
3. Экономичность метода благодаря отказу от дорогих образцовых сферических поверхностей и замены их набором концевых мер длины.
4. Быстрота и удобство при работе в цеховых условиях в случае отсутствия эталонной поверхности.

Недостатком метода следует считать необходимость применения трех концевых мер вместо одной вогнутой образцовой поверхности (в случае измерения вогнутых сфер) и использование плоской стеклянной пластины.

Исследование кольцевого контактного метода при измерении высоты шарового сегмента методом непосредственной оценки

Особенностью данного метода является то, что высота шарового сегмента h измеряется непосредственно по рабочей мере, в качестве которой наиболее часто применяются высокоточные стеклянные шкалы.

Радиус сферической поверхности R вычисляется с помощью формул по измеренной прибором высоте шарового сегмента h и по радиусу r шарового сегмента, величина которого определяется специальным (обычно сменным) опорным кольцом. В зависимости от типа сферометра кольцо или устанавливается на измеряемую сферу, или, наоборот, сфера устанавливается на кольцо. Первый вид установки применяется обычно в сферометрах настольного типа, второй — в накладных сферометрах.

Для измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей большого габарита и веса в Ленинградском оптико-механическом объединении разработан накладной сферометр типа СНО. К основным достоинствам этого прибора следует отнести:

1) высокую точность измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей больших размеров благодаря применению опорных колец большого диаметра;

2) наличие в кольцах прибора шариковых опор, которые по мере износа могут быть повернуты; ленточные кольца в зарубежных сферометрах этого типа обычно перетачиваются;

3) осуществление измерений высоты шарового сегмента методом непосредственной оценки, в то время как в известных зарубежных накладных сферометрах требуются установочные образцовые сферические стекла.

Предел допускаемой относительной погрешности измерения сферы вычисляется по формуле

$$\delta R_{\text{изм}} = \pm \sqrt{\delta R_{\text{п}}^2 + \delta R_{\text{т}}^2 + \delta R_{\text{у}}^2},$$

где $\delta R_{\text{п}}$ — относительная погрешность прибора;

$\delta R_{\text{т}}$ — температурная погрешность;

$\delta R_{\text{у}}$ — погрешность измерительного усилия и веса прибора.

Относительная погрешность прибора в зависимости от отношения $\chi = \frac{r}{R}$ определяется по формуле

$$\delta R_{\text{п}} = \pm \frac{\sqrt{\left(\frac{\chi}{1 - \sqrt{1 - \chi^2}}\right)^2 dr^2 + \left(\frac{\sqrt{1 - \chi^2}}{1 - \sqrt{1 - \chi^2}}\right)^2 dh^2 + d\rho^2}}{R},$$

где dr — наибольшая погрешность радиуса кольца;

dh — наибольшая погрешность измерения высоты шарового сегмента;

$d\rho$ — наибольшая погрешность радиуса шарика кольца;

$\chi = \frac{r}{R}$ — отношение радиуса кольца к измеряемому радиусу;

R — измеряемый радиус сферической поверхности.

Наибольшая погрешность измерения высоты шарового сегмента dh при использовании накладного сферометра типа СНО в основном определяется следующими составляющими погрешностями: dh_1 — погрешности аттестации шкалы прибора (при применении аттестованной шкалы), dh_2 — погрешности установки на «нормальное» увеличение отсчетного микроскопа, dh_3 — периодической погрешности спирального окулярного микроскопа, dh_4 — погрешности наведения спира-

ли окулярного микрометра на изображение штрихов миллиметровой шкалы и отсчета, dh_5 — погрешности от переносов и зазоров в конструкции сферометров.

Проведенные расчеты показывают, что наибольшая погрешность измерения высоты шарового сегмента для сферометра СНО не превышает

$$dh = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^5 dh_i^2} = \pm 1,1 \text{ мм},$$

а для сферометра типа ССО —

$$dh = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^5 dh_i^2} = \pm 0,8 \text{ мм}.$$

Погрешность определения радиуса опорных колец в общем случае вычисляется по формуле

$$dr = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial a}\right)^2 da^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial b}\right)^2 db^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial c}\right)^2 dc^2},$$

где da, db, dc — погрешности измерения сторон a, b, c между точками опор колец; $\frac{\partial r}{\partial a}, \frac{\partial r}{\partial b}, \frac{\partial r}{\partial c}$ — частное производное от функции r по переменным a, b, c .

