

В. А. АФАНАСЬЕВ Оптические измерения

В. А. АФАНАСЬЕВ

В. А. АФАНАСЬЕВ

Оптические измерения

В. А. АФАНАСЬЕВ

Оптические измерения

Издание третье,
переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего
и среднего специального
образования СССР
в качестве учебника
для студентов оптических
специальностей вузов



Москва «Высшая школа» 1981

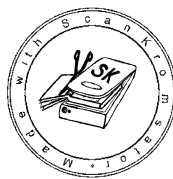
ББК 22.34

А 94

УДК 535.8 (075.8)

Рецензенты:
кафедра прикладной оптики МВТУ им. Н. Э. Баумана (зав. кафедрой Н. П. Заказнов) и проф. Г. В. Погарев

Под редакцией проф. Д. Т. Пуряева



Афанасьев В. А.

А 94 **Оптические измерения: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. школа, 1981. — 229 с., ил.**

В пер.: 75 к.

В учебнике излагаются основные понятия о методах оптических измерений и возникающих при этом погрешностях, рассмотрены методы определения основных оптических характеристик и качества оптического изображения систем. Значительное место уделено способам контроля оптических материалов и методам измерения аберраций оптических систем, применяемых в оптико-механической промышленности. По сравнению со вторым изданием (М., Недра, 1968) в некоторые разделы книги внесены изменения.

Предназначается для студентов оптических специальностей вузов.

А 20405—260
001(01)—81 30—81 1704050000

ББК 22.34
6П5.8

© Издательство «Высшая школа», 1981

О Г Л А В Л Е Н И Е

От редактора	5
Предисловие	6
Введение	7
Глава I. Погрешности измерений и свойства оптических приборов	10
§ 1. Погрешности измерений	10
§ 2. Свойства случайных погрешностей измерения	11
§ 3. Веса измерений	14
§ 4. Погрешности функций измеренных величин	16
§ 5. Свойства глаза	18
§ 6. Свойства оптических приборов	21
Глава II. Методы и приборы для измерения линейных и угловых величин оптических деталей	24
§ 7. Измерение длины оптических деталей	24
§ 8. Измерение длин плоскопараллельных концевых мер	37
§ 9. Измерение толщин линз и воздушных промежутков	42
§ 10. Измерение толщин тонких пленок	47
§ 11. Измерение радиусов кривизны сферических поверхностей	52
§ 12. Контроль плоскостей оптических деталей	64
§ 13. Измерение углов призм и клиньев	68
Глава III. Методы контроля формы асферических поверхностей оптических деталей	85
§ 14. Контактные методы	87
§ 15. Бесконтактные методы	89
§ 16. Контроль формы астрономических зеркал	94
Глава IV. Методы испытания оптического стекла	101
§ 17. Измерение показателя преломления и дисперсии оптического стекла	104
§ 18. Измерение малых разностей показателей преломления жидкостей	121
§ 19. Измерение показателя преломления оптических кристаллов	123
§ 20. Измерение оптической однородности	125
§ 21. Измерение двойного лучепреломления	126
§ 22. Определение бессильности и пузырности	129
§ 23. Определение коэффициентов светопоглощения и отражения	131
Глава V. Контроль основных характеристик оптических систем	138
§ 24. Измерение фокусных расстояний	138
§ 25. Измерение диаметров входного и выходного зрачков оптических систем	148
§ 26. Измерение числовой апертуры микроскопа	151
§ 27. Измерение увеличения оптических систем	153
§ 28. Измерение поля зрения оптических систем	156
§ 29. Измерение виньетирования фотографического объектива	160
§ 30. Измерение распределения освещенности в плоскости изображения	162
§ 31. Измерение коэффициента светопропускания оптических систем	164
§ 32. Измерение коэффициента светорассеяния оптических систем	166
§ 33. Измерение децентрировки линз	167

Глава VI. Измерение аберраций оптических систем	170
§ 34. Измерения геометрических аберраций. Метод визуальных фоку- сировок	171
§ 35. Измерение волновых аберраций	187
§ 36. Измерение дисторсии объективов	193
§ 37. Измерение аберраций прожекторных зеркал (отражателей) . . .	199
§ 38. Оценка качества изображения оптической системы	203
§ 39. Оптическая передаточная функция и ее измерение	217
Литература	226

ОТ РЕДАКТОРА

Автор книги — крупный специалист в области оптических измерений, опытный педагог, сочетавший глубокое знание теоретических основ с большим практическим опытом. Многое из того, что описано в книге, автор умел делать своими руками. Он ушел из жизни, не закончив работу над книгой, но успел сделать главное: отобрать нужный материал и изложить его в систематизированном виде. При подготовке рукописи к изданию редактор стремился, насколько это было возможно, учесть замечания рецензентов по научному содержанию книги, сохранить стиль изложения и индивидуальность языка автора. Некоторые разделы книги, небольшие по объему, написаны редактором заново; это связано с новыми достижениями в области оптических измерений, описанными главным образом в специальной научной литературе, которая малодоступна основному читателю книги — студентам высших учебных заведений.

Д. Т. Пуряев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Рост производительности труда, эффективность и качество продукции тесно связаны с внедрением в практику прогрессивной техники и методов технологии. Повышение качества новых машин, приборов и оборудования требует дальнейшего развития и совершенствования контроля на всех этапах технологического процесса.

В оптико-механической промышленности производство современных оптических приборов, стоящих на уровне лучших мировых образцов, должно быть обеспечено высокоточными методами и контрольно-измерительными приборами.

Успешная работа оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащенности ее современными приборами и высокой квалификации работников, но и от знания и использования прогрессивных методов оптических измерений, их возможностей и перспектив.

Учебник «Оптические измерения» по содержанию соответствует одному из разделов курса «Прикладная оптика», отражает опыт производственных измерительных лабораторий и предназначен для студентов, обучающихся по специальности «Оптические приборы и спектроскопия».

В отличие от прежних изданий в учебнике освещены современные достижения в области контроля и испытания оптических систем.

Рассмотрены новые методы и приборы, проверенные в ответственных лабораторных испытаниях и перспективные для широкого внедрения. Приведены описания и приемы работ с помощью приборов, широко применяемых на практике.

Учебник может быть полезен инженерно-техническим работникам, занимающимся контрольными измерениями.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Ускорение научно-технического прогресса и рост эффективности производства во всех отраслях народного хозяйства связаны с повышением качества продукции, в частности, на основе совершенствования способов контроля и внедрения новых средств измерения и измерительных приборов.

Одно из ведущих мест в процессе контроля занимают оптические контрольно-измерительные приборы, обладающие высокой точностью.

Большой вклад в науку об оптических измерениях внесли советские ученые. Наиболее важное практическое значение имели труды академика В. П. Линника, разработавшего методы и приборы для измерения шероховатости поверхностей, длины концевых мер, контроля качества оптических систем и др.; методы измерений И. В. Обреимова, Д. С. Рождественского, Д. Д. МаксUTOва, А. Н. Захарьевского и др. нашли широкое признание не только в нашей стране, но и за рубежом. На современном этапе развития науки об оптических измерениях важное практическое значение имеют научные труды профессоров Ю. В. Коломийцева, Г. В. Погарева, Д. Т. Пуряева, М. М. Русинова, М. Н. Семибратова. Над актуальными проблемами оптических измерений, связанных с контролем качества оптических систем, работают И. И. Духопел, Г. В. Креопалова, Б. А. Чунин и др.

Наука об оптических измерениях постоянно обогащается новыми достижениями, связанными с решением наиболее актуальных проблем оптического приборостроения: повышением точности, производительности, автоматизации измерений и контролем асферической оптики, в том числе астрономических зеркал крупных телескопов, выпуклых сферических поверхностей линз большого диаметра, однородности заготовок стекла диаметром до 1 м и т. д. Успехи, достигнутые при решении этих проблем, освещены как в специальных научных изданиях, так и в учебной литературе. Например, студентам, заинтересованным в приобретении практических навыков измерений, полезно ознакомиться с руководством Г. В. Погарева к лабораторным работам по курсу «Оптические измерения», читаемому в Ленинградском институте точной механики и оптики.

Производить измерения — значит опытным путем сравнить физические величины с помощью приборов или инструментов, проградуи-

рованных в принятых единицах. Всякий раз, проводя измерения, находят, какую часть единицы или целое число единиц составляет сравниваемая величина. Единицей величины является условно принятая и вошедшая в практику измерений мера. Основными единицами системы СИ являются метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела и моль, дополнительными единицами — радиан и стерадиан.

Почти все измерения в оптике сводятся к определению длин и углов. При выполнении оптических измерений необходимо учитывать свойства контролируемого объекта, а также уметь правильно выбрать единицу величины и метод измерения.

Контролируемый объект должен иметь заданные свойства, характеризующие техническими требованиями к нему. Чем выше качество и совершеннее форма объекта, тем точнее должны быть проведены измерения. Прибор и метод измерения выбирают в зависимости от заданной точности, необходимой для практических целей и устанавливаемой на основании опыта.

В зависимости от способа получения числовых значений измеряемой величины все измерения делятся на прямые, косвенные и совокупные [1, 8]. В результате прямых измерений непосредственно получают искомую величину, которая определяется сравнением с мерой или фиксированием отсчета, даваемого контрольно-измерительным прибором. Косвенные измерения дают возможность определить искомую величину путем вычислений по формулам, в которые входят результаты прямых измерений. Например, при определении радиуса кривизны поверхности на кольцевом сферометре требуется выполнить расчет по формуле, в которую входят значения стрелки прогиба, радиуса кольца и радиуса шарика, полученные прямыми измерениями. Косвенные измерения применяют в тех случаях, когда искомую величину непосредственно определить невозможно, слишком сложно или когда они дают более высокую точность, чем прямые.

При совокупных измерениях искомую величину находят путем решения системы уравнений, составленных по результатам повторных прямых или косвенных измерений одной или нескольких величин при различных условиях.

Прямые измерения могут быть осуществлены несколькими методами: непосредственной оценки, дифференциальным, нулевым и методом совпадения. Наиболее распространен метод непосредственной оценки, при котором измерения искомой величины осуществляются измерительными приборами (например, угол призмы измеряют оптическим угломером, толщину линзы — на толщимере или вертикальном длиномере).

Дифференциальный (разностный) метод позволяет непосредственно находить разность между искомой величиной и известной. Например, при контроле толщины или длины на оптиметрах с применением концевых мер одну из деталей, величина которой известна, принимают за образцовую, а остальные детали сравнивают с нею.

При нулевом методе измеряемая величина уравнивается (компенсируется) известной величиной, например, при определении показателя преломления стекла иммерсионным методом Обреимова или Захарьевского [50]. Нулевой метод часто применяют при фотоэлектрических измерениях, когда стрелку гальванометра приводят к нулевому показанию.

Метод совпадения заключается в сопоставлении ряда равномерно чередующихся отметок или сигналов известной величины с измеряемой. Примером служат отсчеты долей миллиметра с помощью нониуса или долей градуса с помощью верньера.

При измерениях длины, толщины и чистоты поверхностей часто применяют контактные и бесконтактные методы измерения. В первом случае имеет место непосредственный контакт поверхности проверяемой детали с поверхностью измерительного наконечника прибора, во втором случае контакт отсутствует.

Глава. I. Погрешности измерений и свойства оптических приборов

§ 1. Погрешности измерений

Как бы ни были совершенны оптические приборы, постоянство условий, в которых их используют, и применяемые методы работ, измерения неизбежно сопровождаются погрешностями. Поэтому всякий раз определяют только приближенное значение измеряемой величины, а возникающая при этом погрешность характеризует точность измерений.

Под погрешностью измерения понимают разность между измеренным и истинным значениями величины. По характеру возникновения погрешности разделяют на три вида: систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематическими называют погрешности измерений, происходящие в результате действия постоянных причин, вызывающих эти погрешности. При повторных измерениях в одинаковых условиях они остаются постоянными по величине и знаку. Систематические погрешности возникают главным образом из-за конструктивных недостатков измерительных приборов, их неправильной установки, неточной градуировки шкал и лимбов и т. д. Погрешности, возникающие в результате указанных причин, называют также инструментальными или приборными.

Систематические погрешности возникают и от изменения параметров среды, в которой ведут измерения, например от изменения температуры, давления и влажности воздуха. К систематическим погрешностям могут быть отнесены ошибки, возникающие от несовершенства органов чувств наблюдателя. Например, наведение биссектора или сетки нитей окуляр-микрометра на изображение штриха шкалы наблюдатель всегда производит односторонне, правее или левее относительно линии симметрии.

Влияние систематических погрешностей на результаты измерения должно быть выявлено в процессе работы и учтено при обработке результатов.

Случайными называются погрешности, которые нельзя устранить при обработке результатов измерений. Они неизбежны, не имеют закономерности и для отдельного измерения не поддаются учету. При повторных измерениях в одинаковых условиях числовые значения случайных погрешностей различны по величине и знаку. Так как такие погрешности неизбежны, то наблюдатель при работе должен стремиться уменьшить их влияние на результаты измерения. Причинами случайных погрешностей могут быть: несовершенство формы объекта и контрольно-измерительных приборов, нестабильность условий наблюдений (температуры, давления, влажности воздуха и вибрации), несовершенство органов чувств наблюдателя и др.

Под грубыми (промахами) понимают случайные погрешности, величина которых резко превышает допустимые и которые явно ис-

кажают результаты измерения. Причинами грубых погрешностей могут быть: недостаточная выверка и регулировка прибора, небрежность при работе, внезапные изменения внешних условий во время наблюдений. Грубые погрешности выявляют при повторных измерениях и обязательно исключают из результатов измерений.

§ 2. Свойства случайных погрешностей измерения

Изучение законов возникновения и влияния случайных погрешностей на результаты измерения — предмет теории ошибок. Согласно этой теории и данным практики известно, что случайные погрешности измерений имеют следующие свойства:

1) случайные погрешности не могут превосходить по абсолютной величине определенного предела;

2) случайные погрешности — положительные и отрицательные — одинаково часто встречаются в ряду измерений;

3) среднее арифметическое случайных погрешностей измерений одной и той же величины, произведенных при одинаковых условиях, стремится к нулю при неограниченном возрастании числа измерений;

4) чем больше абсолютная величина погрешности, тем она реже встречается в ряду измерений.

При большом числе измерений случайные ошибки подчиняются закону нормального распределения Гаусса. Практически число измерений должно быть около 10. Производить более 10—15 измерений нецелесообразно.

Из третьего свойства вытекает, что при большом числе измерений n сумма случайных погрешностей δ близка к нулю, положительные погрешности компенсируются отрицательными, а в пределе, когда n велико, сумма их равна нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n} = 0.$$

Здесь под случайной погрешностью δ понимается разность между истинным значением величины x и отдельным измеренным ее значением l , т. е. $\delta = x - l$.

Из теории ошибок следует, что для оценки точности измерений наилучшим критерием является средняя квадратическая погрешность, полученная из всей совокупности истинных значений случайных погрешностей данного ряда. Согласно формуле Гаусса, квадрат этой погрешности равен среднему арифметическому квадратов истинных величин случайных погрешностей:

$$\sigma^2 = \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}, \quad \text{или} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}. \quad (1)$$

Величину σ называют средней квадратической погрешностью отдельного измерения или ряда измерений.

Формулу (1) на практике применяют редко, так как истинное значение x измеряемой величины в большинстве случаев неизвест-

но, следовательно, неизвестны истинные значения случайных погрешностей δ . Поэтому за истинное значение измеряемой величины принимают среднее арифметическое L ряда ограниченного числа измерений, а разности между L и каждым измерением — за вероятнейшие погрешности v .

Пусть из ряда равнооточных измерений l_1, l_2, \dots, l_n получены вероятнейшие погрешности: $v_1 = L - l_1, v_2 = L - l_2, \dots, v_n = L - l_n$. Сумма вероятнейших погрешностей данного ряда измерений равна нулю при большом числе измерений. На основании теории ошибок среднюю квадратическую погрешность, характеризующую точность одного измерения, вычисляют по формуле Бесселя:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Одним из важных свойств средней квадратической погрешности является ее надежность в оценке точности при ограниченном числе измерений [8], определяемая по формуле

$$\sigma_m \approx \sigma / \sqrt{2n},$$

где σ_m — средняя квадратическая погрешность самой средней квадратической погрешности σ . Принято считать σ_m надежной, если она определена с погрешностью, не превышающей $0,25 \sigma$, что практически выполнимо при минимально необходимом числе измерений $n=8$.

Точность результата измерения характеризуется средней квадратической погрешностью среднего арифметического:

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad \text{или} \quad S = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Известно, что случайная или вероятнейшая погрешность измерения по абсолютной величине не превосходит утроенной средней квадратической погрешности:

$$v_{\text{пред}} = \pm 3\sigma. \quad (4)$$

Часто для оценки точности одного измерения используют вероятную погрешность ρ , которая получена при условии, что половина случайных или вероятнейших погрешностей по абсолютному значению меньше вероятной, а половина — больше ее:

$$\rho = \pm 0,674 \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} = \pm 0,674\sigma.$$

При этом точность результата измерения оценивается по формуле

$$R = \rho / \sqrt{n}.$$

В табл. 1 приведен пример записи и обработки числового материала в определении угла θ призмы, измеренного на гониометре

ГС-5. Предполагается, что систематические погрешности отсутствуют.

Средняя квадратическая погрешность одного измерения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} = \sqrt{26,2} = \pm 5,2''.$$

Средняя квадратическая погрешность результата измерения

$$S = \sigma/n = 5,2/\sqrt{11} = \pm 1,6''.$$

Предельная погрешность
 $v_{\text{пред}} = \pm 3\sigma$ составит $\pm 15'',6$.
 Полученный результат записывается так: $\theta = 22^\circ 30' 25'' \pm 1'',6$.

Если сумма вероятнейших погрешностей не равна нулю, то это значит, что в результаты вошли систематические погрешности, которые необходимо выявить и исключить. Покажем это на примере (табл. 2). Пять углов призмы измерены на гониометре ГС-5 несколькими приемами наведения зрительной трубы на автоколлимационные изображения перекрестия нитей от граней с соответствующими отсчетами по двум микроскопам А и В.

Чтобы обнаружить систематическую погрешность, нужно взять разность d между измеренными значениями, отсчитанными по микроскопам А и В.

Таблица 2

№ угла	Отсчет по микроскопу		d	$a' = d - d_0$	v'^2
	А	В			
1	90°00'10"	90°00'35"	—25	—4	16
2	157°30'18"	157°30'39"	—21	0	0
3	44°59'21"	44°59'40"	—19	+2	4
4	157°29'14"	157°29'32"	—18	+3	9
5	90°00'40"	90°01'02"	—22	—1	1
			$\sum d = 105$	$\sum v' = 0$	$\sum v'^2 = 30$

Среднее значение систематической погрешности

$$d_0 = \sum d/n = -21'',$$

где n — число измеренных углов.

Беря разности $v' = d - d_0$, исключаем, тем самым, влияние систематической погрешности на результаты измерений. Здесь разности v' следует рассматривать как вероятнейшие погрешности величины d_0 . Далее, по формуле (2), находим среднюю квадратическую погрешность одного измерения угла.

В данном случае каждый угол получен как разность двух измерений, поэтому средняя квадратическая погрешность одного измерения в $\sqrt{2}$ раз меньше, т. е.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v'^2}{2(n-1)}} = \sqrt{\frac{30}{8}} \approx \pm 2''.$$

Значение средней квадратической погрешности результата измерения

$$S = \sigma / \sqrt{n} = 2'' / \sqrt{5} \approx \pm 1''.$$

§ 3. Веса измерений

Нередко одну и ту же величину измеряют инструментами разной точности или одним инструментом, но при разных условиях. В обоих случаях результаты измерений неравноточны. Чтобы найти вероятнейшее значение искомой величины, необходимо принять во внимание достоинство каждого измерения и оценить его числовым значением, называемым весом. Каждый вес, таким образом, показывает степень доверия к результату измерения. Веса вводят в числения, исходя из конкретных условий измерения, например, из числа приемов или характера измерительных средств. Чаще всего веса устанавливают в зависимости от средней квадратической погрешности результата измерения. Чем меньше средняя квадратическая погрешность, тем надежнее результат и тем больше его вес. Веса измерения принимают обратно пропорциональными соответствующим средним квадратическим погрешностям.

Средняя квадратическая погрешность одного измерения (единицы веса), вес которого равен единице, определяется выражением

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum p v^2}{n-1}},$$

где n — число неравноточных измерений; p — вес.

Средняя квадратическая погрешность общей арифметической средины

$$M = \sqrt{\frac{\sum p v^2}{(n-1) \sum p}}.$$

Пример. Преломляющий угол призмы θ измерен шесть раз при различных условиях. Средние квадратические погрешности измерений приведены в табл. 3. Определить вероятнейшее значение угла θ .

№ измерения	θ	c	c^2	$p = \frac{100}{c^2}$	$\Delta\theta$	$p\Delta\theta$	v	v^2	pv	pv^2
1	30°00'44"	±6	36	2,8	4	11,2	+3,4	11,56	9,52	32,4
2	30°00'49"	±2	4	25,0	9	225,0	-1,6	2,56	-40,0	64,0
3	30°00'48"	±3	9	11,1	8	88,8	-0,6	0,36	-6,66	4,0
4	30°00'46"	±4	16	6,2	6	37,2	±1,4	1,96	±8,62	12,2
5	30°00'41"	±5	25	4,0	1	4,0	±6,4	40,96	±25,6	163,8
6	30°00'47"	±8	64	1,6	7	11,2	±0,4	0,16	±6,6	0,3
				$\Sigma p =$ = 50,7	$\Sigma p\Delta\theta =$ = 377,4				$\Sigma pv =$ = + 2	$\Sigma pv^2 =$ = 276,7

При определении весов по средней квадратической погрешности обычно используют формулу

$$p = c/\sigma^2,$$

где c — положительное число, которое для удобства вычислений подбирают таким, чтобы веса выражались в единицах или десятых долях. В данном примере $c = 100$.

Вероятнейшее значение угла

$$\theta_0 = \frac{\Sigma p\theta}{\Sigma p}, \text{ или } \theta_0 = \theta + \frac{\Sigma p\Delta\theta}{\Sigma p}. \quad (5)$$

Для простоты вычислений берем приближенное значение угла призмы $\theta = 30^\circ 00' 40''$ и записываем в табл. 3 разности $\Delta\theta$, которые умножаем на соответствующие значения p , суммируем их и по формуле (5) определяем вероятнейшее значение угла: $\theta_0 = 30^\circ 00' 40'' + 377,4/50,7 = 30^\circ 00' 47,4''$.

Далее находим вероятнейшие ошибки как разности между вероятнейшим значением θ_0 и каждым измеренным значением θ , возводим в квадрат и умножаем на соответствующие веса. В нашем примере из-за округления при вычислении θ_0 имеем: $\Sigma pv = +2$, а не нулю.

Средняя квадратическая ошибка единицы веса измерения

$$\mu = \sqrt{\frac{\Sigma pv}{n-1}} = \sqrt{\frac{276,7}{5}} = \pm 7,4''.$$

Средняя квадратическая ошибка общей арифметической средней

$$M = \sqrt{\frac{\Sigma pv^2}{(n-1)\Sigma p}} = \sqrt{\frac{276,7}{5 \cdot 50,7}} = \pm 1,1''.$$

Таким образом, $\theta = 30^\circ 00' 47'',4 \pm 1'',1$.

§ 4. Погрешности функций измеренных величин

Если искомая величина — функция одного или нескольких аргументов, каждый из которых определен прямыми измерениями, то она определена косвенными измерениями.

Рассмотрим некоторые функции и их средние квадратические погрешности.

Функция суммы ($x=y+z+t$) **или разности** ($x=y-z-t$) **двух, трех и более независимых величин.** Средняя квадратическая погрешность

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}, \quad (6)$$

т. е. равна корню квадратному из суммы квадратов средних квадратических погрешностей аргументов.

Функция произведения ($x=yz$) **или частного** ($x=y/z$). Средняя квадратическая погрешность

$$\sigma_x = x \sqrt{(\sigma_y/y)^2 + (\sigma_z/z)^2}, \quad (7)$$

где σ_y и σ_z — средние квадратические погрешности прямых измерений аргументов.

Формула (7) легко может быть получена логарифмированием и дифференцированием функций. Так, для произведения

$$\ln x = \ln y + \ln z, \quad \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} + \frac{dz}{z}; \quad (8)$$

для частного

$$\ln x = \ln y - \ln z, \quad \frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} - \frac{dz}{z}. \quad (9)$$

Переход к средней квадратической погрешности осуществляется возведением всех членов выражения (8) или (9) в квадрат и заменой дифференциалов средними квадратическими погрешностями:

$$(\sigma_x/x)^2 = (\sigma_y/y)^2 + (\sigma_z/z)^2,$$

откуда и получаем формулу (7).

Функция общего вида $x=f(y, z, \dots, u)$ **от многих независимых переменных.** Средняя квадратическая погрешность

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)^2 \sigma_u^2}, \quad (10)$$

где y, z, \dots, u — истинные значения аргументов, измеренные с соответствующими погрешностями $\delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$; они могут быть представлены в виде $y+\delta_y, z+\delta_z, \dots, u+\delta_u$. При этом функция x также изменится на истинную погрешность δ_x . Имеем

$$x + \delta_x = f(y + \delta_y, z + \delta_z, \dots, u + \delta_u).$$

Так как значения $\delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$ малы, то разложим функцию по формуле Тейлора, сохраняя лишь члены, содержащие первые степени малых погрешностей. Получаем

$$x + \delta_x = f(y, z, \dots, u) + \frac{\partial f}{\partial y} \delta_y + \frac{\partial f}{\partial z} \delta_z + \dots + \frac{\partial f}{\partial u} \delta_u,$$

откуда

$$\delta_x = \frac{\partial f}{\partial y} \delta_y + \frac{\partial f}{\partial z} \delta_z + \dots + \frac{\partial f}{\partial u} \delta_u. \quad (11)$$

Чтобы перейти к средней квадратической погрешности по формуле (10), следует возвести все члены уравнения (11) в квадрат и заменить значения $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \dots, \delta_u$ средними квадратическими погрешностями.

Таким образом, средняя квадратическая погрешность функции общего вида [см. формулу (10)] равна корню квадратному из суммы произведений квадратов частных производных по каждому аргументу на квадрат средней квадратической погрешности соответствующего аргумента.

В оптических измерениях нередко точность результата измерения оценивают относительной ошибкой, т. е. отношением абсолютного значения погрешности к средней измеренной величине объекта, причем сохраняют знак и название погрешности, которую при этом используют (средняя, средняя квадратическая, вероятная, относительная погрешность и т. д.). Например, если фокусное расстояние объектива $f' = 399,5$ мм измерено с погрешностью $S = \pm 0,5$ мм, то относительная погрешность $S/f' = \pm 0,5/399,5 = \pm 0,12\%$.

При подсчете погрешностей нет необходимости выражать их большим числом значащих цифр. Их количество должно определяться точностью измерения величины. На практике достаточно ограничиться одной, редко двумя цифрами; например, оптическая деталь толщиной 5,26 мм измерена со средней квадратической погрешностью $\pm 0,0418$ мм. В данном случае достаточно ограничиться значением $\pm 0,04$ мм.

Числа следует округлять по следующему правилу:

1) если последняя цифра меньше 5, то остающиеся цифры не изменяются, например вместо 12,731 после округления получим 12,73;

2) если последняя цифра больше 5, то предпоследнюю цифру увеличивают на единицу, т. е. вместо 12,736 имеем 12,74;

3) если последняя цифра равна 5, то при наличии предыдущей нечетной цифры последнюю увеличивают на единицу, а при наличии четной — цифру 5 отбрасывают, например для 12,735 округленное число равно 12,74, а для 12,745 оно остается равным 12,74.

Прежде чем выбрать соответствующий метод измерения и контрольно-измерительный прибор, необходимо знать или установить допуск на измеряемую величину. Погрешность измерения не должна превышать 0,1—0,2 величины допуска.

Точность оптических измерений, осуществляемых с помощью зрительных труб, микроскопов и интерферометров, зависит от чув-

ствительности последних. Степень чувствительности приборов определяется свойствами используемого света, способом регистрации наблюдаемых процессов и свойствами оптического прибора [19].

В настоящее время известны три способа регистрации процессов: визуальный, фотографический и фотоэлектрический. Основным приемником излучения в видимой области спектра является глаз. Рассмотрим свойства глаза, которые важны при визуальных наблюдениях.

§ 5. Свойства глаза

Глаз человека представляет собой оптическую систему, в некоторой степени аналогичную объективу фотографического аппарата. К основным свойствам глаза относятся аккомодация, адаптация и разрешающая способность.

Свойство глаза рассматривать предметы, находящиеся на различных расстояниях, называется аккомодацией или аккомодационной способностью. Происходящее при этом изменение формы хрусталика, вызывающее изменение фокусного расстояния глаза, обеспечивает получение резкого изображения предмета на сетчатке глаза. Предел аккомодации от дальней до ближней точки ясного видения определяет широту аккомодации, которая изменяется с возрастом человека.

Для нормального глаза широта аккомодации находится в пределах от бесконечно удаленной точки до ближайшей точки, расположенной на расстоянии 250 мм от глаза, или от 0 до 4 диоптрий. Расстояние, равное 250 мм, считают наиболее удобным для рассматривания предметов и называют расстоянием наилучшего зрения или расстоянием наилучшения видения.

Глаз, подобно оптическому прибору, имеет глубину резкого изображения, так называемую остроту аккомодации. Глаз, аккомодированный на предмет, находящийся на расстоянии s , резко видит предметы, которые расположены несколько дальше или ближе этого расстояния. При диаметре зрачка глаза 2 мм острота аккомодации $\pm 0,3$ диоптрий и ограничивается остротой зрения (кружком наименьшего рассеяния).

Способность глаза приспосабливаться к различным яркостям называется адаптацией. В зависимости от яркости предмета, а при наблюдении в прибор — от яркости изображения диаметр зрачка глаза изменяется от 2 до 7—8 мм.

Приспособление глаза к изменяющейся яркости требует времени. Так, при переходе из яркого освещенного места в темном нужно 40—50 мин для полной адаптации; процесс адаптации при переходе из темноты на яркий свет идет очень быстро.

Нормальная освещенность при точных измерениях должна быть 50—250 лк. Освещенность изображения предмета и отсчетных шкал следует уравнивать. Световое раздражение, которое способен воспринять глаз, адаптированный к темноте, называется абсолютным по-

рогом зрительного ощущения. Астрономы за меру порога светового раздражения принимают освещенность на зрачке $9 \cdot 10^{-9}$ лк, когда глаз может видеть звезды шестой величины. При лабораторных исследованиях с «искусственными звездами» (малыми точечными источниками света) получено иное значение — $2,44 \cdot 10^{-9}$ лк.

Разрешающей способностью глаза или остротой зрения называют наименьший угол, под которым раздельно видны два предмета, например две точки или линии. Разрешающая способность зависит от диаметра зрачка глаза, освещенности, контраста и формы предмета. В случае точечных предметов и при нормальных условиях наблюдения разрешающая способность глаза при диаметре зрачка 2 мм

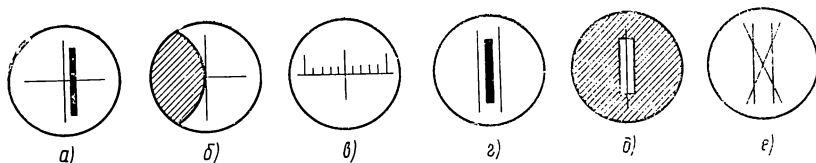


Рис. 1. Вид поля зрения при совмещении:

a — тонкого штриха с краем толстого; *б* — тонкого штриха с краем темного диска; *в* — двух тонких штрихов; *г* — штриха и биссектора; *д* — штриха и щели; *е* — косого штриха и биссектора

равна одной угловой минуте. При уменьшении или увеличении диаметра зрачка глаза от 2 мм разрешающая способность уменьшается. Если диаметр зрачка меньше 1 мм, то разрешающая способность уменьшается из-за дифракции света, а больше 2 мм — в результате влияния сферической и хроматической аберраций и рассеяния света внутри глаза.

Пороговая контрастная чувствительность среднего глаза составляет 1—2%, т. е. два предмета видны раздельно, если разность в яркости фона и предметов не ниже 1—2%.

Особым случаем является рассмотрение одиночных предметов, например, звезды на темном небе или темной нити на светлом фоне. В последнем случае нить видна при толщине, равной в угловой мере 2—2'',5.

На практике точность наведения на контролируемый объект оценивают с помощью штриховых шкал. Точность наведения, или точность поперечной установки невооруженным глазом, зависит главным образом от формы шкалы и контролируемого предмета. Существует несколько способов наведения.

1. Совмещение перекрестия нитей с краем темного широкого штриха (рис. 1, *a*) или темного диска (рис. 1, *б*). В этом случае ошибка наведения равна 30—60''.

2. Нониусная установка — совмещением штрихов, между которыми находится линия раздела — нониус (рис. 1, *в*) или верньер угломерного инструмента. Ошибка равна 10—15''.

3. Биссекторная установка — симметричное расположение краев между двумя тонкими нитями биссектора (рис. 1, *з*) или краями щели (рис. 1, *д*). Ошибка наведения равна 6—8". К последнему случаю относится способ наведения косо́го перекрестия нитей на штрих, биссектор, щель и т. п. (рис. 1, *е*). Высокая чувствительность глаза при биссекторном наведении объясняется его высокой способностью различать несимметричное расположение объектов.

Остроту зрения по отношению к поперечному смещению штрихов иногда называют нониальной остротой и принимают равной 10". При наведении по биссекторному способу отношение ширины штриха к расстоянию между нитями биссектора должно быть 0,5—0,9.

Глаз способен воспринимать свет в диапазоне длин волн 400—760 нм. Наибольшую спектральную чувствительность при дневном освещении глаз проявляет для излучения с длиной волны 555 нм (зеленая часть спектра). Для уменьшения утомляемости глаза при длительном наблюдении в оптический прибор желательно применять зеленый светофильтр. Освещенность рабочего места, журнала для записей наблюдения и рассматриваемого изображения должна быть одинакова.

К важным свойствам глаза относятся способность оценивать доли интервала отсчетной шкалы, поле зрения глаза и бинокулярное зрение. Наиболее благоприятное условие, когда глаз может оценить 0,1, а иногда и 0,05 интервала, создается при видимом расстоянии между штрихами шкалы 1,5—2 мм (в угловой мере 20—27').

Величина поля резкого видения неподвижного глаза равна 4° или 17 мм в пространстве предметов на расстоянии наилучшего видения и определяется размерами желтого пятна (диаметр 1,25 мм) и задним фокусным расстоянием глаза (22,8 мм при аккомодации на бесконечность). Желтое пятно — наиболее чувствительная часть сетчатки глаза. Углы, под которыми подвижный глаз рассматривает пространство, называют углами обзора; в горизонтальной плоскости угол обзора равен 150°, а в вертикальной плоскости — 120°. Резкое видение предметов неподвижными глазами ограничено полем зрения 4°.

Восприятие окружающего пространства двумя глазами называется бинокулярным зрением, которое значительно облегчает оценку размеров и равноудаленности предметов. Бинокулярное поле зрения составляет угол 120°.

Способность глаз к трехмерному восприятию пространства называется стереоскопическим зрением. Угол, под которым сходятся зрительные оси глаз, направленные в точку предмета, называется параллактическим углом или параллаксом. Разность параллаксов двух удаленных точек предмета характеризует разрешающую способность стереоскопического зрения, равную 10".

При наблюдении близких предметов оси глаз сходятся под некоторым углом, называемым углом конвергенции, максимальное значение которого 32°, а при расстоянии 250 мм — 13—15°. Расстояние между глазами, называемое глазным базисом, 58—72 мм; среднее значение глазного базиса принято равным 65 мм.

§ 6. Свойства оптических приборов

Высокая точность измерений с помощью глаза обеспечивается применением оптических контрольно-измерительных приборов (зрительных труб и микроскопов), имеющих необходимую чувствительность.

Под точностью измерений понимают качественную оценку измерений, характеризующуюся близостью результатов измерений к истинному значению измеряемой величины [1]. Точность оптических измерений оценивается главным образом точностью прибора. Точность некоторых приборов выражают ценой деления отсчетной шкалы (наименьшим интервалом между двумя соседними штрихами шкалы). Иногда цену деления отсчетного устройства принимают за допустимую величину основной погрешности прибора.

Способность прибора реагировать на изменения измеряемой величины называется чувствительностью, которая определяется отношением изменения сигнала или показания измерительного прибора к изменению измеряемой величины. У приборов, предназначенных для измерения длин, чувствительность выражается передаточным числом, т. е. отношением длины одного интервала деления к цене деления. Например, при длине интервала 0,8 мм и цене 0,01 мм чувствительность равна отношению 80 : 1.

Важной характеристикой измерительных приборов являются пределы измерения — наибольшее и наименьшее значения измеряемой величины.

В оптических измерениях используют поперечное и продольное наведения (установки) перекрестия на шкалу, марку или контролируемый объект с последующим снятием отсчетов.

Каждое наведение сопровождается погрешностями поперечной и продольной установок, величина которых зависит от дифракции света, остаточных aberrаций и рассеянного света в оптических приборах. Если влияние aberrаций, рассеянного света и других конструктивных недостатков на точность установки можно свести до минимума или устранить полностью, то действие дифракции света неизбежно. Дифракция света ограничивает разрешающую способность оптической системы.

Из теории дифракции света известно, что разрешающая способность зрительных труб зависит от диаметра D действующего отверстия объектива, а у микроскопов — от апертурного угла σ_A . Разрешающая способность идеального объектива в угловой мере

$$\psi'' = 120''/D, \quad (12)$$

где D выражено в миллиметрах; а для микроскопа в линейной мере

$$\Delta = \lambda/(2A), \quad (13)$$

где λ — длина волны света; $A = n|\sin \sigma_A|$ — числовая апертура в пространстве предметов (n — показатель преломления среды).

Кроме того, на точность поперечной и продольной установки также влияет способ наведения, который зависит от формы наблюдаемого объекта шкалы или марки прибора (табл. 4).

Таблица 4

Способ наведения	$\varphi_{\text{ГЛ}}''$	Увеличение трубы			b , мм	Увеличение микроскопа	
		20×	30×	40×		50×	100×
		ξ''				t , мкм	
Крест на край штриха или диска	60	3	2	1,5	0,073	1,5	0,73
Нониусный	10	0,5	0,33	0,25	0,012	0,25	0,12
Биссектор или косой крест на штрих или щель	6	0,3	0,2	0,15	0,007	0,15	0,07

Поперечную установку зрительной трубы чаще всего производят на удаленный предмет, поворачивая или наклоняя трубу, при этом ошибка установки выражается в угловой мере. Поперечную установку микроскопа производят на близко расположенный объект перемещением сетки нитей окулярным микрометром (у измерительных микроскопов) или же передвижением предметного стола вместе с контролируемым объектом (у инструментальных микроскопов и горизонтальных компараторов).

Точность поперечной установки зависит от способа наведения и видимого увеличения оптического прибора. Для зрительной трубы точность наведения ξ'' в угловой мере равна:

$$\xi'' = \varphi_{\text{гл}} / \Gamma_{\text{т}}; \quad (14)$$

для микроскопа в линейной мере

$$t = b / \bar{\Gamma}, \quad (15)$$

где $\varphi_{\text{гл}}$ и b — соответственно острота зрения глаза в угловой и линейной мере при различных способах наведения; $\Gamma_{\text{т}}$ и $\bar{\Gamma}$ — соответственно видимое увеличение зрительной трубы и микроскопа.

В табл. 4 приведена вычисленная по формулам (14) и (15) точность поперечной установки зрительной трубой с увеличением 20, 30 и 40 \times и микроскопом с увеличением 50 и 100 \times и числовой апертурой 0,1.

Точность поперечной и продольной установки повышается в два раза при применении автоколлимационных оптических приборов (зрительной трубы и микроскопа). Аберрации оптических систем, дицентрировка и другие дефекты снижают точность поперечной и продольной установки в 1,5—2 раза.

Продольную установку или фокусировку зрительной трубы производят обычно перемещением окуляра, установку микроскопа — перемещением всего микроскопа. В обоих случаях предполагается, что окуляры трубы и микроскопа предварительно установлены на резкое видение сеток нитей.

Нередко микроскоп фокусируют на изображение объекта, построенное испытываемой оптической системой. При этом наиболее высокая точность установки может быть получена при условии, что

числовая апертура объектива микроскопа равна или несколько больше апертуры испытуемого объектива.

При отсутствии сетки (марки) в фокальной плоскости окуляра фокусировка оптического прибора неопределенна. Для нормального глаза с шириотой аккомодации 4 диоптрии диапазон резкого видения изображения между объективом и окуляром

$$\Delta f = 4f_{\text{ок}}^2/1000.$$

Например, у прибора с фокусным расстоянием окуляра $f_{\text{ок}} = 20$ мм диапазон резкого видения $\Delta f = 1,6$ мм.

При наличии сетки точность продольной установки как зрительной трубы, так и микроскопа характеризуется выражением

$$\Delta f = \lambda/3\sigma^2 \quad (16)$$

и зависит от длины волны света λ и апертурного угла σ . Пусть $\lambda = 0,55$ мкм, тогда

$$\Delta f \approx 0,2/\sigma^2. \quad (17)$$

Оптические приборы, применяемые для измерений, должны иметь высокое качество изображения, что наилучшим образом достигается при небольших апертурах. На практике наиболее часто используют зрительные трубы с относительным отверстием (1:8—1:15) и микроскопы с числовой апертурой 0,1—0,2.

Для зрительной трубы с относительным отверстием объектива 1:10 при $\lambda = 0,55$ мкм точность фокусировки $\Delta f = 0,08$ мм, для микроскопа с числовой апертурой 0,2 $\Delta f = 0,005$ мм. Полученные значения Δf показывают, что отсчетные шкалы окулярной подвижки трубы и тубуса микроскопа должны иметь цены делений соответственно 0,05 и 0,003 мм.

Фокусировку оптических приборов на изображение объекта производят одним из двух способов: одновременным получением резкого изображения сетки и объекта (при выходных зрачках до 1 мм) и способом параллакса (при больших выходных зрачках). В первом случае перемещают окулярную подвижку трубы или тубус микроскопа и отыскивают наиболее резкое изображение объекта, сохраняя в то же время резкое изображение сетки нитей окуляра. Во втором случае стремятся исключить параллакс (несовпадение плоскости изображения контролируемого объекта с плоскостью визирной сетки нитей), который можно обнаружить, смещая глаз вправо и влево или вверх и вниз. Параллакс затрудняет наводку прибора и снижает точность измерений, так как глаз, аккомодированный на резкое изображение объекта, наблюдает размытое изображение сетки нитей или наоборот. Явление параллакса может возникнуть и при совмещенных фокусах объектива и окуляра, но при положении сетки нитей, сдвинутой вперед или назад относительно фокуса. Параллакс появляется также вследствие остаточных аберраций оптической системы, тогда он неустраним и может быть лишь «усреднен». Параллакс прибора выражается в линейной и угловой мере

или в диоптриях. Наибольшая величина параллакса Δf , незаметная для подвижного глаза, равна:

$$\Delta f = f_{\text{ок}}^2 \varphi_{\text{гл}} / (a' \cdot 3438),$$

где $f_{\text{ок}}$ — фокусное расстояние окуляра; $\varphi_{\text{гл}}$ — разрешающая способность глаза; a' — радиус выходного зрачка прибора, мм. При $f_{\text{ок}} = 20$ мм и $a' = 1$ мм $\Delta f \approx 0,1$ мм.

Выходной зрачок прибора должен быть немного меньше зрачка глаза или равен ему. Если яркость изображения объекта мала, то диаметр выходного зрачка следует увеличить до диаметра зрачка глаза. Оптимальный размер выходного зрачка трубы или микроскопа 0,5—1 мм, в этом случае глаз мало утомляется, а точность поперечных и продольных установок сохраняется высокой.

Для исключения «мертвых» ходов микрометрических винтов, имеющих место при установке сетки нитей прибора на изображение контролируемого объекта или отсчетной шкалы, наводку необходимо заканчивать на ввинчивании микрометра, т. е. по ходу часовой стрелки.

Глава II. Методы и приборы для измерения линейных и угловых величин оптических деталей

§ 7. Измерение длины оптических деталей

Длины и толщины оптических деталей, а также воздушные промежутки между линзами измеряют с помощью приборов или инструментов, снабженных эталонами длины в виде штриховых или концевых мер.

Штриховые меры длины представляют собой шкалы (это, например, масштабные линейки, штангенинструменты, микрометры, рычажные измерительные приборы, измерительные микроскопы и компараторы). Концевые меры — это плитки различных размеров, пробки, плоские калибры, измерительные шайбы и другие инструменты, имеющие ограничительные плоскости или сферические торцевые поверхности, расстояние между которыми определяет их размер. Иногда для нахождения внутренних диаметров колец применяют стальные шарики. В этом случае концевая мера составляется из нескольких шариков, при этом учитывают их диаметры.

Основными преимуществами концевых мер по сравнению со штриховыми являются более высокая точность показаний отсчетов и простота использования в технических измерениях. Недостатками следует считать: наличие только одного размера, равного длине стержня; износ с течением времени и возможную деформацию концевой меры.

Штриховые меры имеют меньшую точность, но диапазон их применения шире.

Концевые меры должны иметь высокое качество мерительных поверхностей (плоскостность). Допустимые отклонения на срединную длину, плоскопараллельность рабочих поверхностей и их притираемость, как правило, очень малы. Так, допустимые отклонения от плоскостности для концевых мер от 2 мм и более должны быть не более 0,3 мкм. Отклонения от срединной длины мер нулевого класса от 10 до 2000 мм — от 0,1 до 4 мкм и первого класса — от 0,2 до 8 мкм. Допустимое отклонение от плоскопараллельности поверхностей соответственно не должно превышать 0,07—0,4 мкм и 0,1—0,6 мкм. Притираемость концевых мер нулевого класса характеризуется отсутствием интерференционных полос и оттенков при усилии сдвига не менее 40 Н/см, а мер первого, второго и третьего классов — отсутствием интерференционных полос с оттенками в виде светлых пятен, наблюдаемых в белом свете при усилии сдвига не менее 30 Н/см.

При работе на измерительных приборах, предназначенных для линейных измерений, например на измерительных микроскопах, компараторах, вертикальных и горизонтальных длиномерах и других приборах подобного типа, необходимо соблюдать принцип компарирования (принцип Аббе), заключающийся в том, что при расположении оси контролируемого объекта на продолжении оси образцовой отсчетной шкалы прибора (рис. 2, а) или параллельно ей (рис. 2, в) ошибки измерения, вызванные несовершенством направляющих, имеют минимальные значения. При перекосе осей (рис. 2, б, г) или направляющих, по которым перемещаются объект и образцовая шкала, имеет место погрешность второго порядка

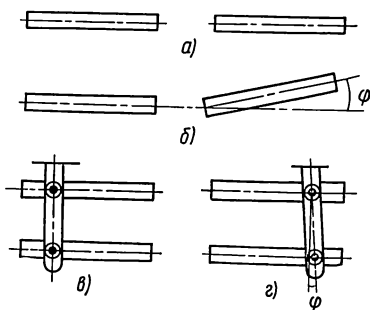


Рис. 2. К принципу компарирования Аббе:

а — оси совмещены; б — оси перекошены; в — оси параллельны; г — оси перекошены

$$\Delta L = L(1 - \cos \varphi) \approx 1/2 L \varphi^2,$$

где L — длина направляющей; φ — угол перекоса.

Погрешность второго порядка имеет место и при наклоне контролируемого объекта к оси визирного микроскопа, компаратора или измерительного микроскопа.

Погрешность первого порядка $\Delta L = h\varphi$, где h — расстояние от шкалы до точки крепления микроскопа, возникает при изгибе траверсы, несущей визирный и отсчетный микроскопы, когда перемещается предметный стол с объектом и образцовой шкалой, а также при изгибе и скручивании направляющих, по которым перемещаются микроскопы, когда контролируемый объект и образцовая шкала остаются неподвижными. У приборов с параллельным расположением осей объекта и образцовой шкалы погрешность первого порядка имеет место при наклоне направляющих и зависит от расстоя-

ния a между микроскопами: $\Delta L = a\varphi$. Погрешность первого порядка может возникнуть при измерении на длиномерах, когда ось контролируемого объекта не является продолжением оси образцовой шкалы прибора, а плоскости измерительных стержней перекошены.

Измерительные микроскопы. По конструкции и назначению измерительные микроскопы можно разделить на две группы. Микроскопы первой группы снабжены отсчетными шкалами, установленными в поле зрения окуляров. Такие микроскопы используют для измерения объектов малых размеров, изображения которых укладываются только в окулярном поле. Ко второй группе относятся микроскопы, измерения на которых производят перемещением предметного стола с объектом как единого целого. В том и другом случаях наблюдатель наводит сетку окуляра на изображения выбранных отметок на объекте. По числу измеряемых координат объекта микроскопы второй группы можно разделить на три подгруппы: однокоординатные, двухкоординатные (малые и большие инструментальные) и трехкоординатные (универсальные).

Универсальные микроскопы характеризуются не только возможностью измерения объекта по трем координатам, но и дополнительными приспособлениями, позволяющими проверять различные по форме и размерам изделия. Все инструментальные и универсальные микроскопы (табл. 5) и однокоординатный микроскоп типа ОКМ имеют подвижные предметные столы.

Таблица 5

Параметры	Шифр прибора				
	ММИ	БМИ, БМИ-1	УИМ-21	УИМ-23	УИМ-24
Пределы измерения длин, мм:					
в продольном направлении	0—75	0—150	0—200	0—200	0—500
в поперечном направлении	0—25	0—50	0—100	0—100	0—200
Пределы измерения углов, град	0—360	0—360	0—360	0—360	0—360
Цена деления:					
отсчетного устройства, мм	0—01	0,005	0,001	0,001	0,001
шкалы угломерной головки, мин	1	1	1	1	1
Увеличение микроскопов	10; 30; 50	10; 15; 30; 50	10; 15; 30; 50	10; 15; 30; 50	10; 20; 30
» объективов	1; 3; 5	1; 1,5; 3; 5	1; 1,5; 3; 5	1; 1,5; 3; 5	1; 2; 3; 10
Увеличение окуляров	10	10	10	10	10
Диаметр поля зрения, мм	21; 7; 4,2	21; 14; 7; 4,2	16,2; 10,8; 5,4; 3,2	18; 12; 6; 3,6	18; 9; 6
Масса прибора, кг	27	95	414	540	1550

Инструментальные микроскопы малые (ММИ) и большие (БМИ и БМИ-1) предназначены для измерения не только линейных, но и угловых размеров объектов в прямоугольных и полярных координатах.

тах, а также для измерения профилей наружных резьб, углов шаблонов, элементов зубчатых передач, конусов и т. п.

Большие инструментальные микроскопы (БМИ и БМИ-1) имеют идентичные оптические схемы (рис. 3), однако микроскоп БМИ-1 снабжен дополнительными приспособлениями для измерения диаметров отверстий и высот изделий.

Из рис. 3 следует, что пучок лучей, идущий от лампы 1, проходит через линзы 2, 4 и 6 осветительной системы и защитное стекло 3 (зеркало 5 служит для излома оси) и освещает предметный стол 7, на котором устанавливают контролируемые объекты. Объектив 8 через призму 9 и защитные стекла 10 строит изображение объекта на сетке 11. Полевая и проекционная линзы 12 и 13, призма 14, поворачивающая изображение на 90° и зеркало 15 проецируют изображение объекта и сетки на экран 16.