Учитывая, что при изготовлении колец имеет место условие

$$a \approx b \approx c \approx l,$$

а также то, что измерение сторон a, b, c равнозначны, т. е.

$$da = db = dc = dl,$$

предыдущая формула может быть приведена к виду

$$dr = \frac{1}{3} dl.$$

Расчетные значения относительной погрешности $\delta R_{\text{изм}}$ при определении радиусов сфер посредством сферометра с оптическим отсчетным устройством типа СНО приведены в табл. 2.

Таблица 2

Радиус измеряемой сферы	$r = 45 \text{ мм}$		$r = 75 \text{ мм}$		$r = 110 \text{ мм}$		$r = 150 \text{ мм}$	
	χ	$\pm \delta R_{\text{изм}}$	χ	$\pm \delta R_{\text{изм}}$	χ	$\pm \delta R_{\text{изм}}$	χ	$\pm \delta R_{\text{изм}}$
мм		%		%		%		%
80	0,56	0,04	—	—	—	—	—	—
250	0,18	0,05	0,30	0,03	—	—	—	—
500	0,09	0,08	0,15	0,04	0,22	0,04	0,30	0,04
750	0,06	0,12	0,10	0,05	0,14	0,04	0,20	0,04
1 000	0,045	0,15	0,075	0,07	0,11	0,05	0,15	0,05
2 000	0,022	0,40	0,0375	0,12	0,055	0,12	0,075	0,08
5 000	0,009	0,50	0,015	0,25	0,022	0,20	0,03	0,15
10 000	0,0045	1,00	0,0075	0,50	0,011	0,50	0,015	0,20
20 000	0,002	3,00	0,0037	0,70	0,005	0,70	0,0075	0,30
40 000	0,001	5,50	0,0019	1,70	0,003	1,80	0,004	0,50

Экспериментальное исследование точности колец проводилось на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21.

Измерение радиусов колец, длина которых превышает 200 мм, производилось на приборах УИМ-24 и СИП. На тубус главного микроскопа вместо телецентрического объектива МТ устанавливался опак-иллюминатор с микрообъективом ОМ-12 с увеличением $3\times$. На предметный стол устанавливали измеряемое опорное кольцо, на которое помещали полированную плоско-параллельную пластину из однородного стекла, при этом вокруг точек контакта пластины и шариков кольца образовывались интерференционные кольца равной толщины. Центры интерференционных колец выставлялись по ходу стола прибора. Перекрестие главного микроскопа последовательно наводилось на центры интерференционных картин и снимались отсчеты. Проведенные измерения показали, что точность колец диаметром 90 и 150 мм не превышает расчетных данных.

Было установлено, что у колец диаметром свыше 150 мм происходит изменение радиусов во времени. Для устранения нестабильности были сделаны изменения в конструкции колец и технологии их изготовления.

Экспериментальные исследования точности сферометров проводились на партии приборов с применением методов теории случайных функций.

Результаты исследований показали, что погрешности приборов не превышают расчетных значений. По этим данным были установлены пределы допускаемых основных погрешностей, которые были внесены в нормативные документы (ГОСТ, ТУ).

Для измерения радиусов пар пробных стекол применяется так называемый «метод измерения двойной стрелки». Этот метод позволяет получать более высокую точность измерений. Радиус пары вычисляется при этом по формулам

$$R_n = \frac{\tilde{r}_0^2}{2h} + \frac{h}{2}, \quad \tilde{r}_0 = r + \frac{\rho^2 r}{2(R^2 - r^2)},$$

где r — радиус кольца;

ρ — радиус шарика кольца;

$2h$ — измеряемая двойная стрелка;

R — приближенное значение радиуса измеряемой пары пробных стекол, каким может быть известно заранее номинальное значение или вычисленное по формуле

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}.$$

Полученный по формуле радиус R_n может быть отнесен в равной степени как к первой (вогнутой), так и ко второй (выпуклой) сфере.

Таким образом, принимается равенство сфер пары.

Такое допущение здесь возможно, так как отклонение радиусов пары пробных стекол друг от друга, согласно ГОСТ 2786—62 для группы, не превышает 0,1—0,07 интерференционной полосы. Это отклонение значительно меньше погрешности измерения радиусов при помощи кольцевых сферометров. Применение приближенного значения r_0 вместо точного r_0 вызывает погрешность метода измерения.

Для вычисления точного значения r_0 получена формула вида

$$r_0 = \sqrt{\frac{r^2 (h_1 + h_2)^2}{4h_1 h_2}},$$

где h_1 — высота шарового сегмента вогнутой сферы, h_2 — высота шарового сегмента выпуклой сферы.

Погрешность метода при использовании приближенной формулы при этом определяется выражением

$$\Delta R_n = \tilde{R} - R = \frac{\tilde{r}_0^2 - r_0^2}{2h}.$$

Расчеты показывают, что применение приближенной формулы допустимо при измерении радиусов в пределах от 100 до 750 мм. При измерении радиусов пар меньше 100 мм следует вычислять точные значения r_0 .

Коинцидентный метод и установка для измерения радиусов сферических поверхностей

Коинцидентный метод измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей основан на образовании двух систем изображений марки (щели) при помощи соприкасающихся клиньев, ориентированных преломляющими углами в разные стороны. При коинцидентном методе благодаря совмещению концов изображений штрихов марки используется нокиальная острота глаза, которая при работе с окуляром или микроскопом повышается на значение их увеличения. Такой способ наведения на центр и поверхность сферы обеспечивает более высокую точность, чем при выполнении наведения по разности изображения специальной марки.

На этом принципе разработана установка для измерения радиусов основных пробных стекол в пределах от 40 до 2000 мм. Оптическая система установки состоит из двух частей: визирной и измерительной (отсчетной). Первая предназначена для наведения на центр и поверхность измеряемой сферы, вторая служит для измерения перемещений визирной системы. Визирная и измерительная системы имеют общий окуляр, что повышает удобство и производительность измерений на установке. В качестве источника света в визирной системе используется лампа накаливания СЦ-70. Световой поток от лампы через конденсор и систему зеркал падает на соприкасающиеся клинья с нанесенными на них штрихами.

Изображение штрихов проектируется системой, состоящей из призмы-куб, прямоугольной призмы и двух объективов, в предметную плоскость последнего объектива, с которой совмещаются либо поверхность, либо центр измеряемой сферы. Отраженный от сферы световой поток через объективы и призмы направляется в окуляр, через который рассматрива-

ются изображения штрихов, нанесенных на клинья. При наведении визирной системы на центр сферы или ее поверхность концы изображений штрихов совмещаются. При смещении визирной системы с положения наведения в поле зрения окуляра наблюдается расхождение изображения штрихов в разные стороны.

В качестве рабочей меры стомиллиметровых интервалов используется металлическая линейка с установленными в ней через 100 мм стеклянными пластинами, на поверхности которых нанесены биссекторы. Источник света отсчетной системы освещает через конденсор стеклянную пластину с нанесенным на ней штрихом. Система из двух объективов и призм проектирует изображение штриха в плоскость биссектора. Изображение двойного штриха линейки и штриха проектируется в плоскость миллиметровой шкалы, которая служит для измерения перемещения визирной системы на интервал до 100 мм.

Изображение миллиметровой шкалы, биссектора и штриха проектируется в плоскость сетки с десятими долями миллиметра. Изображение миллиметровой шкалы при этом проходит плоскопараллельную пластину оптического микрометра, которая связана с круговой шкалой.

Условие возможности различия глазом взаимного смещения изображений штрихов визирной системы определяется выражением

$$\alpha = \frac{\delta}{f_{\text{ок}}} \geq \varepsilon,$$

где ε — предельный угол разрешающей способности глаза;
 α — угол, под которым видно смещение изображения штрихов из центра выходного зрачка;
 δ — линейное смещение изображения штрихов в плоскости сетки окуляра;

$f_{\text{ок}}$ — фокусное расстояние окуляра визирной системы.

При этом δ вычисляется из зависимости

$$\delta = v\delta',$$

$$\delta' = \left\{ \Delta + \left[R \cos(\beta + \gamma) - \frac{R \sin(\delta + \gamma)}{\operatorname{tg}(\beta + 2\gamma)} \right] \right\} \operatorname{tg}(\beta + 2\gamma),$$

где R — радиус измеряемой сферы;
 Δ — предел допускаемой погрешности наведения на центр или поверхность измеряемой сферы;
 v — увеличение визирной системы;
 γ — угол падения луча на сферическую поверхность.

В результате проведенных теоретических расчетов были определены углы соприкасающихся клиньев и фокусные расстояния сменных объективов установки для измерения радиусов сфер соответственно до 750, 1500 и 2000 мм.

Экспериментальное исследование метода проводилось на макете и опытных образцах установки.

Проведенные исследования погрешности наведения на центр и поверхность измеряемой сферы показало, что погрешности распределяются по нормальному закону. Предельные погрешности результатов наведения (при доверительной вероятности $\alpha = 0,9973$) не превышают: для $R = 100$ мм $\varepsilon = \pm 1,8$ мкм и для $R = 1000$ мм $\varepsilon = \pm 7,5$ мкм.