Более совершенным является бинокулярный инструментальный микроскоп, который имеет предел измерения в поперечном направлении до 75 мм и точность отсчета 0,002 мм; увеличения микроскопа 10, 20, 30, 60 и $90\times$, масса прибора 182 кг.

При измерении линейных размеров на больших инструментальных микроскопах требуется правильная установка объекта на круглом столе. Отсчеты по шкалам барабанов производят с точностью 0,005 мм.

При измерении угловых размеров производят центрировку круглого стола, совмещая центр его вращения с началом координат — точкой пересечения нитей окулярной угломерной головки. Вершина измеряемого угла объекта должна быть в центре перекрестия нитей; изображение одной из сторон угла совмещают со штриховой линией сетки, отсчет производят по угломерной шкале стола микроскопа. Затем совмещают другую сторону угла объекта с этой же штриховой линией сетки и производят второй отсчет по шкале стола. Разность отсчетов составляет величину измеряемого угла.

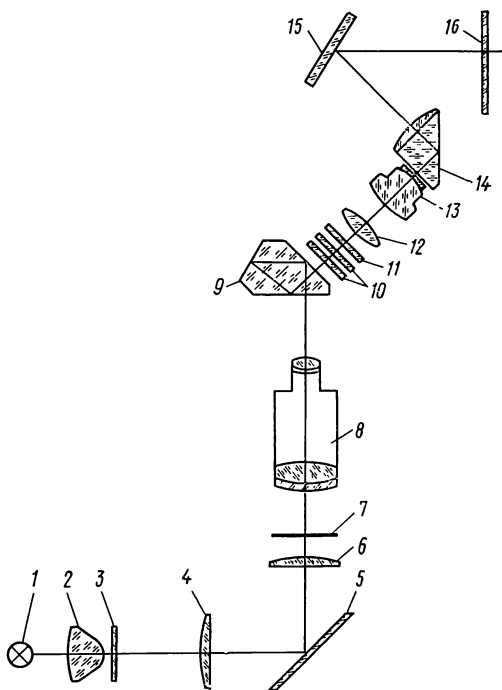


Рис. 3. Оптическая схема большого инструментального микроскопа

Из табл. 5 следует, что наибольшую точность и пределы измерений имеют универсальные измерительные микроскопы УИМ-21, УИМ-23 и УИМ-24. Их назначение подобно назначению инструментальных микроскопов, а дополнительные приспособления позволяют измерять изделия различной формы. Например, микроскоп УИМ-21 имеет следующие дополнительные приспособления: вертикальный длиномер ИЗВ-21 для измерения координаты по высоте; приспособление ИЗО-1 для измерения внутренних размеров контактным методом и приспособление ИЗО-2 для измерений бесконтактным методом; профильную окулярную головку ОГР-23; окулярную головку двойного изображения ОГУ-22; круглый стол СТ-9; стол с высокими центрами СТ-2; измерительную бабку ИБ-21М; призматические опоры ОП-23; проекционную насадку ПН-7 и объективы МТ-22, -23, -24; МТ-22а, -23а, -24а.

Визирный микроскоп УИМ-21 перемещается вместе с поперечной кареткой, а с помощью кремальберного винта может быть опущен или поднят вдоль вертикальной стойки. Продольная каретка имеет полуцилиндрические направляющие, в которые вкладываются центровые бабки для установки резьбовых изделий длиной до 750 мм. На установочных площадках каретки могут быть укреплены: предметный стол для измерения плоских деталей или круглый стол с ценой деления 1° в интервале от 0 до 360° с точностью отсчета $30''$.

Визирный микроскоп снабжен штриховой окулярной головкой, подобной головке инструментального микроскопа с отсчетным микроскопом.

Прибор снабжен револьверной головкой с тремя конденсорами: головка с надписью «фото» служит для непосредственных наблюдений и измерений теневым методом и методом осевого сечения, с надписью «3х» — для работы с проекционной насадкой при увеличении объективов $3\times$ и $5\times$ и с надписью « $1\times$ и $1,5\times$ » — для работы с проекционной насадкой при увеличении объективов $1\times$ и $1,5\times$.

Длины на универсальном микроскопе измеряют теневым (проекционным) методом в проходящем свете и методом осевого сечения. Для этого контролируемую деталь помещают на плоский стол и визирный микроскоп фокусируют на резкое видение ее края. Установка детали под визирным микроскопом осуществляется вначале перемещениями продольной и поперечной кареток вручную, а после закрепления их стопорными винтами более точно — микрометрическими винтами. При этом нужно следить, чтобы микрометрические винты были установлены в среднее положение, отмеченное белыми штрихами.

Предельные погрешности измерения (выражаются в микрометрах) определяются следующими эмпирическими формулами:

в продольном направлении: $\Delta L = \pm (3 + L/30 + HL/4000)$,

в поперечном направлении: $\Delta L = \pm (3 + L/50 + HL/2500)$,

по высоте с помощью длиномера ИЗВ-21: $\Delta H = \pm (1,4 + H/140)$, где L и H — измеряемые длина и высота детали, мм.

Универсальный измерительный микроскоп УИМ-23 имеет то же назначение, что и микроскоп УИМ-21, но в отличие от последнего снабжен оптической системой, проецирующей изображения измеряемого объекта и отсчетных шкал на экран. Микроскоп УИМ-23 снабжен теми же дополнительными приспособлениями, что и микроскоп УИМ-21. Кроме того, микроскоп УИМ-23 снабжен проекционным вертикальным длиномером ИЗВ-23, отличающимся от вертикального длинмера ИЗВ-21 более сложной оптической системой и увеличением проекционной системы $60\times$. Увеличение отсчетного микроскопа ИЗВ-21 равно $62\times$. Длиномеры ИЗВ-21 и ИЗВ-23 устанавливаются на вертикальных колонках микроскопов УИМ-21 и УИМ-23 на место кронштейнов с главными (наблюдательными) микроскопами. Оптическая схема длинмера ИЗВ-23 аналогична схеме вертикального длинмера ИЗВ-2 (см. рис. 5).

Компараторы. Компараторы предназначены для сравнения и контроля линейных размеров деталей с образцовой шкалой прибора. Различают горизонтальные, стереоскопические и интерференционные компараторы. Последние имеют наиболее высокую точность и применяются для абсолютных измерений концевых мер. Горизонтальный компаратор ИЗА-2 снабжен двумя микроскопами: визирным и отсчетным. Первый служит для наблюдения объекта и его деталей, второй — для отсчетов по образцовой шкале. Оба микроскопа закреплены на неподвижной траверсе, перемещается предметный стол, несущий образцовую шкалу и контролируемый объект. Компаратор ИЗА-2 служит для прямых измерений штриховых шкал, сеток, расстояний между спектральными линиями на спектрограммах и т. п. и имеет следующие технические характеристики: предел измерения 0—200 мм, цена деления образцовой шкалы 1 мм, цена деления отсчетного устройства 0,001 мм, точность отсчитывания на глаз 0,0001 мм. Увеличение визирного микроскопа 7—10,5 \times , отсчетного — 61,5 \times . Поле зрения визирного микроскопа соответственно 12 и 2,3 мм, числовая апертура 0,05—0,04; числовая апертура отсчетного микроскопа 0,15. Масса прибора 25 кг.

В зависимости от характера измерений применяют продольные и поперечные горизонтальные компараторы с перемещающимися микроскопами и неподвижным предметным столом или с неподвижными микроскопами и перемещающимся столом. Последние обеспечивают более высокую точность измерения.

В поперечных компараторах предметный стол перемещается перпендикулярно оси измерительной шкалы, а в продольных — вдоль оси.

Поперечные компараторы применяют, главным образом, для сравнения штриховых мер по всей длине с образцовой или эталонной шкалой (например, в метрологии для эталонирования и компарирования мер длины).

Продольные горизонтальные компараторы с подвижным предметным столом нашли широкое применение в оптических измерениях. Продольный горизонтальный компаратор ИЗА-2 (рис. 4) име-

ет массивное литое основание 5 С-образной формы с двумя направляющими: основной 1 цилиндрической формы и вспомогательной 10 прямоугольной формы, по которым передвигается предметный стол 9. В верхней части основания имеется траверса 6, несущая два микроскопа: визирный 7, с увеличением от 7 до 10,5^x и полем зрения 13 мм и отсчетный 4 со спиральным окулярным микрометром с увеличением 61,5^x и полем зрения 2,3 мм.

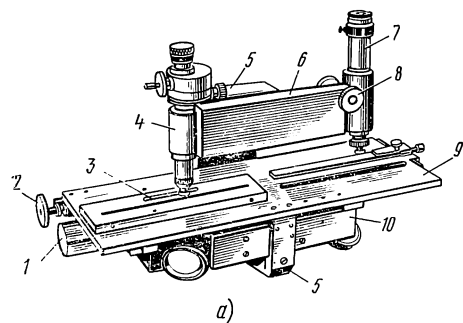


Рис. 4. Горизонтальный компаратор для измерения длин

Микроскоп предназначен для отсчетов по измерительной шкале, на которую объектив сфокусирован постоянно.

Для повышения точности измерений на окуляр отсчетного микроскопа надевается съемная диафрагма с зеленым светофильтром. Точность измерения на компараторе определяется эмпирической формулой

$$\delta L = \pm \left(0,9 + \frac{L}{300 - 4H} \right),$$

где L — измеряемая длина, мм; δL — погрешность измерения, мкм, H — высота плоскости измеряемого объекта над плоскостью измерительной шкалы компаратора, мм.

При работе на компараторе ИЗА-2 измеряемый объект устанавливают на стол под визирным микроскопом, линия измерения должна быть параллельна ходу стола и оси измерительной шкалы (в этом случае сохраняется принцип Аббе). Резкость изображения по всей поверхности объекта должна быть постоянной.

Вначале предметный стол перемещают вручную до появления в поле зрения визирного микроскопа места наводки (штрихи, точки или контуры объекта). Затем стол закрепляют зажимным винтом и, вращая микрометрический винт 2, производят точную наводку визирным микроскопом, вводя штрих, или отметку измеряемой детали в биссектор окулярной сетки. После этого, наблюдая в отсчетный микроскоп, устанавливают двойной виток спирального микрометра на штрих измерительной шкалы и снимают отсчет. Измерения ведут при нескольких (пяти — семи) наводках визирного микроскопа на

контролируемую деталь и витков отсчетного микроскопа на штрих измерительной шкалы со снятием соответствующих отсчетов. Температура окружающего воздуха и компаратора должна быть $(20 \pm 3)^\circ \text{C}$. Результаты измерения могут быть исправлены с учетом не точности делений измерительной шкалы введением соответствующих поправок, взятых из аттестата на шкалу.

Т а б л и ц а 6

№ приемов	Отсчеты		$A - B$, мм	v	$v^2 \cdot 10^8$
	A , мм	B , мм			
1	118,5992	68,5960	50,0032	-0,0003	9
2	118,5986	68,5945	50,0041	-0,0012	144
3	118,5977	68,5963	50,0014	+0,0015	225
4	118,5787	68,5940	50,0047	-0,0018	324
5	118,5979	68,5967	50,0012	+0,0017	189
Среднее			50,0029	$\sum v =$ = 0,0001	$\sum v^2 \cdot 10^8 =$ = 891
	118,5984	68,5955			

В табл. 6 приведен пример измерения интервала контролируемой шкалы на горизонтальном компараторе ИЗА-2. Средняя квадратическая погрешность одного измерения

$$\sigma = \sqrt{(\sum v^2)/(n-1)} = \pm 0,0015 \text{ мм} \approx \pm 0,002 \text{ мм}.$$

Средняя квадратическая погрешность арифмической середины результата измерений

$$S = \sigma / \sqrt{n} = \pm 0,0015 / \sqrt{5} \text{ мм} \approx 0,001 \text{ мм},$$

или $(A-B) \pm S = (50,003 \pm 0,001) \text{ мм}$.

Длиномеры. Оптические вертикальные длиномеры ИЗВ-1, ИЗВ-2, ИЗВ-3 и горизонтальный длиномер ИКУ-2 предназначены для прямых и относительных (дифференциальных) линейных измерений калибров и других изделий.

Вертикальный длиномер ИЗВ-2 состоит из литого основания со штативом, вдоль которого перемещается прибор, аналогичный длиномеру ИЗВ-21, прилагаемому к микроскопу УИМ-21. Технические характеристики длиномеров ИЗВ-2 и ИЗВ-21 одинаковы. Пределы прямых измерений по шкале 0—100 мм; пределы измерений сравнительным методом 0—250 мм; цена деления образцовой шкалы 1 мм; цена деления отсчетного устройства 0,001 мм; увеличение отсчетного микроскопа 62 \times . Предельная погрешность измерения без учета поправок по аттестату шкалы $\pm (0,0014 + L/140\,000) \text{ мм}$, где L — измеряемая длина, мм.

На рис. 5 приведена оптическая схема дальномера ИЗВ-2: лампа 1, светофильтр 2, конденсор 3, образцовая миллиметровая шкала 5 с защитным стеклом 4, объектив 10 микроскопа, призмы 8 и 9, отклоняющие пучок лучей соответственно на 90 и 45° и спиральный окулярный микрометр с окуляром 6 и двумя пластинками, одна из которых 7 — подвижная со спиралью Архимеда, а другая 11 — неподвижная со шкалой десятых долей миллиметра и индексом.

Методика работы на дальномере ИЗВ-2 такая же, как и на дальномере ИЗВ-21. Для более точного определения места положения

контакта наконечника с поверхностью объекта и для бесконтактного измерения высоты изделия дальномер ИЗВ-2 укомплектован центрировочным микроскопом, который с помощью гайки закреплен на измерительном стержне. При определении места контакта измерительный стержень перемещают по высоте и устанавливают микроскоп на резкое видение поверхности объекта, затем, сдвигая объект, подводят выбранную на поверхности точку к центру перекрестия сетки окуляра микроскопа. Затем центрировочный микроскоп удаляют и на

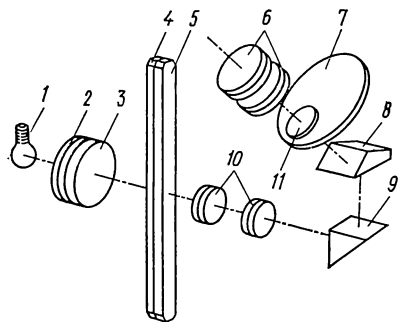


Рис. 5. Оптическая схема вертикального дальномера ИЗВ-2

измерительном стержне закрепляют наконечник, который должен иметь контакт с объектом и столом. В зависимости от формы измеряемого объекта на измерительный стержень устанавливают соответствующий наконечник: плоский, ножевидный или сферический, при этом площадь контакта между контролируемым объектом и наконечником должна быть минимальной. Например, для объекта с цилиндрической поверхностью выбирают ножевидный наконечник и устанавливают лезвием перпендикулярно к образующей цилиндра.

Вертикальный проекционный дальномер ИЗВ-3. Дальномер ИЗВ-3 отличается от дальномера ИЗВ-2 конструктивным оформлением и наличием проекционной системы отсчетов на экране. Предельная погрешность измерения без учета поправок по аттестату шкалы $\pm (0,0012 + L/12\,000)$ мм, где L — измеряемая длина в мм. Оптическая схема дальномера ИЗВ-3 приведена на рис. 6. Пучок лучей от источника света 1 через конденсор 2, светофильтр 3, линзы 4 и зеркало 5 освещает образцовую шкалу 6, защищенную стеклом 7. Объектив 8 через призмы 9 и 10, дополнительные линзы 11 и плоскопараллельную пластинку 12 проецирует изображение штрихов образцовой шкалы 6 на сетку 13, имеющую шкалу с десятими долями миллиметра и индекс для отсчета сотых, тысячных и десяти-тысячных долей миллиметра. Изображения шкалы 6, сетки 13 и де-

лений лимба 14 с помощью объектива 16, коллективной линзы 15 и зеркал 17, 18 и 19 передаются на экран 20.

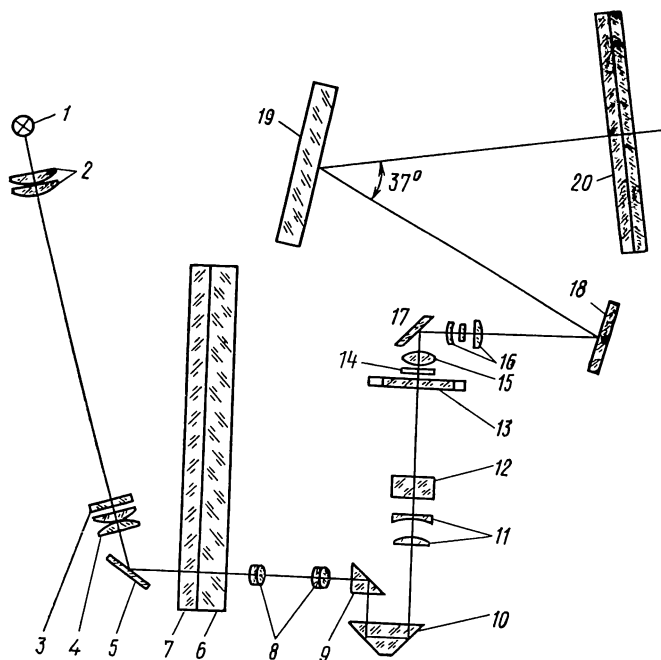


Рис. 6. Оптическая схема вертикального дилномера ИЗВ-2

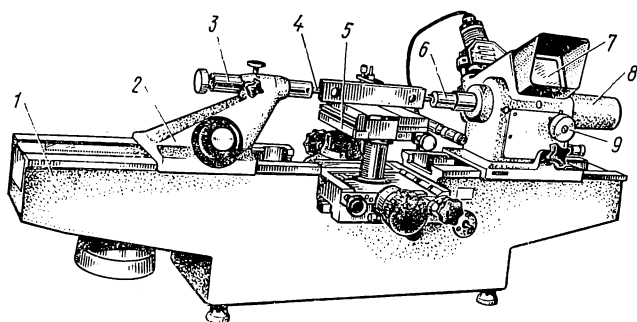


Рис. 7. Общий вид дилномера ИКУ-2

Горизонтальный дилномер ИКУ-2 (рис. 7). Дилномер ИКУ-2 состоит из основания 1, пинольной 2 и измерительной 8 бабок и предметного стола 5. Для размещения и передвижения пинольной и измерительной бабок на основании прибора имеются направляющие. Предметный стол находится в средней части основания. В пинольной бабке на линии измерения помещена пиноль 3 с измери-

тельным наконечником 4. В измерительной бабке расположена измерительная пиноль 6, в которой размещена оптическая система. Внутри измерительной пиноли установлена головка с качающимся зеркалом, жестко связанная с измерительным стержнем, на котором крепятся наконечники. В средней части пиноли на линии измерения установлена стомиллиметровая стеклянная шкала, служащая для измерения величины перемещения пиноли. Изображения миллиметровой шкалы, биссекторных штрихов шкалы десятых долей миллиметра и микронной шкалы с индексом проецируются на экран 7.

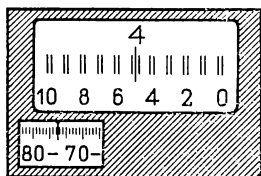


Рис. 8. Поле экрана
длиномера ИКУ-2

Прибор устанавливают в нулевое положение: шкалы должны быть на нулевом делении, а пиноли находиться в соприкосновении, затем измерительную пиноль отводят и на предметном столе закрепляют измеряемое изделие. Касаясь изделия наконечником пиноли измерительной бабки, поворачивают стол, выравнивая изделие по линии измерения до получения наименьшего или наибольшего отсчета в зависимости от его формы и вида измерительных наконечников.

В этом положении стол закрепляют. Для снятия с экрана отсчета вводят с помощью микрометричного винта 9 изображение миллиметрового штриха в середину ближайшего биссектора. На рис. 8 отсчет соответствует 4,4730. При измерениях относительным методом отсчеты берут только по микронной шкале.

Методика работы на приборе ИКУ-2 аналогична работе на горизонтальном оптиметре. На длиномере ИКУ-2 можно измерять концевые плоскопараллельные меры длины 5-го разряда, калибры, диаметры шариков, диаметры отверстий (с помощью электроконтактной головки ГК-3), внутренние размеры деталей с гладкими поверхностями (с помощью измерительных дуг приспособления ИП-8), резьбовые кольца (с помощью приспособления ИП-9). Вертикальные (ПП-2) и горизонтальные (ПП-3) центры позволяя устанавливать на предметном столе изделия различной формы.

Длиномер ИКУ-2 имеет следующие технические характеристики. Пределы измерения длин: наружных 0—500 мм; внутренних — 13,5—400 мм; пределы измерения внутренних диаметров 13,5—150 мм; пределы измерения по шкалам: миллиметровой 0—100 мм, микронной $\pm 0,1$ мм; цена деления отсчетного устройства 0,001 мм.

Погрешность δL в мм измерения длины L вычисляется по формуле

$$\delta L = \pm (0,0014 + L/140\,000)$$

— для наружных размеров,

$$\delta L = \pm (0,0019 + L/140\,000)$$

— для внутренних размеров.

Масса прибора 150 кг.

Измерительные машины. Измерительные машины (ИЗМ) предназначены для линейных измерений наружных и внутренних размеров объектов прямым и относительным методами. Отечественная промышленность выпускает следующие измерительные машины: ИЗМ-10М, ИЗМ-11 и ИЗМ-12, отличающиеся пределами измерения. Так, предел измерения наружных размеров на измерительной машине ИЗМ-10М от 0 до 1000 мм, на ИЗМ-11 от 0 до 2000 мм и на

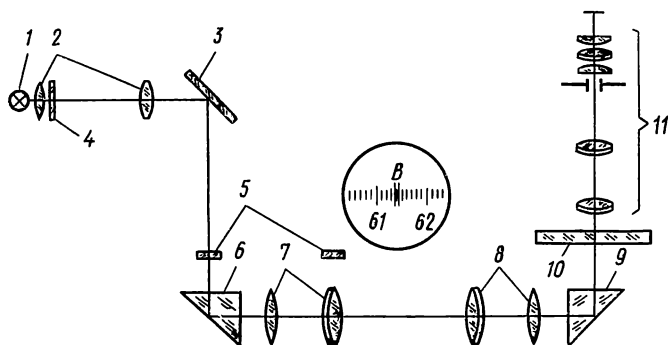


Рис. 9. Оптическая схема ИЗМ

ИЗМ-12 от 0 до 4000 мм. Цена деления метровой шкалы всех указанных ИЗМ 100 мм, стомиллиметровой 0,1 мм, шкалы трубки оптиметра 0,001 мм. Пределы измерения внутренних размеров следующие: 13,5 — 150 мм.

Оптические схемы ИЗМ одинаковы (рис. 9) и содержат два коллиматора с ломаной оптической осью, отсчетный микроскоп и трубку оптиметра. Пучок лучей от лампы 1 через конденсор 2 и светофильтр 4 направляется зеркалом 3 на одну из пластинок дециметровой шкалы 5. На нижней поверхности пластинки, установленной в фокальной плоскости объектива 7 коллиматора с призмой 6, нанесены двойной штрих (биссектор) и цифра, обозначающая число сотен миллиметров. Расстояние между соседними биссекторами 100 мм.

Из объектива 7 выходит параллельный пучок лучей, который падает на объектив 8 второго коллиматора с призмой 9 и образует изображение биссектора в задней фокальной плоскости на миллиметровой шкале 10. Наблюдения за изображением и отсчет по шкале производят с помощью микроскопа 11. Между объективами 7 и 8 проходит параллельный пучок лучей, поэтому бабки (пинольную и измерительную), расположенные на направляющих горизонтальной станины, можно раздвигать на требуемое расстояние.

При непосредственных измерениях номинальный размер объекта определяют по метровой и миллиметровой шкалам, а отклонение от этого размера — по шкале трубки оптиметра. При сравнитель-

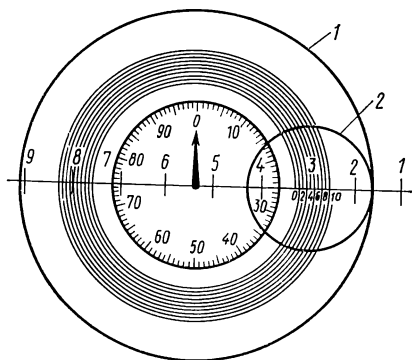


Рис. 10. Спиральный окулярный микрометр

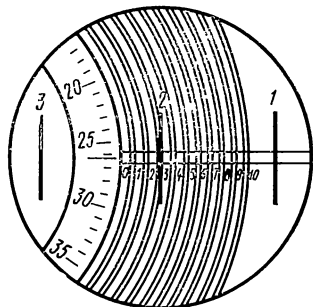


Рис. 11. Поле зрения спирального окулярного микрометра

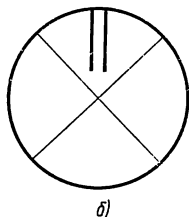
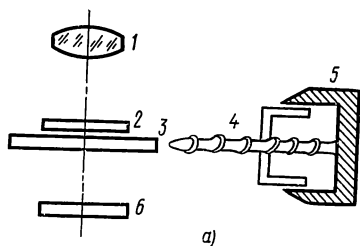


Рис. 12. Винтовой окуляр-микрометр:

а — схема устройства винтового окулярного микрометра; б — поле зрения винтового окулярного микрометра

ных измерениях используют только шкалу трубки оптиметра (как и при работе на горизонтальном оптиметре). Для измерения наружного размера ИЗМ устанавливают в нулевое положение. Для этого пинольную бабку устанавливают по наружному индексу на нуль метровой шкалы, а измерительную — на нуль стомиллиметровой шкалы, вводя нулевой штрих в середину нулевого биссектора. Измерительные наконечники пиноли и трубки оптиметра на измерительной бабке приводят в соприкосновение, шкалу трубки оптиметра также устанавливают на нуль. Отодвинув пинольную бабку на необходимое расстояние, измеряемый объект устанавливают на столе и закрепляют зажимным винтом, ориентируя по линии измерения с помощью механизма движения стола. Затем микрометрическим винтом устанавливают измерительную бабку в положение, при котором один из штрихов стомиллиметровой шкалы располагается посередине биссектора. Отсчет целых и десятых долей миллиметра берут по микроскопу, а сотых и тысячных долей — по шкале трубки оптиметра.

Спиральный и винтовой окулярные микрометры. Большая часть измерительных приборов снабжена отсчетными микроскопами со спиральными окулярными микрометрами, позволяющими измерять с большей точностью, чем винтовыми окулярными микрометрами.

Спиральный окулярный микрометр (рис. 10) состоит из окуляра и двух стеклянных пластинок: подвижной 1 и неподвижной 2. На подвижной пластинке, рас-

положенной под неподвижной с зазором 0,1 мм, нанесены спиральная сетка (спираль Архимеда) из одиннадцати двойных витков и круговая шкала со 100 делениями. На неподвижной пластинке нанесены индекс в виде стрелки и две параллельные красные линии, одна из которых в интервале 5 мм разделена на 10 частей с оцифровкой от 0 до 10. Индекс служит указателем для отсчета по круговой шкале. Все одиннадцать витков спирали укладываются в десять деления неподвижной шкалы. Поворот пластинки со спиралью и круговой шкалой производится вращением рукоятки микрометра. При трех оборотах рукоятки спираль перемещается на один виток в пределах одного деления неподвижной шкалы. Увеличение объективов отсчетных микроскопов подбирают так, чтобы изображение интервала шкалы в 1 мм точно укладывалось в десять деления неподвижной шкалы (рис. 11). Тогда цена деления последней становится равной 0,1 мм, а круговой шкалы — 0,001 мм. Двойные витки спирали нанесены с интервалом 0,05 мм, а каждый двойной виток отстоит от соседнего на 0,5 мм. При рассмотрении через окуляр с увеличением 10—12^x эти расстояния становятся соответственно равными 0,5—0,6 мм и 5—6 мм.

Для снятия отсчета нужно один из ближайших двойных витков спирали навести на штрих образцовой шкалы прибора, расположенной в зоне спирали. Например, в поле зрения окуляра (рис. 11) видны три штриха образцовой шкалы с цифрами 1, 2 и 3, из которых один штрих с цифрой 2 попал в зону спирали. На этот штрих наводится двойной виток спирали как биссектор в пределах двух красных горизонтальных линий. Целые миллиметры отсчитывают, начиная с наведенного штриха образцовой шкалы, десятые доли — по неподвижной шкале от нуля до наведенного штриха, сотые, тысячные и десятитысячные доли миллиметра — по круговой шкале относительно индекса. Десятитысячные доли миллиметра оценивают на глаз. При положении спирали, указанном на рис. 11, отсчет соответствует 2,2263 мм.

Многие отсчетные микроскопы имеют винтовые окулярные микрометры простой конструкции. На рис. 12, а приведена принципиальная схема устройства, состоящего из окуляра 1 с увеличением 15^x, в фокальной плоскости которого расположены шкала 2 с ценой деления 1 мм и оцифровкой от 0 до 8, и подвижная пластинка 3 с перекрестием и биссекторным индексом (рис. 12, б). Пластика 3 передвигается с помощью винта 4 и отсчетного барабана 5. Для предохранения шкалы и пластинки от загрязнений имеется защитное стекло 6. Отсчетный барабан разделен на 100 частей с ценой деления 0,01 мм. Отсчеты берут сначала по оцифрованной шкале микрометра относительно индекса, а затем по барабану.

§ 8. Измерение длин плоскопараллельных концевых мер

Относительный метод. Длина плоскопараллельных концевых мер с точностью $\pm 0,1$ мкм может быть измерена техническим интерференционным методом сравнением контролируемой концевой

меры с образцовой и выражена дробным или целым числом длин световых волн. Длину образцовой концевой меры следует предварительно измерить с точностью $\pm 0,07$ мкм.

Сущность относительного метода заключается в наблюдении двух интерференционных картин в виде полос равной толщины, образованных в воздушных клиньях, и в определении разности хода Δ между лучами, отраженными от нижней поверхности верхней стеклянной пластинки и поверхностями образцовой и проверяемой мер.

Пусть на проверяемую меру II под некоторым углом β наложена пластинка I (рис. 13). Лучи 1 и 2, вышедшие из источника L , после отражения от поверхностей I и II встречаются в точке A и интерферируют. Разность хода лучей в воздушном клине

$$\Delta = 2h \cos \varepsilon + \lambda/2, \quad (18)$$

где h — высота (толщина) клина в точке A ; ε — угол падения лучей на поверхность I ; $\lambda/2$ — добавочная разность хода, появляющаяся в результате разных условий отражения лучей в точках A и B .

При встрече в точке A лучей, отраженных от верхней I и нижней II поверхностей, наблюдаются полосы, которые расположены параллельно ребру клина (при хорошей плоскостности поверхностей). У вершины клина при $h=0$ появляется темная полоса, соответствующая разности хода $\Delta = \lambda/2$.

При угле падения ε , близком к нулю, выражение (18) принимает вид:

$$\Delta = 2h + \lambda/2 = \delta + \lambda/2,$$

где $\delta = 2h$.

Толщина клина в произвольной точке $h = \delta/2$. При $\delta = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, N\lambda$ наблюдаются темные интерференционные полосы и толщина клина $h = 0, 1 \frac{\lambda}{2}, 2 \frac{\lambda}{2}, 3 \frac{\lambda}{2}, \dots, N \frac{\lambda}{2}$. При $\delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots, (2N+1) (\lambda/2)$ наблюдаются светлые интерференционные полосы и толщина клина $h = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots, (2N+1) (\lambda/2)$, где N — порядок интерференции (целое число).

В зависимости от длины концевых мер N может быть выражено как целым, так и дробным числом. Если применяется белый источник света, то обычно наблюдают не более семи интерференционных полос, которые окрашены в различные цвета спектра. При монохроматическом свете имеют место чередующиеся темные и светлые полосы. На рис. 14 в точке A порядок интерференции $N = 3,75$, что соответствует толщине клина $h = 3,75 \lambda/2$.

Для сравнения концевых мер необходимы две стеклянные пластинки с высоким качеством рабочих поверхностей (отклонение от плоскостности не более $0,1$ мкм). К рабочей поверхности нижней пластины 1 (рис. 15) притираются образцовая и проверяемая 3 меры до полного исчезновения интерференционных полос. На верхнюю грань концевой меры накладывают вторую стеклянную пластинку 2, имеющую скос под углом 10 — 12° и два взаимно перпенди-

кулярных штриха CD и EF , один из которых параллелен ребру скоса.

Слегка нажимая на верхнюю пластинку 2 и изменяя ее наклон, добиваются появления двух интерференционных картин в воздушных клиньях между рабочими поверхностями концевых мер и нижней поверхностью верхней пластинки. Образовавшиеся интерференционные полосы ориентируют следующим образом: штрих EF верхней пластинки направляют параллельно длинному ребру образцовой меры ($Об$), а точку пересечения штрихов CD и EF располагают

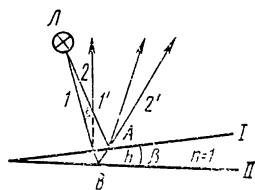


Рис. 13. К измерению длин концевых мер относительным методом с применением интерференционных полос равной толщины

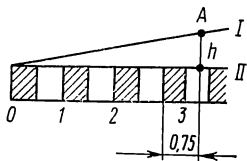


Рис. 14. Определение порядка интерференционных полос

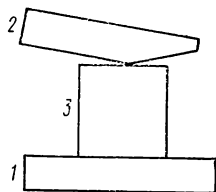


Рис. 15. Расположение элементов схемы при измерении концевых мер

примерно посередине ее рабочей поверхности (рис. 16). Интерференционные полосы от проверяемой меры ($Пр$) приводят в положение, параллельное штриху CD . Взаимное смещение полос определяется расстоянием между ахроматическими (темными) полосами двух интерференционных картин и является величиной отклонения контролируемой меры от образцовой.

Если середина ахроматической полосы на мере $Пр$ совпадает со штрихом CD , а ахроматическая полоса на мере $Об$ проходит через точку пересечения штрихов CD и EF (рис. 16), то смещение полос равно нулю, а длина проверяемой меры совпадает с образцовой (наблюдаемый на рис. 16 наклон полосы на мере $Об$ относительно штриха CD свидетельствует о некоторой непараллельности мер). В случае, когда ахроматическая полоса на мере $Пр$ ниже штриха CD (рис. 17), а ахроматическая полоса на мере $Об$ проходит через точку пересечения штрихов CD и EF , то дробная часть a полосы, находящаяся ниже штриха CD , оценивается на глаз и прибавляется к целому числу полос N , отсчитанных между ахроматической полосой и штрихом CD . Если ахроматическая полоса не видна, то нужно наклонить верхнюю пластинку в сторону меры $Пр$ до появления полосы, не обращая внимания на изменение наклона полос, и определить их число. Дробному значению полосы приписывается знак минус, так как в сечении клина вертикальной плоскостью в направлении от проверяемой меры наблюдаются полосы более высоких порядков по сравнению с полосами от меры $Об$. Таким образом,

длина L_{π} проверяемой меры меньше длины L_0 образцовой на величину $d = a \lambda/2$, т. е. $L_{\pi} = L_0 - d$.

Возможен случай, когда середина ахроматической полосы на мере $Пр$ совпадает со штрихом $СД$, а ахроматическая полоса на мере $Об$ находится ниже штриха $СД$ (рис. 18). Тогда смещение ахроматических полос оценивают дробной частью a полосы, находящейся ниже штриха $СД$ в направлении EF , прибавляя целое число

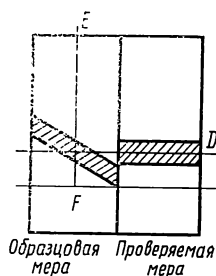


Рис. 16. Ориентирование интерференционных полос в образцовой и проверяемой мерах

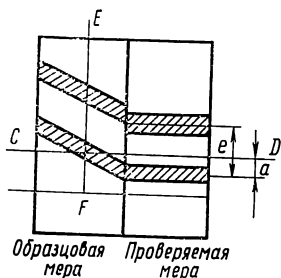


Рис. 17. Определение дробной части номера интерференционной полосы

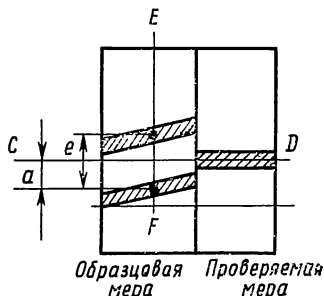


Рис. 18. Определение смещения ахроматической полосы

полос, расположенных между штрихами $СД$ и ахроматической полосой на мере $Об$. В данном случае длина проверяемой меры больше образцовой на $d = a \lambda/2$, т. е. $L_{\pi} = L_0 + d$.

Точность измерения длины проверяемой меры dL_{π} определяется погрешностями измерения длины образцовой меры dL_0 и оценкой дробной части полосы da на глаз:

$$dL_{\pi} = \sqrt{(dL_0)^2 + (da)^2}.$$

Принимая $dL_0 = \pm 0,07$ мкм и $da = 0,25$ ширины полосы, т. е. $da = (\pm 0,25 \cdot 0,3)$ мкм $= \pm 0,075$ мкм, получаем $dL_{\pi} \approx 0,1$ мкм.

При контроле длин концевых мер в белом свете длину волны можно принять равной 0,6 мкм.

Абсолютный метод. Длина концевой меры, выраженная в длинах световых волн, в этом случае определяется с помощью бесконтактных интерференционных компараторов, которые могут быть также использованы и для измерения длин относительным методом. Широкое применение в мерологии получили интерферометры с верхним пределом измерения до 100 мм (вертикальный интерферометр Кёстерса и интерферометр Физо), позволяющие использовать простые источники света без регулирования температуры и давления воздуха [19].

На рис. 19 приведена оптическая схема интерферометра Кёстерса. Свет от источника 9 через конденсор 8 направляется на щель 7,

расположенную в фокальной плоскости объектива 6 коллиматора и, выходя из объектива параллельным пучком, падает на диспергирующую призму Аббе 5. Система, состоящая из деталей 5—9, представляет собой монохроматор. Пройдя диспергирующую призму, параллельный пучок света падает на полупрозрачную пластинку 4 и делится на две части. Одна часть лучей идет к неподвижному зеркалу 11, а вторая — к пластинке 13, на которую притирается контролируемая концевая мера 12. Поверхности пластинки и концевой меры образуют второе зеркало. Отраженные от зеркал пучки лучей обеих ветвей интерферометра встречаются на поверхности полу-

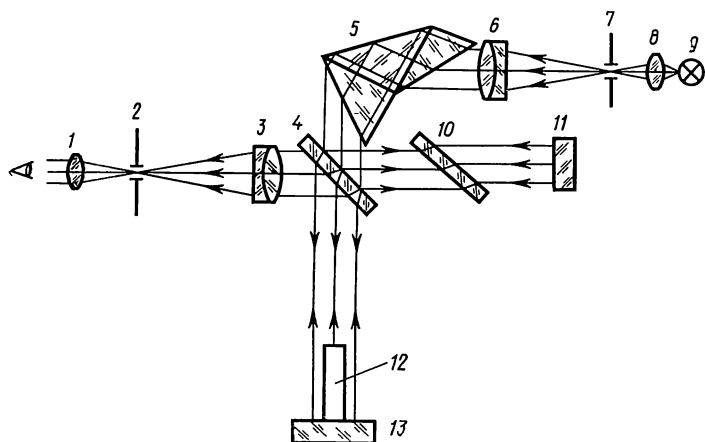


Рис. 19. Оптическая схема интерферометра Кёстера

прозрачной пластинки, интерферируют между собой и собираются объективом 3 в плоскости выходной диафрагмы 2. Оператор наблюдает интерференционную картину без окуляра 1. Последний используется при настройке интерферометра.

Прямой подсчет интерференционных полос, содержащихся в концевой мере, чрезвычайно труден, поэтому прибегают к косвенному методу определения длины — способу совпадения дробных частей для нескольких (минимум трех) длин волн. Приближенная длина проверяемой концевой меры должна быть известна из предварительных более грубых измерений, выполненных, например, на оптиметре или длиномере с точностью $\pm 1-2$ мкм. Изменяя расстояние между вторым зеркалом и полупрозрачной пластинкой, устанавливают относительную плоскость 14, являющуюся изображением зеркала 11, примерно посередине длины концевой меры 12 под небольшим углом к поверхностям меры и пластинки 13 (рис. 20). Два воздушных клина в любой точке их составляют сумму, равную длине концевой меры $L_{\Pi} = l_1 + l_2$.

В поле зрения интерферометра наблюдаются две системы полос равной толщины (рис. 21), образованные на поверхностях концевой меры и пластинки. На рис. 21 изображен случай, когда поверх-

ности меры и пластинки параллельны. Если эти поверхности не параллельны, то интерференционные полосы располагаются под некоторым углом.

Высота воздушного слоя, равная длине контролируемой концевой меры L_n , определяется формулой

$$L_n = (N + a)(\lambda/2),$$

где N — порядок интерференции, выражаемый целым числом полос; a — дробная часть полосы.

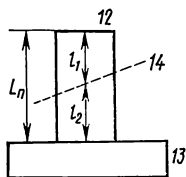


Рис. 20. Схема расположения концевых мер

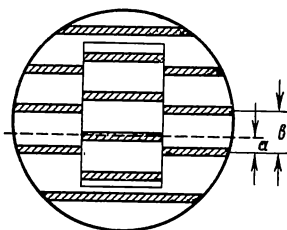


Рис. 21. Вид поля зрения окуляра интерферометра Кёстера:

a — дробная часть; b — ширина интерференционной полосы

Дробная часть a определяется для трех-четырех длин волн, выделяемых поворотами диспергирующей призмы 5 монохроматора (см. рис. 19). При определении дробной части важно знать расположение ребра воздушного клина между поверхностью контролируемой меры и относительной плоскостью. Чтобы выяснить, в какую сторону возрастают номера полос, следует надавить на пластинку 13, при этом полосы смещаются в сторону возрастания номеров; дробную часть полосы отсчитывают в направлении от середины поля зрения. При изменении длины волны света меняется и величина дробной части:

$$2L_n/\lambda = N + a.$$

Для известных длин волн применяемых источников света, например спектральных ламп, наполненных гелием или криптоном, составлены специальные таблицы для необходимого интервала дробных частей, по которым определяют размеры концевых мер.

Более подробно работа на интерферометре описана в книге [19].

§ 9. Измерение толщин линз и воздушных промежутков

Толщины линз и воздушных промежутков определяют контактными и бесконтактными способами.

Контактный (механический) способ наиболее прост и широко распространен в практике, его реализуют с помощью вертикальных длиномеров, оптиметров, толщесмеров и стрелочных индикаторов.

При бесконтактном способе поверхности измеряемых деталей не соприкасаются с измерительным устройством и рабочие поверхности не испытывают механических повреждений. В случае бесконтактного способа контроля применяют пневматические и оптические толщесмеры.

Для определения толщин линз и воздушных промежутков контактным способом удобны вертикальные длиномеры ИЗВ-1, ИЗВ-2 и ИЗВ-3, устроенные по типу толщесмера Аббе. При работе на вертикальном длиномере ИЗВ-2, оптическая схема которого приведена на рис. 5, измерительный стержень 2 со сферическим наконечником 1 центрируют по сфери-

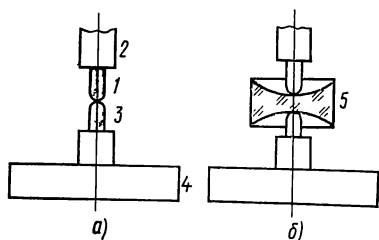


Рис. 22. Применение измерительного стержня при контактном измерении толщин линз

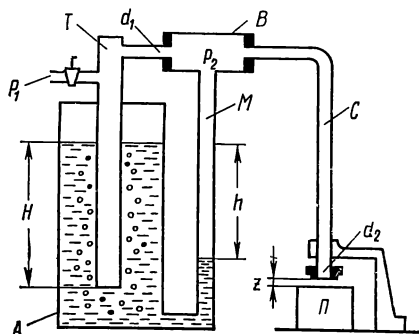


Рис. 23. Принципиальная схема пневматического толщесмера

ческой головке 3 дополнительного приспособления 4 (рис. 22, а), помещенного на предметный стол прибора. Перемещая дополнительное приспособление, отыскивают по шкале отсчетного устройства экстремальное значение отсчета, соответствующее правильной центрировке наконечников и совмещению их осей. Затем приподнимают измерительный стержень и устанавливают измеряемую линзу 5 между сферическими головками стержня и приспособления (рис. 22, б) и центрируют ось линзы, добиваясь получения экстремального отсчета по шкале. Разность между средними значениями отсчетов по шкале, взятых с линзой и без нее, есть толщина линзы.

Бесконтактный способ измерения толщин линз, пластин и других оптических деталей с помощью пневматического толщесмера основан на измерении давления воздуха в камере прибора. Шкала манометра градуируется в зависимости от отношения диаметров входного и выходного отверстий сопел при постоянном давлении потока воздуха. Давление воздуха в камере В меняется (рис. 23) при изменении диаметра выходного отверстия сопла или зазора между поверхностью измеряемой детали II и выходным отверстием сопла. Разность h уровней воды в сосуде А и в трубке манометра М служит мерой величины z .

Величина h с точностью, достаточной для практических целей, определяется по формуле

$$h = \frac{H}{1 + (S_2/S_1)^2},$$

где H — высота столба воды в трубке T , автоматически поддерживаемая постоянной; S_1 — площадь поперечного сечения входного отверстия сопла; S_2 — площадь кольцевого зазора z .

Так как $S_1 = \pi d_1^2/4$ и $S_2 = \pi d_2 z$, то

$$h = \frac{H}{1 + (4d_2 z/d_1^2)^2},$$

где d_1 и d_2 — диаметры входного и выходного отверстий сопл.

В зависимости от изменения зазора z составляют график передаточных отношений перемещения уровня жидкости по шкале манометра, градуированной в микрометрах.

Пневматический толщемер (см. рис. 23) состоит из наполненного водой сосуда A и камеры B , которая соединена с трубкой T и манометром M . Через верхнюю часть трубки, диаметр которой d_1 , подается от компрессора поток воздуха, благодаря чему в трубке T автоматически устанавливается постоянное давление, равное высоте H столба. Обычно давление равно 500 или 1000 мм. Шкала манометра практически равномерна на участке 250—400 мм. Передаточное отношение на таком участке находится в пределах 2500—5000.

Измерение толщины детали сводится к сравнению ее с образцовой деталью, толщина которой предварительно определена на другом высокоточном измерительном приборе. Отмеченный отсчет по шкале манометра для образцовой детали при некотором зазоре z принимается за начальный. Последовательно устанавливая детали, толщина которых отличается от образцовой, получают различные зазоры, что приводит к изменению показания манометра, фиксируемые по его шкале. Точность измерения толщины детали 1—2 мкм.

К оптическим толщемерам, применяемым при бесконтактном способе контроля, можно отнести автоколлимационный оптический толщемер ЛО ЦНИИГАиК и микрометр оптический бесконтактный ОБМ-2, разработанный в ГОИ им. С. И. Вавилова.

Оптический толщемер (рис. 24) состоит из двух автоколлимационных микроскопов M_1 и M_2 , закрепленных на вертикальной стойке. Микроскоп M_1 передвижной и соединен с индикатором, по которому можно отсчитать величину его перемещения. Микроскоп M_2 неподвижен и для удобства наблюдений имеет излом оптической оси.

В начале измерений подвижной микроскоп перемещают до получения в поле зрения резкого изображения перестия нитей неподвижного микроскопа (контролируемая деталь $З$ удалена), затем добиваются совмещения изображений перекрестия обоих микроскопов, устанавливая тем самым их визирные оси на одну линию. Отсчет, взятый по индикатору при таком положении микроскопов, слу-

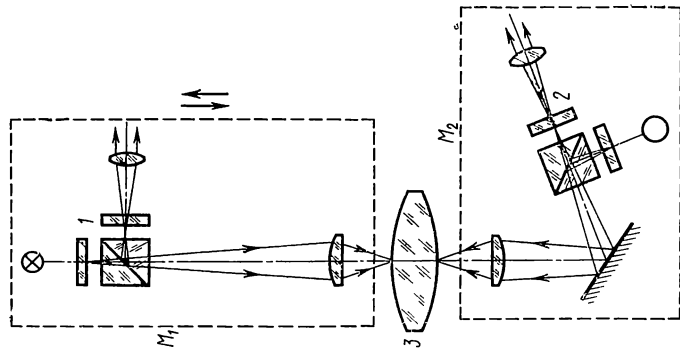


Рис. 24. Схема оптического
толщесмера

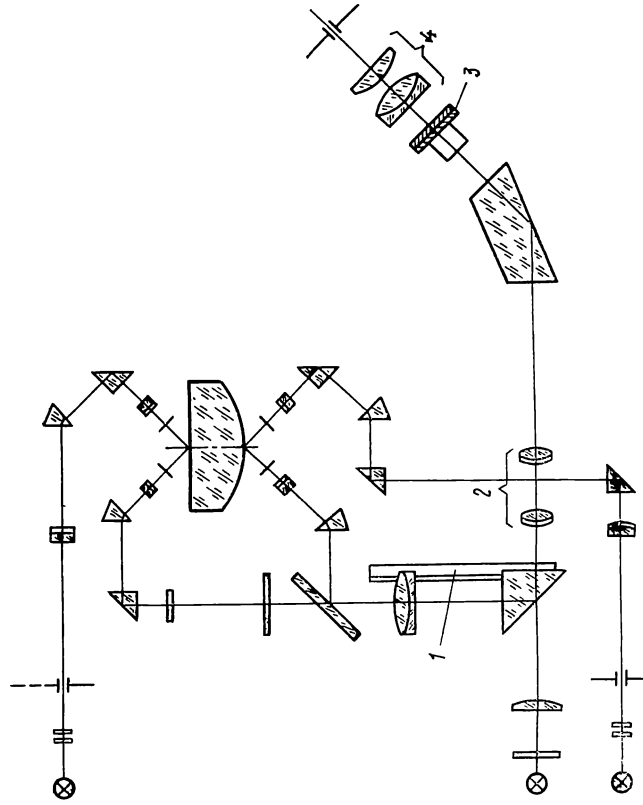


Рис. 25. Схема бесконтактного оптического микрометра

жит начальным (нулевым). После этого устанавливают контролируемую линзу 3 над отверстием подвижного предметного столика и закрепляют в положении, при котором в поле зрения микроскопа M_2 наблюдается автоколлимационное изображение перекрестия пластинки 2 от нижней поверхности линзы. Перемещая микроскоп M_1 , фокусируют его на автоколлимационное изображение перекрестия пластинки 1, полученное при отражении лучей от верхней поверхности детали 3, и берут второй отсчет по индикатору. Разность

между двумя отсчетами равна толщине линзы. Точность определения толщины 0,02—0,03 мм.

Если поверхности контролируемой детали неполированы или непрозрачны, то вместо автоколлимационных изображений перекрестий наблюдают изображения самих поверхностей.

Микрометр оптический бесконтактный ОБМ-2 имеет более сложную конструкцию по сравнению с автоколлимационным оптическим толщимером. Он предназначен для измерения толщин положительных линз и изделий из твердых и мягких материалов с предельной погрешностью $\pm 0,004$ мм. Предел измерения на

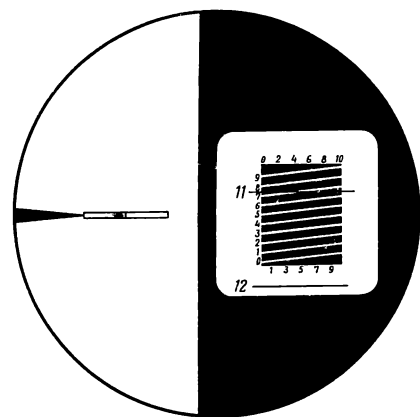


Рис. 26. Поле зрения бесконтактного оптического микрометра

приборе 50 мм, цена деления образцовой шкалы 1 мм, точность отсчета по растровой сетке (трансверсальной) 0,001 мм.

Оптическая схема прибора, изображенная на рис. 25, содержит два двойных микроскопа Линника с общим полем зрения на сетке 3, в котором наблюдают построенные отраженными от поверхностей контролируемой детали лучами изображения двух щелей, изображение образцовой шкалы 1 и через микрообъектив 2 — изображение трансверсальной сетки. Контролируемая линза должна быть центрирована; для этого перемещают столик прибора с линзой до положения, при котором в поле зрения окуляра 4 происходит симметричная смена изображения щелей друг относительно друга в противоположных направлениях. Совместив изображения щелей в одну линию и с индексом сетки (рис. 26), берут отсчет миллиметров по образцовой шкале, один штрих которой располагается на трансверсальной сетке, а десятые, сотые и тысячные доли миллиметра — по сетке. Десятые доли миллиметра оценивают отрезком по вертикальной линии от миллиметрового штриха до нулевого (на рис. 26 он равен 0,7 мм), сотые и тысячные доли миллиметра берут по горизонтальной линии по месту пересечения косо́го биссектора миллиметровым штрихом, что на рис. 26 соответствует положению штриха между третьим и четвертым делениями сетки. Окончательный отсчет равен 11,733 мм.

Толщины можно измерять как методом сравнения, так и абсолютным методом. Если измерения проводят методом сравнения, то при отклонении толщины контролируемой детали от образцовой на некоторое значение Δh в поле зрения прибора изображение одной щели по отношению другой сместится на отрезок $a = \sqrt{2} \beta \Delta h$, где β — увеличение объектива микроскопа.

Искомая величина отклонения по толщине находится по формуле

$$\Delta h = a / (\sqrt{2} \beta).$$

§ 10. Измерение толщин тонких пленок

Тонкие пленки находят широкое применение в оптике, например для просветления поверхностей оптических деталей, деления светового пучка на отраженный и проходящий с помощью полупрозрачных покрытий, для получения асферических поверхностей методом вакуумной асферизации, в интерференционных светофильтрах. Качество и эффективность действия тонких пленок зависят от их толщины, условий изготовления и от показателя преломления наносимого вещества.

Замечено, что структура тонких пленок при малых толщинах сильно отличается от структуры толстых слоев. Тонкие пленки могут быть изготовлены несколькими способами: катодным распылением, термической возгонкой, электролитическим и химическим осаждением и анодным окислением. При контроле пленок определяют геометрическую (h) или оптическую (d) толщину, причем $d = hn$, где n — показатель преломления вещества слоя.

При измерении толщины пленок используют различные методы: визуальные, механические, электрические и оптические (фотометрический, интерференционный и поляризационный). Выбор метода зависит от назначения слоя, его толщины, точности измерения и имеющегося в распоряжении оборудования. Наибольшее распространение для измерения толщины многослойных покрытий получил фотометрический метод с фотоэлектрической регистрацией [29, 30]. Особый интерес представляет метод непрерывного контроля толщины пленок в процессе их изготовления. С этой целью чаще всего применяют интерференционный метод, так как поляризационный метод требует сложного оборудования и перестройки измерительной системы.

Фотометрический метод. Фотометрический метод является наиболее простым для определения оптических характеристик прозрачных пленок, нанесенных на поверхность прозрачных подложек. В основе этого метода лежит измерение коэффициентов отражения ρ или пропускания τ , которые являются главными характеристиками пленок.

При определении толщин однослойных или двуслойных пленок, наносимых для просветления оптических деталей, измеряют спектральный коэффициент отражения ρ_λ для некоторых длин волн выбранного участка спектра или интегральный коэффициент отра-

жения. Для интерференционных светофильтров и многослойных покрытий измеряют коэффициент пропускания, для светоделительных слоев — коэффициенты отражения и пропускания.

При определении толщины непрозрачных слоев целесообразно использовать интерференционный метод.

Коэффициент отражения однослойного просветляющего покрытия оптической детали при нормальном падении света определяется выражением

$$\rho = \rho_{13}^2 = \frac{\rho_{12}^2 + \rho_{23}^2 + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos(-\Delta_{12} + \Delta_{23} - (4\pi n_2 h_2)/\lambda)}{1 + \rho_{12}^2 \rho_{23}^2 + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos(\Delta_{12} + \Delta_{23} - (4\pi n_2 h_2)/\lambda)}, \quad (19)$$

где ρ_{12} и ρ_{13} — амплитуды отраженных пучков лучей (рис. 27); Δ_{12} и Δ_{13} — скачки фаз на границах раздела воздух — слой и слой — подложка (стекло); n_2 — показатель преломления вещества пленки; h_2 — геометрическая толщина пленки; $n_2 h_2$ — ее оптическая толщина.

Амплитуды отраженных пучков лучей определяются выражениями:

$$\rho_{12} = |(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)|, \quad \rho_{23} = |(n_2 - n_3)/(n_2 + n_3)|,$$

где n_1 и n_3 — показатели преломления соответственно воздуха и подложки (стекла).

При переменной оптической толщине пленки и постоянной длине волны падающего света наблюдаются экстремальные значения коэффициента отражения, которые согласно формуле (19) соответствуют оптической толщине пленки $n_2 h_2$, кратной $\lambda/4$, т. е. $n_2 h_2 = (2k + 1)(\lambda/4)$ или $n_2 h_2 = 2k(\lambda/4)$, где k — волновое число, равное 1, 2, 3, ...

При $n_2 < n_3$ экстремальные значения ρ определяются формулами

$$\rho_{\min} = [(n_2^2 - n_1 n_3)/(n_2^2 + n_1 n_3)]^2, \quad \rho_{\max} = [(n_3 - n_1)/(n_3 + n_1)]^2;$$

при $n_2 > n_3$

$$\rho_{\min} = [(n_3 - n_1)/(n_3 + n_1)]^2, \quad \rho_{\max} = [(n_2^2 - n_1 n_3)/(n_2^2 + n_1 n_3)]^2.$$

Из уравнения $\rho_{\min} = [(n_2^2 - n_1 n_3)/(n_2^2 + n_1 n_3)]^2$ находим n_2 при известном n_3 подложки:

$$n_2 = n_1 n_3 (1 + \sqrt{\rho_{\min}})/(1 - \sqrt{\rho_{\min}}).$$

Геометрическую толщину пленки h_2 находим, учитывая соотношения $n_2 \leq n_3$ для λ , соответствующих экстремальным значениям ρ .

Погрешность в определении показателя преломления слоя составляет $5 \cdot 10^{-3}$ при измерении ρ с погрешностью порядка 0,1%.

Спектрометрические измерения коэффициента отражения тонкой пленки в области спектра 0,25—1,1 мкм можно осуществить с помощью спектрофотометра Сф-4 со специальной зеркальной насадкой ФМ-40; измерения в области 0,4—1,0 мкм — на универсальном монохроматоре УМ-2 (рис. 28).

Испытуемый слой, нанесенный на клиновидную пластинку 1, помещают за выходной щелью 2 монохроматора 3 в такое положение, чтобы угол падения пучка лучей на поверхность образца не превышал 15° . Входная щель 4 монохроматора освещается источником света 5. Пучок лучей, отраженный от испытуемой поверхности, попадает на селеновый фотозэлемент, 7, соединенный с гальванометром 6, по шкалы которого и берут соответствующий

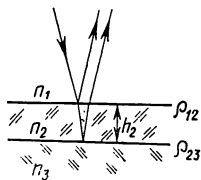


Рис. 27. К измерению коэффициента отражения слоев

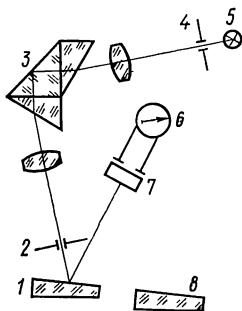


Рис. 28. Схема универсального монохроматора УМ-2

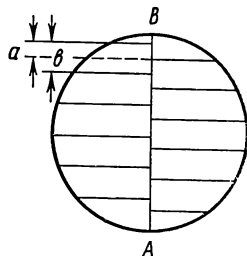


Рис. 29. К контролю толщин пленок методом смещения интерференционных полос равной толщины

отсчет A . Значение ρ находят сравнением с непросветленным эталоном 8, изготовленным из стекла с известным показателем преломления и устанавливаемым на место испытуемого образца. Получают второй отсчет A_2 на шкале гальванометра для пучка лучей, отраженного от эталона.

Коэффициент отражения испытуемого слоя

$$\rho = A_1 \rho_0 / A_2,$$

где ρ_0 — коэффициент отражения эталонной поверхности.

Интерференционный метод*. Интерференционный метод основан на измерении смещения интерференционных полос равной толщины, образованных в воздушном клине между поверхностями испытуемого слоя и пробного стекла. При применении интерферометра ИПП-15 (см. рис. 56) или интерференционного компаратора Кёстерса воздушный клин образован испытуемым слоем и мнимой оптической плоскостью.

Испытуемый слой наносят только на одну половину стеклянной пластинки. Для исключения фазовых скачков, имеющих место при отражении лучей на границе диэлектрик-металл и уравнивания коэффициентов отражений, всю поверхность пластинки покрывают от-

* Написан Д. Т. Пуряевым.

ражающим слоем. При этом коэффициент отражения повышается до 95%, а профиль поверхности сохраняется. На поверхность пробного стекла наносят полупрозрачный слой. На рис. 29 видно смещение

полос испытуемого слоя (слева) по отношению к полосам на чистом стекле (справа). Вершина воздушного клина расположена в точке *A*. С уменьшением угла клина при нажатии в точке *B* полосы расширяются и двигаются к вершине клина. Геометрическая толщина пленки в долях полосы определяется формулой

$$h = (a/b)(\lambda/2),$$

где *a* — величина смещения полосы; *b* — ширина полосы; λ — длина волны света. Точность определения *h* около 0,05 λ .

Интерференционный метод позволяет контролировать толщину пленок прозрачных и непрозрачных слоев в процессе нанесения их в вакууме [56], что имеет важное значение при изготовлении асферических поверхностей методом вакуумной асферизации.

В МВТУ им. Н. Э. Баумана разработан интерферометр, принципиальная схема которого изображена на рис. 30. Здесь

Рис. 30. Оптическая схема интерферометра с вакуумной установкой, используемой в процессе нанесения пленок

1 — испаритель, 2 — плита вакуумной установки, 3 — колпак, 4 — маска, 5 — асферизируемая деталь. Элементы 6—20 образуют собственно интерферометр: 6 — контрольная пластинка, 7 — экран, 8 — плоскопараллельная пластинка, 9 и 10 — одинаковые линзы, фокусы которых F_9 и F_{10} расположены в плоскости контрольной пластинки, 11 — разделительный призмный блок, 12, 16, 18 — линзы, 13, 17 — диафрагмы, 14 — фотоэлемент, 15 — регистрирующее устройство, 19 — зеркало, 20 — гелий — неоновый лазер. На рисунке ин-

терферометр изображен повернутым на 90° ; фактически его эталонная и рабочая ветви расположены симметрично относительно испарителя. Головная часть интерферометра (элементы 6—10) состоит из двух одинаковых ветвей, любая из которых может быть рабочей или эталонной. В интерферометре предусмотрено механическое устройство, позволяющее в нужный момент открывать или закрывать окна, через которые испаряемое вещество попадает на контрольную пластинку и осаждается на небольших участках в окрестностях точек F_9 и F_{10} . На поверхность контрольной пластинки, обращенную внутрь интерферометра, предварительно наносится зеркальное покрытие.

Если рабочего вещества нет, то оптические пути в обеих ветвях интерферометра постоянны, и на чувствительной площадке фотоэлемента 14 возникает интерференционная картина в виде колец. Нанесение вещества в точке F_9 (точка F_{10} переключается) вызывает изменение разности хода в ветвях интерферометра, что в свою очередь, вызывает изменение освещенности в центре интерференционной картины. При изменении разности хода на половину длины волны света, используемого в интерферометре, освещенность в центре интерференционной картины изменится на противоположную, т. е. темное пятно становится светлым, или наоборот. Число изменений освещенности в центре интерференционной картины, соответствующее толщине t непрозрачного слоя, равно числу половин длин волн λ , уложившихся в разности хода $2t$, т. е.

$$m = 4t/\lambda, \quad (20)$$

а для прозрачного слоя с показателем преломления n

$$m = [4(n - 1)t]/\lambda. \quad (21)$$

Диапазон измерения толщин зависит от монохроматичности источника света, и в случае применения оптического квантового генератора практически не ограничен.

Очевидно, что минимальная толщина слоя t_{\min} , которая еще может быть измерена по интерференционным кольцам, определяется по формулам (20) и (21) при $m=1$. Для непрозрачных веществ при $\lambda=0,633$ мкм получаем $t_{\min}=0,16$ мкм. Из формулы (21) следует, что при переходе от измерения непрозрачных к измерению прозрачных веществ с $n>2$ чувствительность прибора возрастает. Например, для сульфида цинка ($n=2,315$ при $\lambda=0,633$ мкм) имеем $t_{\min}=0,12$ мкм, что вполне достаточно для метода вакуумной асферизации.

При нанесении вещества на контрольную пластинку интерференционные полосы (дуги колец) перемещаются в плоскости приемного окна фотоэлемента 14 (рис. 30). Регистрация перемещений интерференционных полос более проста и надежна, чем регистрация изменений освещенности в центре интерференционной картины, полученной в виде колец. Смещение интерференционной полосы на четверть ее ширины (половина светлой или темной полосы) уверен-

но регистрируется; таким образом, точность контроля может быть повышена в два раза.

Собственно процесс контроля сводится к регистрации перемещений интерференционных полос, что осуществляется с помощью автоматического регистрирующего устройства. Это дает возможность непрерывно контролировать толщину наносимых слоев с высокой точностью и в широком диапазоне. Лучи света между линзами 9 и 10 и призмённым блоком 11 параллельны, поэтому детали 6—10 можно расположить под колпаком вакуумной установки, а остальную часть интерферометра — вне ее. Так как эталонная и рабочая ветви интерферометра расположены параллельно и близко друг к другу и с оптической точки зрения совершенно одинаковы, то влияние вибраций, температуры и других внешних факторов вызывает одинаковые изменения в обеих ветвях, т. е. интерферометр относится к типу нерасстраивающихся приборов. Линзы 9 и 10 наклеены на кварцевую плоскопараллельную пластинку 8, необходимую для обеспечения вакуума. Фокусные расстояния линз 9 и 10 равны 120 мм. Длина корпуса прибора, установленного под колпаком вакуумной установки, 530 мм, диаметр головной части корпуса 55 мм.

§ 11. Измерение радиусов кривизны сферических поверхностей

Измерение радиусов кривизны сферических поверхностей и проверка их формы — важная и обязательная контрольная операция при изготовлении оптических деталей. Отклонение поверхностей от заданной кривизны приводит к нарушению конструктивных характеристик оптических систем и к ухудшению качества изображения. Контролируются радиусы кривизны как рабочего инструмента (грибов и чашек), так и контрольного (пробных стекол), а также поверхностей линз в процессе их изготовления. В цеховых условиях проверка радиуса кривизны грибов и чашек осуществляется с помощью плоских шаблонов, изготовленных на токарном станке; радиусов кривизны шлифованных линз — притиркой их к чашке или с помощью индикаторных сферометров, полированных линз — методом пробного стекла. Радиусы кривизны шариковых пробных стекол диаметром до 37,5 мм измеряют винтовыми микрометрами, пробные стекла с радиусом кривизны от 37,5 до 750 мм — на кольцевом сферометре ИЗС-7, стекла, радиус кривизны которых от 750 до 5000 мм — методом автоколлимации из центра кривизны и свыше 5000 — методом колец Ньютона.

Очень большие радиусы кривизны (несколько сотен метров или километров), образовавшиеся в результате недостаточно точной шлифовки и полировки деталей с плоскими поверхностями, удобнее измерять методом автоколлимации.

Для измерения радиусов кривизны сферических поверхностей в лабораторной практике используют ряд методов, целесообразность применения которых зависит от величины радиуса, требуемой точности измерения и наличия соответствующего оборудования. Напри-

мер, метод диэдров применяют для измерения радиусов кривизны выпуклых сферических и цилиндрических поверхностей, метод касательных сфер — для вогнутых и выпуклых сферических поверхностей, метод Моффита или сферометр с подвижными салазками — для сферических, цилиндрических и асферических поверхностей, метод зеркального отражения — для выпуклых сферических поверхностей [1], теневой метод — для вогнутых поверхностей [45].

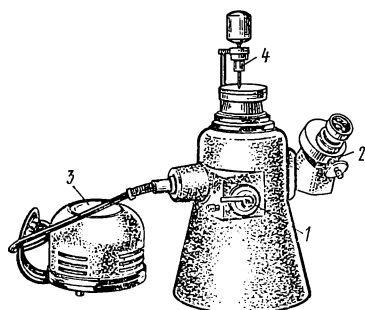
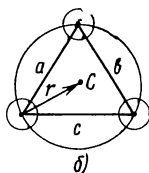
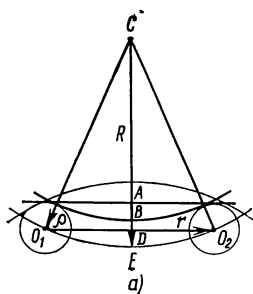


Рис. 31. Измерение стрелки прогиба на кольцевом сферометре

Рис. 32. Общий вид сферометра ИЗС-7

Кольцевой сферометр. Измерения на кольцевом сферометре ИЗС-7 сводятся к определению стрелки прогиба h контролируемой поверхности и вычислению радиуса кривизны R по формуле (22), полученной из рис. 31, а, где R — искомый радиус кривизны выпуклой поверхности; r — радиус кольца и ρ — радиус шарика. Из элементарных геометрических соотношений находим

$$R = (r^2 + h^2)/(2h) \pm \rho, \quad (22)$$

где знак минус берут для выпуклой поверхности, плюс — для вогнутой.

Среднюю квадратическую погрешность измерения радиуса кривизны одной поверхности вычисляют по формуле

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{r}{h}\right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{h^2 + r^2}{2h^2}\right)^2 \sigma_h^2 + \sigma_\rho^2}.$$

Радиус r кольца с шариками, как и радиус ρ самих шариков, аттестуются заводом-изготовителем с высокой точностью. Радиус кольца определяют с помощью универсального измерительного микроскопа или горизонтального компаратора путем измерения сторон a , b и c треугольника, в вершинах которого расположены центры шариков (рис. 31, б). Вокруг точек касания шариков с плоской поверхностью пластинки, наложенной на них, наблюдают кольца Ньютона, центры которых расположены в точках касания. Это дает возможность точно измерить отрезки a , b и c .

$$r = abc / (4 \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}),$$

где $s = (a+b+c)/2$.

Кольцевой сферометр ИЗС-7 (рис. 32) предназначен для измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых сферических поверхностей пар пробных стекол с радиусами 37,5—750 мм и отдельных линз и зеркал с радиусами 10—1000 мм. Предельная погрешность измерения $\pm 0,02\%$.

Сферометр снабжен набором из семи сменных колец, диаметры которых 15, 21, 30, 42, 60, 85 и 120 мм. Внутри литого металлического корпуса находится измерительный стержень со стеклянной миллиметровой шкалой длиной 30 мм. Под действием противовеса измерительный стержень поднимается вверх и его сферический наконечник соприкасается с поверхностью контролируемой детали.

Для опускания измерительного стержня вниз служит рычаг — арретир 1. Отсчет по шкале производится с помощью отсчетного микроскопа со спиральным окуляр-микрометром 2 с ценой деления 0,001 мм. Увеличение микроскопа 62 \times . Измерительная шкала освещается лампочкой 3,5 В, включаемой в сеть через трансформатор 3.

Для измерения радиуса кривизны поверхности выбирают из набора кольцо, диаметр которого на 5—10 мм меньше диаметра контролируемой детали и насаживают его на верхнюю полированную площадку корпуса сферометра. Соприкасающиеся поверхности кольца и площадки корпуса, а также рабочие поверхности шариков и детали должны быть тщательно очищены кисточкой от пыли и загрязнений. На шарики кольца накладывают последовательно плоское стекло, прилагаемое к сферометру, и контролируемую линзу. Освободив арретир измерительного стержня, следят за его соприкосновением с поверхностью линзы и пластинки. Если контролируемая деталь имеет массу и измерительный стержень выталкивает ее, то сверху деталь прижимают упором 4 (рис. 32). Перемещая линзу по кольцу, берут каждый раз отсчет по измерительной шкале и микрометру. Эту операцию повторяют несколько раз как для линзы, так и для плоского стекла. Разность отсчетов при наложении линзы и плоского стекла и есть величина стрелки прогиба h , подставляя которую в формулу (22), определяют искомый радиус кривизны R .

При измерении радиуса кривизны пары пробных стекол применение плоского стекла не требуется. Разность двух отсчетов при наложении выпуклой, а затем вогнутой поверхностей есть удвоенная величина стрелки прогиба $2h$.

Радиус кривизны пары пробных стекол

$$R = (r^2/4)(1/h_1 + 1/h_2) + (h_1 + h_2)/4.$$

Для предварительного расчета стрелки прогиба при заданном радиусе кривизны пары пробных стекол используют формулу

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2}.$$

Кольцевой сферометр ИЗС-7 может быть приспособлен для измерения радиусов кривизны цилиндрических поверхностей. Для этого кольца с тремя шариками заменяют кольцами с двумя направляющими, несущими по два опорных шарика. Точность измерения радиуса кривизны $\pm 0,025\%$.

В табл. 7 приведен пример измерения радиуса кривизны выпуклой поверхности радиусом $R \approx 177,5$ мм. Радиус кольца $r = 42,467$ мм, радиус шарика $\rho = 5,148$ мм.

Таблица 7

№ при- ема	Отсчет, мм		h , мм	h^2	$2h$, мм	R , мм
	Плоское стекло	Сфериче- ская по- верхность				
1	15,6048	10,5983	5,0065	25,065	10,0130	177,467
2	15,6044	10,5982	5,0062	25,062	10,0124	177,760
3	15,6046	10,5982	5,0064	25,064	10,0128	177,707
4	15,6047	10,5981	5,0066	25,066	10,0132	177,638
5	15,6046	10,5982	5,0064	25,064	10,0128	177,707
Среднее	15,6046	10,5982	5,0064	25,064	10,0128	177,656

Автоколлимационный метод. Автоколлимационный метод основан на зеркальном отражении лучей, идущих из центра кривизны полированной поверхности. Этим методом можно измерять радиусы кривизны сферических поверхностей от 0,5 мм до нескольких километров.

Для измерения малых радиусов кривизны (от 0,5 до 100 мм) вогнутых и выпуклых сферических поверхностей используют автоколлимационные микроскопы, которые в случае вогнутых сферических поверхностей могут быть применены для измерения радиусов 5000 мм и более.

В последнем случае вместо микроскопов проще использовать автоколлимационные окуляры. Для вогнутых поверхностей с радиусами кривизны 500—5000 мм удобно использовать длиномерные измерительные машины. Для выпуклых сферических поверхностей с радиусами 50—500 мм требуются длиннофокусные микроскопы или зрительные трубы с насадочными объективами. При измерении больших радиусов кривизны сферических поверхностей, мало отличающихся от плоских поверхностей, применяют автоколлимационные зрительные трубы с длиннофокусными объективами (1500—2000 мм).

Измерения сводятся к определению разности отсчетов для двух положений окуляра зрительной трубы, сфокусированной на бесконечно удаленный предмет и на автоколлимационное изображение перекрестия окуляра, которое получают от поверхности контролируемой детали, помещенной перед объективом трубы.

Измерение малых радиусов кривизны. Малые радиусы кривизны выпуклых и вогнутых сферических поверхностей измеряют с помощью автоколлимационных микроскопов, снабженных объективами с числовой апертурой не более 0,2. Для выпуклых поверхностей рабочие расстояния объективов микроскопов должны быть больше измеряемых радиусов кривизны.

Микроскопы должны иметь отсчетные устройства с ценой деления 0,01—0,001 мм для определения величин перемещений контролируемой детали или микроскопа.

В начале работы деталь центрируют, для чего, наблюдая в микроскоп, вращают микрометрический винт и перемещают линзу вручную в положение, при котором автоколлимационное изображение перекрестия окажется неподвижным. Чтобы отчетливо видеть поверхность детали, необходимо посыпать ее порошком мела или пудрой.

Процесс измерения состоит из двух фокусировок (наводок): на автоколлимационное изображение перекрестия и на поверхность детали. При наведении на выпуклую поверхность микрометрический винт с линзой удаляется от объектива микроскопа (рис. 33, а), при наведении на вогнутую поверхность — приближается (рис. 33, б) до совмещения с предметной плоскостью микроскопа. Разность отсчетов двух положений линзы составит искомый радиус кривизны R .

Точность измерения R зависит от точности отсчетных устройств

и чувствительности продольной наводки. Она находится в пределах 0,1—0,01% для R от 1 до 50 мм и 0,01—0,001% для R от 50 до 5000 мм.

Для расширения диапазона контролируемых радиусов кривизны выпуклых сферических поверхностей от 10 до 380 мм и повышения точности их измерения применяют автоколлимационный прибор с увеличенной за счет разделения пучка лучей на два [49] апертурой. Этот же прибор можно использовать для измерения радиусов кривизны цилиндрических и торических поверхностей.

Оптическая схема прибора изображена на рис. 34. Пучок лучей от источника 1 через светофильтр 2 и конденсор 3 освещает щель диафрагмы 4, расположенной в фокусе коллиматорного объектива 6, за которым помещен объектив 7 с фокусным расстоянием, обеспечивающим измерение в нужном диапазоне радиусов кривизны.

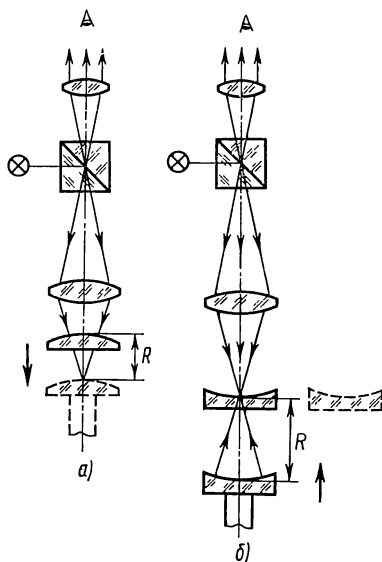


Рис. 33. Оптическая схема автоколлимационного микроскопа для измерения радиусов кривизны выпуклой поверхности (а) и вогнутой поверхности (б)

Прямоугольная призма 8 делит падающий на нее пучок света на две части и направляет их на плоские зеркала 9, установленные под заданным апертурным углом. После отражения от зеркал пучки лучей падают на поверхность контролируемой детали 10 и, меняясь местами, идут в обратном направлении через объективы 7 и 6 до полупрозрачного зеркала 5. Отражаясь от зеркал 5, 13 и 11,

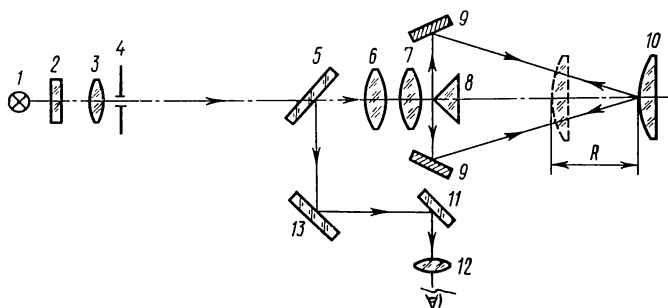


Рис. 34. Оптическая схема автоколлимационного прибора с увеличенной апертурой

пучки лучей образуют два автоколлимационных изображения щели, наблюдаемых в поле зрения окуляра 12. Контролируемую деталь перемещают вдоль направляющих прибора до совмещения ее поверхности с фокальной плоскостью объектива 7. В момент совмещения два автоколлимационных изображения щели сольются. После этого деталь приводят в положение, при котором два пучка лучей, отраженных от поверхности детали, идут обратно в направлениях, совпадающих с нормальными поверхностями. При этом автоколлимационные изображения щели также должны слиться. Разность отсчетов, взятых с помощью отсчетного микроскопа по шкале направляющих измерительной машины, на которой смонтирован прибор, при двух положениях детали составит величину искомого радиуса кривизны R .

Цена деления отсчетного микроскопа 0,001 мм. Точность измерения радиуса кривизны выпуклой сферической поверхности $\pm 0,01\%$.

Измерение больших радиусов кривизны. Автоколлимационный метод измерения больших радиусов кривизны основан на фокусировке зрительной трубы, осуществляемой перемещением ее окуляра. При этом фокусное расстояние объектива автоколлимационной зрительной трубы должно быть точно известно.

Пусть на рис. 35 точка F_1' — задний фокус объектива O автоколлимационной трубы, установленной на бесконечность по удаленному предмету или методом автоколлимации путем совмещения перекрестия с его автоколлимационным изображением, полученным при отражении лучей от плоского зеркала Π , поставленного перед объективом трубы.

Заменяя плоское зеркало испытуемой деталью с выпуклой сферической поверхностью и перемещая окуляр, фокусируют трубу на резкое видение автоколлимационного изображения перекрестия от поверхности S испытуемой детали. В этом случае пучок лучей, выходящий из объектива трубы, падает на поверхность детали нормально и, отражаясь от нее, в обратном направлении идет из центра сферы (точка C). По шкале и нониусу окуляра определяют величину смещения от положения установки на бесконечность.

Учитывая правило знаков, принятое в геометрической оптике, из рис. 35 находим

$$R = z + f + d, \quad (23)$$

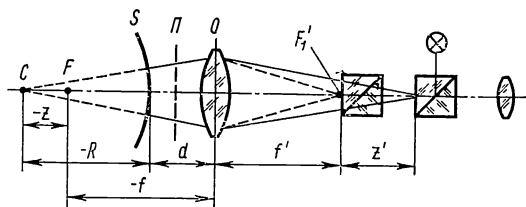


Рис. 35. Изменение больших радиусов кривизны сферических поверхностей с помощью автоколлимационной зрительной трубы

где z — расстояние от переднего фокуса F объектива до центра — точки C ; f — переднее фокусное расстояние объектива автоколлимационной трубы; R — радиус кривизны сферической поверхности; d — расстояние от вершины сферической поверхности до передней главной плоскости объектива.

Для практических целей достаточно измерить расстояние d между вершиной сферической поверхности и внешней поверхностью объектива.

Применяя формулу Ньютона $zz' = -f'^2$ и подставляя в нее выражение (23), находим

$$z'(R - d + f') = -f'^2, \quad (24)$$

откуда для выпуклой сферической поверхности имеем

$$-R = f'^2/z' + f' - d. \quad (25)$$

При измерении радиуса кривизны вогнутой сферической поверхности окуляр нужно вдвинуть на величину z' , тогда формула (25) принимает вид

$$R = -f'^2/z' - f' + d. \quad (26)$$

где $z' < 0$.

При измерении очень больших радиусов кривизны значениями d и f' в формулах (25) и (26) можно пренебречь, тогда

$$R = |f'^2/z'|.$$

Точность определения R зависит от погрешностей фокусировки трубы на автоколлимационные изображения и погрешностей отсче-

тов по шкале и нониусу механизма перемещения окуляра. Например, если объектив трубы имеет фокусное расстояние $f' = 2000$ мм, величина z' измерена с погрешностью $dz' = 0,01$ мм для $R = 2000$ м, то, используя формулу

$$dR = \frac{f'^2}{z'} dz',$$

получаем $dR = \pm 10$ мм, что соответствует относительной погрешности 0,5%.

Интерференционный метод. Интерференционный метод измерения радиусов кривизны сферических поверхностей основан на применении пробного стекла и подсчету числа колец, образованных в тонком слое воздуха между поверхностями контролируемой детали и пробного стекла [19].

Наложение пробного стекла нередко приводит к образованию царапин и выколов на проверяемой поверхности, поэтому более рационально использовать интерферометры, в которых «пробным стеклом» служит эталонная поверхность, не соприкасающаяся с контролируемой.

Бесконтактный интерференционный метод. Отечественная промышленность выпустила небольшими партиями четыре вида интерферометров с совмещенными ветвями: КЮ-210, КЮ-211, ИТ-148 и ИТ-154 для бесконтактного контроля и определения радиусов кривизны сферических поверхностей. Интерферометры ИТ-154 и КЮ-210 предназначены для контроля выпуклых поверхностей с радиусами соответственно 8—55 мм и 15—330 мм; интерферометры ИТ-148 и КЮ-211 — для контроля вогнутых поверхностей с радиусами 13—60 и 15—60 мм. Принципиальные схемы интерферометров одинаковы, разница состоит в наборах эталонных менисков.

На рис. 36 приведена оптическая схема интерферометра для бесконтактного контроля формы выпуклых сферических поверхностей [32, 34]. Пучок лучей от источника света 1 (ртутная лампа), отраженный от зеркала 2, проецируется конденсорной линзой 3 на диафрагму 4 с круглым отверстием А. После прохождения полупрозрачной пластинки 5 пучок лучей падает на объектив 6, который строит изображение отверстия А в точке А', являющейся центром эталонной вогнутой поверхности S_1 сменного мениска 7 и центром кривизны выпуклой поверхности S_2 контролируемой линзы 8.

В поле зрения окуляра 9 наблюдаются два автоколлимационных изображения светящегося отверстия А, полученные в результате отражения сходящегося пучка лучей от эталонной поверхности S_1 мениска 7 и от поверхности S_2 контролируемой линзы 8. Перемещая линзу 8 вдоль оптической оси, можно сфокусировать изображение отверстия А от поверхности S_2 , а перемещая ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях — совместить с изображением А'' от эталонной поверхности S_1 . Интерференционная кар-

тина наблюдается невооруженным глазом или через телескопическую лупу, сфокусированную на поверхность мениска S_1 .

При совмещении центров кривизны C_1 и C_2 (рис. 37, а) эталонной поверхности S_1 и контролируемой поверхности S_2 интерференционное поле освещено равномерно. В этом случае расстояния между интерферирующими волновыми фронтами в направлении их радиусов кривизны одинаковы во всех точках. Если линзу 8 (см. рис. 36) сместить вдоль оптической оси на величину a (рис. 37, б), то в поле зрения

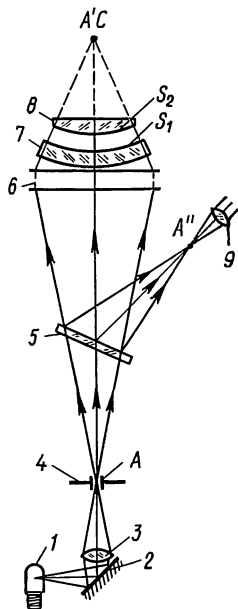


Рис. 36. Оптическая схема интерферометра для бесконтактного контроля формы выпуклых сферических поверхностей

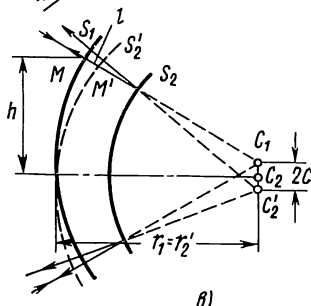
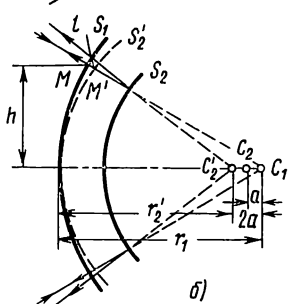
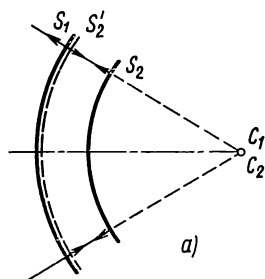


Рис. 37. Автоколлимационные изображения светящегося отверстия A от эталонной поверхности мениска S_1 и контролируемой поверхности линзы S_2 : а — при совмещении центров; б — при смещении центров вдоль оси; в — при смещении центров перпендикулярно оптической оси

прибора возникнет интерференционная картина в виде колец. Пучок лучей, отраженный от поверхности S_1 , сходится в точке C_1 ; отраженный от поверхности S_2 имеет своим центром точку C_2' , находящуюся приблизительно на расстоянии $2a$ от C_1 . Отраженный пучок лучей образует исследуемый волновой фронт S_2' .

Разность хода $\Delta = MM'$ между интерферирующими волновыми фронтами для края поля вычисляется по формуле

$$\Delta = N\lambda = a(h/r_1)^2, \quad (27)$$

где N — число колец, укладываемых от центра до края интерференционного поля; λ — длина волны света; h — расстояние от точки M до оптической оси; r_1 — радиус кривизны поверхности мениска.

Из формулы (27) следует, что число колец определяется величиной a отношением h/r_1 и длиной волны λ . Если сместить контролируемую линзу вдоль оптической оси на величину $\Delta a = 2$ мкм, то при $\lambda = 0,5$ мкм и $h/r_1 = 0,5$ получим $\Delta N = 1$, т. е. число колец в поле зрения изменится на единицу.

При смещении контролируемой линзы на расстояние s в направлении, перпендикулярном оптической оси, интерферирующие волновые фронты S_1 и S_2 (рис. 37, в) образуя небольшой угол. На поверхности мениска наблюдаются прямые интерференционные полосы, направленные перпендикулярно линии, соединяющей точки C_1 и C_2 .

Разность хода Δ' между интерферирующими волновыми фронтами на краю поля вычисляется по формуле

$$\Delta' = N'\lambda = 4hc/r_1,$$

где N' — число полос в поле зрения.

Для изменения в поле зрения числа полос на единицу при $\lambda = 0,5$ мкм и $h/r_1 = 0,5$ нужно контролируемую линзу сместить перпендикулярно оптической оси на величину $\Delta c = 0,25$ мкм. Получение прямых полос позволяет обнаружить малые местные ошибки и измерить их величину.

При смещении контролируемой линзы вдоль и перпендикулярно оптической оси интерференционная картина представляет собой дуги окружностей с общим центром, сдвинутым относительно центра поля зрения.

Бесконтактный интерференционный метод позволяет путем сравнения с эталонной линзой быстро контролировать радиусы кривизны. Зная число колец, наблюдаемых в поле зрения прибора вначале от эталонной, а затем от поочередно накладываемых на посадочное место контролируемых линз, можно по формуле (27) вычислить разность радиусов кривизны поверхностей проверяемой и эталонной линз.

При контроле поверхностей с различными радиусами кривизны необходимо вводить поправку, учитывающую глубину посадки линз на кольцо (диаметром D) прибора.

При изменении r на величину Δr смещение a центра кривизны поверхности вдоль оси определяется выражением

$$a = \Delta r (1 + D^2/(8r^2)). \quad (28)$$

Подставляя формулу (28) в (27), получаем

$$\Delta r = \frac{N\lambda}{1 + D^2/(8r^2)} (r_1/h)^2.$$

Если относительное отверстие контролируемой поверхности ограничено диаметром кольца и меньше относительного отверстия мениска, то отношение h/r_1 нужно заменить отношением $D/(2r)$.

В работе [25] проверена возможность применения фотоэлектрической регистрации интерференционных колец. На пути лучей между полупрозрачной пластинкой 5 и окуляром 9 (см. рис. 36) ввели дополнительные зеркало и оптическую систему, направляющую пучок лучей на ФЭУ, связанный с индикаторным устройством.

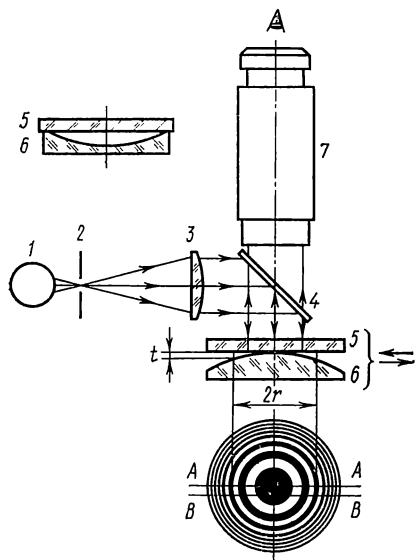


Рис. 38. Измерение больших радиусов кривизны методом колец Ньютона

пучок, падающий нормально к плоскопараллельной пластинке 5, нижняя поверхность которой является эталоном плоскостности. Фокусное расстояние линзы 3 выбирают в зависимости от минимального диаметра диафрагмы 2, угловой размер которой $15-20'$. Удобно использовать линзу 3 с фокусным расстоянием 150—200 мм в сочетании с диафрагмой 2 диаметром 1 мм.

Для получения колец Ньютона на линзу 6 накладывают пластинку 5. Кольца наблюдают с помощью микроскопа 7 в воздушном слое между плоской и сферической поверхностями. Вид поля зрения показан в нижней части рис. 38. Интерференционные кольца имеют темный центр.

Очевидно, что разность хода δ между интерферирующими лучами равна удвоенной величине воздушного слоя t между плоской

Метод колец Ньютона*. Метод применяется для измерения больших радиусов выпуклых и вогнутых сферических поверхностей. Для измерений удобно использовать микроскоп УИМ-21 (рис. 38) с осветительным приспособлением, состоящим из монохроматического источника света 1, диафрагмы 2, линзы 3 и полупрозрачной пластинки 4. Лучи, выходящие из осветительной системы, образуют параллельный

* Написан Д. Т. Пуряевым.

и сферическими поверхностями. Из геометрических соотношений найдем

$$R = r^2 / (2t) + t/2, \quad (29)$$

где R — радиус сферической поверхности; r — радиус сегмента сферы, соответствующий стрелке прогиба.

Так как стрелка прогиба t очень мала при больших R , то без ущерба для точности можно использовать формулу

$$R = r^2 / (2t). \quad (30)$$

Очевидно, что r — радиус интерференционного кольца, соответствующий разности хода $2t$ между интерферирующими лучами. Так как в точке контакта возникает темное пятно, то темные кольца наблюдаются на таких расстояниях от точки контакта, для которых $2t = m\lambda$, где m — целое число (номер интерференционного кольца).

Таким образом, измерив радиус кольца r и зная его номер, по формуле (30) можно вычислить радиус R сферической поверхности. В этом и заключается сущность метода.

При наложении стекол друг на друга в точке контакта имеет место заметная деформация поверхностей, что приводит к несимметричному распределению освещенности в интерференционных кольцах, расположенных близко к точке контакта. Поэтому на практике измерения диаметров колец начинают с четвертого — шестого кольца, а для вычисления R используют эквивалентную формулу

$$R = \frac{D_2^2 - D_1^2}{4\lambda(m_2 - m_1)}, \quad (31)$$

где D_2 и D_1 — диаметры колец соответственно с номерами m_1 и m_2 . Из этой формулы следует, что нет надобности знать собственные номера колец m_2 и m_1 . Для вычисления радиуса R необходимо знать лишь разность $m_2 - m_1$.

Важно заметить, что центрировка линзы относительно оси микроскопа не имеет существенного значения, так как вычисления R по формуле (31), выполняемые по результатам измерений вдоль линий AA или BB (рис. 38), теоретически точно дают одинаковые результаты.

Аналогично измеряют радиус кривизны вогнутой сферической поверхности. Взаимное расположение пластинки 5 и линзы 6 показано в верхней части рис. 38.

Погрешность метода зависит, главным образом, от погрешности установки перекрестия микроскопа на середину интерференционной полосы. Примем эту погрешность равной 0,1 ширины полосы т. е. $dm_2 = dm_1 = 0,1$. Дифференцируя формулу (31), получаем

$$\frac{dR}{R} = - \frac{d(m_2 - m_1)}{m_2 - m_1}. \quad (32)$$

В наиболее неблагоприятном случае

$$\frac{dR}{R} = \frac{dm_1 + dm_2}{m_2 - m_1} = \frac{0,2}{m_2 - m_1},$$

что при $m_2 - m_1 = 50$ соответствует относительной погрешности 0,4%. На практике часто приходится решать вопрос о применимости метода колец Ньютона для измерения больших радиусов кривизны линз. При этом обычно принимают во внимание только величину радиуса R . Между тем применимость метода зависит как от величины R , так и от диаметра детали, т. е. в конечном итоге от минимальной ширины интерференционного кольца. Наиболее узкое кольцо возникает на краю детали. Ширину b этого кольца легко определить, используя преобразованную формулу (31):

$$b = r_2 - r_1 = \frac{R(m_2 - m_1)\lambda}{r_2 + r_1}, \quad (33)$$

где r_2 и r_1 — радиусы интерференционных колец.

Очевидно, что минимальная ширина b_{\min} на краю детали определяется как разность радиусов кривизны последнего и предпоследнего кольца, т. е.

$$b_{\min} = R\lambda/D, \quad (34)$$

где $D = r_2 + r_1$ — диаметр детали, практически равный диаметру последнего интерференционного кольца.

Если b_{\min} меньше разрешающей способности микроскопа, используемого для визуальных наблюдений, то выполнить измерения невозможно. Для измерительных микроскопов апертура микрообъектива мала, поэтому разрешающая способность микроскопа зависит от разрешающей способности глаза. В этом случае предел разрешения

$$\delta = 250\psi'/\bar{F}, \quad (35)$$

где ψ' — разрешающая способность глаза; \bar{F} — видимое увеличение микроскопа.

Пусть, например, радиус кривизны сферической поверхности линзы $R = 1000$ мм; диаметр линзы $D = 20$ мм; длина волны света, используемого для измерения, $\lambda = 0,6$ мкм. По формуле (34) найдем: $b_{\min} = 0,03$ мм. Если разрешающая способность глаза $\psi' = 2' = 0,0006$, то при $\delta = 0,03$ мм по формуле (35) получаем: $\bar{F} = 50\times$. Таким образом, для измерений необходим микроскоп, имеющий $\bar{F} > 50\times$. Число m интерференционных колец, наблюдаемых по всему диаметру линзы, определяется по формуле

$$m = D^2/(4R\lambda).$$

Для рассмотренного примера $m = 167$.

§ 12. Контроль плоскостей оптических деталей

Метод пробного стекла. Отклонение плоских поверхностей оптических деталей от идеальной плоскости влияет на качество изображения, создаваемого оптической системой. Плоские поверхности часто приобретают некоторую сферичность, что вызывает фокусность детали и, как следствие этого, расфокусировку прибора.

Основным и наиболее точным методом контроля плоскостности оптических деталей в настоящее время является интерференционный метод, для реализации которого используют плоские пробные стекла и интерферометры. С помощью пробных стекол можно контролировать поверхности, диаметр которых не превышает 220 мм. Главным недостатком метода является контакт эталонной поверхности с контролируемой, что не исключает повреждение поверхности при наложении пробного стекла. Метод практически не применим для контроля просветленных поверхностей. Однако несмотря на указанные недостатки, он занимает ведущее место в цеховых условиях.

Большим преимуществом метода является простота, надежность и возможность использования на рабочем месте. Плоское пробное стекло первого класса должно иметь высокое качество поверхности, с отклонением от плоскостности не более 0,1 интерференционной полосы или $0,1 (\lambda/2) \approx 0,03$ мкм.

Пробное стекло образцовой поверхностью накладывают на контролируемую поверхность детали, например пластинку, и, нажимая на край верхней пластинки, создают воздушный клин между соприкасающимися поверхностями. В результате интерференции света в воздушном клине образуются полосы равной толщины с разностью хода

$$\Delta = 2h \cos \varepsilon + \lambda/2,$$

где h — толщина клина в данной точке; ε — угол падения луча.

Поверхности пластинок перед наложением должны быть тщательно очищены от пыли и жировых пятен обезжиренной ватой или фланелевой салфеткой, смоченной эфиром или этиловым спиртом.

Форма, величина и знак интерференционных полос характеризуют профиль контролируемой поверхности. Положение ребра воздушного клина определяют нажатием на край верхней пластинки в точке A или B (рис. 39) (если полосы сужаются, то в этом месте находится ребро клина). При расширении полос ребро клина находится противоположно точке нажатия. Если при нажатии на край стекла центр колец сдвигается к месту нажима, то на контролируемой поверхности имеется «бугор», в противоположном направлении — «яма». Выпуклой поверхности приписывают знак плюс, вогнутой — минус.

Неплоскостность поверхности определяется величиной изгиба a , которая выражается в долях ширины полосы b , измеренной при ориентировке полос вдоль двух взаимно перпендикулярных линий AB и CD (рис. 39):

$$\Delta = a (\lambda/2),$$

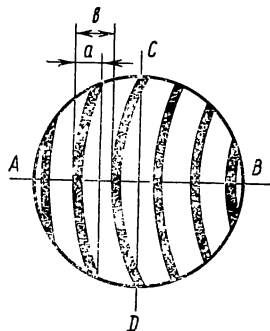


Рис. 39. К методу пробного стекла при контроле плоскостности

где Δ — отклонение от плоскостности; λ — длина волны света (для дневного света берут $\lambda = 0,555$ мкм).

Точность определения неплоскостности зависит от погрешности измерения плоскостности поверхности образцовой пластинки $d\Delta_{об}$, не превышающей $\pm 0,1$ полосы, и погрешности оценки на глаз наибольшего изгиба полосы da , которая в белом свете не превышает $\pm 0,2$ полосы, а при монохроматическом свете $\pm 0,1$ полосы. Средняя квадратическая погрешность определения неплоскостности

$$d\Delta_{\Pi} = \sqrt{d\Delta_{об}^2 + da^2},$$

$$\text{или } d\Delta_{\Pi} = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,2^2} \approx 0,23 \text{ полосы};$$

в линейной мере $d\Delta_{\Pi}(\lambda/2) = 0,23 \cdot 0,27 \text{ мкм} \approx \pm 0,06 \text{ мкм}$.

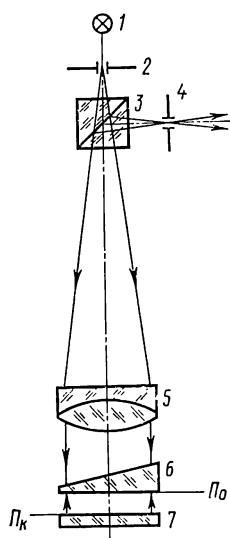


Рис. 40. Оптическая схема интерферометра для контроля плоскостности

Интерферометры. Применение интерферометров для контроля плоскостности поверхностей оптических деталей позволяет избавиться от ряда недостатков, имеющих место при применении пробных стекол, дает возможность расширить диапазон размеров проверяемых деталей и повысить точность измерения. Основной недостаток интерферометров — трудность применения для контроля деталей непосредственно на рабочем месте.

Для контроля плоскостности поверхностей отечественная промышленность выпускает серийно несколько моделей интерферометров с рабочими диаметрами образцовых пластинок [14] 70—280 мм.