Экспериментальные исследования точности измерения сфер коинцидентным методом были проведены как путем измерения образцовых сфер с радиусами от 15 до 40 мм, так и сфер с радиусами от 40 до 2000 мм.

Образцовые пробные стекла радиусом до 40 мм были применены в связи с возможной высокой точностью их аттестации и возможностью наиболее полно оценить погрешности установки на нижних пределах измерения. Стекла были аттестованы с предельной погрешностью $\pm 0,4$ мкм. Относительная погрешность их, следовательно, не превышает 0,001—0,002%.

Исследования показали, что погрешность измерения радиусов сферических поверхностей не превышает $\pm 0,005$ — $0,006$ %. Для определения погрешностей измерения в пределах 100—2000 мм применялись образцовые пробные стекла, аттестованные во ВНИИК и ЛОМО. Точность аттестации этих стекол составляет $\pm 0,01$ %. Результаты исследований показали, что погрешность измерения не превышает погрешности аттестации образцовых пробных стекол. Были проведены также сличения результатов измерения пробных стекол, выполненных на нескольких коинцидентных установках.

Фотоэлектрический время-импульсный метод измерения радиусов сферических поверхностей

В основу принципа действия фотоэлектрического устройства регистрации наведения на центр и поверхность измеряемой сферы положен время-импульсный метод.

Временную развертку изображений штрихов создает сканирующее зеркало. При сканировании зеркала посредством

электромагнита изображение каждой половины сетки приводится в одновременное движение в плоскости щелей фотоприемников.

В цепи фотопреобразователей возникают импульсы, которые после усиления подаются в электронный блок формирования импульсов. Исключение импульсов, поступающих с фотопреобразователей при движении изображения в обратном направлении, осуществляется электронным переключателем, управляемым генератором тактовых импульсов, синхронизированным с узлом развертки.

Фиксация точки экстремума сигнального импульса осуществляется с помощью дифференцирующей цепи. Достоинством этого способа фиксации является отсутствие зависимости определения положения точки от амплитуды сигнала.

За дифференцирующим узлом находится детектор, который срезает первую полуволну. Последующий каскад амплитудный дискриминатор, в данном случае блокинг-генератор, работающий в ждущем режиме, формирует кратковременные импульсы управления, временное положение которых соответствует отсчетным точкам исходного импульса.

В зависимости от последовательности управляющих импульсов электронный переключатель будет включать цепь показывающего прибора. По его показаниям наблюдатель определяет положение наведения визирной системы на центр и поверхность измеряемой сферы. В качестве визуального индикатора наведения может быть применен электронно-оптический индикатор настройки, который находит широкое применение в измерительных приборах и устройствах для измерения линейных размеров.

Схема установки для измерения радиусов сферических поверхностей с фотоэлектрической регистрацией наведения включает в себя визирную и измерительную системы и систему компенсации разворотов измерительной каретки при ее перемещении.

Визирная система установки состоит из источника света, конденсора, марки, клиньев, ориентированных преломляющими углами в разные стороны объектива. В плоскости сетки визирной системы образуется две системы изображения марки.

Сканирующее зеркало фотоэлектрического регистрирующего устройства приводит в движение изображение штрихов в плоскости щелей фотоприемников. Импульсы поступают в схему формирования импульсов, работа которой рассмот-

рена выше. При совмещении штрихов импульсы совпадают по времени, и показывающий прибор даст нулевое показание. При несовмещении штрихов в показывающий прибор будет поступать ток, и стрелка будет отклоняться.

Измерительная система установки, состоящая из дециметровой шкалы с фотоэлектрическим микроскопом и интерполирующего отсчетного устройства, служит для измерения перемещения визирной системы.

Система имеет цифровой отсчет, что вместе с объективом наведения повышает производительность и точность измерений.

Приведенный теоретический анализ точности установки и экспериментальные исследования электронных схем, работающих по время-импульсному методу, показывают, что при этом методе погрешность измерений радиусов не будет превышать 0,002—0,003%, что позволит применять его для измерения пробных стекол первого класса в пределах от 40 до 250 мм.

Выводы

1. Разработаны, теоретически и экспериментально исследованы коинцидентный метод и установка для измерения радиусов сферических поверхностей, обеспечивающие повышение точности и производительности измерений. Образец установки применяется для аттестации образцовых сфер с 1965 г.

2. Исследование макетов и опытных образцов установки показало, что погрешность измерения радиусов сферических поверхностей в диапазоне 37,5—2000 мм не превышает $\pm 0,005$ — $0,006\%$, что превышает точность существующих установок.