На рис. 40 приведена схема интерферометра типа Физо для получения полос равной толщины, возникающих в воздушном зазоре между проверяемой поверхностью P_k детали 7 и эталонной поверхностью пластинки 6. Диафрагма 2 переменной ширины, расположенная в фокальной плоскости объектива 5, освещается монохроматическим источником света 1 (ртутная лампа). Лучи, прошедшие диафрагму и светоделительный кубик 3, направляются к объективу, образуя параллельный пучок лучей, который падает на клиновидную эталонную пластинку 6 с образцовой поверхностью P_0 и на контролируемую поверхность P_k . Клиновидность эталонной пластинки необходима для отклонения в сторону лучей, отраженных верхней нерабочей поверхностью, которые могут снизить контраст полос, попадая в отверстие выходной диафрагмы 4. Для ослабления лучей, отраженных нижней поверхностью контролируемой детали, ее можно смазать смесью вазелина с сажей. Лучи, отраженные от проверяемой и образцовой

поверхностей, образуют интерференционные полосы, воспроизводящие рельеф контролируемой поверхности, подобный рельефу, имеющему место при контроле пробным стеклом.

Отклонение Δ контролируемой поверхности от образцовой определяется величиной изгиба a (рис. 39), выраженной в долях ширины полосы b :

$$\Delta = (a/b)(\lambda/2).$$

Наблюдают интерференционную картину и измеряют изгиб полос невооруженным глазом (оценка до 0,1 ширины полосы) или с

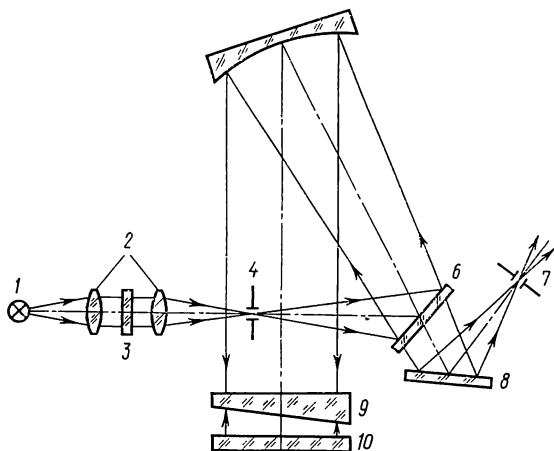


Рис. 41. Оптическая схема интерферометра для контроля плоскостности со светосильным параболическим зеркалом

помощью телескопического окуляра, снабженного винтовым окулярным микрометром, который позволяет более точно измерить изгиб (до 0,05 длины полосы).

Точность измерения плоскостности поверхностей можно повысить * до 0,005—0,01 ширины полосы, если применить способ нониального совмещения полос, помещая на пути выходящих лучей призму Дове.

На рис. 41 приведена схема интерферометра со светосильным параболическим зеркальным объективом 5 и эталонной клиновидной пластинкой 9, несущей образцовую поверхность диаметром 100 мм [24]. Этот интерферометр отличается от интерферометра ПК-452, эталонная пластинка которого имеет диаметр 280 мм, отсутствием экранирования центральной рабочей зоны поля, в котором располагалась призма размером 20×20 мм.

* Контиевский Ю. П., Клочкова О. А., Пережогин А. Я. Двухлучевой интерферометр повышенной чувствительности. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 9, с. 24—26.

Пучок лучей от источника света 1 (ртутной лампы ДРС-50 или лампы СМР-1) через конденсор 2 и светофильтр 3 освещает диафрагму 4, расположенную в фокальной плоскости объектива. После прохождения через диафрагму и отражения от светоделительной пластинки 6 лучи направляются на объектив, отражаются от него и параллельным пучком падают на эталонную пластинку 9 и контролируемую деталь 10. Лучи, отраженные от контролируемой и образцовой поверхностей, интерферируя, идут обратно к светоделительной пластинке, проходят ее и с помощью зеркала 8 направляются в выходную диафрагму 7.

Метод измерения подобен вышеописанному.

§ 13. Измерение углов призм и клиньев

Для измерения углов призм и клиньев применяют угловые металлические плитки (калибры), механические и оптические угломеры, индикаторы с механическими и оптическими рычажными системами, гониометры, автоколлиматоры и интерферометры.

Оптические угломеры позволяют измерять углы призм от 0 до 180° контактным методом на просвет. Внутри круглого корпуса угломеров имеются стеклянные лимбы с ценой деления 10' и оцифровкой через 5° от 0 до 90° в угломере УО и с ценой деления 5' с оцифровкой через 2° от 0 до 90° в угломере УО-2.

Оптические угломеры снабжены двумя металлическими линейками, одна из которых постоянно соединена с корпусом и лимбом, а другая — сменная и при закреплении вращается вместе со стеклянной пластинкой, на которой имеется индекс, служащий для снятия отсчета по лимбу с помощью лупы 16х увеличения. Точность отсчета угломера УО $\pm 5'$, угломера УО-2 $\pm 0,5'$.

Для более точных измерений используют гониометры, автоколлиматоры и оптические угольники. Последние используют как калибры со строго установленными углами, например 30, 45, 60, 90° и т. д.

Оптические угольники обычно составляют из посаженных на оптический контакт плоскопараллельной пластинки и призмы с полированными поверхностями, образующими заданный угол. При работе с оптическими угольниками используется явление интерференции, имеющее место в воздушном клине между поверхностью контролируемой детали и поверхностью угольника. Оптические угольники позволяют измерять углы точнее, чем металлические угольники, обеспечивая точность $\pm 1''$.

Измерение углов призм на гониометре-спектрометре. Гониометр-спектрометр предназначен для измерения углов призм, оптических клиньев, пирамидальности призм, показателей преломления прозрачных материалов и т. п. В зависимости от конструкции и точности отсчетных устройств различают гониометры малой точности (30"—1'), средней точности (5"—20") и высокой точности (1"—2").

При измерении углов призм на гониометре используется авто-

коллимационное отражение лучей. Для получения минимальной погрешности необходимо рабочие грани призмы отполировать с точностью $1/4$ интерференционной полосы. Размер грани должен быть меньше или равен диаметру объектива зрительной трубы.

Отступление грани от плоскости создает сферичность поверхности, которая, в свою очередь, придает призме оптическую силу, поэтому для получения резкого автоколлимационного изображения перекрестия окуляра или щели коллиматора приходится производить перефокусировку зрительной трубы, что нежелательно.

При больших углах падения лучей сферичность вызывает астигматизм в изображении перекрестия или щели, поэтому в поле зрения зрительной трубы наблюдается параллакс, понижающий точность измерения. Применение метода автоколлимации или установки зрительной трубы под острым углом к коллиматору позволяют уменьшить влияние сферичности на качество изображения.

В настоящее время существуют различные гониометры, отличающиеся конструктивным оформлением и системами отсчетных устройств. Однако во всех гониометрах имеются: лимб (круг с градусными или градовыми делениями), зрительная труба, коллиматор и отсчетное устройство. Отечественная промышленность серийно выпускает гониометры-спектрометры ГС-30, ГС-10, ГС-5 и ГС-1М (табл. 8).

Т а б л и ц а 8

Параметры	Шифр	ГС-30	ГС-10	ГС-5	ГС-1М
Фокусное расстояние объектива коллиматора, мм		250	250	400	674
Световой диаметр объектива коллиматора, мм		40	40	50	70
Увеличение зрительной трубы с окуляром $f' = 9,8$ мм		25,5x	25,5x	40,9x	69x
Поле зрения		—	—	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
Номинальная точность		30"	10"	5"	1"

Гониометр-спектрометр ГС-5 (рис. 42) состоит из массивного основания 2 с тремя подъемными винтами 1, вертикальной колонки 17 с коллиматором 13 и осевого устройства с алидадой 4, на котором расположена колонка 5 со зрительной трубой 10. Последнюю вместе с алидадой можно вращать вокруг вертикальной оси прибора вручную или микрометричным винтом 21 (после закрепления алидады зажимным винтом 20).

С помощью подъемных винтов и круглого уровня, встроенного в корпус алидады, ось вращения прибора приводится в вертикальное положение. Зрительная труба и коллиматор имеют внутреннюю

фокусировку, осуществляемую с помощью трибок 9, и одинаковые объективы с фокусным расстоянием 400,6 мм. Для фиксации положения установок объективов на бесконечность и величины расфокусировок, появляющихся из-за кривизны поверхностей контролируемых деталей, трубы снабжены фокусирующими отсчетными шкалами 14. Визирные оси зрительной трубы и коллиматора с помощью юстировочных винтов 11 и 11' могут быть установлены перпендикулярно относительно вертикальной оси вращения. Заменяя окулярные устройства, коллиматор можно превратить в зрительную трубу,

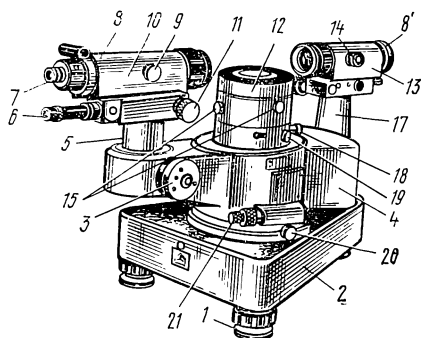


Рис. 42. Общий вид гониометра

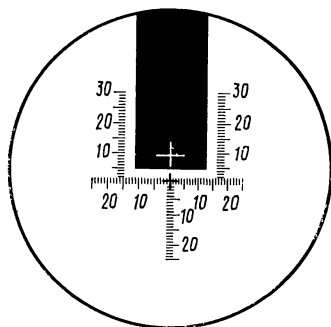


Рис. 43. Поле зрения автоколлимационного окуляра гониометра

а зрительную трубу — в коллиматор. Смена и закрепление окулярных устройств производится зажимными кольцами 8 и 8'. На верхней части вертикальной оси установлен предметный столик 12, свободно вращающийся вручную, а после закрепления зажимным винтом 19 он может вращаться вместе с лимбом при неподвижной зрительной трубе. На вертикальную ось прибора посажен стеклянный лимб с ценой деления 20' и оцифровкой через градус от 0 до 359°. При включении или выключении специального механизма, помещенного на корпусе алидады, лимб может вращаться вместе с алидадой, самостоятельно при неподвижной алидаде и вместе со столиком. Самостоятельное вращение лимба относительно алидады и столика осуществляется трибкой (на рис. 42 не показана), а вместе со столиком — вручную и микрометричным винтом 18. Столик может вращаться с лимбом при неподвижной зрительной трубе, совместно с лимбом и зрительной трубой и самостоятельно после отключения зажимного винта. С помощью двух регулировочных винтов 15 столик может быть наклонен и приведен в горизонтальное положение. Для контроля различных по высоте призм предусмотрено несколько сменных дисков, накладываемых и укрепляемых на столике.

На рис. 43 изображено поле зрения автоколлимационного окуляра типа Аббе, предназначенного для измерения углов и пирамидальности призм. Шкала сетки окуляра имеет цену деления 1'.

Перед работой на гониометре необходимо его отъюстировать, т. е. проверить установку труб на бесконечность, перпендикулярность визирной оси зрительной трубы оси вращения алидады и совпадение или параллельность визирных осей коллиматора и зрительной трубы.

Первое условие можно выполнить, устанавливая трубы трибками 9 (см. рис. 42) по фокусирующим шкалам 14 на отметку ∞ . В случае ошибочного положения отметки трубу устанавливают на бесконечность методом автоколлимации с помощью контрольной плоскопараллельной пластинки или по удаленному предмету. Установка коллиматора на бесконечность может быть произведена так же, как и зрительной трубы (по отметке ∞) или по сфокусированной зрительной трубе.

Выполнение второго условия проверяется совмещением автоколлимационного изображения перекрестия, отраженного от поверхности контрольной плоскопараллельной пластинки, с перекрестием зрительной трубы. Для этого плоскопараллельную пластинку устанавливают на столике 12 и с помощью регулировочных винтов 15 приводят в нормальное положение к визирной оси зрительной трубы.

Отключив зажимной винт 19 и повернув столик с пластинкой на 180° , проверяют совпадение по вертикали перекрестия сетки трубы с его автоколлимационным изображением от другой поверхности пластинки. Несовпадение перекрестий исправляют так: половину интервала выбирают наклоном столика (винтом 15), а другую половину — наклоном трубы (юстировочным винтом 11). Эту операцию повторяют до точного совмещения перекрестий от обеих поверхностей пластинки. Затем пластинку, расположенную на столике, поворачивают на 90° по отношению к первоначальному положению и снова наблюдают за совмещением перекрестий, исправляя несовпадение только наклоном столика (другим регулировочным винтом 15, ось которого перпендикулярна пластинке).

Выполнение третьего условия обеспечивается совмещением изображения перекрестия сетки зрительной трубы с изображением перекрестия сетки, установленной в фокальной плоскости объектива коллиматора. Несовпадение перекрестий по высоте исправляют юстировочным винтом 11' коллиматора.

После юстировки гониометра устанавливают испытываемую призму на столик 12. Призму устанавливают так, чтобы одна из граней была перпендикулярна одному из винтов 15 наклона столика. Вращая столик в горизонтальной плоскости и пользуясь винтами 15, находят автоколлимационное изображение перекрестия, которое совмещают с перекрестием сетки окуляра. Поворачивая трубу или столик с призмой, отыскивают автоколлимационное изображение перекрестия от второй грани призмы и винтами 15 также совмещают

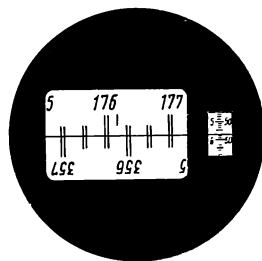


Рис. 44. Поле зрения отсчетного микроскопа гониометра

ют его с перекрестием сетки трубы. Призма установлена правильно, если перекрестие сетки окуляра зрительной трубы строго совмещено с автоколлимационным изображением перекрестия от обеих граней. В этом случае обе грани призмы расположены параллельно оси вращения прибора.

Отсчеты по лимбу производят с помощью отсчетного микроскопа 6, расположенного под окуляром 7 зрительной трубы (см. рис. 42). Увеличение отсчетного микроскопа $46\times$, цена деления шкалы $1''$. Изображения штрихов от двух диаметрально противоположных концов лимба возникают в поле зрения отсчетного микроскопа (рис. 44) в виде прямого изображения верхнего ряда штрихов и обратного изображения нижнего ряда. Изображение делений шкалы отсчетного микроскопа — минуты и секунды и горизонтальный индекс — расположены в правом окне поля зрения.

Шкала микроскопа рассчитана так, что при смещении штрихов лимба верхнего ряда относительно нижнего на $10'$ (штрихи лимба сдвигаются на одно деление) в поле зрения проходят 600 делений. Таким образом, одно деление шкалы соответствует $1''$ ($1/600$ от $10'$).

Для снятия отсчета по лимбу нужно маховичок 3 (см. рис. 42) оптического микрометра повернуть до совмещения верхних и нижних штрихов лимба, видимых в левом окне поля зрения отсчетного микроскопа. Градусы отсчитывают по верхнему ряду штрихов лимба влево от вертикального индекса до ближайшего оцифрованного штриха. Число десятков минут равно числу интервалов между верхним штрихом, по которому взято число градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . Единицы минут отсчитывают в правом окне по левому ряду чисел, а секунды и их доли — по правому ряду чисел, располагающихся над горизонтальным неподвижным индексом.

Отсчет, который соответствует расположению штрихов, изображенному на рис. 44, складывается из отсчета по лимбу $176^\circ 10'$ и отсчета по шкале микроскопа $5'57''$,5. Суммарный отсчет составляет $176^\circ 15'57''$,5.

Измеряя углы призмы автоколлимационным методом, наводят трубу 10 на грани призмы вращением столика с призмой при неподвижной трубе или при неподвижном столике с призмой — вращением трубы.

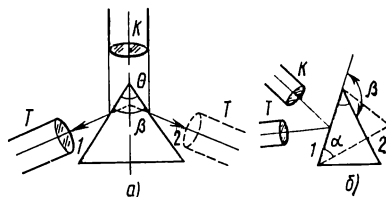
В обоих случаях автоколлимационное изображение перекрестия от первой и второй граней призмы совмещают с перекрестием трубы и берут соответствующие отсчеты по лимбу. Разность отсчетов по лимбу при первом и втором положении граней призмы и есть угол β . Искомый угол призмы $\theta = 180^\circ - \beta$.

В качестве примера результаты измерения одного угла призмы и расчет средней квадратической погрешности приведены в табл. 9.

Средняя квадратическая погрешность одного измерения $\sigma = \sqrt{\Sigma v^2 / (n - 1)} \approx \pm 1,8''$; средняя квадратическая погрешность результата измерения $S = \sigma / \sqrt{n} \approx \pm 1,8'' / \sqrt{5} \approx \pm 0,8''$.

№ при- мов	1-я грань	2-я грань	β	θ	v	v^2
1	254°58'31,4"	134°58'23,3"	120°00'08,1"	59°59'51,9"	-0,3"	0,09
2	254°58'29,0"	134°58'23,3"	120°00'05,7"	59°59'54,3"	-2,7"	7,29
3	254°58'31,1"	134°58'21,1"	120°00'10,0"	59°59'50,0"	+1,6"	2,56
4	254°58'30,4"	134°58'22,0"	120°00'8,4"	59°59'51,6"	0,0"	0,00
5	254°58'31,0"	134°58'21,0"	120°00'10,0"	59°59'50,0"	+1,6"	2,56
Среднее					$\sum v =$ $= 0,2"$	$\sum v^2 =$ $= 12,50$
	254°58'30,58"	134°58'22,14"	120°00'08,44"	59°59'51,6"		

Рис. 45. Измерение угла призмы на гониометре с обычным окуляром зрительной трубы



При контроле всех углов призмы измерения заканчивают для той грани, с которой начинали измерения. Сумма полученных углов должна быть равна номинальной; отклонение не должно превышать точность измерений на приборе. Погрешность измерения

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{\pi}^2 + \sigma_y^2},$$

где σ_n — погрешности совмещения (наведения) перекрестия трубы с автоколлимационными изображениями от граней призмы; σ_{π} — погрешности совмещения штрихов лимба при отсчетах; σ_y — погрешности установки призмы на столике.

Для гониометра ГС-5 погрешность $\sigma_n = \pm 0,5''$, $\sigma_{\pi} = \pm 0,5''$ и $\sigma_y = \pm 1,0''$; суммарная погрешность $\sigma_{\Pi} = \pm 1,2''$; предельная погрешность $3\sigma = \pm 3,6''$.

Если зрительная труба гониометра имеет обычный (не автоколлимационный) окуляр, то измерять углы призмы можно следующими способами.

1. Столик гониометра устанавливают так, чтобы преломляющее ребро (рис. 45, а) измеряемого угла призмы находилось перед объективом коллиматора и рассекало выходящий из него пучок лучей приблизительно пополам. Щель коллиматора делают как можно более узкой, а перекрестие зрительной трубы наводят последовательно на изображение щели от первой и второй граней призмы.

Разность отсчетов по лимбу дает удвоенную величину измеряемого угла. При этом способе измерения надежность результата обеспечивается только при высоком качестве обработки граней призмы. Искомый угол призмы $\theta = \beta/2$.

2. Зрительную трубу T подводят близко к коллиматору K , образуя между осями предельно возможный острый угол (рис. 45, б) и оставляют неподвижными в процессе измерения. Лимб, освобожденный от зажима, вращают вместе со столиком, на котором установлена призма, до совмещения перекрестия окуляра с отраженным изображением щели коллиматора как от первой, так и от второй граней призмы. Разность между двумя отсчетами соответствует углу β , а его дополнение до 180° определяет искомый угол $\theta = 180^\circ - \beta$.

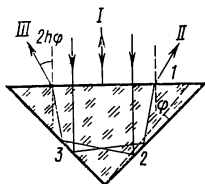


Рис. 46. Измерение угла призмы на гониометре с автоколлимационным окуляром

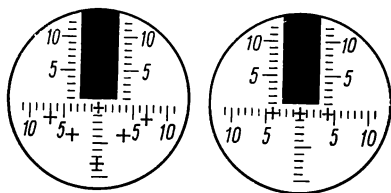


Рис. 47. Поле зрения автоколлимационного окуляра

Наиболее точно можно измерить углы призмы автоколлимационным способом, если лучи падают и отражаются нормально от граней призмы.

При измерении углов призмы можно одновременно проверить и ее пирамидальность. Пирамидальность призмы, установленной в оптическом приборе, вызывает отклонение линии визирования. Допустимую величину пирамидальности и степень ее влияния на отклонение линии визирования для различных призм можно определить по формуле «инварианты пирамидальности», предложенной В. Н. Чуриловским [71].

Пирамидальность призм измеряют также с помощью зрительной трубы с автоколлимационным окуляром типа Аббе. Визирную ось зрительной трубы устанавливают строго перпендикулярно вертикальной оси вращения прибора. Контролируемую призму помещают на приведенный в горизонтальное положение предметный столик и получают изображение перекрестия от каждой грани призмы. Смещение изображения перекрестия по высоте свидетельствует о наличии пирамидальности, а деленная пополам разность отсчетов, взятая по вертикальной шкале, составит угол пирамидальности.

Для прямоугольной призмы при определении пирамидальности можно одновременно измерить и ошибку ϕ прямого угла. При этом призму следует установить на предметном столике гониометра гипотенузной гранью нормально к визирной оси зрительной трубы. В поле зрения должны появиться пять или, как минимум, три автоколлимационных изображения перекрестия сетки окуляра (рис. 46),

из которых одно образуется от гипотенузной грани (луч I), второе — после отражения от катетных граней 3 и 2 (луч II) и третье — от катетных граней 2 и 3 (луч III). При прохождении лучей через призму с показателем преломления n лучи II и III отклонятся от нормали или от луча I на угол $2\varphi n$, а друг от друга — на угол $4\varphi n$. Если $n \approx 1,5$, то угол отклонения $\beta \approx 6\varphi$. Вращая столик с призмой, можно видеть, что автоколлимационное изображение, полученное от гипотенузной грани, перемещается, в то время как изображения, построенные лучами II и III , остаются неподвижными. О наличии пирамидальности свидетельствует тот факт, что все автоколлимационные изображения смещены по высоте симметрично относительно центрального изображения (рис. 47).

Автоколлимационные изображения I , IV и V будут подвижными, так как они образовались при нечетном числе отражений. Смещение автоколлимационных изображений по высоте (пирамидальность) определяют по вертикальной шкале окуляра, угол пирамидальности

$$\gamma = \alpha / (2n),$$

где α — угол смещения; n — показатель преломления призмы.

Ошибка прямого угла призмы определяется из выражения

$$\varphi = \beta / (4n) \approx \beta / 6,$$

где β — угол между неподвижными автоколлимационными изображениями II и III , измеренный по горизонтальной шкале окуляра.

Если угол отклонения β выходит за пределы $40'$ горизонтальной шкалы окуляра, то, вращая столик вместе с призмой, автоколлимационное изображение от гипотенузной грани совмещают с изображением II , а затем с изображением III . Разность между соответствующими отсчетами по лимбу образует угол β . В этом случае ошибки в прямом угле определяют по формуле

$$\varphi = \beta / (2n) \approx \beta / 3.$$

Автоколлимационный метод контроля углов призм в производственной практике обычно реализуется на автоколлимационных приборах путем сравнения с образцовыми или эталонными призмами, углы которых известны. Для этих целей можно использовать автоколлимационный прибор АКУ, имеющий трубу с фокусным расстоянием объектива 500 мм и ценой деления $0,5''$ точной шкалы оптического микрометра.

На рис. 48 изображена оптическая схема АКУ. Пучок лучей от источника 9 после прохождения конденсора 8 и светофильтра 7 освещает автоколлимационную марку 6, расположенную в фокальной плоскости объектива 11. Марка представляет собой биссектор, нанесенный на стеклянную пластинку. Отразившись от светоделительного слоя куб-призмы 1 и зеркала 12, пучок лучей попадает в объектив, а затем падает параллельным пучком на грань контролируемой призмы 10. Отраженный пучок лучей проходит обратно через объектив, куб-призму, оптический компенсатор 2 и строит

автоколлимационное изображение марки на шкале 3. Оптический микрометр состоит из линзы компенсатора 2, секундной шкалы 3 и минутной шкалы 4. Положительная линза компенсатора связана с секундной шкалой и может вместе с ней перемещаться. Отрицательная линза приклеена к куб-призме.

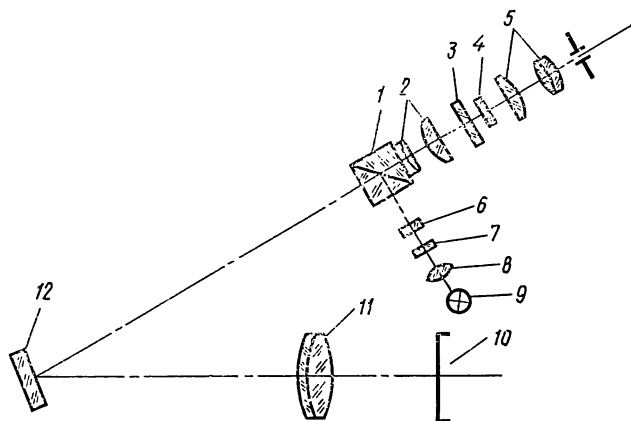


Рис. 48. Оптическая схема автоколлимационного прибора АКВ

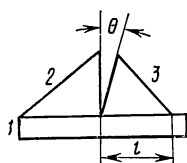


Рис. 49. К измерению углов призм при помощи эталонных оптических угольников

При массовом контроле призм одной партии устанавливают столик с эталонной призмой, прижатой к опорным штифтам, и приводят автоколлимационное изображение марки от выбранной грани на середину поля зрения. Удалив эталонную призму, последовательно меняют контролируемые призмы, следя за смещением автоколлимационных изображений и фиксируя величину отклонения угла от эталонного. Точность измерения угла призмы $\pm 1''$.

Более точно измерить углы призм (отклонение от заданных $0,5-1''$) можно с помощью эталонных оптических угольников со строго установленными углами (90° , 60° , 45° и др.). Например, оптический угольник с эталонным углом 90° представляет собой прямоугольную призму 2 (рис. 49), посаженную одним катетом на оптический контакт с поверхностью плоскопараллельной пластинки 1 [31]. Второй свободный катет призмы и поверхность пластинки образуют эталонный угол, равный 90° .

Испытуемую призму 3 устанавливают на эталонный угольник, как показано на рис. 49. При отклонении угла призмы от 90° между катетами призм образуется воздушный клин, в котором локализованы интерференционные полосы. По числу полос N и длине ка-

тета l определяют угол воздушного клина $\theta = N\lambda/(2l)$, т. е. угол отклонения от 90° .

Для увеличения контраста интерференционных полос и точного их подсчета гипотенузную грань следует покрыть зеркальным слоем и блок 1—3 поместить в одну из ветвей интерферометра типа Майкельсона или Кёстерса для измерения угла воздушного клина [31]. Основной недостаток такого способа — влияние неоднородности материала всего блока призм и пластинки на результаты измерений.

Измерение углов многогранника. Многогранные стеклянные или стальные призмы, имеющие хорошо полированные грани и аттестованные с необходимой точностью, нашли в последнее время широкое применение в различных отраслях производства и техники для проверки лимбов углоизмерительных приборов — гониометров, теодолитов, делительных головок и столов и для других целей.

Обычно многогранные призмы аттестуют с помощью высокоточных гониометров или теодолитов и автоколлиматоров. Углы многогранника на гониометре измеряют так же, как и углы призм, т. е. автоколлимационным методом, получая от каждой грани автоколлимационное изображение перекрестия или марки и совмещая его с перекрестием сетки окуляра. Разность отсчетов по лимбу для двух смежных (соседних) граней образует дополнительный до 180° угол β , искомым углом $\theta = 180^\circ - \beta$. Удобнее закрепить лимб и автоколлимационную трубу гониометра, а предметный столик (алидаду) с многогранником вращать.

Для контроля измерения находят разность между суммой измеренных углов $\Sigma\theta$ и теоретической суммой, равной $180^\circ(n-2)$, где n — число сторон многогранника. Эта разность не должна превышать двойной точности прибора.

Аттестовать углы многогранника можно с помощью двух автоколлиматоров, например АК-1, и поворотного стола, используя, например, стол большого инструментального микроскопа. Многогранник помещают на поворотный стол, а автоколлиматоры устанавливают под углом, при котором в поле зрения каждого из них наблюдаются автоколлимационные изображения марок от двух смежных граней. Один из автоколлиматоров принимают за нулевой, сохраняя постоянными отсчет и положение автоколлимационных изображений марки от каждой грани. Вторым автоколлиматором используют как отсчетный и по нему измеряют отклонения от заданного угла. После проверки всех углов многогранника производят контрольный промер, для чего автоколлимационное изображение грани, с которой были начаты измерения, снова подводят к нулевому автоколлиматору и снимают отсчет по второму автоколлиматору. Расхождение не должно превышать цену деления окуляр-микрометра.

Окончательная величина отклонения каждого центрального угла от номинального значения

$$\Delta\alpha_n = \alpha - \alpha_{ср},$$

где a — отсчет при наблюдении от одной грани; $a_{cp} = (1/n) \sum_1^n a$ — среднее арифметическое всех показаний отсчетного автоколлиматора по n граням призмы. Точность определения любого угла многогранника меньше двойной погрешности одного измерения, независимо от числа граней призмы.

Проверка образцовых многогранных призм первого разряда с предельной погрешностью $\pm 0,5''$ может быть произведена методом сравнения с рабочей эталонной многогранной призмой на установке ВНИИМ, снабженной поворотным столом и автоколлиматором.

Призмы помещают одну над другой на поворотном столе так, чтобы соответственные грани были параллельны. Автоколлиматор устанавливают перпендикулярно граням призм; оптическая ось объектива должна быть между гранями призм. Если углы призмы различны, то в поле зрения автоколлиматора наблюдаются два автоколлимационных изображения марки окуляра. Расстояние между этими изображениями измеряют окулярным микрометром, закрывая то верхнюю, то нижнюю грань. Угол расхождения между поверяемым и образцовым многогранниками

$$\delta = \alpha_n - \alpha_o,$$

где α_n и α_o — отсчеты по окулярному микрометру при наведении на автоколлимационные изображения от граней поверяемой и образцовой призм.

Вращая поворотный стол с призмами на угол $360^\circ/n$, равный центральному углу (n — число граней), измеряют углы расхождения по всем граням. Отклонение угла от его номинального значения

$$\Delta_i = \delta_i - \delta_{i+1},$$

где δ_i и δ_{i+1} — углы расхождения двух смежных (соседних) граней поверяемой призмы.

Измерения ведут в прямом и обратном ходе лучей, получая от каждой грани не менее трех наведений и отсчетов, а затем берут средние значения. Истинное отклонение углов поверяемой многогранной призмы от образцовой

$$\gamma_i^n = \gamma_i^o + \Delta_i,$$

где γ_i^o — номинальное значение угла; Δ_i — поправка.

Гониометрический способ является одним из наиболее простых способов измерения углов в косых пучках лучей при углах падения $75-80^\circ$ [43]. На рис. 50 приведена схема установки измерения углов многогранной призмы на гониометре ГС-5. Параллельный пучок лучей, вышедший из объектива 4 коллиматора 1—4, падает наклонно на грань призмы 7, установленной на столике гониометра и, отразившись от грани, попадает в объектив 8 зрительной трубы 8—10. Для исключения виньетирования пучков лучей при отражении от граней призмы требуется дополнительное устройство в виде салазок, по которым коллиматор и зрительная труба переме-

щаются перпендикулярно визирным осям на величину, равную половине основания призмы.

В фокальной плоскости объектива зрительной трубы наблюдается дифракционное изображение щели 3 в виде светлой ахроматической полосы с окрашенными боковыми полосами. Перекрестие сетки 9 окуляра 10 наводится на середину светлой полосы. Разность отсчетов по лимбу 5, взятых с помощью отсчетного микроскопа при наведении на светлые полосы от двух смежных граней, образует искомый угол.

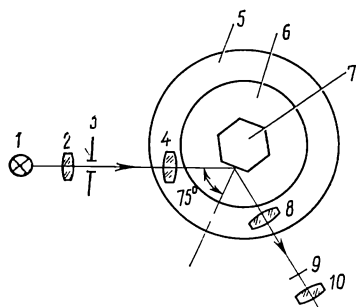


Рис. 50. Схема установки измерения углов многогранника

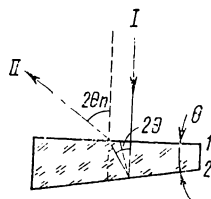


Рис. 51. Измерение угла клина автоколлимационным способом

Для измерения пирамидальности призму устанавливают на дополнительный столик одной из граней перпендикулярно основанию, а само основание приводят в вертикальное положение. Измеряют двугранные углы между основанием призмы и каждой гранью, определяя тем самым перпендикулярность граней основанию призмы. Предельная погрешность одного измерения угла $\pm 4—5''$.

Измерение углов оптических клиньев. Оптические клинья представляют собой призмы с преломляющими углами от нескольких секунд до нескольких градусов. Их применяют, главным образом, как компенсаторы и для измерения малых углов.

На практике часто имеет место клиновидность плоскопараллельных пластинок, возникающая при обработке деталей, защитных стекол, стеклянных светофильтров, пластинок для сеток, шкал, прижимных стекол аэрофотоаппаратов и т. д. Угол клина или клиновидность пластинок можно измерить автоколлимационным или более точным интерференционным методом.

Автоколлимационный метод. Автоколлимационный метод используется при работе на гониометрах с автоколлимационными трубами или на автоколлиматорах, снабженных отсчетными устройствами — оптическими или винтовыми окуляр-микрометрами.

На гониометре ГС-5 с автоколлимационной зрительной трубой угол можно измерять по лимбу и по шкале окуляра. Угол клина на гониометрах измеряют следующими способами.

Способ 1. Контролируемую деталь устанавливают на предметный столик гониометра так, чтобы в поле зрения трубы появились два автоколлимационных изображения перекрестия от передней и задней поверхностей детали (рис. 51). Эти изображения приводят на один уровень по высоте и совмещают с отсчетной шкалой окуляра (см. рис. 47). Измеренное значение угла между автоколлимационными изображениями и есть угол отклонения, равный $\varphi = 2\theta n$, откуда $\theta = \varphi / (2n)$, где n — показатель преломления материала клина.

Способ 2. Для более точного определения угла клина следует воспользоваться лимбом, для чего совмещают последовательно автоколлимационные изображения с перекрестием сетки окуляра и снимают отсчеты по лимбу с помощью отсчетного микроскопа 6 (см. рис. 42). Разность отсчетов по лимбу составляет угол отклонения $\varphi = \theta n$. Точность определения угла θ при многократных наведениях $\pm 2''$.

Способ 3. Этот способ аналогичен измерению угла призмы: вращают столик с деталью или автоколлимационную трубу при неподвижной детали и наводят перекрестие сетки на автоколлимационное изображение перекрестия от каждой поверхности. Разность отсчетов по лимбу составит угол β , а его дополнение до 180° и есть искомый угол клина: $\theta = 180^\circ - \beta$.

Автоколлиматоры представляют собой зрительные трубы с автоколлимационными окулярами, в которых используется визуальная или фотоэлектрическая регистрация; они снабжены отсчетными шкалами или микрометрами оптического или винтового устройства. Угол клина измеряется по отсчетной шкале или с помощью окуляр-микрометра. У некоторых автоколлиматоров, например у автоколлимационного прибора (АКП) МИИГАиК [1], отсчетные устройства вынесены на предметный стол, угол наклона которого отсчитывается по барабану винта. Цена деления отсчетной шкалы или барабана окуляр-микрометра, как правило, дается в угловой мере заводом-изготовителем или определяется по формуле

$$\tau = 206265y/f',$$

где τ — цена деления отсчетной шкалы в угловой мере; y — линейная величина одного деления шкалы, мм; f' — фокусное расстояние объектива автоколлиматора, мм.

Цена деления барабана окуляр-микрометра находится по аналогичной формуле

$$\tau = 206265t/\varphi',$$

где t — цена деления барабана в линейной мере.

Из приведенных формул видно, что цена деления шкалы или барабана окуляр-микрометра тем меньше, чем больше фокусное расстояние объектива автоколлиматора. Например, автоколлима-

тор АК-0,25 ($f'=1000$ мм) с оптическим окуляр-микрометром имеет $\tau=0,25''$; АК—0,5 ($f'=500$ мм) — $\tau=0,5''$; АК—1 ($f'=250$ мм) — $\tau=1''$.

На рис. 52 приведена схема автоколлиматора с автоколлимационным окуляром со светоделительным кубиком 6. Пучок лучей от источника света 3 через конденсор 4 освещает перекрестие сетки 5 и после отражения от светоделительного слоя кубика направляется

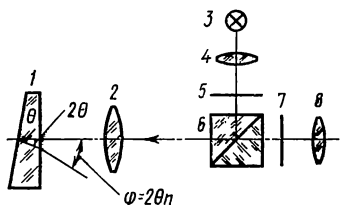


Рис. 52. Оптическая схема автоколлиматора с окуляром

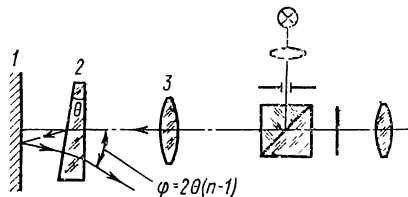


Рис. 53. Оптическая схема автоколлиматора с зеркалом

через объектив 2 на испытуемый клин 1. Отраженные от передней и задней поверхностей клина пучки лучей образуют в фокальной плоскости объектива на окулярной шкале 7 два автоколлимационных изображения перекрестия, угловое расстояние между которыми, измеренное окуляр-микрометром, образует угол отклонения $\varphi=2\theta n$.

Точность измерения угла θ зависит от цены деления окуляр-микрометра и погрешности измерения расстояния между автоколлимационными изображениями. При цене деления винтового окуляр-микрометра $t=0,01$ мм и f' объектива 500 мм, т. е. при $\tau=4''$ и оценке на глаз до 0,2 деления барабана, т. е. $0,8''$, суммарная погрешность определения угла θ равна $\pm 1''$.

Для повышения точности измерения угла клина используют плоское автоколлимационное зеркало 1, обращенное отражающей поверхностью нормально к объективу 3 автоколлиматора (рис. 53). Контролируемый клин 2 устанавливают между зеркалом и объективом. Параллельный пучок лучей дважды проходит через клин 2, поэтому угол клина

$$\theta = \varphi / [2(n-1)],$$

где φ — измеренный угол отклонения.

Если схему, изображенную на рис. 53, дополнить вторым зеркалом 3 (рис. 54), покрытым частично отражающим слоем, а испытуемую деталь 2 с малым углом клина поместить между зеркалами 1 и 3, установленными строго параллельно друг другу и нормально оптической оси объектива 4 автоколлиматора [51], то пучок лучей, выходящий из объектива, после прохождения зеркала 3, клина 2 и отражения от зеркала 1 образует в фокальной плоскости окуляра двойной угол отклонения, поэтому угол клина

$$\theta = \varphi (n-1).$$

Измеряя окуляр-микрометрами угловые расстояния между автоколлимационными изображениями щели, возникающими при втором и третьем отражении от зеркал 3 и 1 , получают углы, равные 4φ , 6φ , ..., а после поворота клина на 180° и измерения расстояний между автоколлимационными изображениями одноименного порядка находят углы 4φ , 8φ , 12φ , ...

Средняя квадратическая погрешность измерения угла клина, равного $8'$, для второго порядка отражения и поворота клина на 180° составляет $\pm 0,2''$.

Контроль клиновидности стержней. Для контроля клиновидности непрозрачных стержней типа концевых мер, резонаторов твердотельных лазеров и других деталей наиболее доступным и простым является автоколлимационный метод.

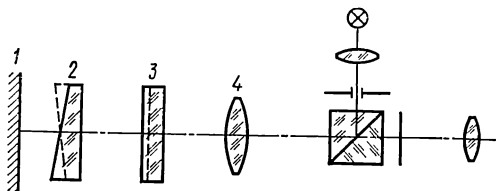


Рис. 54. Оптическая схема автоколлиматора с двумя зеркалами

И. И. Духопелом и другими разработана автоколлимационная установка ИГ-79, состоящая из коллиматора, в фокальной плоскости объектива которого расположено плоское зеркало, и автоколлиматора АК-05, с фокусным расстоянием объектива $f' = 400$ мм. Расстояние между объективами коллиматора и автоколлиматора позволяет проверять клиновидность стержней длиной до 700 мм. Диафрагма перед объективом автоколлиматора делит пучок лучей, выходящий из объектива, на две части, в одну из которых вводится проверяемый стержень; другая часть остается свободной. В поле зрения автоколлиматора наблюдаются два автоколлимационных изображения марки окуляра: от переднего (ближнего) торца и от заднего (дальнего) торца стержня. Расстояние между автоколлимационными изображениями марки, измеренное оптическим микрометром АК-0,5, пропорционально углу расхождения α , по которому определяют клиновидность стержня: $\theta = \alpha/2$.

Недостатком установки ИГ-79 является трудность совмещения отражающей поверхности зеркала с фокальной плоскостью объектива коллиматора по резкости автоколлимационного изображения марки. Учитывая этот недостаток, в Московском институте инженеров аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК) разработали автоколлимационный прибор АКП-400, предназначенный для контроля клиновидности стержней длиной до 400 мм.

Оптическая схема АКП-400 (рис. 55) содержит автоколлиматор $1-11$ с фокусным расстоянием объектива 500 мм и отражатель 3 , состоящий из двух призм, приклеенных на пластинку. Грани призм, образующие угол 120° , и промежуток между призмами покрыты

зеркальным слоем. В качестве третьего зеркала используется верхний торец стержня 2, обращенный к отражателю. Дифрактама 1 служит для перекрытия автоколлимационных изображений марки 7 раздельно от нижней или верхней поверхностей стержня или одновременно от обеих поверхностей. Первоначальную установку автоколлиматора на бесконечность производят по плоскому зеркалу отражателя, когда автоколлимационное изображение марки 7 совпадает с индексом сетки 6.

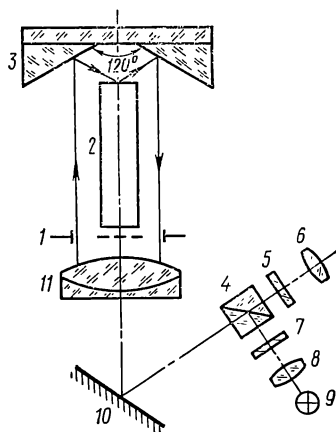


Рис. 55. Оптическая схема автоколлиматорного прибора АКП-400 для проверки клиновидности стержней

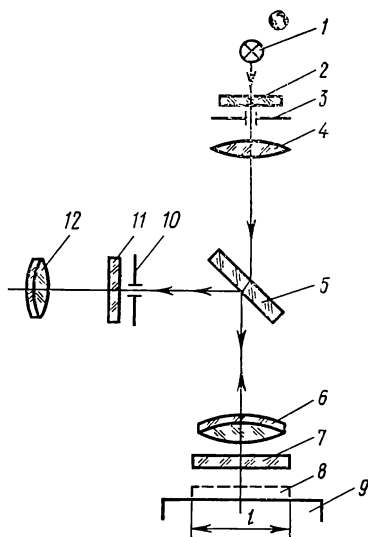


Рис. 56. Оптическая схема интерферометра типа ИПП-15

Проверяемый стержень 2, как показано на рис. 55, устанавливают в вертикальное положение и закрепляют в зажимном устройстве. Закрывая дифрактамой нижнюю поверхность стержня, посылают параллельный пучок лучей на отражатель. После отражения от поверхности призмы и от верхней поверхности стержня пучок лучей возвращается обратно и строит автоколлимационное изображение марки 7 на сетке 5. Это положение автоколлимационного изображения фиксируют отсчетом по шкале и барабану винтового окулярного микрометра. Затем, освобождая нижнюю поверхность стержня от дифрактамы и перекрывая пучки лучей, идущие на отражатель, наблюдают второе автоколлимационное изображение марки от нижней поверхности стержня, фиксируя второй отсчет по барабану микрометра. Разность между отсчетами, деленная пополам, и есть искомая клиновидность стержня.

Точность определения клиновидности на АКП-400 $\pm 4-5''$.

Интерференционный метод. Интерференционный метод применяют для точных измерений деталей с углами клина порядка нескольких минут. Используют для этих целей интерферометр Кёстнера или ИПП-15. На рис. 56 изображена оптическая схема интерферометра ИПП-15. Раздвижная щель 3, установленная в фокальной плоскости объектива 6 коллиматора, освещается через светофильтр 2 монохроматическим пучком лучей от источника 1. После прохождения дополнительной линзы 4, полупрозрачной пластинки 5, объектива 6 и эталонной клиновидной пластинки 7 входящий пучок лучей падает на испытываемую деталь 8, помещенную на столик 9 интерферометра. Дополнительная линза 4 выводится из пучка лучей при контроле плоскостности поверхностей пластинок. Пучки лучей, отраженные от верхней и нижней поверхностей испытываемой детали, интерферируют между собой, образуя интерференционную картину в виде колец равного наклона, которую рассматривают через окуляр 12 на сетке 11. При настройке интерферометра столик с испытываемой деталью можно наклонять, опускать, перемещать перпендикулярно оси прибора и вращать в горизонтальной плоскости. При перемещении детали в поле зрения окуляра через перекрестие сетки проходят интерференционные кольца, число которых определяют для всей длины или выбранного участка l детали.

Угол клина θ , выраженный в угловых секундах, определяют по формуле

$$\theta'' = 206\,265 N \lambda / (2nl),$$

где N — число интерференционных колец; λ — длина волны света, мм; n — показатель преломления стекла детали; l — длина измеренного участка клина, мм.

Фотоэлектрический метод. В Московском институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии разработана фотоэлектрическая установка для контроля клиновидности плоскопараллельных пластинок и малых углов оптических клиньев [73].

Основные технические характеристики установки: фокусное расстояние объектива приемной трубы 1000 мм, диаметр объектива трубы 100 мм, диапазон измерений углов до $40''$, цена деления отсчетной шкалы $0,1''$, средняя квадратическая погрешность измерения угла $0,3''$.

Оптическая схема установки изображена на рис. 57. Щелевая диафрагма 2, расположенная в фокальной плоскости объектива 4 коллиматора, освещается источником света 1. Пучок лучей модулируется с частотой 5000 Гц модулятором 3, проходит объектив 4, испытываемую пластинку 5 и поступает в объектив 6 приемной трубы, в фокальной плоскости которой находится ребро разделительного анализатора 16. На пути лучей перед анализатором помещен компенсатор 18 (телескопическая линза) угла рассогласования. Анализатор делит пучок лучей на две части и направляет их по двум каналам на зеркальные конденсоры 17, собирающие обе части пучка на приемник излучения 14. После усилителя 13 сигнал поступает на

индикаторный прибор 12. Перед приемником излучения установлен обтюратор 15, пропускающий лучи на приемник с частотой 380 Гц и одновременно диафрагмирующий рассеянный свет.

При наклоне пучка лучей к оси объектива 6 количество световой энергии в каналах различно, поэтому в цепи приемника излучения возникает сигнал рассогласования, который компенсируют перемещением телескопической линзы 18 перпендикулярно оптической оси объектива приемной трубы.

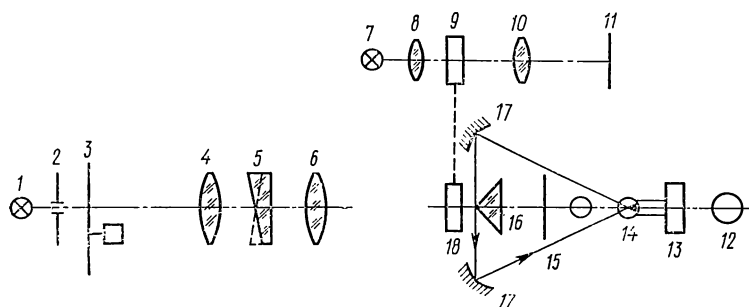


Рис. 57. Фотоэлектрическая установка для проверки клиновидности плоскопараллельных пластинок

Испытуемую пластинку проверяют в двух положениях, поворачивая ее на 180° . Образованные при этом на приемнике излучения сигналы рассогласования компенсируют перемещением телескопической линзы до приведения стрелки на нуль индикатора. Компенсатор 18 жестко связан с отсчетной шкалой 9, изображение шкалы системой 7, 8 и 10, передается с увеличением на экран 11.

Угол клина

$$\theta = \varphi / (n - 1),$$

где $\varphi = a(b_1 - b_2)$ — угол отклонения; b_1 и b_2 — отсчеты по шкале 9; n — показатель преломления стекла пластинки; a — коэффициент, постоянный для данного прибора.

Коэффициент a определяют с помощью клина (угол отклонения известен), вводимого в установку вместе испытуемой пластинки 5.

Глава III. Методы контроля формы асферических поверхностей оптических деталей *

В современных оптических приборах используют оптические детали, имеющие чаще всего сферические и плоские поверхности. Однако применение асферических поверхностей (не имеющих сферической формы) в ряде случаев позволяет решить важные практические задачи: улучшить качество изображения, повысить оптические характеристики, уменьшить габаритные размеры и массу, раз-

* Глава III написана Д. Т. Пуряевым.

работать принципиально новые оптические приборы. Хотя ценные свойства асферических поверхностей были известны еще во времена Декарта, однако и в настоящее время асферические поверхности применяют значительно реже, чем сферические. Объясняется это трудностями изготовления и контроля асферических поверхностей. Поэтому последние применяют только в тех случаях, когда можно получить большой эффект, например в астрономических зеркалах крупных телескопов; в астрономических приборах, используемых за пределами земной атмосферы, так как их масса и габаритные размеры должны быть существенно уменьшены; в приборах, которые работают в рентгеновских лучах, отражающихся от оптических поверхностей лишь при углах падения, близких к прямому. Внимание оптиков давно приковано к так называемой асферической оптике, которая открывает новые пути развития оптических приборов и повышает их роль в науке и техническом прогрессе.

Главное отличие асферической поверхности от сферической заключается в том, что кривизна сферической поверхности в любой ее точке одинакова, в то время как кривизна асферической поверхности — переменная величина, зависящая от координат точки поверхности и формы последней. В оптических системах главным образом используют поверхности вращения, причем начало прямоугольных координат x, y, z совмещают с вершиной поверхности, а ось вращения — с оптической осью (осью Oz). При этом наиболее употребительные виды асферических поверхностей могут быть заданы уравнениями плоских кривых, определяющих профиль поверхности:

$$y^2 = a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n, \quad (36)$$

$$z = A_1 y^2 + A_2 y^4 + \dots + A_n y^{2n}. \quad (37)$$

Уравнение (37) применяют в основном для асферических поверхностей, мало отличающихся от плоскости (планоидные поверхности). В частном случае (для кривых второго порядка) уравнение (36) принимает вид

$$y^2 = 2r_0 z + (\varepsilon^2 - 1) z^2, \quad (38)$$

где r_0 — радиус кривизны при вершине кривой; ε — эксцентриситет.

Если в уравнении (38) $\varepsilon = 0$, то это уравнение окружности; при $\varepsilon = 1$ получаем уравнение параболы; при $0 < \varepsilon < 1$ — эллипса, большая ось которого расположена по оси Oz ; при $\varepsilon > 1$ — гиперболы; при $\varepsilon^2 < 0$ — эллипса, малая ось которого расположена по оси Oz . Все отражающие поверхности второго порядка обладают замечательным оптическим свойством: геометрические фокусы этих поверхностей являются анаберрационными точками. Это свойство широко используется для контроля эллиптических, гиперболических и параболических поверхностей.

В зависимости от назначения асферических поверхностей требования к точности их изготовления и контроля меняются в очень ши-

роких пределах. Например, допустимое отклонение реальной формы поверхности высококачественного астрономического зеркала от теоретической не должно превышать 0,05—0,1 мкм, в то же время для прожекторных зеркал допускаются отклонения порядка десятых долей миллиметра.

Главная цель контроля формы асферической поверхности заключается в том, чтобы выявить и, если необходимо, измерить отклонения реальной формы поверхности от теоретической, на основании чего можно сделать заключение о пригодности использования асферической поверхности или детали по прямому назначению.

Методам контроля асферических поверхностей посвящена обширная литература [10, 16, 18, 21, 27, 28, 36, 44, 45, 56—60, 64, 67—70]. Значительная часть методов и приборов, описанных в приведенной литературе, разработана в последние годы в связи с развитием лазерной техники, голографии и других новых научных направлений.

В настоящее время в оптическом приборостроении используют методы, которые можно разделить на несколько групп. Принятое деление обусловлено не только научным содержанием методов, но и традициями, поэтому в известном смысле является условным.

§ 14. Контактные методы

Главное достоинство контактных методов заключается в том, что они применимы для шлифованных поверхностей и их можно использовать в цеховых условиях. Однако эти методы, как правило, имеют сравнительно невысокую точность; позволяют проверить поверхность в отдельных точках или зонах, т. е. относятся к дискретным методам; контакт измерительного инструмента с контролируемой поверхностью не исключает возможности повреждения последней.

С помощью сферометров-индикаторов (рис. 58) определяют положение отдельных зон или точек поверхности 1 в прямоугольной системе координат. Для ряда сечений с заранее выбранными координатами y_i измеряют стрелки прогиба z_i . Диаметр накладного кольца 2 измеряют заранее с точностью 0,01—0,005 мм. Стрелка прогиба z_i должна измеряться с погрешностью, близкой к 1 мкм. Для контроля одной поверхности необходимо иметь набор, состоящий, как правило, из 4—12 колец.

Аналогичный контроль может быть проведен на сферометре ИЗС-7. Методика измерений аналогична методике измерений радиусов сферических поверхностей, описанной выше.

Контроль профиля асферической поверхности может быть выполнен с помощью полярного компаратора, принцип действия которого заключается в определении полярных координат (радиуса-вектора ρ и координатного угла φ) контролируемой поверхности 1 (рис. 59). Измерительный стержень 2 перемещается вдоль своей оси и вращается вокруг точки С. Погрешность измерений зависит от точности установки контролируемой детали относительно оси вра-

щения и точности механических узлов. Сферометр ИГ-60, разработанный И. В. Шевцовым, работает в автоматическом режиме. В измерительный узел прибора входит датчик угла поворота φ и датчик линейного перемещения q . Прибор имеет следующие характеристики: точность угловой индикации $4''$, точность измерения линейных перемещений $0,3 \text{ мкм}$, пределы измерения отступлений асферической поверхности от ближайшей сферы 1 мм .

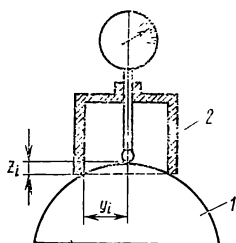


Рис. 58. Контроль сферической поверхности с помощью сферометра-индикатора

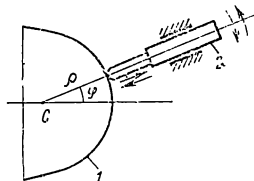


Рис. 59. Принцип действия полярного компаратора

Для контроля асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы или плоскости, используют сферические или плоские пробные стекла. Последние накладывают на контролируемую поверхность и наблюдают интерференционную картину, возникающую в воздушном промежутке между контролируемой и эталонной (плоской или сферической) поверхностями. Профиль поверхности определяется по толщине t воздушного промежутка:

$$t = (N_2 - N_1)(\lambda/2),$$

где N_2 и N_1 — порядковые номера интерференционных полос в начале и конце измеряемого отрезка. Для наблюдения интерференционной картины и измерения диаметров колец обычно используют микроскоп типа УИМ-21, сфокусированный на воздушный промежуток.

Значительно реже применяют асферические пробные стекла. Объясняется это трудностью изготовления такого пробного стекла, которое имело бы точную и обратную контролируемой поверхности форму, а также более сложными приемами пользования асферическим пробным стеклом, так как необходимо точное совмещение осей эталонной и контролируемой поверхностей. Однако несмотря на эти недостатки, применение асферических пробных стекол считают целесообразным для контроля даже небольших серий асферических деталей, так как изготовление пробного стекла оправдывается экономически.

§ 15. Бесконтактные методы

В основу большинства бесконтактных методов контроля положены оптические свойства асферических поверхностей. Бесконтактные методы имеют, как правило, большие преимущества перед контактными: исключают возможность повреждения поверхности, обладают повышенной точностью, позволяют проверить не только отдельные зоны, но и всю поверхность за один прием контроля. Однако контролируемая поверхность должна быть полированной, и, как правило, иметь форму, близкую к теоретической, что является некоторым недостатком бесконтактных методов.

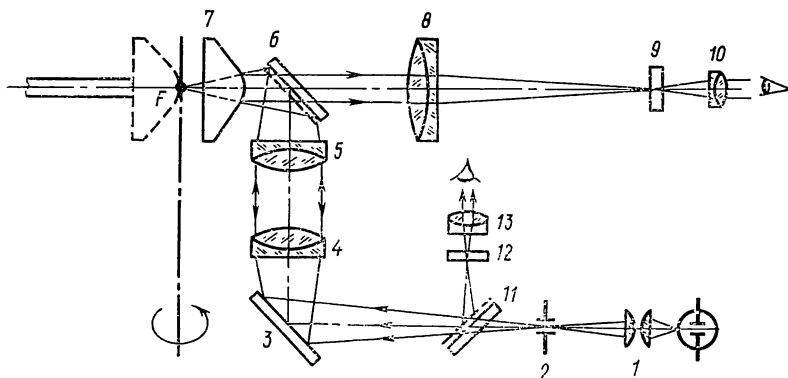


Рис. 60. Оптическая схема асферометра

Для контроля профиля поверхностей второго порядка разработан асферометр [69], принцип действия которого основан на использовании анаберрационных точек. Принципиальная схема прибора, настроенного на контроль выпуклой поверхности, приведена на рис. 60. Лучи света, идущие от источника света (ртутная лампа) с помощью конденсора 1 направляются на диафрагму 2, проходят полупрозрачную пластину 11, отклоняются зеркалом 3, затем проходят объективы 4, 5 и полупрозрачное зеркало 6 и падают на линзу 7 о выпуклой параболической поверхности. Таким образом, оптическая система, состоящая из элементов 1—6, проецирует изображение диафрагмы 2 в фокус F параболической поверхности. Если последняя идеальна, то отраженные лучи образуют параллельный пучок лучей, поступающий в зрительную трубу типа Кеплера (объектив 8, сетка 9 и окуляр 10). Система, состоящая из элементов 11, 12 и 13, служит для юстировки прибора. Асферометр снабжен устройством для вращения системы 1—7 вокруг вертикальной оси, что дает возможность проверить поверхность в любом сечении. Если какая-либо зона контролируемой поверхности имеет ошибку, то отраженный пучок лучей отклоняется от оси поверхности, падает наклонно к оси зрительной трубы 8—10, что в конечном итоге приводит к смещению изображения диафрагмы 2 с центра сетки 9.

Перемещая линзу 7 вдоль оси, можно измерить фокусное расстояние отражающей параболической поверхности. Конструкция асферометра рассчитана на установку проверяемой детали вместе со шпинделем станка «Парабола» и имеет следующие характеристики: максимальное отклонение контролируемой поверхности от идеальной $30'$, диапазон световых диаметров контролируемых поверхно-

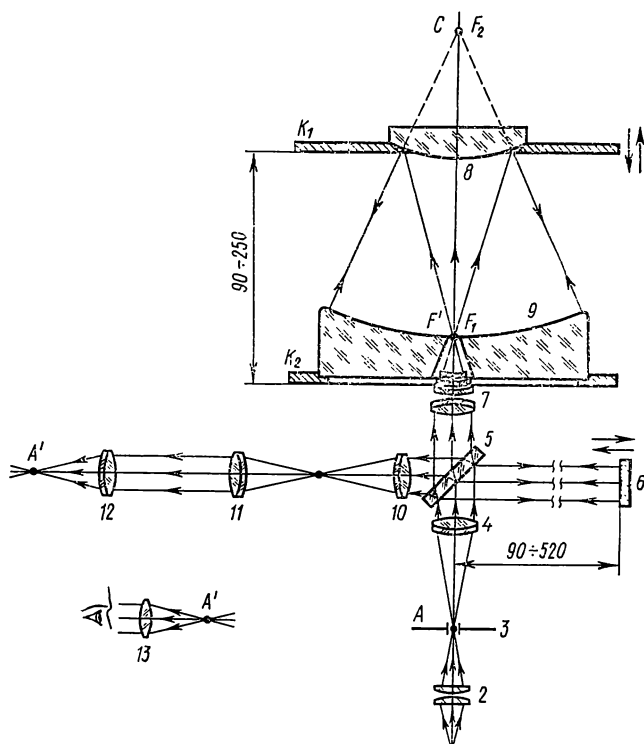


Рис. 61. Оптическая схема интерферометра ИКП-1

тей 5—150 мм, относительное отверстие не более 1:0,2; точность измерения угловой ошибки поверхности для параболоидов с фокусным расстоянием 75—110 мм не более $10''$. Недостатком прибора является невозможность контроля поверхности за один прием на полном световом диаметре и сравнительно невысокая точность; кроме того, местные ошибки поверхности могут остаться не обнаруженными, так как контроль производится в отдельных меридиональных сечениях.

Для высокоточного контроля асферических поверхностей второго порядка на полном световом диаметре разработан [56] интерферометр ИКП-1, оптическая схема которого изображена на рис. 61. Монохроматический источник света 1 (например, натриевая лампа

с длиной волны излучения 589,3 нм) с помощью конденсора 2 освещает отверстие диафрагмы 3 (точка A — центр отверстия), расположенной в фокальной плоскости коллиматорного объектива 4. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива 4, поступает на полупрозрачную пластинку 5 и делится ею на два пучка, один из которых идет в эталонную ветвь интерферометра, содержащую только один элемент — эталонное плоское зеркало 6. Лучи света, отраженные от зеркала 6, образуют плоский волновой фронт сравнения (референтный волновой фронт). Другой пучок идет в рабочую ветвь интерферометра, состоящую из элементов 7, 8 и 9. Объектив 7 формирует строго сферический волновой фронт, центром которого является задний фокус F' объектива 7. С точкой F' совмещен первый геометрический фокус F_1 выпуклой гиперболической поверхности 8, являющейся объектом контроля. Второй геометрический фокус F_2 совмещен с центром кривизны эталонного сферического зеркала 9. Таким образом, в рабочей ветви интерферометра установлена автоколлимационная система, состоящая из контролируемой поверхности 8 и эталонного зеркала 9, обеспечивающая двукратное отражение лучей от контролируемой поверхности. Ход лучей ясен из рисунка. Пучок лучей, выходящий из рабочей ветви, поступает на разделительную пластинку 5, отражается от него и интерферирует с волновым фронтом, идущим из эталонной ветви. Для наблюдения интерференционной картины служит телескопическая лупа 10—12, для юстировки интерферометра используют откидной окуляр 13, сфокусированный на точку A' — изображение точки A , построенное обеими ветвями интерферометра.

Совмещение точек F_1 с F' и F_2 с C , а также настройка интерференционной картины на кольца или полосы осуществляется перемещением деталей 8 и 9, установленных на каретках K_1 и K_2 , расстояние между которыми может меняться в значительных пределах. Это дает возможность контролировать асферические поверхности различных видов и параметров [36, 56].

Поскольку лучи света дважды отражаются от контролируемой поверхности, то ее погрешности переносятся на волновой фронт в масштабе 4:1, т. е. цена одной интерференционной полосы соответствует погрешности поверхности, равной $\lambda/4$. Однако цена интерференционной полосы, строго говоря, — переменная величина, так как угол падения лучей на контролируемую поверхность лишь вблизи оси близок к нулю, а на краю значительно увеличивается, иногда до 20—25°. Учет этого обстоятельства описан в работах [19, 20].

Среди асферических поверхностей второго порядка наибольшее распространение получила вогнутая параболическая поверхность, часть которой используется как объектив зеркальных или зеркально-линзовых систем различного назначения (оптические телескопы, коллиматоры, прожекторы, пеленгаторы целей и т. д.). Замечательное свойство вогнутого параболоида заключается в том, что осевой параллельный пучок лучей, падающий на идеальный параболоид, после отражения образует строго гомоцентрический пучок лучей не-

зависимо от относительного отверстия параболоида. Это свойство широко используется для контроля формы вогнутых параболоидов методом пентапризм, перемещающихся в меридиональной плоскости параболоида.

Примером реализации метода пентапризм может служить прибор (рис. 62) для контроля профиля вогнутых параболических поверхностей *. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива автоколлиматора 4, поступает на пентапризмы 2 и 2', снабженные

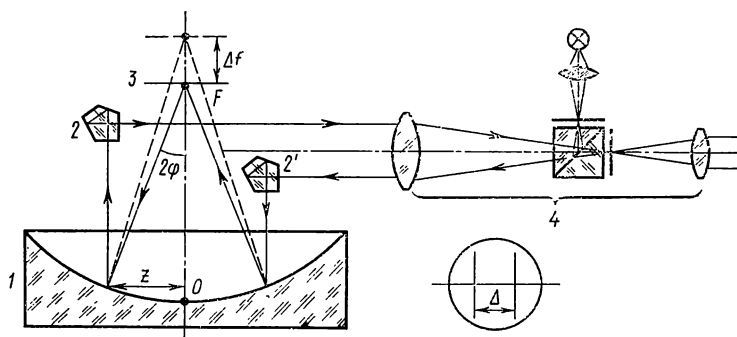


Рис. 62. Принципиальная схема прибора для контроля профиля вогнутых параболических поверхностей

устройством для перемещения их перпендикулярно оси параболоида навстречу друг другу. Узкие пучки лучей, отраженные от пентапризм, падают на различные зоны параболоида и после отражения от него фокусируются в точке F — фокусе параболоида, в фокальной плоскости которого расположено плоское зеркало 3. Очевидно, что если прибор не имеет собственных ошибок, а параболоид идеален, то фокус любой зоны находится в точке F . В поле зрения автоколлиматора в этом случае наблюдается одно автоколлимационное изображение перекрестия или марки. Если поверхность имеет ошибки, то при перемещении пентапризм из одной зоны в другую образуются два автоколлимационных изображения марки, расстояние Δ между которыми может быть измерено винтовым окулярным микрометром. Величину ошибок параболоида можно определить, перемещая плоское зеркало 3 вдоль оси OF на величину Δf до совмещения обоих автоколлимационных изображений. Величина Δf связана с остальными параметрами схемы формулой

$$\Delta f = p \sin \gamma / [2 \sin 2\varphi (1 - \cos 2\varphi)],$$

где p — параметр параболической поверхности; φ — угол нормали с осью параболоида; γ — угол отклонения нормали для зоны с координатой z .

* Подобрыйский А. В., Рудь Г. М., Семибратов М. Н. Авторское свидетельство № 267084.

Таким образом, сущность измерений на рассматриваемом приборе сводится к определению положения фокусов различных зон. Для получения достоверных результатов важно принять во внимание, что плоское зеркало 3 должно занимать строго постоянное положение в процессе контроля, иначе пучки лучей отнесутся от несимметричных зон контролируемой поверхности, что не позволит определить принадлежность ошибки той или иной зоны. То же самое может произойти и при контроле крупногабаритных астрономических зеркал, у которых в силу особенностей технологического процесса изготовления ошибки носят несимметричный характер, т. е. симметричные зоны поверхности часто имеют совершенно различные по величине и знаку ошибки.

Для контроля формы параболических зеркал крупных телескопов можно использовать устройство*, схема которого изображена на рис. 63. Здесь 1 — контролируемое параболическое зеркало, 2 — пентапризмы, 3 — зеркальная плоскопараллельная пластинка, 4 — источник света, 5 — автоколлимационный окуляр или окуляр-микроскоп. Перекрестие шкалы окуляра 5 или точечная диафрагма, освещенная источником света 4, совмещена с фокусом F контролируемой параболической поверхности зеркала 1. Лучи света, отраженные от зеркала 1, идут параллельно оптической оси и попадают на пентапризму 2, а затем на зеркальную пластинку 3, установленную перпендикулярно падающим лучам. После отражения от нее лучи света повторяют свой путь в обратном направлении и возвращаются в точку F , что контролируется с помощью окуляра 5. Пентапризмы перемещаются в направлении, перпендикулярном оптической оси зеркала 1. Если последнее имеет идеальную форму, то при любом положении пентапризм отраженные лучи собираются в точку F . В противном случае автоколлимационное изображение точки F смещается на величину Δ , определяемую по формуле: $\Delta = 4f\gamma$, где γ — угол отклонения нормали от номинального значения; f — фокусное расстояние параболического зеркала. Так как фокусное расстояние зеркала известно, а величина Δ измеряется по шкале окуляра 5, то для каждого положения пентапризм легко определить угол γ , характеризующий качество контролируемого зеркала.

С помощью окуляр-микроскопа величина Δ измеряется с точ-

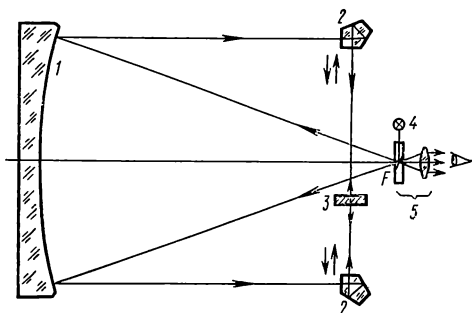


Рис. 63. Принципиальная схема устройства для контроля профиля астрономических зеркал крупных телескопов методом пентапризм

* Пуряев Д. Т. Авторское свидетельство № 450077.

ностью 0,01 мм; если фокусное расстояние $f=24$ м, то угол γ можно определить с точностью порядка 0,02". Отсюда ясно, что применение устройства выгодно для длиннофокусных параболических зеркал, применяемых в крупных телескопах.

Собственно процесс контроля сводится к следующему: пентапризмы перемещаются перпендикулярно оптической оси зеркала 1 и для ряда их положений измеряется величина смещения автоколлимационного изображения перекрестия или точки. Очевидная простота контроля повышает его производительность.

Отличительной особенностью устройства является расположение зеркальной пластинки 3, установленной параллельно оптической оси контролируемого зеркала. Так как лучи света дважды отражаются от контролируемого зеркала, то погрешности его профиля учтутверяются, что значительно повышает точность контроля. Надежность контроля обеспечивается тем, что возможные наклоны пластинки 3 (например, вследствие вибраций) не меняют расстояния между автоколлимационными изображениями перекрестий, построенными пентапризмами. Это позволяет выявить астигматизм поверхности зеркала или его деформации, вызванные собственной массой.

Большие возможности для контроля асферических поверхностей открывает голографический метод. Он основан на применении искусственных голограмм, выполняющих роль либо эталонной поверхности, либо оптического компенсатора. Голографический метод реализуется на специальных приборах — голографических интерферометрах, оптические схемы которых во многих случаях строят по схеме интерферометра Тваймана — Грина, но дополняют ее специальным элементом — голограммой. Подробные сведения о голографических интерферометрах, применяемых для контроля асферических поверхностей, приведены в специальной литературе [10, 16, 38, 44].

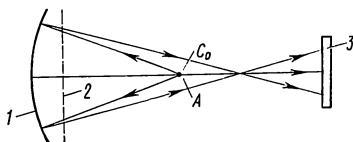
§ 16. Контроль формы астрономических зеркал

В последние годы наблюдается повышенный интерес к астрономическим приборам, работающим как за пределами земной атмосферы, так и с поверхности Земли. Во многих странах мира начато или планируется создание крупных телескопов, главные зеркала которых имеют диаметр свыше 1 м, иногда — несколько метров; они имеют, как правило, параболическую форму, реже — гиперболическую. Параболические зеркала телескопов диаметром свыше 1 м имеют относительное отверстие, не превышающее, как правило, 1 : 4, за редким исключением 1 : 3,3. Создание крупного телескопа оправдано только в случае, если оптическая система телескопа имеет высшее качество. Допустимое отклонение действительной формы отражающей поверхности от ее теоретического вида не должно превышать, как правило, долей длины волны видимой области спектра, т. е. десятых и даже сотых долей микрона. Обеспечить такую точность на асферической поверхности площадью несколько десятков квадратных метров — чрезвычайно трудная задача. Вот почему соз-

дание крупного первоклассного телескопа воспринимается как национальное достижение, основанное на использовании всего научного и промышленного потенциала страны.

В СССР завершено создание крупнейшего в мире оптического телескопа принципиально новой конструкции с главным зеркалом диаметром 6 м, сокращенно именуемого БТА (большой телескоп азимутальный). Работы по созданию БТА проводились под руководством генерального конструктора Б. К. Иоаннисиани [26]. В создании БТА принимали участие многие предприятия, заводы и научно-исследовательские институты, возглавляемые Ленинградским

Рис. 64. Схема контроля астрономических зеркал методом Гартмана



оптико-механическим объединением им. В. И. Ленина. Качество главного зеркала БТА уже в первые годы эксплуатации обеспечило открытие новых галактик, звезд и других объектов Вселенной. Однако достигнутые характеристики разрешающей способности телескопа — не предел; работы, направленные на повышение качества всей оптической системы и прежде всего главного зеркала БТА, продолжаются.

Одним из наиболее распространенных методов контроля астрономических зеркал является метод Гартмана [16, 21, 47]. Суть его заключается в следующем. Точечный источник света A (рис. 64) или его изображение совмещают с центром кривизны C_0 контролируемого зеркала 1 . Вблизи поверхности зеркала устанавливают диафрагму 2 , представляющую собой непрозрачный экран с множеством круглых отверстий. Лучи света, идущие из точки A , отражаются от открытых участков поверхности зеркала и поступают на фотопластинку 3 , установленную на известном расстоянии от зеркала. На фотопластинке возникают следы лучей, отраженных от зеркала; они представляют собой размытые пятна. Координаты следов лучей на фотопластинке зависят от геометрических параметров схемы, сферической аберрации, вызванной параболической формой зеркала и его ошибками, под которыми понимают отклонение реальной поверхности зеркала от ее теоретического вида. Все геометрические параметры схемы (положение источника света и фотопластинки относительно зеркала, координаты центров отверстий диафрагмы, расстояние от плоскости диафрагмы до вершины зеркала) измеряют заранее с необходимой точностью. На практике источник света A во избежание центрального экранирования смещают с оси зеркала; возникающая при этом аберрация комы пренебрежимо мала для зеркал с относительным отверстием до $1:4$ и большим фокусным расстоянием.

После проявления фотопластинки определяют координаты центров пятен на измерительных микроскопах или специальных прибо-

рах и сравнивают их с теоретическими значениями координат; эта информация позволяет составить карту ошибок поверхности зеркала и в конечном итоге сделать заключение о пригодности его использования по прямому назначению. Для обработки результатов измерений в настоящее время широко используют ЭВМ. При высоком уровне организации измерений, тщательной обработке результатов и учете принципиальных особенностей метода погрешность в определении ошибок поверхности зеркала не превышает 0,05 длины волн света.

Важное достоинство метода Гартмана — возможность его реализации с помощью простых технических средств, а главное без использования вспомогательных оптических элементов. Рассмотрим принципиальные особенности метода. Лучи, падающие на отверстие диафрагмы, образуют отраженный пучок, усредняющий ошибки открытых участков поверхности зеркала. Так как лучи света от закрытых участков зеркала вообще не попадают на фотопластинку, то заключение о форме поверхности зеркала на закрытых участках можно сделать, строго говоря, только предположительно, на основании информации о «поведении» поверхности на открытых участках. Вероятность достоверных заключений тем выше, чем меньше ошибки поверхности, т. е. чем ближе она к идеальной. При обработке крупных астрономических зеркал ошибки их формы часто носят нерегулярный характер, поэтому даже соседние открытые участки, равноудаленные от центра зеркала, оказываются «непохожими» друг на друга. Разворот диафрагмы вокруг оси не меняет сути дела, хотя и несколько повышает достоверность заключений. Поэтому контроль астрономических зеркал методом Гартмана не является исчерпывающим; результаты контроля всегда сопоставляют с результатами контроля другими методами, например теневым, интерференционным или фотоэлектрическим. Впрочем, это же самое можно сказать и о любом другом методе контроля.

Указанных недостатков лишен интерференционный метод, позволяющий получить полную информацию об ошибках формы одновременно всех участков поверхности зеркала. Интерференционный метод обладает большой наглядностью, не требует длительной обработки результатов, имеет достаточно высокую точность, но реализуется с помощью сравнительно сложных приборов — интерферометров.

Для контроля формы поверхности второго главного зеркала БТА был использован интерферометр ИКАП-2 с универсальным компенсатором в рабочей ветви*.

Сущность компенсационного метода, реализуемого на интерферометре, заключается в том, что с помощью дополнительного оптического элемента (компенсатора) плоский или сферический волновой фронт преобразуется в асферический, совпадающий с теоретической формой контролируемой поверхности.

* Пуряев Д. Т. Авторские свидетельства № 155964 и № 508671. В разработке интерферометра ИКАП-2 принимали участие В. А. Горшков, Н. Л. Лазарева, А. В. Дягилева, В. С. Кряхтунов и др.

На рис. 65 показано взаимное расположение компенсатора 1 и контролируемой асферической поверхности 2; центр кривизны C_0 при вершине поверхности совмещен с параксиальным фокусом F'_0 компенсатора, а оптическая ось компенсатора совпадает с осью симметрии асферической поверхности. Параллельный пучок лучей, падающий на компенсатор, после выхода из него преобразуется в пучок, все лучи которого направлены по нормальным к асферической поверхности. Отразившись от последней, лучи света повторяют путь в обратном направлении и по выходе из компенсатора вновь

Рис. 65. К сущности компенсационного метода контроля асферических поверхностей

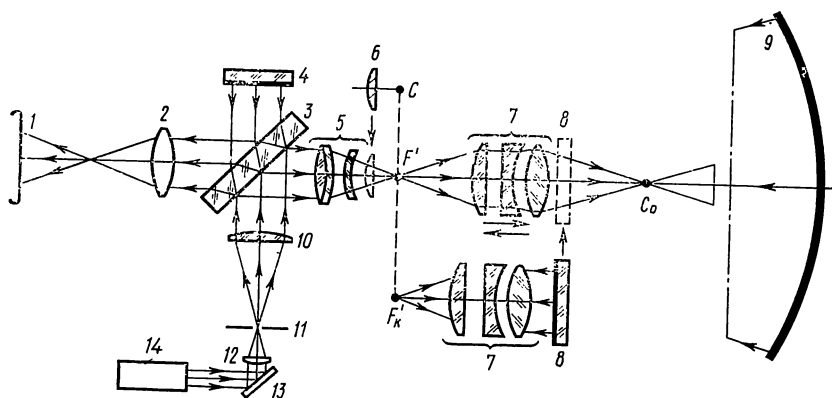
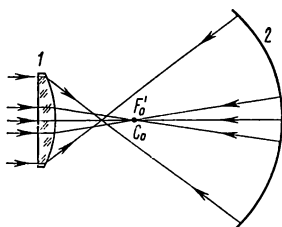


Рис. 66. Оптическая схема интерферометра ИКАП-2

образуют параллельный пучок лучей. Таким образом, назначение компенсатора в общем случае заключается в преобразовании плоского или сферического волнового фронта в волновой фронт заданной формы. С точки зрения геометрической оптики назначение компенсатора состоит в компенсации аберраций нормалей асферической поверхности; отсюда следует название метода — компенсационный. Компенсационная система, состоящая из компенсатора и асферической поверхности, во всех случаях образует автоколлимационную систему с угловым увеличением, равным единице.

Оптическая схема интерферометра ИКАП-2 (рис. 66) построена по схеме интерферометра Тваймана — Грина, но принципиально отличается от него устройством рабочей ветви. Интерферометр имеет компактную конструкцию (рис. 67).

Рассмотрим ход лучей в интерферометре. Лучи света, выходящие из гелий-неонового лазера 14 (см. рис. 66) (длина волны излучения $\lambda = 632,8$ нм), поступают на плоское зеркало 13, затем на линзу 12 и фокусируются в отверстии диафрагмы 11, установленной в задней фокальной плоскости линзы 10. Очевидно, что элементы 12 и 10 образуют телескопическую систему Кеплера, а элементы 14—10 — осветительную ветвь интерферометра. Параллельный пучок лучей, выходящий из линзы 10, направляется на полупрозрачную плоскопараллельную пластинку 3, где разделяется на два пучка. Один

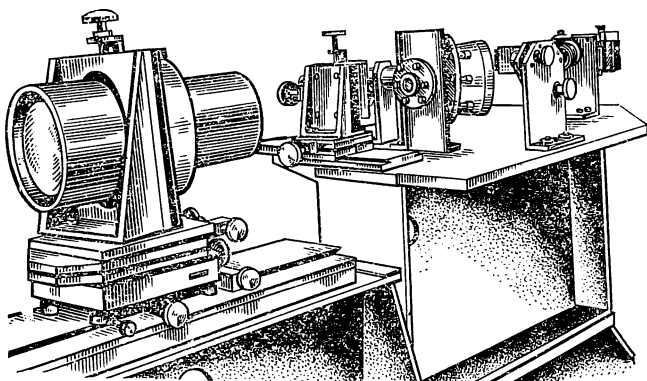


Рис. 67. Внешний вид интерферометра ИКАП-2

из них направляется к эталонному плоскому зеркалу 4, образующему эталонную ветвь интерферометра. Другой пучок идет в рабочую ветвь интерферометра, содержащую объектив 5, компенсатор 7 и контролируемую асферическую поверхность 9 с центром кривизны C_0 при ее вершине. Объектив 5 предназначен для формирования строго сферического волнового фронта; для проверки его качества в рабочую ветвь интерферометра вводят эталонное сферическое зеркало 6, центр кривизны C которого совмещают с задним фокусом F' объектива 5.

Компенсатор 7 преобразует сферический волновой фронт, выходящий из объектива 5, в строго параболический волновой фронт, соответствующий теоретической форме главного зеркала БТА. Для проверки качества компенсатора 7 в рабочую ветвь интерферометра вводят эталонное плоское зеркало 8, а задний фокус $F'_к$ компенсатора совмещают с задним фокусом F' объектива 5.

Лучи света, отраженные от контролируемой поверхности 9, повторяют свой путь в обратном направлении и после выхода из рабочей ветви интерферируют с лучами, отраженными от эталонного плоского зеркала 4. Для юстировки интерферометра, наблюдения и фотографирования интерференционной картины служат линза 2, фотографический объектив (на рисунке не показан) и фотопленка 1; они образуют регистрирующую ветвь интерферометра.

«Сердцем» прибора является компенсатор 7, призванный формировать строго параболический волновой фронт [57]. Он состоит из трех линз: плосковыпуклой, плосковогнутой и двояковыпуклой. Первые две линзы выполнены из стекла марки ЛК6; они имеют равные по величине радиусы сферических поверхностей, образуя как бы пару пробных стекол, поэтому их можно использовать для взаимного контроля. Очевидно, что погрешности изготовления взаимно контролируемых поверхностей линз в два раза меньше, чем при обычном способе контроля пробными стеклами.

В основной схеме применения компенсатора задний фокус F' объектива 5 совмещен с передним фокусом первой поверхности компенсатора, поэтому лучи света вблизи оси идут параллельно оптической оси между сферическими поверхностями плосковыпуклой и плосковогнутой линз. Нанесение зеркального покрытия на плоскую поверхность одной из линз в пределах нерабочей зоны дает возможность точно установить объектив 5 относительно компенсатора 7, используя автоколлимационное отражение лучей.

Важным свойством компенсатора является возможность его окончательного и высокоточного контроля как готового изделия на этом же интерферометре. Эта возможность основана на том,

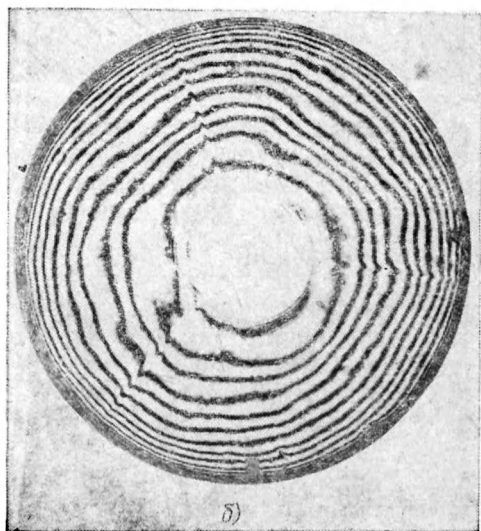
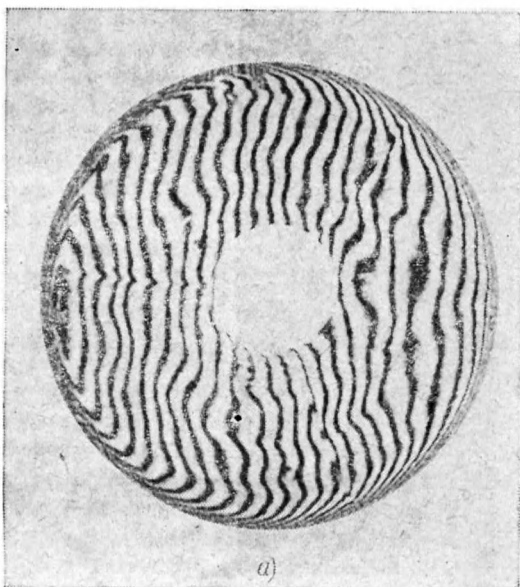


Рис. 68. Интерференционная картина, полученная на интерферометре ИКАП-2 при контроле второго главного зеркала БТА:

a — в виде полос; b — в виде колец

что параллельный пучок лучей, падающий на компенсатор со стороны двояковыпуклой линзы, преобразуется в пучок, мало отличающийся от гомоцентрического (волновая аберрация не превышает $\lambda/4$). Таким образом, изготовленный компенсатор можно проверить с высокой точностью на интерферометре при той же длине волны света, которая используется для контроля асферической поверхности, что гарантирует высокую достоверность результатов контроля зеркала БТА.

Наиболее ценное свойство компенсатора заключается в универсальности его применения [57]. Он позволяет контролировать параболические, гиперболические

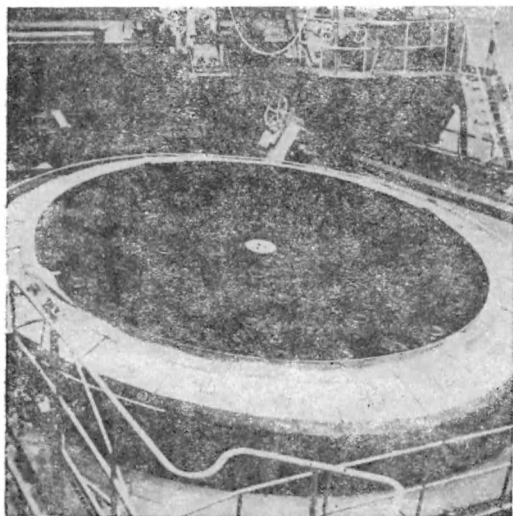


Рис. 69. Второе главное зеркало БТА, установленное на планшайбе станка, в стадии полировки

и эллиптические зеркала с различными параметрами, при этом конструкция компенсатора остается неизменной, но изменяется положение компенсатора относительно контролируемой поверхности и центра сферического волнового фронта, входящего в компенсатор. Это свойство имеет особо важное значение для технологического контроля параболического зеркала, начиная с грубой формы параболоида и заканчивая стадией точной доводки, когда форма контролируемой поверхности последовательно приобретает форму эллипсоидов с эксцентриситетами от нуля (сферическая поверхность)

до единицы (параболическая поверхность).

Заключение о качестве контролируемой поверхности делают по виду интерференционной картины, которая может быть получена как в виде полос, так и в виде колец (рис. 68, а, б). Как известно, по одной интерферограмме теоретически невозможно определить знак погрешности (бугор или яма), однако этот недостаток имеет значение только в теории метода, но не на практике. Так как изготовление астрономических зеркал весьма трудоемкий процесс, в котором применяются не только интерференционный, но и другие методы контроля, то технологам обычно хорошо известны места расположения бугров и ям на поверхности зеркала. Эти характерные участки и служат для определения знаков погрешностей и выбора базовой поверхности, относительно которой можно определить знак погрешностей зеркала и их величину, зная, что цена одной интерфе-

ренционной полосы равна $\lambda/2$. В настоящее время для обработки интерферограмм применяют ЭВМ.

Интерферометр ИКАП-2 многократно использовался для технологического контроля второго главного зеркала БТА (рис. 69), а также для его аттестации. Результаты контроля сопоставлялись с результатами контроля другими методами, например методом Гартмана, теневым, фотоэлектрическим, методом изофот, интерференционным методом с применением интерферометра сдвига и др. Эти сопоставления позволили сделать убедительный вывод: интерферометр ИКАП-2 с универсальным компенсатором в рабочей ветви обеспечивает получение в высшей степени достоверных результатов. Таким образом, подтвердилась практическая ценность и правильность научных идей, заложенных в интерферометре ИКАП-2 и универсальном компенсаторе.

Глава IV. Методы испытания оптического стекла

Оптическое бесцветное стекло представляет собой сложное по химическому составу неорганическое вещество в затвердевшем аморфном состоянии, обладающее высокой однородностью, прозрачностью, бесцветностью. Оно является основным материалом для изготовления оптических деталей приборов: линз, призм, зеркал, клиньев, плоскопараллельных пластинок, волоконных элементов и т. д. Для изготовления светофильтров используют, как правило, оптическое цветное стекло.

С 1 января 1979 г. до 1 января 1984 г. действует ГОСТ 3514—76 «Стекло оптическое бесцветное», согласно которому оптическое бесцветное стекло в зависимости от расположения на координатном поле диаграммы «показатель преломления n_e — коэффициент дисперсии v_c » изготавливают следующих типов: ЛК — легкий крон, ФК — фосфатный крон, ТФК — тяжелый фосфатный крон, К — крон, БК — баритовый крон, ТК — тяжелый крон, СТК — сверхтяжелый крон, ОК — особый крон (с особым ходом дисперсии), КФ — кронфлинт, БФ — баритовый флинт, ТБФ — тяжелый баритовый флинт, ЛФ — легкий флинт, Ф — флинт, ТФ — тяжелый флинт, СТФ — сверхтяжелый флинт, ОФ — особый флинт (с особым ходом дисперсии). Стекла изготавливают двух серий: обычные — с нумерацией марок от 1 до 99 и серии 100 — малотемнеющие под воздействием ионизирующего излучения с нумерацией марок от 100 до 199. Стекло нормируют по следующим параметрам: а) показатель преломления n_e ; б) средняя дисперсия $n_{F'} - n_{C'}$; в) однородность партии заготовок по показателю преломления; г) однородность партии заготовок по средней дисперсии; д) оптическая однородность; е) двойное лучепреломление; ж) радиационно-оптическая устойчивость (стекла серии 100); з) показатель ослабления ϵ_d ; и) бессвильность; к) пузырность.

Значения показателя преломления n_e и средней дисперсии $n_{F'} - n_{C'}$ установлены в качестве номинальных. Длины волн, обозначенные F' и C' , соответствуют линиям спектра кадмия и равны 480,0 и 643,8 нм. Длина волны, обозначенная e , соответствует линии спектра

ртути и равна 546,07 нм. В каталогах оптического стекла приведены показатели преломления стекол для длин волн видимой области спектра (табл. 10) и соответствующих им спектральных линий химических элементов. В ультрафиолетовой области спектра показатели преломления стекол даны для длины волны 365,0 нм (линия i , ртуть); в инфракрасной области спектра — для длин волн 800; 863; 900; 950,8 нм, 1 мкм и далее: от 1,05 до 1,20 мкм через 0,05 мкм; от 1,3 до 2,6 мкм через 0,1 мкм.

Т а б л и ц а 10

Длина волны, нм	Цвет	Обозначение линии спектра	Химический элемент
766,49	Красный	A'	Калий
656,28	»	C	Водород
643,8	»	C'	Кадмий
589,3	Желтый	D	Натрий
587,56	»	d	Гелий
546,07	Зеленый	e	Ртуть
486,13	Голубой	F	Водород
480,0	»	F'	Кадмий
435,8	Синий	g	Ртуть
434,05	»	G'	Водород
404,66	Фиолетовый	h	Ртуть

В нормативно-технической документации, утвержденной до 1 января 1979 г., допускается использовать значения показателя преломления n_D вместо n_e и средней дисперсии $n_F - n_C$ вместо $n_F - n_{C'}$. Условное обозначение стекла при записи в документации должно состоять из обозначений марки стекла и действующего стандарта. Пример условного обозначения оптического бесцветного стекла марки К8: стекло К8 ГОСТ 3514—76.

В зависимости от предельного отклонения значения показателя преломления n_e и средней дисперсии $n_F - n_C$, установлены пять категорий (табл. 11). По оптической однородности установлены две системы оценки заготовок в зависимости от их размеров. Для заготовок, у которых диаметр или наибольшая сторона не превышают 250 мм, установлены пять категорий оптической однородности (табл. 11), характеризующих разрешающей способностью при $\lambda = 0,55$ мкм. Разрешающая способность заготовки стекла определяется как отношение угла разрешения φ дифрактометра (коллиматорной установки по ГОСТ 3518—69), в параллельный пучок которого введена заготовка стекла, к углу разрешения φ_0 самого дифрактометра. Отличие стекла первой категории от второй заключается в том, что для стекла первой категории дифракционное изображение точечной миры должно состоять из круглого пятна, окруженного концентричными кольцами, и не иметь разрывов, хвостов и заметного на глаз отклонения от круга. Для заготовок стекла размером более 250 мм установлены пять категорий оптической однородности (см. ГОСТ 3514—76), характеризующих тремя коэффициентами: K_ϕ , обусловленным неоднородностью показателя преломления,

Таблица 11

Категория	Отклонение показателя преломления	Отклонение средней дисперсии	Оптическая однородность	Двойное лучепреломление, нм/см, не более			Показатель ослабления ϵ_A , см ⁻¹	Бессвильность	Пузырность, диаметр пузыря в заготовке, мм, не более
				при оптическом коэффициенте напряжения $10^{12} \cdot 1/\text{Па}$					
				до 2,0	от 2,0 до 2,8	св. 2,8			
1	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	1,0	1,5	2	3	0,0002—0,0004	ГОСТ 3521—69	0,002
1а	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$	1,0	4	6	8	0,0005—0,0009		0,05
2	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	1,1	7	10	13	0,0010—0,0017		ГОСТ 3521—69 0,1
3	$\pm 10 \cdot 10^{-4}$ $\pm 20 \cdot 10^{-4}$	$\pm 10 \cdot 10^{-5}$ $\pm 20 \cdot 10^{-4}$	1,2	10	15	20	0,0018—0,0025		0,2
4			1,5	35	50	65	0,0026—0,0035		0,3
5							0,0036—0,0045		0,5
6							0,0046—0,0065		0,7
7							0,0066—0,0130		1,0
8									2,0
9									3,0
10								5,0	

возникающей в процессе отжига стекла; ΔK , обусловленным асимметричным относительно оси заготовки расположением неоднородностей показателя преломления, возникающих в процессе отжига стекла; K_x , обусловленным неоднородностью показателя преломления, возникающей в процессе варки и разделки стекло-массы.

По двойному лучепреломлению установлены пять категорий стекла (табл. 11), характеризующихся разностью хода двух лучей, на которые разделяется падающий луч под действием напряжений при прохождении в направлении наибольшего размера заготовки. К стеклу третьей категории предъявляется дополнительное требование: в заготовках деталей поляризационных приборов при просмотре в поляризованном свете в рабочем направлении не должны обнаруживаться просветленные участки.

По показателю ослабления ϵ_A установлены восемь категорий стекла (см. табл. 11). Под показателем ослабления ϵ_A понимают величину, обратную расстоянию, на котором поток излучения источника A по ГОСТ 7721—76 ослабляется в 10 раз. Ослабление потока вызывается поглощением и рассеиванием его в стекле. Например, если $\epsilon_A = 0,0005 \text{ см}^{-1}$, то начальный поток после прохождения в стекле пути, равного 2000 см, уменьшится в 10 раз.

Бессвильность оптического стекла характеризуется двумя категориями и двумя классами. В среднем допускается не более 10 узлов свилей длиной до 10 мм в 1 кг стекла. Категории стекла по бессвильности установлены по ГОСТ 3521—69. В зависимости от числа направлений, в которых проверяют заготовку стекла, установлены два класса бессвильности: A — два взаимно перпендикулярных направления, B — одно направление.

По пузырьности установлены одиннадцать категорий (см. табл. 11), характеризующихся диаметром наибольшего пузыря, допускаемого в заготовке. Если пузырь имеет удлиненную форму, то за его диаметр принимают размер, полученный как среднее арифметическое длин его наибольшей и наименьшей осей. Камни, кристаллы, головки свилей приравнивают к пузырям. Камни, сопровождаемые трещинами, не допускаются.

Следует помнить, что соблюдение стандартов обязательно в тех случаях, когда составляют официальные документы, характеризующие качество оптического стекла. Ниже рассмотрены методы и приборы, применяемые для испытания качества оптического стекла. В практике оптической измерительной лаборатории часто возникает задача определения характеристик качества стекла, параметров деталей или прибора в научно-исследовательских или учебно-методических целях. В этих случаях допускаются отклонения от стандартных методик. При этом научное содержание и сущность методов, разумеется, остаются неизменными.

§ 17. Измерение показателя преломления и дисперсии оптического стекла

Под показателем преломления n вещества (стекла) понимают отношение синуса угла падения ϵ к синусу угла преломления ϵ' , или отношение скорости света в воздухе v_b к скорости света в веществе v_c :

$$n = \sin \epsilon / \sin \epsilon' = v_b / v_c. \quad (39)$$

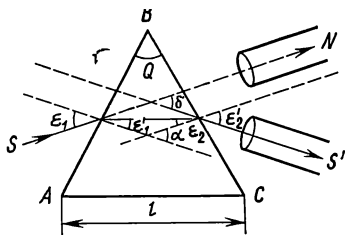


Рис. 70. К измерению показателя преломления и дисперсии стекла методом наименьшего отклонения на гониометре-спектрометре

При постоянной температуре и барометрическом давлении воздуха показатель преломления стекла для выбранной длины волны света величина неизменная.

Для измерения показателя преломления и дисперсии стекла применяют следующие методы.

1. Метод наименьшего отклонения и метод автоколлимации, осуществляемые на гониометре-спектрометре с точностью до $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ показателя преломления.

2. Метод измерения предельного угла выхода лучей из призмы на рефрактометре с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ показателя преломления и $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ дисперсии.

3. Иммерсионный метод Обреимова с точностью определения показателя преломления $\pm 1 \cdot 10^{-4}$.

4. Интерференционный метод позволяет измерять показатель преломления сравниваемых образцов стекла одной марки с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Метод наименьшего отклонения. Этот метод основан на определении угла минимального отклонения луча призмой. Последний образуется при нормальном падении луча на биссектрису преломляющего угла призмы, при этом $\epsilon_1 = \epsilon'_2$ и $\epsilon'_1 = \epsilon_2$ (рис. 70), а угол отклонения δ луча SS' от первоначального направления SN имеет наименьшее значение.

В этом случае $\theta = 2\epsilon'_1$ и $\delta = 2\epsilon_1 - \theta$, откуда $\epsilon'_1 = \theta/2$ и $\epsilon_1 = (\delta + \theta)/2$. Так как $\sin \epsilon_1 = n \sin \epsilon'_1$, то, подставляя значения ϵ_1 и ϵ'_1 , находим

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \theta}{2}}{\sin (\theta/2)}. \quad (40)$$

Точность измерения показателя преломления n можно найти после логарифмирования и дифференцирования выражения (40) по переменным n , θ и δ :

$$dn = \frac{n}{2} \left[\operatorname{ctg} \frac{\delta + \theta}{2} (d\delta + d\theta) - \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} d\theta \right].$$

Переходя к квадратам дифференциалов и заменяя их средними квадратическими погрешностями, получаем

$$\sigma_n = \frac{n}{2} \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \frac{\delta + \theta}{2} (\sigma_\delta^2 + \sigma_\theta^2) + \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2} \sigma_\theta^2 \sin^2 1''}.$$

Если углы δ и θ измерены с одинаковыми погрешностями, то

$$\sigma_n = \frac{n}{2} \sqrt{\left(2\operatorname{ctg}^2 \frac{\delta + \theta}{2} + \operatorname{ctg}^2 \frac{\theta}{2} \right) \sigma_\theta^2 \sin^2 1''}.$$

Чтобы измерить n с точностью $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$, требуется иметь гониометр-спектрометр, позволяющий измерять углы δ и θ с погрешностью не более $\pm 2''$, например гониометр-спектрометр ГС-2. Основание образца призмы l (см. рис. 70) должно быть не менее 25 мм, высота 10 мм и обе рабочие грани отполированы с точностью $1/4$ интерференционной полосы.

Стандартом рекомендуется преломляющие углы призмы в зависимости от показателя n выдерживать в пределах 60° для $n < 1,65$; 50° — для $n = 1,65 - 1,75$ и 40° — для $n > 1,75$. Однако предел преломляющих углов без потери точности может быть увеличен до $70 - 75^\circ$ [1]. Для метода автоколлимации преломляющие углы призм должны быть вдвое меньше.

Преломляющий угол призмы измеряется методом автоколлимации несколькими приемами совмещения перекрестия трубы с его автоколлимационным изображением от каждой грани и взятием соответствующих отсчетов по лимбу. Искомый угол определяется по формуле $\theta = 180^\circ - \beta$, где β — разность отсчетов по лимбу.

Призму на столике гониометра устанавливают так, чтобы биссектриса преломляющего угла прошла примерно над осью вращения лимба, а пучок лучей, идущий из объектива коллиматорной трубы, падал бы на середину грани призмы.

Угол δ наименьшего отклонения находится из разности отсчетов места нуля (МО) (визирные оси зрительной и коллиматорной труб совмещены) и наведения оси зрительной трубы на луч S' , находящийся в положении наименьшего отклонения. Соответствующее положение призмы определяется вращением столика гониометра с призмой в одну сторону, например против хода часовой стрелки и наблюдения в зрительную трубу за поведением изображения щели коллиматора, освещенной монохроматическим светом. Можно заметить, что сначала перемещение изображения щели совпадает с направлением вращения столика, затем останавливается и начинает двигаться обратно, хотя столик продолжает вращаться в том же направлении. Момент остановки изображения щели соответствует положению призмы для угла наименьшего отклонения, который измеряется для нужной спектральной линии.