3. Коинцидентные установки могут быть рекомендованы для измерения радиусов пробных стекол первого класса точности ГОСТ 2786—62 и найдут применение на предприятиях оптико-механической промышленности и в научно-исследовательских институтах.

4. В целях дальнейшего повышения точности и производительности измерения радиусов сфер предложен фотоэлектрический время-импульсный метод и схема установки.

5. Теоретически и экспериментально исследован метод измерения радиусов сферических поверхностей путем сравнения высоты шарового сегмента с размером блока плоско-параллельных концевых мер. К основным достоинствам метода

следует отнести универсальность применяемого набора концевых мер и возможность аттестации его высокой точностью.

Недостаткам метода следует считать необходимость иметь три набора концевых мер для измерения вогнутых сфер.

6. Проведены исследования кольцевых контактных сферометров, выпускаемых Ленинградским оптико-механическим объединением. Относительная погрешность измерения радиусов сферических поверхностей в пределах от 80 до 40 000 мм посредством сферометра типа НСО при правильно выбранном размере кольца находится в пределах 0,05—0,5% величины измеряемого радиуса.

Относительная погрешность измерения радиусов сферических поверхностей в пределах от 80 до 40 000 мм посредством сферометра типа НСМ не превышает 0,05—2% величины измеряемого радиуса.

7. При определении радиусов пар пробных стекол при помощи кольцевых контактных сферометров целесообразно применять метод измерения двойной стрелки. Получена точная формула для вычисления радиуса пары. Дается выражение для расчета погрешности метода при применении приближенной формулы для вычисления радиуса.

8. Для повышения точности и производительности измерений целесообразно выпускать кольцевые контактные сферометры типа ССЭ с применением проекционных экранов.

9. Систематизирован и классифицирован материал по методам и средствам измерения сферических поверхностей. Разработаны и изданы материалы, обеспечивающие надлежащий технический уровень контактных сферометров, выпускаемых промышленностью. Разработан и утвержден Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов ГОСТ 11194—65 «Сферометры».

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Никитин В. А. Контактные сферометры. «Оптико-механическая промышленность», № 6, 1966.
2. Никитин В. А., Данилевич Ф. М. Исследование точности определения радиусов сфер методом сравнения стрелки прогиба с блоком концевых мер. «Оптико-механическая промышленность», № 10, 1966.
3. Голод С. Д., Никитин В. А. Накладной сферометр ИЗС-8. «Измерительная техника», № 8, 1964.
4. Никитин В. А., Данилевич Ф. М. Новые оптические приборы Ленинградского оптико-механического объединения. «Оптико-механическая промышленность», № 6, 1967.

5. Никитин В. А., Голод С. Д., Ахремчик И. В., Александрова А. Н. Коинцидентный метод и установка измерения радиусов сферических поверхностей. «Измерительная техника», № 6, 1969.

6. Никитин В. А. Методы и средства измерения радиусов сферических поверхностей оптических деталей. «Оптико-механическая промышленность», № 10, 1970.

7. Никитин В. А., Ахремчик И. В., Голод С. Д., Пеликс Н. А., Александрова А. Н. Автоколлимационный сферометр. Авторское свидетельство № 191851. «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 4, 1967.

8. Никитин В. А., Данилевич Ф. М., Андреев В. А. Фотоэлектрическое отсчетное устройство. Авторское свидетельство № 206123 «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 24, 1967.

9. Никитин В. А. Фотоэлектрическое устройство для регистрации совмещения штрихов шкал. Авторское свидетельство № 280887. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 28, 1970.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и совещаниях:

1. Никитин В. А. Новые измерительные приборы Ленинградского оптико-механического объединения. Научно-техническое совещание «Методы и приборы для измерения длин и углов», Ленинград, 1966 г.

2. Никитин В. А. Коинцидентный метод и установка для измерения радиусов сферических поверхностей. Всесоюзная конференция «Световые и оптические измерения», Ленинград, 1969 г.

3. Никитин В. А. Оптические контрольно-измерительные приборы ГОМЗа. Всесоюзная конференция «Оптические контрольно-измерительные приборы», ВДНХ, Москва 1962 г.

4. Никитин В. А. Новые методы и средства для линейных измерений. Семинар в ЛДНГП. Ленинград, 1969.

Подп. к печ. 2/XII-70 г.	М-10624	Формат бум. 60×84 ¹ / ₁₆
Объем 1,25 печ. л.	Зак. 439	Тираж 120 Бесплатно

Типография 3/1 УПЛ. Ленинград, Центр, пер. Гривцова, 14