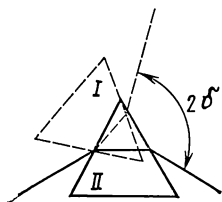


Рис. 71. К повышению точности определения показателя преломления и дисперсии стекла на гониометре-спектрометре

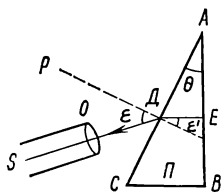


Рис. 72. К измерению показателя преломления и дисперсии стекла методом автоколлимации на гониометре-спектрометре

Поскольку желтая линия натрия D состоит из двух близко расположенных линий с $\lambda = 589,0$ нм и $\lambda = 589,6$ нм, а синяя линия водорода G' , длина волны которой $\lambda = 434,1$ нм мало интенсивна, то целесообразно углы отклонения δ измерять для желтой линии гелия и синей линии ртути g с последующим пересчетом n_d и n_g на n_D и $n_{G'}$, используя поправки $n_d - n_D$ и $n_g - n_{G'}$, взятые из каталога оптического стекла.

Для повышения точности определения n и дисперсии стекла необходимо преломляющий угол θ призмы измерять несколькими приемами на разных участках лимба, а угол

δ — при двух симметричных положениях призмы, дающих двойные углы отклонения 2δ (рис. 71).

Метод автоколлимации. Метод автоколлимации или метод Аббе, как и метод угла наименьшего отклонения, основан на принципе измерения преломляющего угла θ призмы и установке призмы в положение наименьшего отклонения. Разница лишь в том, что преломляющий угол призмы и ее основание здесь вдвое меньше, и установка призмы в положение наименьшего отклонения достигается автоматически простым совмещением автоколлимационного изображения щели зрительной трубы от второй грани AB (рис. 72) со штрихом сетки. Рабочие грани AB и AC полируются с точностью до $1/4$ интер-

ференционной полосы. Стекло призмы должно быть однородным и бесцветным.

Для усиления яркости отраженного пучка лучей от грани AB последнюю серебрят или покрывают алюминием. На рис. 72 видно, что угол отклонения ϵ образуется между нормалью PD к грани AC и лучом DS , отраженным от грани AB . Нормаль PD , продолженная до грани AB , образует с лучом DE угол ϵ' , равный преломляющему углу призмы θ . Отсюда следует: $\sin \epsilon = n \sin \epsilon' = n \sin \theta$, или

$$n = \sin \epsilon / \sin \theta. \quad (41)$$

Продифференцируем формулу (41) по ϵ :

$$dn = \frac{\cos \epsilon}{\sin \theta} d\epsilon$$

и почленно разделим на $n = \sin \epsilon / \sin \theta$; в результате получим выражение, удобное для вычисления дисперсии стекла:

$$dn = n \operatorname{ctg} \epsilon d\epsilon.$$

При вычислении дисперсии угол $d\epsilon$ должен быть выражен в радианах.

Точность измерения показателя преломления стекла можно определить по формуле

$$\sigma_n = n \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \epsilon \sigma_\epsilon^2 + \operatorname{ctg}^2 \theta \sigma_\theta^2} \sin 1''.$$

При равенстве средних квадратических ошибок δ_ϵ и δ_θ

$$\sigma_n = n \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \epsilon + \operatorname{ctg}^2 \theta} \sigma_\theta \sin 1''.$$

Преломляющий угол призмы θ и угол отклонения ϵ измеряют методом автоколлимации, для чего призму на столике гониометра устанавливают так, чтобы пучок лучей, выходящий из объектива трубы, падал нормально и покрывал полностью грани призмы.

Углы отклонения для различных линий спектра ϵ_C , ϵ_D , ϵ_F и ϵ_G , получают из разности отсчетов места нуля (МО) при нормальном падении пучка лучей на грань AC и наведении трубы на отраженное изображение щели от второй грани AB . Подставляя измеренные значения углов θ , ϵ_C , ϵ_D , ϵ_F и ϵ_G , в формулу (41), вычисляют показатели преломления n_C , n_D , n_F и n_G .

Рефрактометр. Рефрактометр получил широкое применение в лабораторной и цеховой практике. Принцип его действия основан на измерении предельного угла выхода луча из системы, составленной из образца, испытуемого стекла и эталонной призмы прибора. Преломляющий угол θ и показатель преломления N эталонной призмы точно известны. Пучок лучей, падающий на грань испытуемого образца, должен скользить вдоль верхней грани призмы прибора.

Пусть луч S_a падает на грань испытуемого образца под углом 90° (рис. 73, а). После преломления в слое промежуточной жидкости и в призме прибора луч выходит в направлении CS' .

Согласно закону преломления

$$n \sin 90^\circ = n' \sin \varepsilon_1, \quad (42)$$

$$n' \sin \varepsilon_1 = N \sin \varepsilon_2, \quad (43)$$

$$N \sin (90^\circ - \varepsilon_2) = N \cos \varepsilon_2 = \sin \varepsilon, \quad (44)$$

где n , n' и N — соответственно показатели преломления испытуемого образца, промежуточной жидкости и эталонной призмы прибора, а ε_1 и ε_2 — углы преломления в жидкости и в эталонной призме.

Из уравнений (42) и (43) имеем

$$n = N \sin \varepsilon_2. \quad (45)$$

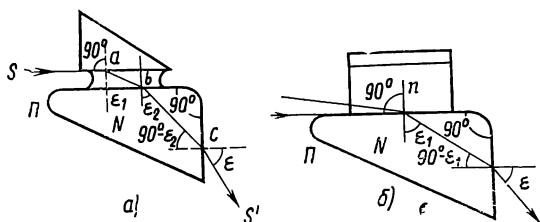


Рис. 73. К измерению показателя преломления и дисперсии стекла на рефрактометре

Это равенство указывает на то, что слой промежуточной жидкости не оказал влияния на измеряемый показатель преломления n и его действие подобно плоскопараллельной пластинке. Чтобы произошло преломление скользящего луча, показатель преломления промежуточной жидкости должен быть больше показателя преломления исследуемого образца и меньше показателя преломления эталонной призмы.

Из равенств (44) и (45) находим

$$\sin \varepsilon_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon / N^2}.$$

Так как $\sin \varepsilon_2 = n/N$, то

$$n/N = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon / N^2}, \text{ откуда}$$

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon}. \quad (46)$$

Зная предельный угол ε выхода луча и показатель преломления N эталонной призмы, по формуле (46) можно вычислить показатель преломления n стекла, в чем можно убедиться из рис. 73. Однако формула (46) применима только в случае, если преломляющий угол эталонной призмы прибора мало отличается от 90° (в пределах $\pm 3''$). Если угол призмы значительно больше или меньше 90° , то показатель преломления испытуемого стекла следует определять по формуле (51) или (52).

Пусть призма прибора Π (см. рис. 73) имеет преломляющий угол $\theta \neq 90^\circ$. По закону преломления имеем следующие отношения:

$$n = N \sin \epsilon_1, \quad (47) \quad N \sin \epsilon_2 = \sin \epsilon. \quad (48)$$

Так как $\epsilon_1 = \theta - \epsilon_2$, то

$$n = N \sin (\theta - \epsilon_2) = N (\sin \theta \cos \epsilon_2 - \sin \epsilon_2 \cos \theta). \quad (49)$$

Из отношения (48) следует:

$$N^2 (1 - \cos^2 \epsilon_2) = \sin^2 \epsilon. \quad (50)$$

Из уравнения (50) находим: $\cos \epsilon_2 = \sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon} / N$.

Подставляя это значение и значение $\sin \epsilon_2$ из формулы (48) в формулу (49), получаем

$$n = N \left(\sin \theta \frac{\sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon}}{N} - \frac{\sin \epsilon}{N} \cos \theta \right),$$

или

$$n = \sin \theta \sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon} - \sin \epsilon \cos \theta. \quad (51)$$

При $\theta < 90^\circ$ формула (51) принимает вид

$$n = \sin \theta \sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon} + \sin \epsilon \cos \theta. \quad (52)$$

При $\theta = 90^\circ$ формулы (51) и (52) тождественны формуле (46).

Определение показателя преломления стекла по формуле (51) или (52) может быть произведено с необходимой степенью точности, если преломляющий угол θ эталонной призмы предварительно измерен на гониометре с погрешностью не более $\pm 2''$.

Дифференцируя формулу (46) по n , ϵ и N , находим

$$dn = - \frac{\sin 2\epsilon}{2 \sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon}} d\epsilon + \frac{N}{\sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon}} dN.$$

Заменяя $\sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon}$ на n , получаем формулу для вычисления дисперсии испытуемого стекла:

$$dn = - \frac{\sin 2\epsilon}{2n} d\epsilon + \frac{N}{n} dN, \quad (53)$$

где $d\epsilon$ — приращение угла ϵ для выбранной линии спектра; dN — дисперсия стекла призмы прибора.

Формулу (53) можно использовать также для нахождения ошибки в измерении показателя преломления стекла:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sin^2 2\epsilon}{4n^2} \sigma_\epsilon^2 + \left(\frac{N}{n}\right)^2 \sigma_N^2}, \quad (54)$$

где σ_ϵ и σ_N — соответственно ошибки в измерении угла ϵ и показателя преломления N .

Отечественная промышленность выпускает три типа рефрактометров: ИРФ-22 (типа Аббе) для измерения показателей преломления жидкостей, ИРФ-23 (типа Пульфриха) для измерения показателей преломления твердых и жидких тел; рефрактометр ИРФ-25 используют только для твердых тел.

Рефрактометр ИРФ-23 (рис. 74) состоит из металлического штатива 22, несущего на себе градусный лимб 16, автоколлимацион-

ную зрительную трубу 17, отсчетный микроскоп 18, лампы 19 и измерительную (эталонную) призму прибора 15.

Зрительная труба жестко скреплена с вертикальным лимбом. Грубое вращение трубы производится вручную, а точное — микрометрическим винтом 20 после закрепления винта 21. Фокусировка на резкость автоколлимационного перекрестия осуществляется вращением окуляра в пределах ± 5 диоптрий.

Осветительная система прибора состоит из двух конденсоров. Конденсор 11 служит для освещения испытуемой детали от газоразрядной трубки 10 (водородной или гелиевой), конденсор 13 — от

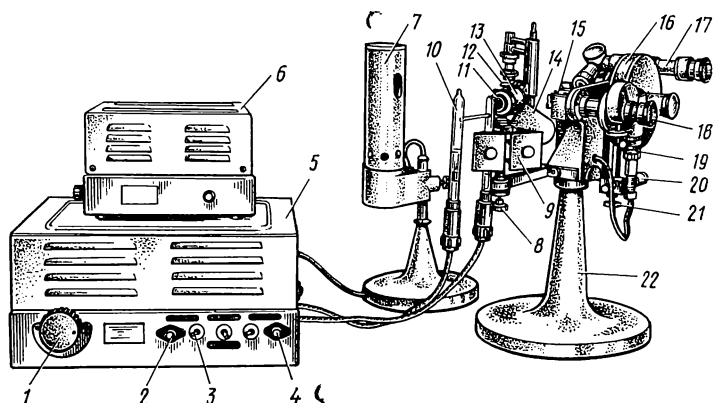


Рис. 74. Общий вид рефрактометра ИРФ-23

натриевой лампы 7. Ниже конденсора 11 имеется держатель 9 для двух газоразрядных трубок. Конденсор 13 крепится на кронштейне, вращающемся вокруг вертикальной оси на 45° для регулирования освещения от натриевой лампы 7, установленной сзади прибора. Для изменения ширины полос оба конденсора снабжены диафрагмами с зубчатыми краями.

Газоразрядная труба питается от индукционной катушки или от пускового приспособления 5 осветительного устройства ОУ-1. Пусковое приспособление представляет собой трансформатор, повышающий напряжение до 3000 В от сети 127 или 220 В. Величина напряжения может быть отрегулирована рукояткой 1.

Для зажигания натриевой лампы служит дроссель 6 осветительного устройства, включающийся в сеть только с напряжением 220 В. Лимб и сетка нитей автоколлимационной зрительной трубы освещаются лампой 19, питающейся через трансформатор 3,5 В, который встроен в пусковое приспособление. Перед включением пускового приспособления и дросселя в сеть необходимо проверить положение вилок, соответствующее напряжению в сети, наличие предохранителей 2 и 4 и заземления через специальную клемму в приспособлении. После этого пусковое приспособление включается в сеть с помощью выключателя 3.

К прибору прилагается набор из трех измерительных (эталонных) призм с показателями преломления $N_D = 1,61675$; $1,740176$ и $1,806196$. Они служат для измерения показателей преломления материалов: призма 1 — от 1,33 до 1,59; призма 2 — от 1,57 до 1,72 и призма 3 — от 1,65 до 1,78. Каждая призма заключена в оправу, устанавливаемую на трехгранный штыр прибора и закрепляемую винтом. Для поддержания постоянной температуры в оправе призм предусмотрены камеры со штуцерами, выходящими наружу. К штуцерам подсоединяют резиновые шланги, через которые пропускается подогретая вода. Температура воды измерительной призмы и испытуемого материала может быть измерена термометром, ввинчиваемым в корпус головки.

Прежде чем приступить к работе на рефрактометре, из прилагаемого набора эталонных призм выбирают призму с показателем преломления N_D , большим показателя преломления испытуемого образца, устанавливают ее на трехгранный штыр прибора и закрепляют винтом.

Образец испытуемого стекла должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда или прямоугольной призмы размером не менее $3 \times 3 \times 3$ мм, две грани которой хорошо отполированы. Грань, соприкасающуюся с эталонной призмой прибора, полируется с точностью двух интерференционных полос на 1 см, а боковую грань, встречающуюся со скользящим пучком лучей, — с точностью пяти полос на 1 см.

Ребро между полированными гранями, образующими угол 90° , не должно иметь фасок и выколок, а прямой угол может иметь ошибку не более $\pm 6'$. Свилы и крупные пузыри не допускаются. Перед установкой испытуемого образца на призму прибора тщательно протирают соприкасающиеся поверхности, затем стеклянной палочкой с закругленным концом наносят на поверхность образца каплю иммерсионной жидкости.

Для стекол с показателем преломления меньше 1,66 используют альфамонобромнафталин ($n_D = 1,66$), а для стекол с показателем преломления больше 1,66 — иодистый метилен ($n_D = 1,76$). Если показатель преломления стекла больше 1,74, то используют иодистый метилен, в котором растворена сера.

Испытуемый образец устанавливают на призму прибора так, чтобы боковая грань была параллельна вертикальной грани призмы и обращена к источнику света.

Пучок лучей, идущий от газоразрядной водородной трубки 10 (рис. 74), направляется и фокусируется конденсором 11 на основание грани испытуемой призмы или жидкости в стаканчике. Фокусировка осуществляется перемещением конденсора вдоль оптической оси винтом 12 и по высоте винтом 8. Резкость изображения проверяется с помощью бумажного экрана, прижатого к грани призмы.

Наблюдая в трубу и изменяя положение монохроматического источника света и образца, убеждаются в соответствии граничной линии цветной полосы предельному углу. При этом граница линий должна занимать крайнее верхнее положение и не перемещаться.

Увеличивая яркость источника света и уменьшая рассеянный свет зубчатой диафрагмой 14 у конденсора 11 и эллиптической диафрагмой перед объективом трубы, можно получить наиболее яркое освещение цветной полосы и его верхней границы.

Если слой иммерсионной жидкости распределяется неравномерно по толщине или случайно между контактными поверхностями попадает пыль, то образуется клин, ведущий к ошибкам в измерениях. Клин легко обнаружить по интерференционным полосам при рассмотрении их невооруженным глазом в монохроматическом свете через вертикальную грань испытуемого образца. Установив трубу на светлую полосу, например на полосу натрия, можно рассматривать интерференционные полосы через лупу 6—8-кратного увеличения, поставленную перед окуляром трубы и сфокусированную на плоскость выходного зрачка.

Для повышения точности измерения показателя преломления необходимо образец легким нажимом руки притереть так, чтобы уничтожить образующийся клин, или расположить интерференционные полосы параллельно плоскости вертикального круга.

На расстоянии 30—40 см от прибора помещают натриевую лампу и конденсором 13 направляют пучок лучей на основание вертикальной грани. Вращая круг с трубой, находят желтую полосу линии натрия.

Если требуется определить показатель преломления жидкости, то на призму рефрактометра приклеивают стеклянный стаканчик. Чтобы скользящий луч прошел внутрь стаканчика, нужно участок между двумя вертикальными рисками на стаканчике установить в сторону конденсора. В стаканчик наливают испытуемую жидкость (около 1,5 см³).

Вначале определяют нульпункт (место нуля) вертикального круга. Для этого освещают сетку нитей зрительной трубы через боковое отверстие автоколлимационного окуляра и добиваются получения в поле зрения трубы автоколлимационного перекрестия от вертикальной грани призмы прибора.

Закрепляя круг зажимным винтом 4 и вращая микрометрический винт, совмещают несколько раз перекрестие с его автоколлимационным изображением или добиваются симметричного расположения перекрестия относительно изображения. Отсчет по вертикальному лимбу берут с помощью отсчетного микроскопа с точностью до 0,0001° на глаз. Отсчетный микроскоп имеет увеличение 61,5^x, поле зрения 2,3 мм и цену деления спирального окулярного микрометра 0,001°. После этого включают натриевую лампу, а зрительную трубу переводят на спектральную линию. Снова закрепляют круг зажимным винтом 4 и, вращая микрометрический винт, наводят перекрестие несколько раз на неподвижный верхний край желтой полосы (рис. 75), снимая отсчеты по лимбу. Затем конденсор 13 (см. рис. 74) отводят в сторону и с помощью осветительного устройства ОУ-1 (или индукционной катушки) включают водородную трубку 10, установленную перед конденсором 11.

Также наводят перекрестие на верхние границы линий *C*, *F* и *G'*

(красной, голубой и синей). При окончательном наведении перекрестия на границу линий следует вращать микрометрический винт всегда в сторону ввинчивания и работать на различных его участках.

При переходе от одной спектральной линии к другой возникает параллакс, особенно заметный для синей области спектра, когда перекрестие и граница линии находятся в различных плоскостях, изменяющих положение в зависимости от смещения глаза. Поэтому важно, чтобы центр зрачка глаза наблюдателя по отношению к оптической оси трубы занимал правильное положение. Иногда при работе можно использовать диафрагму с малым отверстием, установленную перед окуляром зрительной трубы.

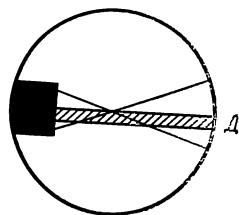


Рис. 75. Поле зрения рефрактометра ИРФ-23

Примеры записи наблюдений и вычислений показателей преломления и дисперсии стекла для линий C , d и F приведены в табл. 12. Значение $n_D = 1,51779$ известно из предварительных измерений.

Таблица 12

Измерительная (эталонная) призма № 1				
№ приема	Место нуля (МО)	Гелий (d)	Водород	
			C	F
1	0,2245°	34,0857°	33,5986°	35,4439°
2	0,2246°	34,0853°	33,5983°	35,4430°
3	0,2248°	34,0854°	33,5978°	35,4442°
4	0,2246°	34,0857°	33,5975°	35,4467°
5	0,2247°	34,0848°	33,5967°	35,4418°
Среднее	0,22464°	34,08538° —0,22464°	33,59778° —0,22464°	35,44392° —0,22464°
ϵ n Δn		33,86074° 1,51819 —0,000329	33,37314° 1,51557 —0,000387	35,21928° 1,52339 0,000103
$n + \Delta n$		$n_d = 1,51786$	$n_C = 1,51518$	$n_F = 1,52329$
Дисперсия dn		$n_D - n_C =$ $= 0,00261$	$n_F - n_C =$ $= 0,00811$	$n_F - n_D =$ $= 0,00550$

Коэффициент дисперсии $v = (n_D - 1) / (n_F - n_C) = 63$.

Вычисление показателя преломления по формуле (46) приведено в табл. 13, дисперсии по формуле (53) — в табл. 14.

Эталонная призма № 1	$N_d = 1,616897; N_D = 1,61675; N_C = 1,611949; N_F = 1,628798$					
Линия	ϵ	$\sin \epsilon$	$\sin^2 \epsilon$	N^2	$N^2 - \sin^2 \epsilon$	n
d	$33^\circ 51' 38,7''$	0,557176	0,310445	2,614356	2,303911	1,51786
C	$33^\circ 22' 23,3''$	0,550089	0,302598	2,598380	2,295782	1,515184
F	$33^\circ 13' 09,4''$	0,576708	0,332592	2,652983	2,320391	1,523283
				$n_D = 1,51779$		

Таблица 14

$d n$	$\sin 2 \epsilon$	$d \epsilon$, рад	$-\frac{\sin 2 \epsilon_d}{2 n_d} d \epsilon$	$d N$	$\frac{N_d}{n_d} d N$	$d n$
$n_d - n_C$	0,925351	0,00851	-0,002594	0,004948	0,005271	0,002677
$n_F - n_d$	0,925351	0,023707	-0,007226	0,011900	0,012676	0,00545

$$n_D - n_C = 0,00261, \quad n_F - n_C = 0,00809, \quad n_F - n_D = 0,00552;$$

$$v = (n_D - 1)/(n_F - n_C) = 63,9.$$

Таблица 15

№ призмы	C	D	F	ϵ	G'
1	4,9	5,2	5,5	6,2	7,0
2	7,4	8,5	9,3	10,9	13,1
3	9,6	10,6	11,7	13,4	16,1

Берут средние значения пяти приемов измерений по вертикальному лимбу места нуля (M_0) и границ спектральных линий C , d и F (см. табл. 11). Разности между средними значениями каждой линии и M_0 образуют предельные углы ϵ_C , ϵ_d , ϵ_F и т. д.

Для каждого угла ϵ_C , ϵ_d (если работают с гелиевой трубкой) и ϵ_F и $\epsilon_{G'}$ по заводским таблицам, составленным через $0,1^\circ$ для каждой эталонной призмы, выбирают значения показателей преломления n_C , n_d и n_F . Для дробных величин углов $0,01$; $0,001$ и $0,0001^\circ$ подсчитывают поправки Δn интерполяцией по дополнительным таблицам пропорциональных частей. Переход к значению n_L производится введением поправки $n_d - n_D$, взятой для соответствующего сорта стекла из каталога. Вычисления ведут до шестого десятичного знака, округляя окончательный результат до пятого знака.

В заводских таблицах показатели преломления для трех эталонных призм имеют правильные значения для измерений при температуре 20°C . При другой температуре нужно вводить поправки, вычисляя показатель преломления по формуле

$$n_t = (n + \Delta n) + \frac{N_\lambda d N}{(n + \Delta n) d t} (t - 20), \quad (55)$$

где N_λ — показатель преломления эталонной призмы; $\frac{dN_\lambda}{dt}$ — изменение показателя преломления при увеличении температуры на 1°C для длины волны λ , полученное из табл. 12 в единицах шестого знака.

При отсутствии заводских таблиц показатель преломления и дисперсию стекла вычисляют по формулам (46) и (53).

Точность измерения показателя преломления оптического стекла на рефрактометре ИРФ-23 зависит от следующих факторов:

1) точности измерения предельного угла; так, при $d\epsilon = \pm 0,5'$ погрешность в определении n составляет $\pm 5 \cdot 10^{-5}$;

2) неплоскостности поверхности образца, соприкасающейся с эталонной призмой, равной двум интерференционным полосам, которые вызывает погрешность в определении n до $\pm 2 \cdot 10^{-5}$;

3) точности измерения показателя преломления эталонной призмы; при $\Delta N = \pm 2 \cdot 10^{-5}$ имеет место погрешность в определении n около $\pm 2 \cdot 10^{-5}$;

4) отклонения преломляющего угла эталонной призмы от 90° на $\pm 3''$, которое вызывает погрешность в определении n , равную $\pm 1 \cdot 10^{-5}$;

5) отклонения температуры от 20°C на $\pm 3^\circ$ вызывает погрешность в определении n , равную $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Суммарная точность определения n составляет $\pm 0,8 \cdot 10^{-4}$ и дисперсии $\pm 3 \cdot 10^{-5}$.

Иммерсионный метод И. В. Обреимова. Этот метод относится к интерференционным и удобен для измерения показателей преломления стекол, имеющих форму небольших осколков или линз, что особенно важно для стекловаренных заводов, ведущих непрерывный контроль каждой плавки.

Метод основан на использовании явления исчезновения видимости стекла, погруженного в жидкость. Это явление наблюдается при той длине волны монохроматического света, для которой показатели преломления стекла и жидкости одинаковы. Последняя подбирается по эталону стекла с известным показателем преломления n_α , эталон также погружен в жидкость.

Показатель преломления жидкости $n_{\text{ж}}$ подбирают равным показателю преломления образца стекла n_c с точностью $\pm (1-2) \cdot 10^{-3}$. При этом дисперсия жидкости и дисперсия образца стекла, а также n_c и n_α должны быть близки друг к другу. О равенстве показателей преломления образца и жидкости судят по интерференционным полосам на краю образца.

Если кривые дисперсии эталона и образца достаточно близки, то можно подобрать смесь жидкости, кривая дисперсии которой пересекает кривые дисперсий эталона и образца вблизи заданной длины волны света.

Показатели преломления эталонов n_α для основных длин волн света должны быть известны из предварительных измерений на рефрактометре или спектрометре, по данным которых строится кривая

дисперсии. Кривая дисперсии жидкости определяется с помощью эталона известной толщины для нескольких светлых полос (исчезновений ребра грани эталона в жидкости) при значениях длин волн λ , отмеченных на барабане монохроматора, и вычисленных разностей Δn по формуле

$$\Delta n = n_{\text{ж}} - n_{\text{с}} = N\lambda/d,$$

где N — число интерференционных полос; d — толщина эталона. Прибавляя разности Δn к соответствующим ординатам кривой дисперсии эталона, получаем кривую дисперсии жидкости.

Для измерения $n_{\text{с}}$ от 1,46 используют смесь бензина и керосина, от 1,46 до 1,66 — смесь альфа-монобромнафталина и керосина, для $n_{\text{с}}$ от 1,66 до 1,74 — смесь изодистого метилена и альфа-монобромнафталина и от 1,74 до 1,79 — изодистого метилена и серы.

Расчет $n_{\text{ж}}$ смеси ведут по формуле

$$n_{\text{ж}} = (n_1 v_1 + n_2 v_2) / (v_1 + v_2),$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления жидкостей смеси; v_1 и v_2 — объемы жидкостей.

Эталон стекла изготавливается в виде прямоугольного параллелепипеда размером $2 \times 10 \times 10$ мм. Для измерений $n_{\text{с}}$ в диапазоне от 1,4 до 1,8 требуется иметь набор из 30 эталонов (каждый эталон обеспечивает предел измерения $\pm 5 \cdot 10^{-3}$).

Пусть ребро рабочей грани AB эталона (рис. 76) ориентировано так, что средняя интерференционная полоса располагается вдоль ребра. Изменяя длину волны λ вращением барабана монохроматора, наблюдают за периодическим изменением интерференционных полос от темных до светлых с появлением и исчезновением ребра грани. Такое явление происходит при изменении разности хода лучей с длиной волны λ , проходящих через эталон и жидкость.

Если N — целое число, то средняя интерференционная полоса становится светлой, а ребро грани эталона исчезает. При N , равном нечетному числу полос, средняя полоса переходит в темную на видимой грани AB . Если $N=0$, то происходит нулевое исчезновение ребра эталона и $n_{\text{ж}} = n_{\text{с}}$.

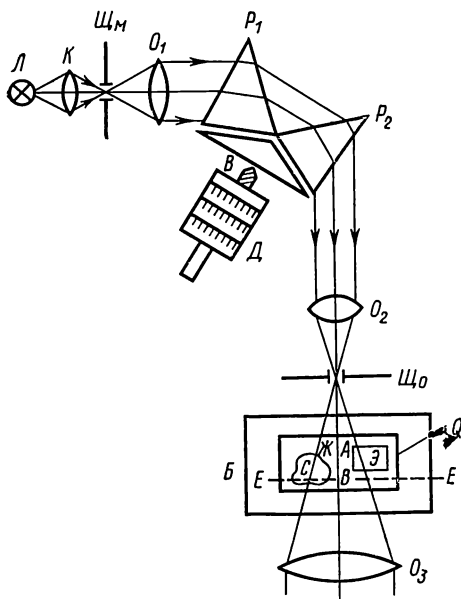


Рис. 76. Измерение показателя преломления и дисперсии стекла методом Обериемова

Измерение показателя преломления стекла n_c сводится к определению нулевого исчезновения образца стекла в жидкости и нахождению $n_{\text{ж}} = n_c$. При этом светлая полоса на краю образца займет среднее положение, а исчезновение образца в жидкости произойдет в промежуток времени между двумя соседними исчезновениями ребра эталона. Дробная часть числа интерференционных полос определяется интерполированием. Для этого на барабане монохроматора отмечают λ_2 , при которой произошло полное исчезновение образца, и λ' и λ'' , соответствующие двум соседним исчезновениям ребра эталона. Разность показателей преломления эталона и образца определяется по формуле

$$\Delta n = n_{\text{э}} - n_c = N\lambda/d$$

или

$$\Delta n = \frac{\left(N + \frac{\lambda' - \lambda_2}{\lambda' - \lambda''} \right) \lambda_2}{d}, \quad (56)$$

где $(\lambda' - \lambda_2)/(\lambda' - \lambda'')$ — дробное интерполяционное число.

После замены выражения $N + (\lambda' - \lambda_2)/(\lambda' - \lambda'')$ на N' уравнение (56) принимает вид

$$\Delta n = N'\lambda_2/d, \quad (57)$$

по которому определяется разность показателей преломления эталонного и испытуемого образцов.

Точность измерения Δn определяется выражением

$$\sigma_{\Delta n} = \pm \Delta n \sqrt{(\sigma_{N'}/N')^2 + (\sigma_{\lambda_2}/\lambda_2)^2 + (\sigma_{\lambda}/d)^2},$$

где σ_{λ} — ошибка отсчета по барабану монохроматора; d — толщина эталона; $\sigma_{N'}$ — ошибка установки.

Точность определения показателя преломления образца $n_c \pm 1 \cdot 10^{-4}$; путем термостатирования ее можно повысить до $\pm 2 \cdot 10^{-5}$. Для этого кювету с образцом и эталоном помещают в бак, наполненный водой при комнатной температуре, а иммерсионную жидкость в кювете перемешивают до исчезновения потоков.

Оптическая схема установки изображена на рис. 76. Пучок лучей от лампы L проецируется конденсором K на щель монохроматора Π_m , находящуюся в фокусе объектива O_1 коллиматора, который посылает параллельный пучок на призмы P_1 и P_2 . Пучок лучей разлагается призмами в спектр и собирается в фокусе объектива O_2 , где расположена щель Π_0 . На пути монохроматического пучка лучей между щелью и лупой O_3 помещается бак B с водой и кюветой Q . Кювета наполнена иммерсионной жидкостью $Ж$, в которую погружены образец испытуемого стекла C и эталон $Э$. Стенки бака и кюветы делают из оптического или хорошего зеркального стекла.

Если смесь жидкостей подобрана правильно, то при медленном вращении испытуемого образца в кювете и просматривании его на свет образец переливается всеми цветами спектра. Неравенство показателей преломления стекла и жидкости определяют ориентирова-

нием двугранного угла образца (или края линзы) в кювете так, как показано на рис. 77.

Если $n_c = n_{ж}$, то лучи света через образец пройдут прямолинейно. При этом возникает небольшая окраска призмы (положение 1). Если $n_c > n_{ж}$, то вершина призмы темная, а основание светлое (положение 2), а при $n_c < n_{ж}$, вершина призмы светлая, а основание темное (положение 3). После подбора жидкости требуется сразу же измерить ее показатель преломления на рефрактометре или спектрометре любым известным методом.

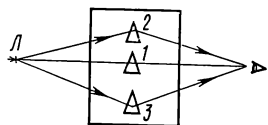


Рис. 77. Ориентирование образца в кювете

Поворачивая призмы монохроматора P_1 и P_2 с помощью винта B (см. рис. 76), в окулярную щель вводят выбранную часть видимого спектра, длина волны которой отсчитывается по барабану D .

С помощью лупы O_3 или окуляра, сфокусированного на плоскость E , наблюдают интерференционные полосы, подсчитывая их при двух соседних исчезновениях ребра эталона, а также следят за нулевым исчезновением контура образца стекла.

При определении дисперсии образца стекла смесь жидкостей для выбранных длин волн λ должна быть подобрана вновь.

Компенсационный метод. Этот метод основан на использовании явления интерференции света, возникающего на границе соприкосновения двух образцов стекла с разными показателями преломления. Для обеспечения точности определения показателя преломления в видимой области спектра порядка $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ разность показателей преломления сравниваемых образцов стекла не должна превышать $1 \cdot 10^{-3}$ и средних дисперсий — не более $5 \cdot 10^{-5}$, что соответствует требованиям к однородности партии заготовок по показателю преломления классам А и Б (см. ГОСТ 3514—76).

Разность показателей преломления Δn измеряют с помощью коллиматора и клинового компенсатора, компенсирующего разность хода, возникающую при интерференции лучей света; величину Δn определяют по формуле

$$\Delta n = C(m_0 - m) \cdot 10^{-6}/l, \quad (58)$$

где C — постоянная компенсатора, нм/мм; m_0 — отсчет по шкале компенсатора при нулевой разности хода, мм; m — отсчет по шкале компенсатора компенсированной разности хода для сравниваемых образцов стекла, мм; l — толщина сравниваемых образцов в направлении хода лучей, мм.

Постоянная компенсатора C определяется градуировкой по линиям спектра газоразрядной лампы смещением подвижного клина на величину $m_0 - m$, соответствующую изменению разности хода лучей длины волны λ на целое (возможно большее) число интерференционных полос N :

$$C = N\lambda/(m_0 - m), \quad (59)$$

где λ — длина волны монохроматического света, нм; m_0 и m — отсчеты по шкале компенсатора при разности хода, равной нулю, и для $N \approx 20$.

На рис. 78 приведена оптическая схема компенсационного рефрактометра, состоящая из коллиматора 5—6 с двумя осветителями 1—2 и 3—4, клинового компенсатора 7, стеклянного столика 8 и окуляра или линзы 10. Осветитель 3—4 предназначен для градуировки компенсатора, имеет газоразрядную лампу 2 и откидную призму 4.

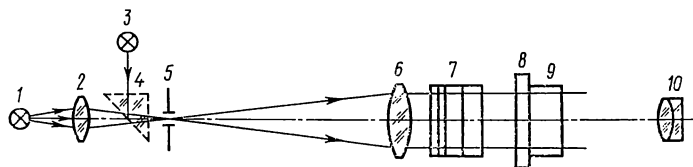


Рис. 78. Оптическая схема компенсационного рефрактометра

В качестве основного источника 1 применяется лампа накаливания, освещающая через конденсор 2 щель 5, расположенную в фокусе объектива 6 коллиматора.

Клиновый компенсатор (рис. 79) состоит из подвижного клина 3 и плоскопараллельной пластинки 2, склеенной с неподвижным клином 1. Все три детали изготовлены из стекла двух марок с разными показателями преломления и одинаковой средней дисперсией. Компенсатор должен обеспечивать получение разности хода в пределах ± 20 интерференционных полос.

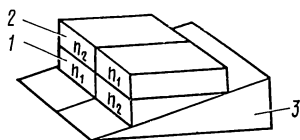


Рис. 79. Клиновый компенсатор

Сравниваемые образцы стекла должны иметь размеры $20 \times 10 \times 10$ и $14 \times 10 \times 10$ мм и быть склеены шлифованными поверхностями по длинным сторонам шеллаком или другим клеем. Показатели преломления стекол сравнивают с показателем преломления образца размером $14 \times 10 \times 10$ мм.

Рабочие грани образцов 20×10 и 14×10 мм обрабатывают с точностью до трех интерференционных полос. Плоскость склейки образцов должна быть перпендикулярна рабочим граням, погрешность не более $10'$. На рабочие грани образцов с помощью иммерсионной жидкости устанавливают накладные стекла толщиной 1—2 мм и размером 20×20 мм.

В начале измерений проверяют градуировку компенсатора, включая в ход лучей призму 4 и натриевую лампу ($\lambda = 589,3$ нм), и определяют постоянную C , равную изменению разности хода лучей при перемещении подвижного клина микрометричным винтом на 1 мм. При этом определяют смещение клина на величину $m_0 - m$, соответствующую изменению разности хода лучей на целое и как можно большее число N , после чего по формуле (59) находят C .

Затем призму откидывают и проверяют правильность положения нулевой (ахроматической) полосы, соответствующей отсчету m_0 по барабану микрометра.

Испытуемые образцы помещают на стеклянный столик так, чтобы плоскость склейки их была совмещена с плоскостью склейки компенсатора. Вращением микрометричного винта определяют положение подвижного клина компенсатора, когда ахроматическая полоса займет симметричное положение в интерференционной кар-

тине, что соответствует полной компенсации разности хода лучей, создаваемой сравниваемыми образцами, и отсчету m .

Подставляя значения C , m_0 , m и l в формулу (58), вычисляют разность показателей преломления Δn . Толщина сравниваемых образцов l измеряется с точностью $\pm 0,005$ мм.

Измерение показателя преломления и дисперсии стекла в инфракрасной области. С развитием оптического приборостроения возникла потребность применения оптического стекла и других оптических материалов для инфракрасной

области спектра. В связи с этим важно знать основные оптические характеристики материалов: показатель преломления и дисперсию.

В настоящее время имеются методы и приборы для измерения показателя преломления и дисперсии оптических материалов в широком диапазоне спектра. Методы основаны, главным образом, на гониометрическом принципе с использованием способа наименьшего отклонения или автоколлимационного способа Аббе с автоматической наводкой и регистрацией измеренных углов [5, 40].

На рис. 80 приведена одна из схем регистрирующего рефрактометра, предназначенного для измерения показателя преломления оптического стекла в области $0,37\text{—}2,3$ мкм методом автоколлимации. Призма 9, изготовленная из исследуемого стекла с преломляющим углом 30° и имеющая зеркальное покрытие на одной грани, помещается на стол стеклянного лимба 15 спектрометра, на котором нанесены радиальные штрихи через $2'$. Лимб приводится во вращение с помощью сканирующего мотора 18. Под лимбом диаметрально противоположно расположены две неподвижные решетки с ценой деления, равной цене деления лимба. При прохождении света через лимб и решетки образуются муаровые полосы, регистрируемые приемниками 16 и 17 на ленте самописца 14 одновременно со спектральными линиями.

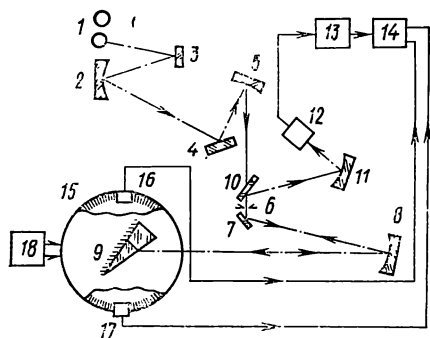


Рис. 80. Оптическая схема регистрирующего рефрактометра для измерения показателя преломления и дисперсии стекла в области $0,37\text{—}2,3$ мкм методом автоколлимации

Источниками света 1 служат сменные спектральные лампы: ртутная, гелиевая, цезиевая и др. Пучок лучей от источника света поступает на призму от коллиматорной системы, образованной сферическими зеркалами 2 и 5, плоскими зеркалами 3, 4, 7, 10 и зеркальным объективом 8. Призма изготовлена из стекла, показатель преломления которого необходимо измерить. Точность измерения показателя преломления $3 \cdot 10^{-5}$.

Практический интерес представляет инфракрасный рефрактометр ИГ-63, разработанный Ю. А. Степиным [5] на базе оптической схемы инфракрасного спектрометра ИКС-21, позволяющий измерять показатель преломления оптических материалов в области спектра 0,7—50 мкм с точностью $2 \cdot 10^{-5}$ — $3 \cdot 10^{-4}$.

Углы измеряют автоколлимационным методом Аббе на гониометре с точностью 2". Основным источником инфракрасного излучения является глобар. Для регистрации излучения используется оптико-акустический приемник ОАП-3.

§ 18. Измерение малых разностей показателей преломления жидкостей

Измерение малых разностей показателей преломления жидкостей основано на явлении интерференции света и определении разности Δ хода лучей, возникающей при прохождении через жидкости с различными показателями преломления:

$$\Delta = (n_{\text{и}} - n_{\text{э}})l = N\lambda,$$

откуда

$$\Delta n = (n_{\text{и}} - n_{\text{э}}) = N\lambda/l, \quad (60)$$

где $n_{\text{и}}$ и $n_{\text{э}}$ — соответственно показатели преломления используемой и эталонной жидкости; l — длина хода лучей в кювете с жидкостью; N — число интерференционных полос; λ — длина волны света.

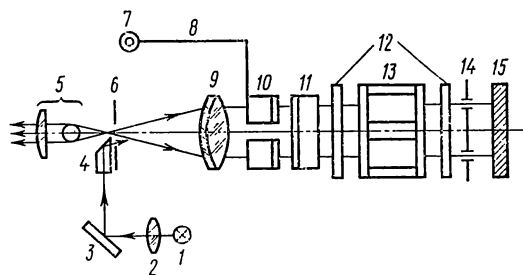


Рис. 81. Схема прибора для измерения малых разностей показателей преломления жидкостей

Для измерения разностей показателей преломления жидкостей используется автоколлимационный интерферометр ИТР-2, построенный по схеме Рэлея. В интерферометре используются дифракционные явления, возникающие на двух щелях. На рис. 81 изображена оптическая схема прибора. Пучок лучей от источника 1 (лампы накаливания 8 В, 0,4 А) с помощью конденсора 2, зеркала 3 и призмы 4 освещает щель диафрагмы 6, расположенной в фокальной плоскости объектива 9. Верхняя часть параллельного пучка лучей проходит через пластины компенсатора 10, стекла термокамеры 12, кювету 13 с двумя камерами, двущелевую диафрагму 14 и падает на плоское зеркало

15, от которого отражается и идет обратно, формируя верхнюю систему интерференционных полос в фокальной плоскости объекта. Нижняя часть пучка проходит пластинку 11 под кюветой, двучелевую диафрагму 14 и после отражения от зеркала 15 идет обратно, образуя нижнюю систему интерференционных полос. Вся картина интерференционных полос рассматривается в цилиндрический окуляр с увеличением 150 \times .

Плоскопараллельная пластинка 11 и две пластинки компенсатора разделяют тонкой линией верхнюю и нижнюю системы полос, что способствует более точному нониусному совмещению полос. При изменении наклона одной из пластинок компенсатора с помощью микрометричного винта 7 и рычага 8 верхняя система полос становится подвижной, в то время как нижняя остается неподвижной и является индексом по отношению к верхней. Таким образом, компенсатором можно верхнюю систему полос привести в нулевое положение по отношению к нижней, совместив их белые (нулевые) полосы. Остальные полосы имеют окраску, интенсивность которой возрастает по мере роста номера полосы.

Если в обе камеры кюветы налить жидкости с разными показателями преломления, то образуется разность хода лучей и верхняя система полос сдвинется относительно нижней. При значительной разности между показателями преломления жидкостей верхняя система полос может выйти из поля зрения.

Микрометричный механизм имеет две шкалы: неподвижную с 30 делениями и подвижную на барабане со 100 делениями и ценой деления $1/15$ полосы. Один оборот барабана соответствует одному делению неподвижной шкалы. Отсчет по шкале и барабану снимается с помощью лупы.

Для уравнивания температуры жидкостей в кювете имеется термокамера, ограниченная пластинками 12. Корпус прибора термостатируют с помощью специального кожуха. В комплект прибора входят пять двухкамерных кювет длиной 80, 40, 20, 10 и 5 мм для жидкостей и дополнительно поставляется кювета длиной 100 мм для газов. На каждой кювете нанесены буквы «П» и «Л», служащие указателями для правильной установки в приборе (справа и слева).

Показатель преломления воды, налитой в термокамеру, не должен отличаться от показателя преломления сравниваемых жидкостей более чем на 0,1. Температура воды должна быть близка к температуре помещения. Для выравнивания температуры воды в термокамере необходимо перемешивание.

Точность измерения разности показателей преломления зависит от длины кюветы. Чем больше длина l , тем выше точность, что следует из формулы, полученной дифференцированием формулы (60):

$$\sigma_{\Delta n} = \lambda_{\text{ср}} N / (2l),$$

где $\sigma_{\Delta n}$ и σ_N — соответственно средние квадратические погрешности измерения разностей показателей преломления жидкостей и совмещения нулевых полос; l — длина кюветы.

В табл. 16 приведены значения Δl в зависимости от длины кюветы для $\lambda \approx 0,6$ мкм, $\sigma_N = 1/15$ полосы.

Для упрощения вычисления разности показателей преломления вначале определяют цену $\tau_{\Delta n}$ деления барабана микрометричного винта и выражают ее в разностях показателей преломления, что осуществляется без жидкостей в камерах кюветы. Вращая барабан микрометричного винта, совмещают нулевую (белую) интерференционную полосу верхней системы полос с правой и симметрично ей с левой полосами нижней системы, сдвинутыми от их нулевой полосы на один интервал, затем по формуле

Таблица 16

Длина кюветы, мм	Диапазон измерения Δl	Приближенные погрешности измерения Δl
80	0,00063	$2,5 \cdot 10^{-7}$
40	0,00125	$5 \cdot 10^{-7}$
20	0,0025	$1 \cdot 10^{-6}$
10	0,005	$2 \cdot 10^{-6}$
5	0,01	$4 \cdot 10^{-6}$

$$\tau_{\Delta n} = \frac{\Delta}{2l(A_1 - A_2)} = \frac{\lambda}{l(A_1 - A_2)}$$

определяют цену деления барабана.

Здесь $\Delta = 2\lambda \approx 1,1$ мкм — разность хода лучей, соответствующая двум интервалам; A_1 и A_2 — отсчеты по неподвижной шкале и барабану винта при наведении на правую и левую полосы.

После этого в одну из камер кюветы наливают испытуемую жидкость, а в другую камеру — эталонную, с которой производится сравнение. К измерениям приступают через несколько минут после заполнения кювет, когда интерференционные полосы примут резкие очертания. Вследствие разности показателей преломления жидкостей лучи, проходящие через камеры кюветы, приобретают разность хода и верхняя система полос сдвигается в сторону. При таком положении фиксируют первый отсчет B_1 , а затем микрометричным винтом совмещают нулевые полосы обеих систем и фиксируют второй отсчет B_2 . Искомая разность показателей преломления

$$\Delta n = \tau_{\Delta n}(B_1 - B_2),$$

где $\tau_{\Delta n}$ — цена деления барабана.

§ 19. Измерение показателя преломления оптических кристаллов

Оптические кристаллы нашли широкое применение в оптико-механической промышленности. В отличие от оптического стекла кристаллы обладают высокой прозрачностью в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. В оптическом приборостроении наиболее часто применяют искусственные кристаллы кубической сингонии,

отличающиеся от естественных однородностью и отсутствием двойного лучепреломления.

Для измерения показателей преломления кристаллов может быть применен метод наименьшего отклонения, метод предельного угла и иммерсионный метод Обреимова. Более простым и удобным является метод предельного угла полного внутреннего отражения, осуществляемый с помощью кристаллорефрактометра типа Аббе, оптическая схема которого приведена на рис. 82.

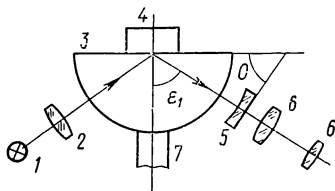


Рис. 82. Схема прибора для измерения показателя преломления оптических кристаллов

Кристаллорефрактометр состоит из полусферовой линзы 3 с полированной плоской поверхностью, закрепленной на вертикальной оси 7 с горизонтальным лимбом, зрительной трубы 6 с вертикальным лимбом и осветителя 1—2 с монохроматическим источником 1 и конденсором 2. Для создания телецентрического хода лучей перед объективом зрительной трубы установлена плосковогнутая линза 5 с радиусом кривизны поверхности, равным радиусу полусферовой линзы, образующая вместе с полусферовой линзой призму с переменным преломляющим углом θ . Плосковогнутая линза соединена со зрительной трубой и вращается одновременно с нею. Полусферовая и плосковогнутая линзы изготовлены из одной марки стекла с большим показателем преломления (около 1,8). Плоская полированная поверхность полусферовой линзы занимает строго перпендикулярное положение к вертикальной оси вращения, угол поворота которой может быть отсчитан по горизонтальному лимбу. Горизонтальная ось вращения зрительной трубы с плосковогнутой линзой совмещена с центром кривизны полусферовой линзы.

Перед измерениями полированную поверхность испытуемого образца 4 смачивают каплей иммерсионной жидкости и накладывают на плоскую поверхность полусферовой линзы. Пучок монохроматических лучей направляют через сферическую поверхность на центр полусферовой линзы и контактирующую с ней поверхность испытуемого образца. Лучи, которые падают на образец под углами, превышающими предельный угол, отражаются от его поверхности, а под углами, меньше предельного, проходят через образец. В зрительную трубу наблюдают поле зрения, разделенное на темную и светлую части. Линия между светлым и темным частями поля соответствует границе предельного угла ϵ_1 , на которую и наводят перекрестие трубы.

Показатель преломления n образца

$$n = n_0 \sin \epsilon_1,$$

где n_0 — показатель преломления стекла полушаровой линзы; ε_1 — предельный угол.

Точность определения показателя преломления n испытуемого образца $1 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-5}$.

§ 20. Измерение оптической однородности

Оптическая однородность характеризуется постоянством показателя преломления во всем объеме заготовки или детали. Оптическая однородность для заготовок, диаметры или стороны которых

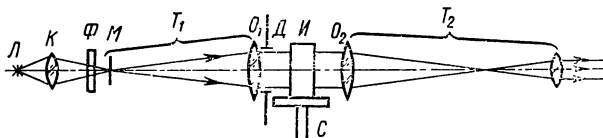


Рис. 83. Схема определения оптической однородности на коллиматорной установке

не более 150 мм, характеризуется коэффициентом K , полученным из отношения угла разрешения φ объектива коллиматора с заготовкой, введенной в параллельный пучок лучей после объектива коллиматора, к углу разрешения φ_0 без заготовки, когда угол φ_0 равен теоретическому значению $120''/D$ (D — диаметр диафрагмы коллиматора или наименьшая сторона прямоугольной заготовки): $K = \varphi/\varphi_0$.

Определение оптической однородности производится на коллиматорной установке, состоящей из коллиматора T_1 и зрительной трубы T_2 (рис. 83) с фокусными расстояниями объективов 1000—1500 мм (но не менее 600 мм) и с диаметрами не менее 60 мм. Для этих целей могут быть использованы коллиматоры оптических скамьей ОСК-3 или ОСК-2. Относительное отверстие должно быть 1 : 10, но не более 1 : 9. Осветитель состоит из лампы накаливания L , конденсора K и зеленого светофильтра Φ . Коллиматорная установка обеспечивается набором штриховых миш M № 1—№ 5, точечных миш с отверстиями 0,007—0,1 мм и набором диафрагм диаметром 50—150 мм. Зрительная труба комплектуется набором сменных окуляров с различным увеличением и должна иметь выдвижной окулярный тубус.

Испытуемый образец $И$ (круглый диск или параллелепипед с полированными с двух сторон поверхностями) устанавливают на столик C в ходе параллельного пучка лучей между объективами коллиматора и зрительной трубы. Диаметр диафрагмы D , установленный за объективом коллиматора, должен быть равен диаметру проверяемого образца $И$.

Если образец имеет шлифованные поверхности, то их покрывают накладными пластинками, смоченными иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой близок к показателю преломления испытуемого стекла с точностью до 0,002. Клиновидность

образцов не должна превышать $2'$, а при использовании зеленого светофильтра — $1'$. Клиновидность накладных пластинок для проверки образцов по первой категории не должна превышать $1'$. Поверхности накладных пластинок полируют с точностью до 10 интерференционных полос с местными отклонениями до 0,3 полосы.

Штриховая мира для коллиматора подбирается в зависимости от диаметра проверяемого образца. При диаметре диафрагмы, равном диаметру испытуемого образца, находят наименьший угол разрешения φ коллиматора с испытуемым образцом, установленным на пути хода лучей, и угол разрешения φ_0 коллиматора без образца. Углы разрешения φ и φ_0 находят по таблице по номерам мира и предельно разрешаемому элементу мира, в котором все четыре направления штрихов видны отдельно. По отношению $K = \varphi/\varphi_0$ устанавливают категорию стекла (см. табл. 11). Для стекол первой категории кроме определения угла разрешения, который должен быть равен теоретическому углу разрешения, требуется просматривать изображение отверстия точечной диафрагмы, установленной вместо штриховой мира. Дифракционное изображение точки при просмотре в микроскоп должно состоять из светлого круглого пятна, окруженного концентрическими кольцами.

Оптическая однородность может быть проверена в образцах стекла в форме призм, но для этого нужно, чтобы зрительная труба имела поворотное приспособление, позволяющее устанавливать ее на соответствующий угол.

§ 21. Измерение двойного лучепреломления

Двойное лучепреломление в стекле может быть вызвано напряжениями, возникающими от термических или механических воздействий. Под термическими воздействиями понимается неравномерное охлаждение стекла после нагрева, создающее так называемые остаточные (постоянные) напряжения. Механические же воздействия, например пережатие стеклянной детали в оправе прибора, вызывают временные напряжения, исчезающие при прекращении воздействия.

Стекло с остаточными напряжениями обладает свойством двойного лучепреломления, подобно одноосным кристаллам (исландский шпат, кварц и др.), что может быть обнаружено с помощью полярископов.

Поляризатором и анализатором могут служить турмалиновые пластинки, призмы Николя, черные стеклянные зеркала (марблит), установленные под углом полной поляризации, и поляроиды. Наиболее простым анализатором является турмалиновая пластинка, но она сильно ослабляет свет и окрашивает поле в зеленый цвет, поэтому на практике чаще используют призму Николя.

Призма Николя изготовлена из исландского шпата и состоит из двух полированных призм, склеенных бальзамом так, что при падении пучка лучей на короткую грань под углом не более 33° обыкновенный луч претерпевает полное внутреннее отражение на грани-

це склеивания и уходит в сторону, а сквозь призму проходит только луч необыкновенный.

Поляроиды — это прозрачные пленки, на которые нанесен поляризующий слой герапатита (соединение хинина и иода). Герапатит наносят на пленку так, что кристаллы удлиненной формы ориентируются в одном направлении. Прозрачность герапатитовых пленок составляет 30%, их апертурный угол достигает 60° и степень поляризации света — до 99,9%.

Линейно поляризованный луч, проходящий через стекло с остаточными напряжениями, распадается на два: обыкновенный и необыкновенный. Плоскости

колебания электрических векторов этих лучей взаимно перпендикулярны. Оба луча в стекле распространяются с различной скоростью, образуя некоторую разность хода. Попадая в анализатор, взаимно перпендикулярные

плоскости колебания электрических векторов приводятся в одну плоскость; лучи света интерферируют между собой и создают цветную картину полос или просветленное поле. Обыкновенный и необыкновенный лучи в любом направлении падения луча на стекло имеют разные показатели преломления.

Величина двойного лучепреломления определяется разностью между показателями преломления Δn обыкновенного и необыкновенного лучей или их разностью хода Δ , выраженной в нанометрах и отнесенной к толщине образца стекла в 1 см:

$$\Delta n = n_0 - n_e = \Delta / l,$$

где n_0 и n_e — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; Δ — разность хода, нм; l — толщина испытуемого образца, см. Таким образом, двойное лучепреломление характеризует степень однородности стекла по показателю преломления.

Для измерения двойного лучепреломления отечественная промышленность выпускает полярископ-поляриметры ПКС-56 и ПКС-115, снабженные чувствительными компенсаторами в четверть длины волны и лимбами с градусными делениями. Схема полярископ-поляриметра ПКС-56 приведена на рис. 84. В качестве поляризатора 3 и анализатора 7 служат поляроидные пленки. Поляризатор освещается источником света 1 (электролампа 127 В) через матовое стекло 2. Рассматривая через анализатор образец испытуемого стекла 4, установленный в поляризованном пучке лучей между поляризатором и анализатором, можно заметить появление темных или цветных полос. Если ввести в ход лучей компенсационную пластинку 5 «четверть длины волны» и зеленый светофильтр 9, то цветные полосы станут темными. Установка компенсационной пластинки производится рычагом; зеленый светофильтр надевают на оправу окуляра 8, в которую помещен анализатор.

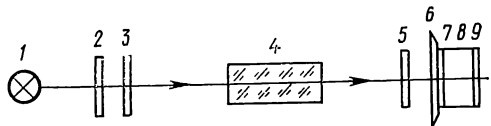


Рис. 84. Схема полярископ-поляриметра ПКС-56 для измерения двойного лучепреломления

В начале измерений двойного лучепреломления анализатор прибора, связанный с лимбом 6, устанавливают крестообразно к поляризатору, при этом возникает густой пурпурно-фиолетовый цвет или темнота, если включен зеленый светофильтр. Берут первый отсчет по нониусу лимба 6; он должен быть равен 0° или 180° . Затем между поляризатором и компенсационной пластинкой помещают испытуемый образец стекла 4 и наблюдают в анализатор. Компенсационная пластинка в «четверть волны» установлена в приборе так, что направления ее главных плоскостей составляют угол 90° с направлением плоскости поляризации анализатора. Образец испытуемого стекла должен иметь форму прямоугольной плитки или диска и просматриваться через свой наибольший размер, который должен быть не менее 7 см при значении двойного лучепреломления, не превышающем 2 нм/см, 5 см — от 2 до 6 нм/см и 3 см, когда двойное лучепреломление больше 6 нм/см.

Поверхности образца стекла должны быть отполированы или отшлифованы. Шлифованные поверхности перед измерением смачивают иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой не должен отличаться от показателя преломления стекла более чем на $2 \cdot 10^{-2}$.

Если образец стекла имеет небольшие напряжения, то в середине и на краях его появляются просветления, разделенные двумя темными полосами. Вращая анализатор с лимбом на угол θ до полного слияния в середине образца двух темных полос, берут второй отсчет по нониусу лимба. Темные полосы должны перемещаться к середине. Если разность хода в образце составляет 100—540 нм, а разность фаз близка к 360° , то максимальное потемнение середины образца сопровождается появлением окраски, затрудняющей точное определение положения анализатора. Поэтому в ход лучей нужно ввести зеленый светофильтр.

Если же разность хода больше 540 нм и разность фаз превышает 360° , то в поле зрения прибора без светофильтра виден ряд цветных интерференционных полос и две нейтральные (темные) полосы. В результате поворота анализатора изменяется только окраска полос. При введении зеленого светофильтра образец стекла покрывается темными и светлыми полосами. В этом случае измерение двойного лучепреломления сводится к определению угла поворота анализатора при максимальном потемнении середины образца, а затем к установке анализатора на нулевое положение с отметкой нейтральной полосы без светофильтра и подсчету при наличии светофильтра числа темных полос N , расположенных между нейтральной полосой и серединой образца стекла. В общем случае разность фаз в угловой мере

$$\delta = 360N + 2\theta,$$

разность хода с учетом толщины образца

$$\Delta = \lambda \delta / (360l),$$

где θ — угол поворота анализатора, в град; $\lambda = 540$ нм — длина волны зеленого света; l — толщина образца в направлении просмотра, см.

Если напряжения в стекле малы, то число темных полос $N = 0$ и

$$\delta = 2\theta, \quad \Delta = \lambda\theta / (180l) = 3\theta / l; \quad (61)$$

при $N \neq 0$

$$\Delta = 3(180N + \theta) / l, \quad (62)$$

Погрешность в определении Δ при $l = 1$ см составляет ± 3 нм и уменьшается с увеличением толщины образца.

По величине разности хода Δ определяют величину двойного лучепреломления и соответствующую категорию стекла (см. табл. 11).

Для определения напряжений в линзах или объективах, в которых двойное лучепреломление возникает от пережатия их в оправах, применяют полярископ или поляриметр.

В сопряженных точках, расположенных приблизительно на двойном фокусном расстоянии от испытуемой системы, устанавливают в перекрестном положении поляризатор и анализатор. Пучок лучей от лампы накаливания проходит через поляризатор и ограничивается диафрагмой, помещенной перед объективом. Наблюдения ведут через анализатор. Оценку величины двойного лучепреломления производят, как и при испытании образцов стекла в дисках или пластинах. При наличии компенсирующей пластинки «в четверть волны», установленной за объективом, и лимба с градусными делениями, можно измерить разность хода и по формуле (61) или (62) подсчитать значение двойного лучепреломления. Если наблюдается темный крест на светлом фоне, то испытуемая система имеет равномерное натяжение, не влияющее на качество изображения. При наличии неравномерного натяжения в системе в поле зрения прибора наблюдаются кривые полосы.

§ 22. Определение бессвильности и пузырности

Свили — прозрачные нитевидные или слоистые участки в стекле, отличающиеся по показателю преломления от окружающей массы стекла. Свили имеют различную форму и размеры. Встречаются групповые и одиночные свили с показателем преломления меньше (редко больше), чем остальной массы стекла. При прохождении пучка лучей через стекло свили искажают ход лучей, что ухудшает качество оптического изображения.

Действие одиночных свилей менее вредно, чем мелких групповых свилей. Наличие отдельных свилей, подобно действию пузырей, приводит к некоторой потере светосилы оптической системы и появлению рассеянного света (фона) в плоскости изображения.

Обнаружить свили в стекле можно, наблюдая изображение светящейся точки или теневой проекции решетки интерференционным, теневым и другими методами. Крупные свили легко обнаружить с помощью простого полярископа, когда вокруг свилей наблюдается цветное окрашивание в виде полос.

Наиболее просто обнаружить свили можно методом светящейся точки или теневой проекции. Испытуемый образец просматривается в пучке лучей между «точечным» источником света и белым экраном, на который проецируется теневая картина свилей. Точечным источником света служит круглое отверстие в диафрагме диаметром 2 или 4 мм, освещенное с помощью конденсора ярким пучком лучей от мощной проекционной или ртутной лампы типа СВДШ-250. На экране должен образоваться круг диаметром 200 мм с освещенностью 70—150 лк.

Испытуемый образец стекла полированными поверхностями помещается нормально к оси пучка лучей. Если в стекле имеются свили, то на экране появится теневая картина, состоящая из темных и светлых полос. При отсутствии свилей все поле экрана освещено равномерно.

Чтобы отличить свили от царапин, нужно образец повернуть на некоторый угол, тогда тени царапин на экране будут перемещаться вместе с изображением поверхности образца, а свили, двигаясь по отношению тени, плавно изменяют темные места на светлые. Свилы с меньшим показателем преломления, чем у массы образца стекла, проецируются на экран с темной серединой и светлыми краями; с большим показателем преломления — со светлой серединой и темными краями.

Резкость, величина и количество свилей, проецируемых на экран, зависят от диаметра отверстия в диафрагме и расстояния между диафрагмой, образцом и экраном. Размеры свилей и их количество характеризуют категорию стекла по свильности. Расстояние от диафрагмы до экрана постоянно и равно 750 мм.

Для 1-й категории бессвильности диаметр отверстия диафрагмы равен 2 мм и образец стекла помещается на расстоянии 500 ± 50 мм от экрана. При этом положении свили в стекле не должны обнаруживаться.

Для 2-й категории диаметр отверстия диафрагмы должен быть равен 4 мм.

При контроле бессвильности стекла по категориям 1к—4к испытуемый образец помещают на расстоянии 2,5 м от экрана, а источник света на расстоянии 8 м от экрана. Для категории 1к используют диафрагму с отверстием 0,2 мм, и теневую картину фотографируют. Для категорий 2к—4к используют диафрагму с отверстием 2 мм, и теневую картину исследуют визуально. Категорию 5к оценивают внешним осмотром и обнаруженные свили проверяют на поляриметре по двойному лучепреломлению.

При наличии набора эталонных свилей контроль стекла значительно упрощается и осуществляется с помощью любой установки, служащей для определения свилей.

Для испытания кусков стекла неправильной формы с поверхностями раскола и литых заготовок или заготовок со шлифованными поверхностями используют кювету с параллельными стенками из однородного зеркального стекла, заполненную иммерсионной жидкостью (смесью α -монобромнафталина и керосина) с показателем

преломления, близким к показателю преломления испытуемого стекла с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-3}$.

Для образцов стекла с параллельными шлифованными поверхностями можно использовать две отполированные накладные пластинки, которые прикладывают к плоским поверхностям образца, предварительно смоченным иммерсионной жидкостью.

Найдено [13], что интервал измерения видимости теней от свилей составляет ± 50 мм (величина смещения образца в направлении от экрана к источнику света, когда тени от свилей перестают различаться), а зона наилучшей видимости находится на расстоянии 150—250 мм от экрана, т. е. менее слабые свили видимы на большем расстоянии от источника света.

Пузырность стекла определяют просмотром образца стекла на фоне темного экрана при сильном боковом освещении и оценкой диаметра наибольшего пузыря. Источником света служат лампы накаливания: 300 Вт (кинопроекционная) и 500 Вт (осветительная), установленные в фокусе конденсора. Первая лампа предназначена для определения пузырности стекла 2—10-й категорий; вторая лампа — для категорий 1 и 1а.

Испытуемый образец стекла должен иметь полированные поверхности. Если испытывают куски стекла неправильной формы или полированные линзы и литые заготовки, то такие образцы просматривают погруженными в кювету с иммерсионной жидкостью, составленной из керосина и α -монобромнафталина с показателем преломления, подобранным с точностью $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ к показателю преломления испытуемого образца. Шлифованные поверхности заготовок при просмотре смачивают иммерсионной жидкостью (водой, керосином или α -монобромнафталином).

Для оценки размера пузырей в образцах стекла надо иметь набор эталонов с заранее измеренными диаметрами пузырей, соответствующими определенной категории пузырности стекла. Размеры пузырей и включений в испытуемом образце стекла оценивают на глаз путем сравнения с пузырем эталона, просматриваемым одновременно на фоне черного экрана. Размер пузыря эллиптической формы берется как среднее арифметическое по большой и малой осям.

§ 23. Определение коэффициентов светопоглощения и отражения

При прохождении потока излучения источника света через оптическое стекло наблюдается ослабление потока за счет потерь на отражение и поглощение в массе стекла. В зависимости от показателя преломления, состояния поверхностей загрязнения, царапин, налетов и других дефектов, от окраски массы стекла и длины волны падающего света поглощение и отражение света различны. Наименьшей поглощаемостью оптическое стекло обладает в видимой части спектра с постепенным увеличением в ультрафиолетовой и инфракрасной частях. Для длин волн короче 300 нм и длиннее 3000 нм

оптическое стекло становится практически непрозрачным. Согласно закону сохранения энергии для светового потока Φ , подающего на образец стекла, выполняется условие

$$\Phi = \Phi_p + \Phi_a + \Phi_t,$$

где Φ_p — отраженный поток; Φ_a — поглощенный поток; Φ_t — поток, выходящий из стекла.

Отношение каждого из потоков Φ_p , Φ_a и Φ_t к падающему потоку Φ называется соответственно: $\rho = \Phi_p/\Phi$ — коэффициент отражения, $\alpha = \Phi_a/\Phi$ — коэффициент поглощения, $\tau = \Phi_t/\Phi$ — коэффициент пропускания. Следовательно, $\rho + \alpha + \tau = 1$.

Коэффициент отражения зависит от угла падения ϵ пучка лучей на преломляющую поверхность и возрастает с увеличением последнего. Для одной отражающей поверхности по известной формуле Френеля

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\epsilon - \epsilon')}{\sin^2(\epsilon + \epsilon')} + \frac{\lg^2(\epsilon - \epsilon')}{\lg^2(\epsilon + \epsilon')} \right], \quad (63)$$

где ϵ и ϵ' — соответственно угол падения и преломления, связанные зависимостью $n \sin \epsilon = n' \sin \epsilon'$. При углах ϵ и ϵ' , меньших 30° , коэффициент отражения с достаточной точностью можно вычислить по упрощенной формуле

$$\rho = \left(\frac{\epsilon - \epsilon'}{\epsilon + \epsilon'} \right)^2.$$

Для нормального падения пучка лучей, идущего из воздуха, формула (63) принимает вид

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2,$$

где n — показатель преломления стекла.

При $n \approx 1,5$ коэффициент отражения $\rho \approx 0,04$, или 4%.

В случае прохождения светового потока через тонкую пластинку, когда потеря света происходит, главным образом, в результате отражения от поверхностей, а потеря от поглощения света массой стекла настолько мала, что ее можно не учитывать, вышедший из пластинки световой поток определяется формулой

$$\Phi_t = (1 - \rho)^2 \Phi.$$

Если учитывать светопоглощение пластинки и отражение от двух ее поверхностей, то световой поток, вышедший из пластинки толщиной l , характеризуется выражением

$$\Phi_t = \Phi (1 - \rho)^2 e^{-\alpha l};$$

коэффициент пропускания стекла

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi} = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha l}, \quad (64)$$

где e — основание натурального логарифма; α — коэффициент светопоглощения, который определяется по формуле

$$\alpha = (1/l) [2 \ln(1 - \rho) - \ln \tau], \quad (65)$$

где l — длина образца, см; n — показатель преломления стекла для спектральной линии D .

Таким образом, под коэффициентом поглощения понимают отношение потока естественного света, поглощенного слоем стекла толщиной 1 см, к потоку, вступившему в этот слой. Погрешность опре-

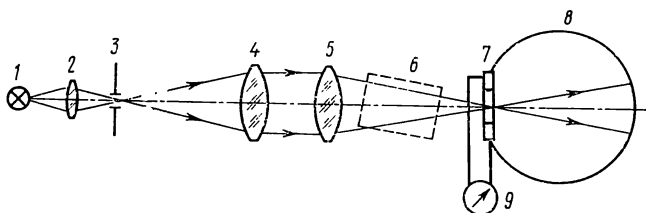


Рис. 85. Схема определения коэффициента пропускания

деления α может быть получена дифференцированием формулы (65):

$$d\alpha = \frac{1}{l^2} [2 \ln(1 - \rho) - \ln \tau] dl + \frac{2 d\rho}{l(1 - \rho)} + \frac{d\tau}{l\tau}.$$

Пренебрегая малым значением $\frac{2 d\rho}{l(1 - \rho)}$, получаем:

$$d\alpha = \frac{dl}{l} \cdot \alpha + \frac{d\tau}{l\tau}.$$

При определении коэффициента светопоглощения необходимо измерить длину образца стекла с точностью ± 1 мм и коэффициент пропускания на любом фотометре, обеспечивающем точность измерения $\pm 0,5\%$, тогда при длине образца 10 см коэффициент светопоглощения будет определен с точностью $\pm 0,05\%$.

Для измерения коэффициента пропускания можно использовать (рис. 85) фотометрический шар 8 диаметром 100 мм с селеновым фотоэлементом 7 и гальванометром 9 или микроамперметром. В качестве осветителя используют коллиматор, в фокусе объектива 4 которого установлена диафрагма 3 с круглым отверстием, освещенным через конденсор 2 лампой накаливания 1, питающейся от сети стабилизированного напряжения. Дополнительный объектив 5 расположен за объективом коллиматора и собирает параллельный пучок в заднем фокусе на отверстии фотоэлемента, помещенного в плоскости шара. Испытуемый образец стекла 6 вводят в сходящийся пучок лучей между объективом 5 и шаром под некоторым углом к оптической оси так, чтобы блик, отраженный от поверхности об-

разца, не попал в объектив 5. Узкое сечение пучка (фокус) должен быть снова приведен в плоскость отверстия шара, для чего последний отодвигают приблизительно на одну треть длины образца.

По гальванометру отмечают показания m_1 и m_2 , соответствующие освещенностям шара при установке образца в ходе лучей и без него; коэффициент пропускания

$$\tau = m_1/m_2$$

Для измерения коэффициента светопоглощения можно использовать горизонтальный фотометр ФМС-56, на котором коэффициенты пропускания и оптической плотности могут быть измерены с точностью $\pm 1-2\%$.

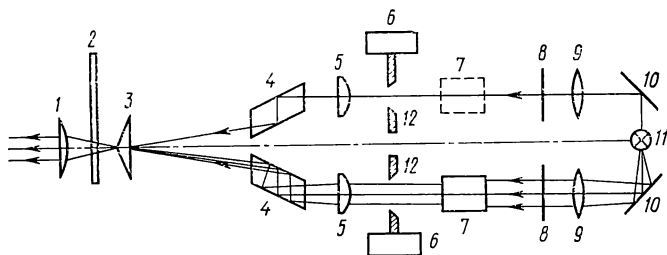


Рис. 86. Оптическая схема фотометра для измерения коэффициента пропускания

Принцип действия прибора основан на визуальном уравнивании яркостей двух половин поля зрения диафрагмированием входных зрачков. Оптическая схема фотометра приведена на рис. 86. Прибор состоит из двух основных частей, осветителя и фотометрической головки. Осветитель снабжен двумя зеркалами 10 и конденсорами 9, направляющими свет на отверстия диафрагм 12. Для правильной установки освещения оба конденсора и лампа 11 перемещаются в продольном направлении. С внешней стороны за конденсорами в гнезда осветителя вставляют молочные или матовые стекла 8, создающие равномерно рассеянный свет. Фотометрическая головка представляет собой двойную зрительную трубу с полем зрения $1^\circ 15'$. Перед объективами 5 помещены две диафрагмы, имеющие квадратные отверстия и переменный размер. Каждая диафрагма имеет отсчетный барабан 6 с двумя шкалами с черными и красными делениями. Черные деления шкалы проградуированы от 0 до 100 и служат для отсчета коэффициента пропускания в процентах. Красные шкалы оптической плотности D разделены в зависимости от коэффициентов пропускания и соответствуют отрицательным десятичным логарифмам: $D = -\lg \tau$.

Два световых пучка, упавших из отверстия диафрагм, сводятся оптической системой (объективами 5, ромбовидными призмами 4 и бипризмой 3) в одно поле зрения в виде круга, разделенного ребром бипризмы на два полукруга. Глаз наблюдателя, находящийся

за окуляром I в выходном зрачке трубы, видит два полукруга различной яркости. При правильном освещении и равном раскрытии отверстий диафрагм яркости полукругов одинаковы.

Перед измерением коэффициента пропускания следует правильно установить патрон с лампой в осветителе. Для этого за осветителем на расстоянии 90—100 см ставят белый лист бумаги и, перемещая патрон с лампой, получают на нем изображение спиралей, причем расстояние между их серединами должно быть равно 70 мм. Если спирали имеют размытое изображение, то конденсоры перемещают до получения резкого изображения. Затем барабаны диафрагм устанавливают на одинаковые отсчеты, например на 100, и, осветив входные отверстия прибора, наблюдают в окуляр. Может оказаться, что при удаленных молочных стеклах изображение спиралей находится не посередине поля зрения, нерезкое или неравномерно освещено. Тогда нужно произвести небольшие перемещения осветителя по высоте и в стороны, а также переместить конденсоры, воспользовавшись юстировочными винтами патрона. После этого молочные стекла снова вставляют в гнезда за конденсорами. Равномерное заполнение отверстий диафрагм светом проверяют с помощью лупы, находящейся за окуляром. Наконец, проверяют интенсивность обоих пучков, идущих из осветителя, для чего, например, левый барабан ставят на отсчет 50 и, слегка перемещая один из конденсоров, добиваются получения на правом барабане отсчета, близкого к 50 с отклонением ± 1 деление. Приступая к измерениям, оба барабана устанавливают на отсчет 100. Испытуемый образец стекла 7 помещают на предметный столик перед левым отверстием прибора и окуляр фокусируют на резкое изображение линии раздела поля. При этом правое поле темнее левого. Вращая правый барабан, добиваются уравнивания полей, т. е. фотометрического равновесия. Отсчет по черной шкале правого барабана составит коэффициент пропускания $\tau_{\text{пр}}$, а отсчет по красной шкале — оптическую плотность $D_{\text{пр}}$. Затем испытуемый образец ставят перед правым отверстием при отсчете на правом барабане 100, а измерения $\tau_{\text{л}}$ или $D_{\text{л}}$ ведут левым барабаном.

Настройку на фотометрическое равновесие обеих частей поля и отсчеты по шкалам барабанов производят 5—7 раз с последующим получением среднего значения группы отсчетов $\tau_{\text{пр}}$ и $\tau_{\text{л}}$ или $D_{\text{пр}}$ и $D_{\text{л}}$.

Окончательные значения τ и D находят с помощью выражений

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{пр}} \tau_{\text{л}}} \quad \text{и} \quad D = (1/2)(D_{\text{пр}} + D_{\text{л}}).$$

Подставляя полученное значение τ и известные значения l , n и ρ в формулу (65), находят коэффициент светопоглощения на пути 1 см. По величине α судят о категории стекла. Удобно коэффициент α подсчитывать по таблицам, составленным заранее для значений $A = -\ln \tau$ и $B = -2 \ln[1 - (n_D - 1)^2 / (n_D + 1)^2]$, тогда $\alpha = (A + B) / l$.

Определение спектрального показателя поглощения оптического стекла и других оптических материалов в ультрафиолетовой и ин-

фракрасной областях спектра сводится к измерению спектрального коэффициента пропускания, вычислению спектрального коэффициента отражения и измерению толщины испытуемого образца. Образец должен иметь размеры $10 \times 25 \times 25$ мм и клиновидность не более 1° .

Для измерения спектрального коэффициента пропускания τ_λ в ближних ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра применяют спектрофотометры СФ-4 или СФ-4А; в инфракрасной области для длин волн 1 мкм и больше — спектрофотометры ИКС-12 и ИКС-21.

Спектральный коэффициент пропускания

$$\tau_\lambda = \Phi_\lambda / \Phi_{0\lambda} = (1 - \rho_\lambda)^2 \cdot 10^{-K_\lambda \cdot l},$$

где Φ_λ и $\Phi_{0\lambda}$ — поток монохроматического излучения с длиной волны λ , соответственно прошедший образец стекла и упавший на него (начальный поток); ρ_λ — спектральный коэффициент отражения; K_λ — показатель поглощения; l — толщина образца, мм.

Измерения τ_λ выполняют через 0,05 мкм на крутых участках спектральной кривой и через 0,1—0,2 мкм на пологих участках.

Для вычисления коэффициента отражения $\rho_\lambda = (n_\lambda - 1)^2 / (n_\lambda + 1)^2$ показатель преломления стекла должен быть измерен с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-2}$. Кроме расчетного способа определения спектрального коэффициента отражения можно применять спектрофотометрический метод на спектрофотометре СФ-4 с насадкой ДП-482 [48].

Показатель поглощения

$$K_\lambda = (1/l) [2 \lg(1 - \rho_\lambda) - \lg \tau_\lambda];$$

K_λ — величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения ослабляется в результате поглощения света в стекле в 10 раз. Показатель поглощения является характеристикой, используемой при оценке категории стекла по светопоглощению.

Относительную погрешность определения K_λ вычисляют по формуле

$$\frac{\Delta K_\lambda}{K_\lambda} = \frac{0,43 \frac{\Delta \tau_\lambda}{\tau_\lambda}}{\lg \tau_\lambda - 2 \lg(1 - \rho_\lambda)} + \frac{\Delta l}{l}.$$

Интегральный коэффициент отражения ρ можно найти двумя способами: абсолютным и относительным. При абсолютном способе

$$\rho = \Phi_p / \Phi,$$

где Φ_p — отраженный световой поток; Φ — падающий световой поток.

При относительном способе

$$\rho = \Phi_p \rho_3 / \Phi_3 = m_p \rho_3 / m_3,$$

где Φ_p и Φ_3 — соответственно световой поток, отраженный от испытуемого образца и от эталонной поверхности; m_p и m_3 — отсчеты по

шкале измерительного прибора при отражении от поверхностей испытуемого образца и эталона; ρ — коэффициент отражения эталона.

На практике часто используют фотоэлектрический рефлексометр ИФТ-32, который можно приспособить для измерения при углах падения лучей $15\text{--}90^\circ$ через каждые 5° [17].

Оптическая схема рефлексометра (рис. 87) состоит из осветительной 1—3 и приемной 4—7 частей, которые можно по кольцу 8 устанавливать под углами друг к другу. Испытуемый образец 10, помещаемый на стол 11, имеет клиновидность для устранения вредного светового потока, отраженного от нижней поверхности. Диафрагмы 3, 9 и 5 служат для регулирования световых потоков и устранения рассеянного света.

Рефлексометр позволяет измерять просветляющее действие интерференционных покрытий (пленок) на оптических деталях, оцениваемое отношением Π коэффициентов отражения поверхностей с пленкой $\rho_{пл}$ и чистой поверхности стекла без пленки $\rho_{ст}$:

$$\Pi = \rho_{пл} / \rho_{ст}.$$

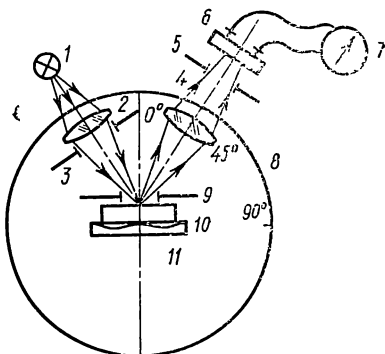


Рис. 87. Схема рефлексометра для измерения коэффициента отражения

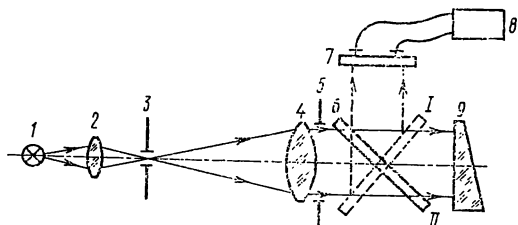


Рис. 88. Схема для измерения коэффициента отражения светового потока, нормально падающего на поверхность испытуемого образца

ку 6 (положение II) на испытуемый образец 9, и приемной части — фотоэлемента 7 с измерительным прибором 8. Светоделительная пластинка имеет покрытие, коэффициент отражения которого ρ_λ и коэффициент пропускания τ_λ .

После отражения от поверхности испытуемого образца световой поток отражается от светоделительной пластинки и направляется на фотоземлет, дающий показание m_1 . Затем светоделительная пластинка поворачивается на 90° (положение I), направляя световой по-

Для измерения коэффициента отражения светового потока, нормально падающего на поверхность испытуемого образца, предложена [22] схема установки, изображенная на рис. 88, которая состоит из коллиматора 1—4, посылающего параллельный пучок лучей через диафрагму 5 и светоделительную пластинку

ток на фотоэлемент, и на измерительном приборе фиксируется отсчет m_2 . Коэффициент отражения

$$\rho = m_1/m_2 \tau.$$

Точность измерения ρ около 1 %.

Глава V. Контроль основных характеристик оптических систем

§ 24. Измерение фокусных расстояний

Из геометрической оптики известно, что расстояние от передней главной точки H до переднего фокуса F называется первым или передним фокусным расстоянием f ; расстояние от задней главной точки H' до заднего фокуса F' — задним фокусным расстоянием f' .

Под главными понимают точки пересечения оптической оси системы с передней и задней главными плоскостями, расположенными перпендикулярно оптической оси и имеющими линейное увеличение, равное единице.

Величина заднего фокусного расстояния f' — одна из основных оптических характеристик системы. На практике при установке объектива в зрительную трубу и фотокамеру, как правило, приходится часто использовать значение заднего фокального отрезка $s'_{F'}$ — расстояние от задней поверхности объектива до заднего фокуса или рабочее расстояние s_p , равное расстоянию от опорного торца оправы объектива до заднего фокуса. Все три параметра определяют при одной установке объектива на оптической скамье или фокометре.

Если при изготовлении объективов допускаются отклонения фактических фокусных расстояний от расчетных на 0,5—2 %, то допуск на контрольные измерения f' должен находиться в пределах 0,05—0,2 %.

Практически погрешности измерения f' составляют 0,1—0,05 % и зависят от качества оптической системы и метода контроля. Для измерения фокусных расстояний применяют специальные фокометры, оптические скамьи типа ОСК-2 или ОСК-3, снабженные коллиматорами, зрительными трубами, объективодержателями и отсчетными микроскопами.

Прежде чем отъюстировать контролируемую систему на оптической скамье, следует проверить правильность установки объектива коллиматора или зрительной трубы скамьи на «бесконечность», т. е. установить предметную шкалу или сетку окуляра в задней фокальной плоскости объектива, и это положение зафиксировать. Установка объектива коллиматора или зрительной трубы на бесконечность может быть осуществлена: по удаленному предмету, методом автоколлимации, с помощью плоскопараллельной пластинки и дополнительной зрительной трубы (для коллиматора) или дополнительного коллиматора (для зрительной трубы) и с помощью длиннофокусной зрительной трубы.

а) Установка объектива коллиматора или зрительной трубы на бесконечность по удаленному предмету производится по предмету, находящемуся на расстоянии более 1000 фокусных расстояний объектива. Такое удаление должно обеспечить фокусировку с точностью 0,1% от f' , что подтверждается расчетом по формуле (17) чувствительности продольной установки трубы.

Коллиматор должен иметь выдвижную часть трубы со шкалой и сменный окуляр. Среднее арифметическое значение многократных отсчетов по шкале при наведении сетки окуляра на изображение удаленного предмета определяет положение установки объектива коллиматора на бесконечность.

б) Установка объектива коллиматора или зрительной трубы на бесконечность методом автоколлимации является наиболее удобной и точной в лабораторных условиях. В распоряжении наблюдателя должны быть автоколлимационный окуляр типа Гаусса или с куб-призмой и плоское зеркало или плоскопараллельная пластинка с полированными плоскими поверхностями и диаметром, который не меньше диаметра фокусируемого объектива трубы.

Точность обработки отражающих поверхностей зеркала или пластинки должна быть не более половины интерференционной полосы. Зеркало или пластинки устанавливаются перпендикулярно оси объектива с помощью подъемных винтов треножника или специальных приспособлений.

Для отыскания автоколлимационного изображения шкалы или сетки окуляра необходимо прижать рабочую поверхность пластинки к торцу оправы объектива зрительной трубы или коллиматора и совместить автоколлимационное изображение шкалы с сеткой окуляра, перемещая последний. Как и при фокусировке объектива по удаленному предмету, необходимо несколько наведений и отсчетов; за окончательную принимают установку, соответствующую среднему значению отсчетов.

в) Фокусировка объектива коллиматора с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность, и плоскопараллельной пластинки, которая помещена между объективами коллиматора и зрительной трубы, сводится к наклону пластинки и наблюдению через окуляр за поперечными смещениями изображения предметной шкалы коллиматора по отношению к перекрестию окуляра. Клиновидность плоскопараллельной пластинки не должна превышать 3".

Перемещая предметную шкалу или объектив коллиматора вдоль оптической оси, добиваются неподвижного положения изображения шкалы при различных наклонах пластинки.

г) Установка коллиматора или зрительной трубы на бесконечность с помощью дополнительной длиннофокусной зрительной трубы с известным фокусным расстоянием объектива позволяет сфокусировать объектив коллиматора с достаточной для практических целей точностью $\Delta f'_k$. Фокусное расстояние объектива дополнительной зрительной трубы должно в 3—5 раз превышать фокусное расстояние объектива коллиматора.

Точность фокусировки

$$\Delta f'_k = \Delta f'_t (f'_k / f'_t)^2,$$

где $\Delta f'_t$ — смещение выдвижной части дополнительной зрительной трубы; f'_k и f'_t — фокусные расстояния объективов фокусируемого коллиматора и дополнительной зрительной трубы. Если, например $f'_t = 1600$ мм, $f'_k = 500$ мм и $\Delta f'_t = 1$ мм, то погрешность $\Delta f'_k = 0,1$ мм, или 0,2%.

Световой диаметр объектива дополнительной зрительной трубы должен быть равен или несколько больше светового диаметра объектива коллиматора и иметь относительное отверстие 1 : 8 — 1 : 10.

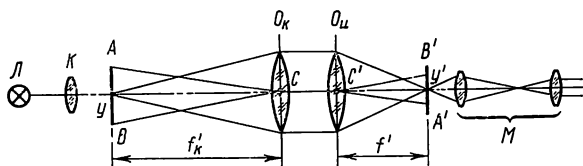


Рис. 89. Определение фокусного расстояния методом увеличения:

Л — лампа; К — конденсор; М — микроскоп

Из практики известно, что для объектива зрительной трубы, используемой совместно с глазом наблюдателя, определение положения фокальной плоскости коллиматора зависит от разрешающей и аккомодационной способностей глаза, распределения освещенности в дифракционном кружке рассеяния объектива коллиматора.

Метод увеличения. Метод увеличения основан на определении величины изображения y' , построенного в фокальной плоскости испытуемого объектива (прямые наблюдения), или на определении y' , построенного в фокальной плоскости объектива трубы, с помощью которой ведут наблюдения (обратный способ наблюдения). При прямых наблюдениях предметную шкалу устанавливают в фокальной плоскости объектива коллиматора O_k (рис. 89) и измерения проводят микроскоп-микрометром M , апертурный угол которого должен быть равен или несколько больше апертурного угла испытуемого объектива. При обратных наблюдениях предметную шкалу устанавливают в фокальной плоскости испытуемого объектива O_u , а измерения осуществляют с помощью винтового окулярного микрометра трубы. В обоих случаях величина предмета y и фокусное расстояние объектива зрительной трубы или коллиматора f'_k должны быть известны с предельной точностью.

Из подобия треугольников ABC и $A'B'C'$ (рис. 89) для прямых наблюдений имеем

$$f' / f'_k = y' / y,$$

откуда фокусное расстояние объектива

$$f' = f'_k y' / y. \quad (66)$$

Аналогично находим фокусное расстояние для обратного способа наблюдений:

$$f' = f'_k y / y'. \quad (67)$$

Измерение f' сводится к определению линейного увеличения и вычислению фокусного расстояния по формуле (66) или (67). Из этих формул видно, что если f'_k и y известны и постоянны для данного прибора, то выгодно найти постоянное значение $K = f'_k / y$ или $1/K = y / f'_k$ и использовать его при вычислениях f' . Имеются фокометры, в которых предметная шкала в зависимости от f'_k объектива коллиматора разделена на интервалы так, что $K = 1$. Тогда отсчет по шкале или измерительному устройству, находящемуся в фокальной плоскости испытуемой системы, показывает непосредственно искомую величину f' .

Для получения истинного значения величины интервала изображения шкалы коллиматора необходимо знать цену деления барабана винтового окулярного микрометра при совместной работе с объективом микроскопа, т. е. цену деления микроскоп-микрометра. Для этого перед объективом микроскопа устанавливают шкалу с точно известной ценой деления, например 0,1 или 0,01 мм. Фокусируют микроскоп на отчетливое видение штрихов шкалы и измеряют выбранный интервал микрометренным винтом. Зная цену деления барабана, находят цену τ деления микроскоп-микрометра:

$$\tau = an / m,$$

где a — цена деления предметной шкалы; n — число делений предметной шкалы в выбранном интервале; m — разность отсчетов по шкале и барабану для выбранного интервала шкалы (в делениях барабана).

Шкалу, по которой определялась цена τ , удаляют и в объективодержателе за объективом коллиматора устанавливают контролируемый объектив. Микроскоп фокусируют на изображение шкалы коллиматора, построенное в фокальной плоскости испытуемого объектива, и измеряют выбранный интервал y' изображения шкалы, укладывающийся в $2/3$ поля зрения окуляра. Окончательно имеем

$$y' = (A_1 - A_2) \tau,$$

где A_1 и A_2 — отсчеты по микрометру; τ — цена деления барабана. Подставляя y , y' и f'_k в формулу (66), находят искомое значение фокусного расстояния испытуемого объектива f' .

Относительную погрешность определения f' можно получить после логарифмирования и дифференцирования формулы (66):

$$\lg f' = \lg f'_k + \lg y' - \lg y, \quad \frac{df'}{f'} = \frac{df'_k}{f'_k} + \frac{dy'}{y'} + \frac{dy}{y}.$$

Полагая, $dy'/y=0,1\%$, $dy/y=0,05\%$ и $df'_k/f'_k=0,2\%$, находим: $df'/f' \approx 0,3\%$.

После определения фокусного расстояния объектива приступают к измерению заднего фокального отрезка $s'_{F'}$ и рабочего отрезка s'_p , используя ту же установку объектива и фокусировку микроскопа на изображение предметной шкалы коллиматора, т. е. на фокус контролируемого объектива. Это положение микроскопа фиксируют отсчетом по шкале станины оптической скамьи или фокометра. Затем перемещают микроскоп к объективу, фокусируют на вершину его задней поверхности и берут отсчет по шкале станины для второго положения микроскопа. Разность отсчетов двух положений микроскопа определяет величину заднего вершинного фокусного расстояния.

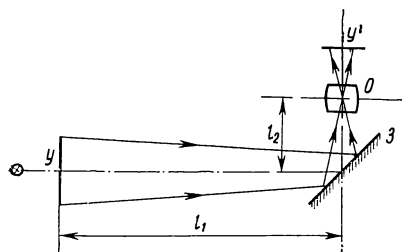


Рис. 90. Определение фокусного расстояния короткофокусных систем методом увеличения

Величину рабочего отрезка находят аналогичным способом. Микроскоп из начального положения (фокусировка на изображение шкалы коллиматора) перемещают к объективу и фокусируют на посадочный торец оправы объектива, для чего тубус микроскопа смещают в сторону от осевого положения по поперечным направляющим каретки (оптические скамьи ОСК-2 и ОСК-3 имеют такие каретки). Второе положение микроскопа фиксируют по шкале станины. Разность отсчетов составит величину рабочего отрезка.

Разность между значениями f' и $s'_{F'}$ определяет расстояние $s'_{H'}$ от задней главной точки H' до вершины последней поверхности объектива:

$$s'_{H'} = f' - s'_{F'}.$$

Погрешность определения $s'_{H'}$ составляет $\sim 1\%$.

Положение передней главной точки H относительно вершины передней поверхности объектива определяется разностью величин f и s_H , измеренных для объектива, который повернут передней поверхностью к микроскопу.

Для определения фокусных расстояний короткофокусных систем, например окуляров и объективов микроскопов, применяют малые фокометры, а при отсутствии последних производят установку предметной шкалы y на большое удаление $s=l_1+l_2$ от испытуемой системы O (рис. 90). Получаемая точность измерения достаточна для практических целей. При определении фокусного расстояния объектива микроскопа расстояние s может быть равно 1,5—2 м. Величина y' изображения предмета измеряется так же, как и на малом фокометре, с помощью микроскоп-микрометра, цена τ деления барабана которого известна.

Фокусное расстояние объектива

$$f' = sy'/y = sm\tau/y,$$

где m — разность отсчетов по шкале и барабану микрометра;
 τ — цена деления барабана.

Фокусное расстояние отрицательных оптических систем можно определить также методом измерения увеличения, но для этого отрицательную систему нужно дополнить положительной с более коротким фокусным расстоянием. В результате получается положи-

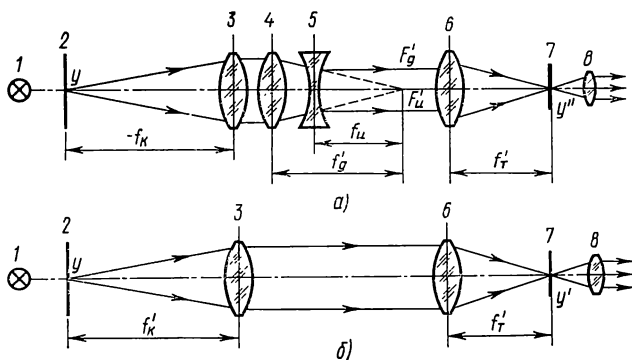


Рис. 91. Определение фокусного расстояния отрицательных оптических систем методом увеличения

тельная система с эквивалентным фокусным расстоянием f'_a , которое и измеряется на фокометре. Зная фокусное расстояние дополнительной системы f'_d и измеренное f'_a и подставляя эти значения в формулу

$$f'_a = f f'_d / (f' + f'_d - d),$$

можно найти искомое фокусное расстояние f' отрицательной системы:

$$f' = [(f'_d - d) f'_a] / (f'_d - f'_a),$$

где d — расстояние между главными плоскостями испытуемой и дополнительной систем.

Измерение фокусных расстояний отрицательных оптических систем методом увеличения сложнее по сравнению с измерением фокусных расстояний положительных систем. Дело в том, что требуется иметь дополнительную положительную систему с известным и более длинным фокусным расстоянием, чем у испытуемой, из этих двух систем составить систему в виде трубки Галилея и выполнить два измерения изображения шкалы коллиматора y' без трубки Галилея и y'' с трубкой (рис. 91).

На основании рис. 91, а, б можно написать

$$y'/y = -f'_\tau/f'_\kappa; \quad y''/y = (-f'_\tau/f'_\kappa) - (f'_\tau/f'_\kappa) = -f'_\tau \Gamma/f'_\kappa,$$

где y — величина интервала шкалы коллиматора; f'_τ и f'_κ — фокусные расстояния объективов зрительной трубы и коллиматора; f'_τ и f'_κ — фокусные расстояния испытуемой и дополнительной систем; Γ — видимое увеличение трубки Галилея.

Из полученных формул следует:

$$y''/y' = \Gamma = f'_\tau/f'_\kappa; \quad (68) \quad f'_\kappa = y' f'_\tau / y''. \quad (69)$$

Как видно из формулы (68), измерения сводятся к определению видимого увеличения трубки Галилея. При массовом контроле f'_τ отрицательных систем произведение $y' f'_\tau$ [см. формулу (69)] можно принять за постоянный коэффициент K и f'_κ вычислить по формуле

$$f'_\kappa = K/y''.$$

Изображения y' и y'' измеряют окулярным микрометром 7—8 зрительной трубы 6—8, объектив 6 которой по коллиматору 2—3 установлен на бесконечность (рис. 91).

Для измерения y'' составляется трубка Галилея 4—5 путем переключения контролируемой отрицательной системы 5 по направляющим скамьи до получения резкого изображения шкалы 2 коллиматора, подсвечиваемой источником 1 и наблюдаемой через окуляр 8. При таком положении передний фокус контролируемой системы совмещен с задним фокусом дополнительной системы 4.

Зная цену деления шкалы коллиматора и барабана винтового окулярного микрометра (обычно она равна 0,01 мм), легко определить значения y' и y'' .

Погрешность определения f'_κ можно вычислить по формуле

$$\sigma_{f'_\kappa} = f'_\kappa \sqrt{(\sigma_{f'_\tau}/f'_\tau)^2 + (\sigma_{y'}/y')^2 + (\sigma_{y''}/y'')^2}, \quad (7)$$

полученной в результате логарифмирования формулы (69), дифференцирования и возведения в квадрат. Здесь $\sigma_{f'_\tau}$, $\sigma_{y'}$ и $\sigma_{y''}$ — средние квадратические погрешности измерения фокусного расстояния дополнительной системы и изображений шкалы y' и y'' .

Пример записи и обработки результатов измерения f'_κ отрицательной системы при $f'_\tau = 489,14$ мм, $y = 3$ мм, $\tau = 0,01$ мм приведен в табл. 17.

Средняя квадратическая погрешность определения f'_κ при $\sigma_{f'_\tau} = 0,5$ мм, $\sigma_{y'} = 0,005$ мм и $\sigma_{y''} = 0,05$ мм равна:

$$\sigma_{f'_\kappa} = 107,54 \sqrt{(0,5/489,14)^2 + (0,005/1,6138)^2 + (0,05/7,34)^2} \approx 0,14 \text{ мм.}$$

Относительная погрешность составляет 0,13%.

Метод угловых измерений. Метод угловых измерений основан на определении угла ω , под которым из передней главной точки H

№ приемов	Без трубки Галилея			С трубкой Галилея			y'/y''	f_{II} , мм
	A_1	A_2	$A_1 - A_2$	A_1	A_2	$A_1 - A_2$		
1	233,1	71,4	161,7	792,5	58,1	734,4	0,22004	107,6
2	233,0	71,5	161,5	792,6	58,4	734,2	0,21996	107,6
3	233,1	71,8	161,3	792,0	58,0	734,0	0,21975	108,5
4	233,0	72,0	161,0	791,8	57,9	733,9	0,21938	107,3
5	233,0	71,5	161,5	792,2	58,6	733,6	0,2215	107,7
Среднее	233,04	71,66	161,38	792,32	58,2	734,02	0,2198	107,54

испытуемой системы 5 рассматривается интервал y предметной шкалы 3 (рис. 92), установленной в фокальной плоскости объектива 5. Зная истинный размер интервала y и соответствующий ему угол ω , вычисляют искомое фокусное расстояние:

$$f' = y' / \operatorname{tg} (\omega / 2). \quad (71)$$

Точность измерения f'_{II} зависит от погрешностей применяемого угломерного инструмента, погрешностей измерения y и установки предметной шкалы в фокальной плоскости системы.

Оптические оси испытуемой системы и зрительной трубы 6 должны быть параллельны или совмещены, передняя главная точка должна находиться над вертикальной осью вращения лимба 4. В случае контроля телеобъектива достаточно установить над осью вращения переднюю вершину объектива.

Первая установка выполняется перемещением системы по высоте и в стороны до приведения отраженных бликов от поверхностей линз в одну линию. Вторая установка производится вращением стола лимба или алидады с системой и перемещением ее вдоль оптической оси до момента, пока изображение центрального штриха будет неподвижным. Необходимая при этом подсветка обеспечивается источником 1 через матовое стекло 2.

Угол ω может быть измерен двумя способами: при неподвижном столе углоизмерительного прибора с испытуемой системой вращают лимб со зрительной трубой, визируя ее на левый (положение I) и правый (положение II) края интервала y шкалы 3, или при постоянном положении зрительной трубы и лимба вращают стол и алидаду вместе с испытуемой системой и шкалой. Угол ω определяется

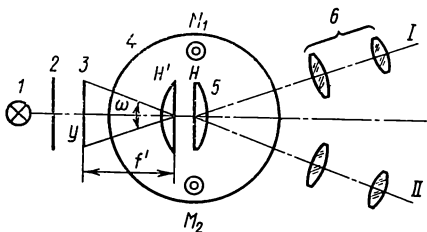


Рис. 92. Определение фокусного расстояния методом угловых измерений

разностью между отсчетами по лимбу и двум микроскопам M_1 и M_2 . Подставляя значения y и ω в формулу (71), находят фокусное расстояние системы.

Средняя квадратическая погрешность в определении фокусного расстояния системы

$$\sigma_{f'} = f' \sqrt{(\sigma_y/y)^2 + (2\sigma_\omega/\sin 2\omega)^2}.$$

Автоколлимационный метод. Автоколлимационный метод измерения фокусного расстояния оптических систем [1], предложенный

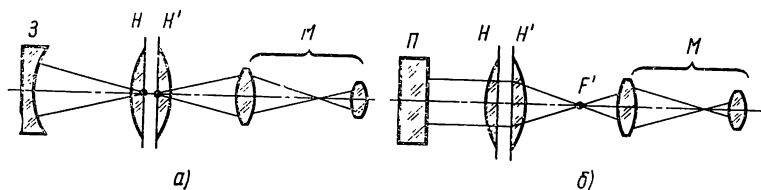


Рис. 93. Определение фокусного расстояния автоколлимационным методом

проф. М. М. Русиновым, основан на получении автоколлимационных изображений окулярной сетки при отражении лучей от вогнутого сферического зеркала в задней узловой точке H' (рис. 93, а) и от плоского зеркала в заднем фокусе F' системы (рис. 93, б). Этот метод подобен методу определения радиусов кривизны с помощью длиннофокусных автоколлимационных микроскопов или зрительных труб с насадочными линзами. Разность отсчетов перемещений тубуса микроскопа или зрительной трубы при наводке на автоколлимационные изображения в точках H' и F' и есть искомая величина фокусного расстояния f' . Ошибка измерения тем меньше, чем точнее совмещено автоколлимационное изображение с предметной плоскостью микроскопа или трубы. Измерительными приспособлениями, позволяющими получить повышенную точность, являются индикаторы с точностью измерения $\pm 0,02$ мм или плоскопараллельные концевые меры, обеспечивающие точность $\pm 0,01$ мм. Радиус кривизны вогнутого сферического зеркала $З$ не имеет решающего значения, важно только, чтобы размер поверхности зеркала, отражающей световой поток, был достаточен для получения яркого изображения.

Автоколлимационный метод может быть применен как для измерения малых фокусных расстояний, например окуляров и объективов микроскопов, так и фокусных расстояний порядка 50—1000 мм, если в распоряжении имеется длиноизмерительная машина.

Приступая к измерениям, вначале получают автоколлимационное изображение сетки окуляра от поверхности вогнутого зеркала. Затем между зеркалом и автоколлимационным микроскопом или

трубой помещают испытуемую систему и, перемещая ее вдоль оптической оси, находят автоколлимационное изображение в задней узловой точке системы. После этого вместо вогнутого зеркала ставят плоское зеркало Π и, отодвигая микроскоп или трубу от испытуемой системы, также получают автоколлимационное изображение в заднем фокусе F' . Производят несколько наведений и отсчетов при двух положениях микроскопа или трубы, подсчитывают средние значения и берут их разность, которая и составит фокусное расстояние системы f' .

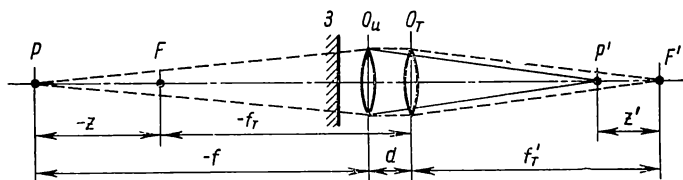


Рис. 94. Определение фокусного расстояния длиннофокусных систем автоколлимационным методом

Для определения очень больших фокусных расстояний оптических систем, мало отличающихся от плоскопараллельных пластинок (светофильтры, защитные стекла, пластинки и т. п.), необходимо иметь автоколлимационную или простую зрительную трубу с известным фокусным расстоянием объектива и установленную строго на бесконечность.

В первом случае для получения автоколлимационного изображения используют эталонное плоское зеркало высокого качества, устанавливаемое перед объективом зрительной трубы и испытуемой системой. Во втором случае вместо зеркала используют длиннофокусный коллиматор. В обоих случаях основным условием является наличие зрительной трубы с длиннофокусным объективом (1500—3000 мм) и диаметром, равным или несколько большим диаметра испытуемой системы.

Автоколлимационный метод повышает точность измерения фокусного расстояния в два раза. Кроме того, он позволяет исследовать системы, находящиеся в специальных условиях, например при низкой температуре и давлении воздуха в термобарокамере.

Пусть на рис. 94 эталонное плоское зеркало Π и испытуемая система $O_{\text{И}}$ установлены перед объективом зрительной трубы O_T ; F и F' — соответственно передний и задний фокус объектива трубы; P и P' — точки предмета и изображения; f_T и f' — фокусные расстояния объектива зрительной трубы и испытуемой системы; d — расстояние между объективом трубы и испытуемой системой.

Если предмет P расположен перед объективом трубы на расстоянии $-z = -f_T$, то его изображение, построенное испытуемой системой и объективом трубы, находится на оптической оси в точке

P' на расстоянии от F' , равном z' . Как видно из рис. 94, $-z - f_{\tau} = f' + d$, откуда

$$-f_{\tau}' = z + f_{\tau} + d. \quad (72)$$

Согласно формуле Ньютона $z = -f_{\tau}'^2/z'$. Подставляя значение z в уравнение (72), находим

$$f' = (f_{\tau}'^2/z') - f_{\tau} - d, \quad (73)$$

где z' — величина дефокусировки трубы, полученная из разности отсчетов при установке трубы на бесконечность и на автоколлимационное изображение сетки окуляра от эталонного зеркала, когда испытываемая система находится между объективом коллиматора и зеркалом.

При больших f' можно использовать приближенную формулу

$$f' \approx f_{\tau}'^2/z'. \quad (74)$$

При измерении фокусного расстояния плоского зеркала также определяют z' как разность отсчетов при фокусировках трубы на автоколлимационное изображение сетки окуляра, построенное лучами, отраженными от эталонного плоского зеркала (соответствующее установке трубы на бесконечность), и лучами, которые отражены от испытуемого зеркала, поставленного вместо эталонного. Фокусное расстояние плоского зеркала $f' = f_{\tau}'^2/(2z')$. Точность измерения f' определяется выражением

$$\frac{df'}{f'} = 2 \frac{df_{\tau}'}{f_{\tau}'} + \frac{dz'}{z'}.$$

Например, если f_{τ}' определено с погрешностью 0,2%, а дефокусировка z' — с погрешностью 0,5%, то суммарная относительная погрешность в определении f' составляет 1%.

§ 25. Измерение диаметров входного и выходного зрачков оптических систем

Пучки лучей, проходящие через оптическую систему, ограничиваются как оправами объективов, призм и зеркал, так и специальными преградами — диафрагмами в виде непрозрачных экранов с круглыми или квадратными отверстиями. Диафрагмы служат, главным образом, для исключения вредных лучей, вызывающих появление аберраций; ограничения поля зрения; устранения рассеянного света с целью повышения качества оптического изображения. К основным диафрагмам оптического прибора относят: апертурную диафрагму, входной зрачок, выходной зрачок, полевые и виньетирующие диафрагмы.

Апертурной называется диафрагма, ограничивающая пучок лучей, выходящих из осевой точки предмета. Параксиальное изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов или апертурная диафрагма, расположенная в пространстве предметов, называется *входным зрачком*. Параксиальное изображение апер-

турной диафрагмы в пространстве изображений или апертурная диафрагма, расположенная в пространстве изображений, называется *выходным зрачком*. Таким образом, апертурная диафрагма, входной и выходной зрачки являются оптически сопряженными элементами: изображение апертурной диафрагмы, построенное в обратном ходе лучей предшествующей частью системы, есть входной зрачок; изображение апертурной диафрагмы, построенное последующей частью оптической системы в прямом ходе лучей, является выходным зрачком; изображение входного зрачка, построенное всей оптической системой в прямом ходе лучей, — не что иное, как выходной зрачок системы.

Отношение диаметра D входного зрачка системы к ее фокусному расстоянию f' называется *относительным отверстием* системы, а величина, обратная относительному отверстию, — *диафрагменным числом* K :

$$K = f'/D.$$

Виньетирующей называют любую диафрагму, кроме апертурной и полевой, которая ограничивает пучки лучей, выходящих из точек предмета, лежащих вне оптической оси. Параксиальное изображение виньетирующей диафрагмы в пространстве предметов или изображений называется соответственно *входным* или *выходным окном*.

Числовой апертурой A в пространстве предметов называют произведение показателя преломления n на абсолютное значение синуса апертурного угла σ_A :

$$A = n \mid \sin \sigma_A \mid .$$

В свою очередь, апертурный угол σ_A — это угол между оптической осью и лучом, выходящим из осей точки предмета и идущим на край апертурной диафрагмы.

Измерение диаметров входного и выходного зрачков зрительной трубы. Входным зрачком простой зрительной трубы, состоящей из объектива и окуляра, является внутренний диаметр оправы объектива (или диаметр объектива), а выходным зрачком — ее изображение, построенное окуляром.

Диаметры входного и выходного зрачков зрительной трубы измеряют после выверки ее на бесконечность путем фокусировки на удаленный предмет или на изображение шкалы, коллиматора. Приближенные измерения могут быть выполнены с помощью циркуля и миллиметровой линейки, прикладывая которые к оправе объектива, определяют размер входного зрачка. Для определения размера выходного зрачка можно использовать в качестве экрана матовое стекло или лист кальки, поместив его за окуляром трубы. Перемещая такой экран вдоль оси, находят наиболее резко очерченный светлый кружок — выходной зрачок, представляющий собой изображение входного зрачка окуляром. Диаметр выходного зрачка также измеряют линейкой или циркулем.

Более точно диаметры зрачков можно измерить динаметром Рамсдена или диоптрийной трубкой со шкалой. Динаметр представляет собой лупу (или окуляр) с увеличением $10\text{--}15\times$, в фокусе которой находится сетка с ценой деления $0,1\text{ мм}$.

Установив динаметр D (рис. 95, *a*) на отчетливое видение штрихов сетки и приставив его выдвинутым тубусом к окуляру O_2 трубы, рассматривают резкие края изображения выходного зрачка (рис. 95, *б*).

Число делений сетки динаметра, укладывающихся в диаметре кружка, определяет величину диаметра выходного зрачка. Для определения диаметра входного зрачка перед объективом трубы

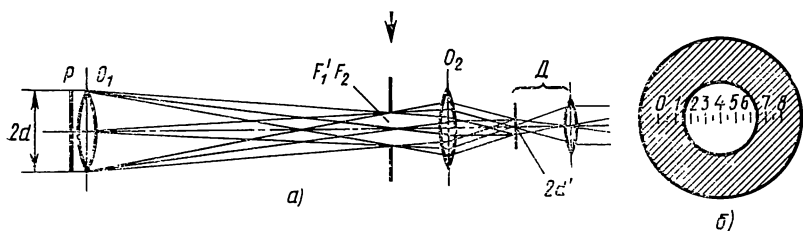


Рис. 95. Измерение диаметров зрачков зрительной трубы:

a — схема определения диаметров входного и выходного зрачков зрительной трубы;
б — поле зрения динаметра

вплотную к его оправе ставят стеклянную шкалу P (рис. 95), например, с миллиметровыми делениями и рассматривают ее изображение через динаметр. Число делений шкалы, видимых в поле зрения динаметра, определяет величину диаметра D входного зрачка.

Отсчет по шкале, нанесенной на оправе динаметра, покажет удаление выходного зрачка от торца окуляра.

Измерение диаметра выходного зрачка микроскопа. У простых микроскопов и микроскопов малого увеличения апертурной диафрагмой и в то же время входным зрачком служит оправа объектива, а ее изображение — выходным зрачком микроскопа.

В сложных объективах апертурной диафрагмой может служить оправа одной из линз объектива, а у измерительных микроскопов — диафрагма, расположенная в задней фокальной плоскости объектива. В последнем случае в пространстве предметов имеет место телецентрический ход лучей (главный луч идет параллельно оптической оси). Изображение такой оправы или диафрагмы в пространстве изображения является выходным зрачком, а в пространстве предметов — входным зрачком, расположенным в бесконечности.

Диаметр выходного зрачка микроскопа измеряют также с помощью динаметра Рамсдена, аналогично измерению диаметра выходного зрачка зрительной трубы. Вначале микроскоп фокусируют на равномерно освещенный предмет, например лист белой бумаги. Затем на окуляр микроскопа сверху ставят динаметр и отыскивают наиболее резкое изображение краев выходного зрачка.

Для контроля правильности измерений диаметр D' выходного зрачка микроскопа может быть вычислен по приближенной формуле:

$$D' = 2fA,$$

где f — фокусное расстояние микроскопа; A — числовая апертура.

Измерение диаметров входного и выходного зрачков фотографических и проекционных объективов. Современные фотографические и проекционные объективы снабжены апертурными диафрагмами, установленными внутри объективов, диаметры которых можно изменять.

Диаметр входного зрачка фотографического или проекционного объективов определяют следующим образом. В заднем фокусе испытуемого объектива ставят диафрагму с диаметром отверстия 2—3 мм и освещают ее с помощью конденсора лампой накаливания. При выходе из объектива лучи света идут параллельным пучком. После объектива ставят экран, на который проектируется входной зрачок в виде светлого круга, диаметр которого измеряют линейкой. Повернув объектив другой стороной и поставив диафрагму в переднем фокусе объектива, аналогично определяют диаметр выходного зрачка.

Диаметры зрачков измеряют линейкой с точностью 0,5—1 мм. Более точно диаметр входного и выходного зрачков можно определить на измерительном микроскопе с фокусным расстоянием объектива не менее 50—60 мм. В этом случае в микроскоп рассматривают изображение действующей диафрагмы объектива, установленного на предметном столике и освещенного снизу рассеянным светом. Наводят перекрестие микроскопа на левый и правый края изображения апертурной диафрагмы и берут соответствующие отсчеты по шкале и барабану винта. На измерительном микроскопе диаметры зрачков объектива определяют с точностью $\pm 0,01$ мм.

Если микроскоп сфокусировать на передний торец оправы объектива, а затем на изображение диафрагмы и то же самое выполнить для объектива, повернутого другой стороной оправы, то разности отсчетов между фокусировками микроскопа при двух положениях объектива дают отрезки, определяющие положение входного и выходного зрачков относительно торцов оправы объектива.

§ 26. Измерение числовой апертуры микроскопа

Числовую апертуру микроскопа определяют специальным прибором — апертометром или же с помощью простых приспособлений (апертометричного кружка или миллиметровой линейки), обеспечивающих точность, достаточную для практических целей.

Апертометринный кружок представляет собой лист белой бумаги или картона, на котором черной тушью нанесен ряд окружно-

стей с диаметрами l , которые соответствуют различным апертурам A :

$$l = 2h \operatorname{tg} \sigma_A.$$

Например, при удалении $h = 25$ мм предметной плоскости объектива микроскопа от апертометричного кружка и при различных апертурных углах σ_A диаметры кружков следующие (табл. 18):

Т а б л и ц а 18

A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
σ_A	5°44,5'	11°31,3'	17°27,3'	23°34,6'	30°	36°52,1'	44°25,6'	53°7,8'	64°9,5'
l , мм	5	10,2	15,7	21,8	28,8	37,5	49,0	66,6	103,2

Для центрировки микроскопа в центре кружка наносят крест. На такой кружок, помещенный на предметный столик, сверху ставят металлический колпачок высотой $h = 25$ мм с боковыми вырезами для подсветки и с круглым отверстием в центре диаметром 1 мм. Сначала микроскоп фокусируют на отверстие колпачка, а затем колпачок и окуляр удаляют. Вместо окуляра ставят диафрагму с отверстием в центре, через которую, приблизительно в задней фокальной плоскости объектива, наблюдают изображения окружностей апертометричного кружка. Отмечают предельно видимый кружок по краям поля зрения, соответствующий определяемой апертуре.

Над отверстием предметного столика помещают стеклянную пластинку с перекрестием, на которое фокусируется микроскоп. Зеркало, служащее для подсветки, удаляют и на нижние приливы подставки микроскопа кладут миллиметровую линейку так, чтобы осевая линия ее делений прошла по диаметру поля зрения. После этого окуляр заменяют диафрагмой, указанной выше, и через ее отверстие наблюдают изображение делений линейки.

Число делений, уложившихся по полю зрения, и есть диаметр кружка l . Затем находят тангенс угла σ_A (отношение радиуса кружка $l/2$ к расстоянию h миллиметровой линейки от стеклянной пластинки на предметном столике) и синус угла σ_A , т. е. числовую апертуру A .

Полученное значение числовой апертуры можно проверить по формуле

$$A = D\bar{T}/(2\delta),$$

где D — диаметр входного зрачка; \bar{T} — видимое увеличение микроскопа; δ — расстояние наилучшего зрения.

§ 27. Измерение увеличения оптических систем

Измерение увеличения зрительной трубы. Зрительные трубы, применяемые для геодезических и астрономических наблюдений, обычно состоят из положительных объектива и окуляра. Такие трубы отличаются от других оптических систем большим увеличением и малым углом поля зрения [61].

Основными оптическими характеристиками зрительных труб являются: видимое увеличение $\bar{\Gamma}$, угол поля зрения 2ω и диаметр зрачка входа D .

Под видимым увеличением понимают отношение тангенса угла ω' , под которым наблюдается параксиальное изображение предмета, к тангенсу угла ω , под которым тот же предмет наблюдается невооруженным глазом. Если предмет расположен в бесконечности, то видимое увеличение $\bar{\Gamma}$ равно угловому увеличению γ :

$$\bar{\Gamma} = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega = \gamma = 1/\beta, \quad (75)$$

где β — линейное увеличение.

Линейное увеличение β связано с продольным увеличением α :

$$\beta^2 = \alpha = (f'_{\text{ок}} / f'_{\text{об}})^2,$$

где $f'_{\text{ок}}$ и $f'_{\text{об}}$ — соответственно фокусные расстояния окуляра и объектива.

В свою очередь, линейное увеличение

$$\beta = f'_{\text{ок}} / f'_{\text{об}} = D' / D. \quad (76)$$

Из соотношения (76) следует, что для определения линейного или углового увеличения зрительной трубы достаточно знать фокусные расстояния объектива и окуляра или диаметры входного D и выходного D' зрачков.

С достаточной для практики точностью видимое увеличение зрительной трубы можно определить с помощью нивелирной рейки, разделенной на сантиметры и установленной от зрительной трубы на расстоянии, равном или большем тридцати фокусным расстоянием объектива.

Сфокусировав окуляр на четкое видение сетки нитей, а трубу — на деления рейки, рассматривают одним глазом изображение делений рейки через трубу, а другим (без трубы) — непосредственно рейку. Замечают, сколько делений y , видимых невооруженным глазом, укладывается в одном или нескольких делениях рейки y' , видимых через трубу. Угловое, или видимое, увеличение трубы определяется формулой

$$\bar{\Gamma} = y / y'.$$

Или, измерив рулеткой расстояние L от объектива зрительной трубы до рейки и взяв отношение y и y' к L , находят соответствующие тангенсы углов, затем по формуле (75) получают искомое видимое увеличение.

Измерение увеличения лупы и микроскопа. Лупы и микроскопы служат для наблюдения мелких предметов.

Лупы в виде простых плосковыпуклых линз имеют небольшое увеличение ($2-4\times$); если для наблюдений необходимо большое увеличение, то используют сложные лупы и микроскопы.

Простая плосковыпуклая линза обычно обращена выпуклой стороной к глазу наблюдателя, благодаря этому лучше исправляется сферическая аберрация. Двояковыпуклая линза дает худшее качество изображения, поэтому рассмотрение предмета с увеличением более $5\times$ уже затруднено.

Широкое применение нашли апланатические лупы со средним увеличением $6-10\times$, состоящие из трех склеенных линз. Лупы $20\times$ увеличения и более применяют очень редко, так как имеют малое рабочее расстояние и небольшое поле зрения.

Большинство наблюдателей используют лупу или окуляр, установленный в зрительной трубе или микроскопе, для рассматривания изображения предмета на расстоянии наилучшего зрения, равном для нормального глаза 250 мм. При этом предмет помещают между передним фокусом и лупой или окуляром.

Если предмет находится в переднем фокусе, то его изображение находится в бесконечности, а видимое увеличение

$$\bar{\Gamma} = 250/f',$$

где f' — заднее фокусное расстояние лупы, микроскопа или окуляра.

Основными характеристиками лупы являются: видимое увеличение $\bar{\Gamma}$ и линейное поле зрения $2l$ [6].

Наиболее простым способом, обеспечивающим достаточную точность измерения увеличения лупы, можно считать способ рассмотрения двух миллиметровых шкал, одну из которых помещают на расстоянии наилучшего зрения и наблюдают невооруженным глазом, а вторую рассматривают через лупу. Сравнивают величину выбранного интервала y на первой шкале с увеличенным его изображением y' на второй шкале; их отношение и определяет увеличение лупы.

Основными характеристиками микроскопа являются: видимое увеличение $\bar{\Gamma}$, поле зрения $2l$ и числовая апертура A .

Видимое увеличение микроскопа

$$\bar{\Gamma}_m = \beta \bar{\Gamma}_{ок}, \quad (77)$$

где $\bar{\Gamma}_{ок}$ — видимое увеличение окуляра; β — линейное увеличение объектива, или

$$\bar{\Gamma}_m = \Delta 250/(f'_{об} f'_{ок}),$$

где Δ — оптический интервал — расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра; $f'_{об}$ и $f'_{ок}$ — соответственно фокусное расстояние объектива и окуляра.

Увеличение микроскопа измеряется с помощью рисовальных приборов, например, типа РА-4 или прибора Е. Ф. Юдина.

Определение увеличения микроскопа рисовальным прибором сводится к проектированию и совмещению видимого изображения предметной шкалы с острием карандаша на листе белой бумаги, положенном на стол под зеркало с правой от штатива микроскопа стороны нормально к падающим лучам.

Рисовальный прибор РА-4 (рис. 96) состоит из обоймы 1 с зажимным винтом 2, откидной головки 6 с куб-призмой и плоско-го зеркала 3 на кронштейне 5. После освобождения зажимного винта 4 зеркало можно повернуть вокруг оси. Куб-призма состоит из двух прямоугольных призм с полупрозрачной гипотенузой гранью. В откидной головке со стороны зеркала имеется отверстие для пропускания пучка лучей от зеркала. Сектор и барабан на откидной головке имеют по четыре отверстия, одно из которых свободно, два с нейтральными светофильтрами разной плотности и четвертое с синим светофильтром, используемые для выравнивания освещенности полей зрения (лист бумаги и изображение предмета).

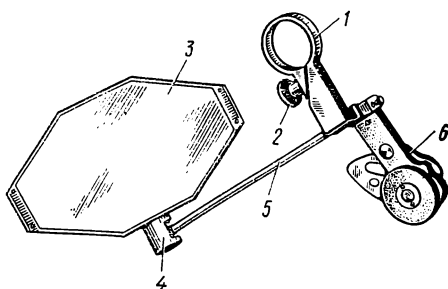


Рис. 96. Общий вид рисовального прибора

После установки рисовального прибора на тубус микроскопа последний фокусируют на резкое изображение объект-микрометра (шкалы с ценой деления 0,01 мм или шкалы с ценой деления 0,1 мм). Вращая зеркало, вводят в поле зрения изображение листа бумаги, освещенного дневным или искусственным светом. Вращением сектора и барабана на откидной головке подбирают нейтральный светофильтр, выравнивая освещенности изображения шкалы и листа бумаги.

После установки рисовального прибора на тубус микроскопа последний фокусируют на резкое изображение объект-микрометра (шкалы с ценой деления 0,01 мм или шкалы с ценой деления 0,1 мм). Вращая зеркало, вводят в поле зрения изображение листа бумаги, освещенного дневным или искусственным светом. Вращением сектора и барабана на откидной головке подбирают нейтральный светофильтр, выравнивая освещенности изображения шкалы и листа бумаги.

Рассматривая изображение выбранного интервала y предметной шкалы, отмечают острием карандаша соответствующий интервал изображения y' на листе бумаги и измеряют линейкой отмеченный интервал y' и расстояние s' от бумаги до глаза наблюдателя, состоящее из отрезка от листа бумаги до оси вращения зеркала, длины кронштейна (от оси вращения зеркала до отверстия кубика) и удаления глаза от кубика, равного 15 мм.

Значения y , y' и s' подставляют в формулу

$$\bar{G}_m = 250 y' / (ys').$$

Для контроля измеренного увеличения микроскопа служат формулы

$$\bar{G}_m = 500 A/s', \quad \bar{G}_m = \beta \bar{G}_{ок}.$$

Измерение увеличения микроскопа с помощью трубки Е. Ф. Юдина основано на определении величины изображения y' выбранного интервала y предметной шкалы (объект-микрометра с ценой деления 0,01 мм), наблюдаемых через окуляр трубки, увеличение которой \bar{G} должно быть известно и учитываться при нахождении \bar{G}_m .

Увеличение микроскопа

$$\bar{G}_m = y' \bar{G} / y. \quad (78)$$

Трубка Юдина представляет собой телескопическую систему, составленную из объектива и окуляра с равными фокусными расстояниями и с увеличением, равным единице. В фокальной плоскости объектива расположена шкала с известной ценой деления $\tau_{\text{ю}}$.

При определении увеличения трубку Юдина помещают на окуляр микроскопа, сфокусированного предварительно на предметную шкалу. Наблюдая через окуляр трубки, устанавливают его на резкое видение одновременно предметной шкалы и шкалы трубки.

Отсчитывают число делений m шкалы трубки, совпадающих с числом n предметной шкалы. Соответствующие интервалы $y' = m\tau_{\text{ю}}$ и $y = n\tau_m$, где τ_m — цена деления предметной шкалы.

Подставляя значения y' и y в формулу (78), вычисляют увеличение микроскопа.

§ 28. Измерение поля зрения оптических систем

Поле зрения оптической системы называется часть пространства предметов, качественно изображаемая системой. Поле зрения ограничивается материальной диафрагмой, называемой диафрагмой поля зрения, которая устанавливается в плоскости действительного изображения. В визуальных телескопических системах и микроскопах диафрагмы поля зрения круглые, в фотографических объективах — прямоугольные.

Размер диафрагмы зависит от конструктивных особенностей оптической системы и дополнительных требований, например допустимого предела падения освещенности или разрешающей способности на краях поля фотографической системы.

Поле зрения телескопических систем и фотообъективов характеризуется в угловой мере, а луп и микроскопов — в линейной.

Измерение угла поля зрения зрительной трубы. Под углом поля зрения зрительной трубы понимают угол, под которым из центра входного зрачка виден диаметр полевой диафрагмы, помещенной в фокальной плоскости объектива:

$$2 \operatorname{tg} \omega = l' / f'_1,$$

где l' — диаметр полевой диафрагмы; f'_1 — фокусное расстояние объектива; 2ω — угол поля зрения.

В полевых условиях, когда из трубы нельзя удалить объектив или окуляр, поле зрения определяют с помощью нивелирной рейки,

установленной нормально к визирной оси на расстоянии L (не ближе тридцати фокусных расстояний объектива). Расстояние L от рейки до объектива измеряют рулеткой.

Угол поля зрения

$$2 \operatorname{tg} \omega = y/L,$$

где y — отрезок рейки, изображение которого укладывается в диаметре полевой диафрагмы.

Величина отрезка рейки $y = mt$, где m — число делений рейки; t — цена деления.

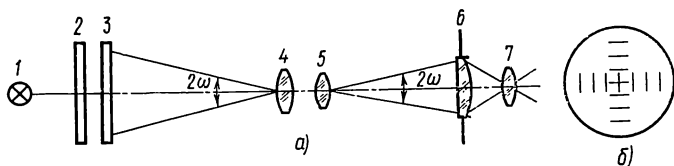


Рис. 97. Оптическая схема измерения поля зрения с помощью широкоугольного коллиматора

Аналогично можно измерить окулярное поле зрения зрительной трубы, устанавливая рейку за окуляром на небольшом расстоянии l от выходного зрачка. Затем рассматривают изображение рейки через объектив трубы и подсчитывают число делений m , укладывающихся в диаметре полевой диафрагмы на отрезке рейки y' . Угол видимого поля зрения

$$2 \operatorname{tg} \omega' = y'/l.$$

Угол поля зрения трубы теодолита или гониометра может быть измерен как в полевых, так и в лабораторных условиях путем наведения правым и левым краями диафрагмы поля зрения на удаленные предметы и фиксации по лимбу соответствующих отсчетов. Разность отсчетов составит угол поля зрения 2ω .

Угол поля зрения в лабораторных условиях удобно измерять с помощью широкоугольного коллиматора, который одновременно можно использовать и для определения поля зрения фотообъективов.

Широкоугольный коллиматор, схема которого приведена на рис. 97, а, состоит из объектива 4 и шкалы 3 с делениями в двух взаимно перпендикулярных направлениях, расположенной в фокальной плоскости объектива. Перед шкалой установлено матовое стекло 2, позволяющее равномерно освещать шкалу от источника 1.

Контролируемую зрительную трубу 5—7 устанавливают объективом как можно ближе к объективу коллиматора и фокусируют на резкое видение штрихов шкалы, трубу горизонтируют по отношению к центру шкалы так, чтобы перекрестие сетки 6 окуляра совпало с центром поля зрения (рис. 97, б). Угол поля зрения тру-

бы $2\omega = m\alpha'$, где m — число делений шкалы, видимых в горизонтальном или вертикальном направлениях поля; α' — цена деления.

Если цена деления a известна в линейной мере, то перевод в угловую меру производят по формуле

$$\alpha' = 3438 a / f'_k,$$

где f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора, мм.

При наличии в лаборатории гониометра угол поля зрения трубы можно измерить с высокой точностью, наблюдая через объектив контролируемой трубы размер диафрагмы поля зрения. Входной зрачок объектива устанавливают над вертикальной осью вращения лимба, а зрительную трубу гониометра визируют на правый и левый края диафрагмы, беря каждый раз отсчет по лимбу. Разность отсчетов составит искомый угол поля зрения.

Измерение поля зрения лупы и микроскопа. Поле зрения лупы, как и любой оптической системы, ограничено диафрагмой поля зрения. Угол, под которым виден диаметр полевой диафрагмы из центра входного зрачка (таким зрачком для лупы является изображение зрачка глаза наблюдателя), характеризует величину поля зрения лупы. При наблюдении в лупу глаз может занимать различные положения, поэтому угол зрения лупы меняется. Так, с приближением глаза к лупе поле зрения увеличивается, а с удалением — уменьшается. Оптимальное положение глаза достигается в том случае, когда глаз расположен на расстоянии наилучшего зрения от мнимого изображения предмета.

Поле зрения лупы определяется в угловой или линейной мере. В линейной мере — это диаметр круга, видимый через лупу при неподвижном положении глаза. При вращении глаза или покачивании головы поле зрения увеличивается.

В угловой мере поле зрения определяется отношением диаметра оправы лупы D к расстоянию s от глаза до лупы, т. е.

$$2 \operatorname{tg} \omega = D/s.$$

Если глаз поместить в заднем фокусе лупы, то

$$2 \operatorname{tg} \omega = D/f',$$

где f' — фокусное расстояние лупы.

При определении поля зрения в линейной мере, как и при определении увеличения, рассматривают неподвижным глазом через лупу шкалу с миллиметровыми делениями; поле зрения

$$l = m\tau,$$

где m — число делений шкалы, видимых по диаметру поля; τ — цена деления шкалы, мм.

Поле зрения микроскопа определяют в линейной мере. Чем больше увеличение микроскопа, тем меньше поле зрения и тем труднее установить предмет в поле зрения и сфокусировать на него микроскоп. Поэтому при работе с микроскопом большого увели-

чения рекомендуется предварительно производить установку с объективом или окуляром малого увеличения, а затем заменить их на объектив или окуляр необходимого увеличения.

В микроскопе диафрагма поля зрения устанавливается в фокальной плоскости окуляра. Ее изображение объективом (входное окно) располагается в предметной плоскости, а выходное окно, изображаемое окуляром в пространстве изображения, находится в бесконечности. Если глаз рассматривает мнимое изображение предмета на расстоянии наилучшего зрения, то выходное окно совпадает с этим изображением.

Различают следующие поля зрения микроскопа: линейное в предметной плоскости; окулярное — в фокальной плоскости окуляра и поле зрения в пространстве изображения, образуемое при проектировании изображения на экран (матовое стекло или на фотопластинку), что имеет место, например, в металлографических микроскопах. Каждое поле зрения определяется в линейной мере.

Поле зрения в предметной плоскости определяется фокусировкой микроскопа и рассмотрением через него штрихов объект-микрометра или стеклянной шкалы, помещаемых на предметный столик, и простого подсчета делений, которые укладываются по диаметру видимого круга. Подсчитав число делений m и зная цену деления объект-микрометра, равную 0,01 мм (для стеклянной шкалы 0,1 мм), определяют линейное поле зрения l .

Окулярное поле зрения $L_{ок}$ отличается от поля зрения в предметной плоскости только размером, оно всегда больше в β раз, где β — линейное увеличение микрообъектива. Поле зрения измеряют в фокальной плоскости окуляра с помощью винтового окуляр-микрометра, цену деления τ барабана которого находят по формуле

$$l_{ок} = m\tau,$$

где m — отсчет по шкале и барабану винтового окуляр-микрометра.

Увеличение объектива микроскопа

$$\beta = l_{ок}/l.$$

Поле зрения микроскопа в пространстве изображения, рассматриваемое на экране, определяется измерением линейкой диаметра круга или диагонали изображения (в случае ограничения экрана прямоугольной рамкой).

Поле зрения микроскопа можно определить и в угловой мере, для этого следует значения y' и s' , полученные при измерении увеличения микроскопа рисовальным прибором, подставить в формулу

$$2 \operatorname{tg} \omega = y'/s',$$

где y' — величина изображения по полю, спроектированного на экран; s' — расстояние от экрана до глаза наблюдателя.

Измерение угла поля зрения фотографического объектива. Поле зрения фотографических объективов (аэросъемочных, киносьемочных, любительских и др.) характеризуется диаметром круга

достаточно высокого качества изображения, которое определяется допустимой величиной падения освещенности и разрешающей способностью. Падение освещенности допускается до 50% и больше, а разрешающей способности — до 10—20 лин/мм.

Освещенность и разрешающая способность в центре и на краю поля для некоторых киносъемочных объективов приведены в табл. 19.

Таблица 19

Марка объектива	f' , мм	D/f'	Угол поля изображения $2\omega'$, град	Освещенность на краю поля, %	Разрешающая способность, лин/мм	
					в центре	на краю поля
ОКС1-12-1	12	1:2,5	97	38	64	8
ОКС1-18-1	18	1:2,8	74	20	64	27
ОКС1-35-1	35	1:2	42,5	50	52	35
ОКС1-50-1	50	1:2	30,5	40	59	38
ОКС1-100-1	100	1:2	15,5	69	54	35
ОКС1-200-1	200	1:2,8	7,7	80	46	30
ОКС1-300-1	300	1:3,5	5,2	90	33	28
ОКС2-1000-1	1000	1:6,3	1,5	97	26	12

Изменения освещенности по полю измерены фотометрическим способом, а разрешающая способность (см. табл. 19) получена путем фотографирования штриховых миш на фотопленку.

Для объективов, установленных в фотоаппаратах, допустимое поле ограничивается прямоугольными прикладными или кассетными рамками, расположенными в фокальной плоскости.

Угол поля зрения (изображения)

$$2 \operatorname{tg} \omega = l' / f',$$

где l' — размер диагонали рамки; f' — фокусное расстояние объектива. Диагональ рамки измеряют миллиметровой линейкой, f' должно быть известно.

Измерение угла поля зрения с помощью широкоугольного коллиматора подобно определению поля зрения зрительной трубы.

§ 29. Измерение виньетирования фотографического объектива

Ограничение наклонных пучков лучей света оправами линз и диафрагмами оптической системы вызывает постепенное затенение или так называемое геометрическое виньетирование по полю от центра к краю. Отношение площади сечения наклонного пучка лучей, измеренной в плоскости, перпендикулярной оптической оси, к площади сечения осевого пучка называется коэффициентом геометрического виньетирования [58, 66].

В фотографических объективах с большими углами поля зрения виньетирование достигает значительной величины, что приводит

к падению освещенности на краях изображения и заметной недодержке при экспонировании снимка. Практически для фотографических объективов виньетирование допускается до 50%. Проф. М. М. Русинов показал, что в реальных оптических системах с полями зрения конечных размеров коэффициент геометрического виньетирования может быть больше единицы, что приводит к выравниванию освещенности по полю изображения [6].

Изменение величины площади изображения отверстий диафрагм в зависимости от угла поля зрения Русинов назвал абберационным виньетированием и использовал его при создании сверхширокоугольных объективов типа «Руссар» для увеличения светопропускания к краям изображения.

Виньетирование измеряют с помощью оптической скамьи, снабженной поворотным рычагом. При этом испытуемый объектив удерживают задней узловой точкой над осью вращения поворотного рычага, а в переднем фокусе объектива помещают диафрагму с круглым отверстием или щель, освещенную от лампы через конденсор. Вращают поворотный рычаг вместе с объективом в обе стороны от осевого положения через каждые 5 или 10° до полного затемнения на краях поля зрения. При каждом положении объектива на лист фотобумаги, помещенный за объективом, экспонируют освещенную фигуру, имеющую форму эллипса. На снимках площади эллипсов различны.

Если вращают только объектив вокруг узловой точки, а поворотный рычаг, экран и источник света неподвижны, то для получения действительных размеров площадей эллипсов необходимо при вращении объектива удерживать отверстие диафрагмы в фокусе, удаляя ее каждый раз на величину

$$\Delta f' = f'(1/\cos \omega - 1).$$

Если экран (лист фотобумаги) остается перпендикулярным падающим пучкам лучей, то измеренные значения площади фигур следует разделить на косинус угла поворота объектива.

Центральный снимок, соответствующий осевому положению объектива, представляет собой круг, диаметр которого равен диаметру выходного зрачка объектива. Остальные снимки фигур вследствие виньетирования имеют эллиптическую форму с постепенным уменьшением площади до полного исчезновения.

Площади фигур снимков измеряют одним из известных способов: планиметром, подсчетом числа квадратов сетки, укладываемых на фигуру, или взвешиванием каждой вырезанной фигуры на аналитических весах.

При осевом положении принимают площадь (или массу) круга выходного зрачка P_0 равной единице, а остальные площади P_ω берут в отношении к осевой площади по формуле (79), выражая их в долях единицы или в процентах:

$$K_\omega = P_\omega / P_0, \quad (79)$$

где K_ω — коэффициент виньетирования.

В табл. 20 приведены значения коэффициентов виньетирования для трех объективов.

Т а б л и ц а 20

„Телемар-7*“ ($f'=1000$ мм, $D/f'=1:6,3$)			„Индустар*“ ($f'=105$ мм, $D/f'=1:4,5$)			„Руссар-29*“ ($f'=70$ мм, $D/f'=1:6,8$)		
ω , град	K_ω	K_ω , %	ω , град	K_ω	K_ω , %	ω , град	K_ω	K_ω , %
0	1,0	100	0	1,0	100	0	1,0	100
2,5	0,955	96	5	0,949	94,9	6	1,062	106
5,0	0,890	89	11	0,853	85,3	12	1,105	110
7,5	0,775	77,5	16	0,830	83	18	1,239	124
10,0	0,640	64	21	0,800	80	24	1,390	139
12,5	0,410	41	25,5	0,760	76	30	1,652	165
			30	0,639	64	36	2,03	203
			33	0,635	63,5	42	2,816	282
			37	0,517	51,7	48	3,555	356
						54	5,265	526

По значениям K_ω и углам ω поворота объектива строят графики виньетирования.

§ 30. Измерение распределения освещенности в плоскости изображения

Падение освещенности в плоскости изображения от центра к краям происходит не только вследствие ограничения наклонных пучков лучей оправками линз и диафрагмами (виньетирования), но и из-за различия углов падения лучей на преломляющие поверхности линз и поглощения в массе стекла.

Для безабберационного объектива освещенность при удалении от центра поля уменьшается согласно закону Ламберта:

$$E = E_0 \cos^4 \omega',$$

где E — освещенность изображения для угла поля ω' ; E_0 — освещенность в центре поля; ω' — угол поля изображения.

Учитывая коэффициент виньетирования K_ω , падение освещенности можно определить по формуле

$$E = E_0 K_\omega \cos^4 \omega'.$$

Использование абберационного виньетирования позволяет уменьшить падение освещенности, что особенно важно при больших углах поля изображения.

Распределение освещенности в плоскости изображения, образуемое широкоугольными объективами, рассчитанными проф. М. М. Русиновым, подчиняется закону косинуса третьей степени, а в объективе «Руссар-38» ($D/f' = 1:77$, $2\omega' = 148^\circ$) — косинусу второй степени:

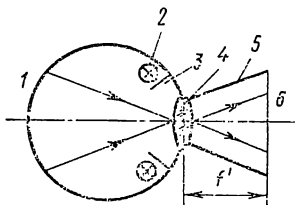
$$E = E_0 \cos^2 \omega'.$$

Освещенность в центре поля изображения при съемке предмета, расположенного в бесконечности (в случае аэрофотосъемки) или на большом удалении, определяется формулой

$$E_0 = \frac{\pi L \tau}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2,$$

где L — яркость предмета; τ — коэффициент светопропускания; D — диаметр входного зрачка; f' — фокусное расстояние объектива.

Рис. 98. Схема измерения распределения освещенности в плоскости изображения с помощью фотометрического шара и фотокамеры



При съемке предмета, находящегося на конечном расстоянии, освещенность в центре поля

$$E_0 = \frac{\pi L \tau}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \frac{\beta_a^2}{(\beta_a - \beta)^2}, \quad (80)$$

где β_a и β — соответственно линейное увеличение в зрачках объектива и в плоскости изображения.

При репродукционной съемке симметричным объективом в масштабе 1 : 1, когда предмет удален на двойное фокусное расстояние, следует использовать формулу

$$E_0 = \frac{\pi L \tau}{16} \left(\frac{D}{f'} \right)^2.$$

Распределение освещенности в плоскости изображения определяется по результатам измерений плотностей почернения снимка (фотографический метод) или освещенностей по полю изображения (фотоэлектрический метод). В том и другом случае необходимо наблюдать равномерно освещенный экран. Наиболее рациональным источником освещения является фотометрический шар или полусфера, внутренние стенки которых покрыты белой матовой краской и освещены лампами накаливания от сети стабилизированного тока.

При использовании фотометрического шара 1 (рис. 98) испытуемый объектив 4 с фотокамерой 5 устанавливают в отверстие шара, освещенного электролампами 2, которые расположены по кругу и экранированы щитками 3.

После экспонирования и обработки снимка 6 приступают к измерению плотностей почернения на денситометре или фотометре через выбранные интервалы (например, 5—10 мм) в направлении по диагонали снимка. Величину плотности почернения в центре снимка принимают за единицу, а по полю берут средние арифме-

тические значения симметричных измерений и приводят их в отношение к единице, определяя тем самым приведенную плотность. График, построенный по приведенной плотности, характеризует распределение освещенности в плоскости изображения.

В табл. 21 приведены значения плотности почернения D и приведенной плотности почернения D_n для объективов «Индустар» и «Руссар-29». У первого объектива падение освещенности подчиняется закону $\cos^4 \omega'$, а у второго — закону $\cos^3 \omega'$.

Т а б л и ц а 21

„Индустар“ ($f' = 105$ мм, $D/f' = 1:4,5$)				„Руссар-29“ ($f' = 70$ мм, $D/f' = 1:6,85$)			
ω' , град	D	D_n	$\cos^4 \omega'$	ω' , град	D	D_n	$\cos^3 \omega'$
0	0,817	1,000	1,000	0	2,49	1,0	1,0
5	0,802	0,982	0,982	6	2,49	1,0	0,98
11	0,769	0,941	0,929	12	2,48	1,0	0,94
16	0,761	0,931	0,885	18	2,47	0,99	0,86
21	0,726	0,889	0,783	24	2,42	0,96	0,76
25	0,654	0,801	0,664	30	2,30	0,92	0,65
30	0,605	0,741	0,568	36	1,98	0,80	0,52
34	0,526	0,644	0,479	42	1,85	0,74	0,41
37	0,471	0,577	0,400	48	1,50	0,60	0,30
				54	1,02	0,40	0,20

Определение распределения освещенности в плоскости изображения фотоэлектрическим методом более производительно, но менее точно по сравнению с фотографическим методом. Погрешность измерения фотоэлектрическим методом 5%, при этом применяется селеновый фотоэлемент, диафрагмированный до размера отверстия 2—3 мм, и чувствительный гальванометр.

В плоскости изображения фотокамеры 5 прижимается металлическая пластинка с отверстиями диаметрами 2—3 мм, нанесенными по диагонали рамки через данные интервалы. Фотоэлемент перемещают по отверстиям диагонали и отмечают соответствующие отсчеты по гальванометру.

Средние арифметические значения симметричных положений и отсчетов по гальванометру характеризуют распределение освещенности по полю. Как и при фотографическом методе, отсчет, соответствующий центру поля, принимают за единицу (или 100%) и остальные берут в отношении к нему.

§ 31. Измерение коэффициента светопропускания оптических систем

Коэффициент светопропускания оптической системы

$$\tau = \Phi / \Phi_0,$$

где Φ — прошедший поток излучения; Φ_0 — упавший на систему поток излучения. Величина коэффициента τ зависит, в основном, от количества отражающих поверхностей и поглощения света в стекле.

Коэффициент светопропускания в большинстве случаев измеряется для осевого потока излучения. Для определения коэффициента пропускания фотографических и телескопических систем применяют (рис. 99) коллиматор 1—4, в фокальной плоскости объектива 4 которого установлена диафрагма 3 с круглым отверстием диаметром 1—2 мм. Эта диафрагма освещается от источника света 1 (электролампы) через конденсор 2. За объективом коллиматора расположена ирисовая диафрагма 5, диаметр отверстия которой на 2—3 мм меньше диаметра свободного отверстия испытуемой си-

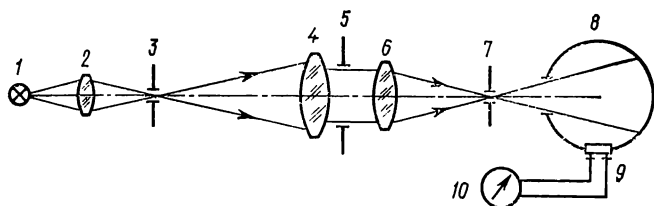


Рис. 99. Схема определения коэффициента светопропускания фотографических и телескопических систем

стемы 6. В качестве приемного устройства служит фотометрический шар 8 диаметром 200—300 мм с селеновым фотоэлементом 9 и зеркальным гальванометром 10. Для ограничения постороннего света в фокальной плоскости испытуемого объектива 6 помещена диафрагма 7, диаметр отверстия которой больше диаметра изображения отверстия диафрагмы 3. При измерении световых потоков необходимо следить, чтобы диаметры сечений световых пучков, падающих на отверстие фотометрического шара, были одинаковы, когда испытуемый объектив находится в схеме установки и без него. Измерения ведут в темном помещении. Вначале измеряют несколько раз световой поток Φ , прошедший через испытуемый объектив, фиксируя каждый раз отсчет A_1 по гальванометру. Затем измеряют световой поток Φ_0 без испытуемого объектива и диафрагмы 7, фиксируя соответствующие отсчеты A_2 .

Отношение средних арифметических значений нескольких отсчетов A_1 и A_2 и есть коэффициент светопропускания:

$$\tau = A_1/A_2.$$

Точность измерения τ составляет 5%.

Для фотографических объективов также важно знать спектральный коэффициент пропускания τ_λ главным образом для тех участков спектра, на которые рассчитаны объективы.

Схема установки для измерения спектрального коэффициента пропускания приведена на рис. 100. В качестве источника монохроматического излучения используют монохроматор 2—5, например УМ-2, и приемное устройство — селеновый или цезиевый фотоэлемент 10. Входная и выходная щели монохроматора заменяются

диафрагмами 3 и 7 с круглыми отверстиями. Диафрагма 7 служит для устранения рассеянного света, возникающего при прохождении объективов 4, 6 и диспергирующей призмы 5. Испытуемый объектив 8 устанавливают между выходным отверстием и диафрагмой 9 приемного устройства на таком расстоянии от выходного отверстия, чтобы можно было подобрать два одинаковых сечения световых пучков — до объектива и после него, направляемых на фотоэлемент. Диафрагма 9 ограничивает рассеянный свет, возникающий в испытуемом объективе. После установки заданной длины волны на монохроматоре фиксируют отсчет B_1 по гальванометру 11, затем фотоэлемент переносят во второе положение (10') (соответствующее измерению потока без объектива), сохраняя тот же диаметр сечения светового пучка, падающего на фотоэлемент, и берут отсчет B_2 . Из нескольких измерений и соответствующих отсчетов по гальванометру находят средние арифметические значения B_1 и B_2 . Отношение B_1 к B_2 и есть искомый коэффициент τ_λ для заданной длины волны:

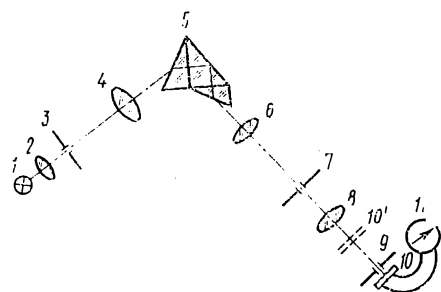


Рис. 100. Схема установки для измерения спектрального коэффициента пропускания фотографических объективов

находят средние арифметические значения B_1 и B_2 . Отношение B_1 к B_2 и есть искомый коэффициент τ_λ для заданной длины волны:

$$\tau_\lambda = B_1/B_2 = \Phi_\lambda/\Phi_{0\lambda}.$$

Подобные измерения выполняют и для других длин волн. По полученным значениям τ_λ строят график спектрального пропускания объектива, откладывая по оси абсцисс длины волн, а по оси ординат значения τ_λ .

Коэффициент светопропускания τ телескопической системы зрительной трубы теодолита, нивелира или бинокля определяют аналогично (см. рис. 99). Важно, чтобы диаметр светового пучка, падающего на отверстие фотометрического шара 8, после установки зрительной трубы между ирисовой диафрагмой 5 и приемным устройством 8—10 оставался примерно таким же, как и без трубы.

§ 32. Измерение коэффициента светорассеяния оптических систем

При прохождении через оптическую систему полезного светового потока, строящего изображение предмета, вместе с ним попадает и часть рассеянного (паразитного) потока, который образуется в результате многократных отражений от преломляющих оптических поверхностей, отражения от внутренних стенок оправ прибора, из-за недостаточной чистоты оптических поверхностей, царапин, налетов, загрязнений и дефектов в стекле (свилей, пузырей и т. п.).

Рассеянный свет, накладываясь на плоскость изображения в

виде дополнительного фона, снижает контраст и качество изображения. Особенно вредно влияние рассеянного света при наблюдении или фотографировании малоконтрастных предметов.

Отношение потока излучения Φ_σ , рассеянного оптической системой, к потоку излучения Φ_0 , упавшему на нее, называется коэффициентом рассеяния σ :

$$\sigma = \Phi_\sigma / \Phi_0.$$

Коэффициент светорассеяния оптических систем определяется фотоэлектрическим методом с помощью фотометрического шара 2 с коллиматорным объективом 5 (шарового коллиматора), фокусное расстояние которого равно диаметру шара, и приемного устройства, состоящего из селенового фотоэлемента 10 и чувствительного гальванометра 11 (рис. 101). Диаметрально противоположно объективу коллиматора в стенке шара имеется отверстие диаметром 20 мм, в которое вставляют сменные пробки: с той же белой окраской, что и внутренние стенки шара (светлая пробка), и «черное тело» — пустотелая камера 1, оклеенная внутри черным бархатом. Внутренние стенки шара освещаются электролампами 3, питающимися от сети постоянного напряжения. От прямого попадания лучей света на испытуемую систему или объектив коллиматора лампы экранированы щитками 4.

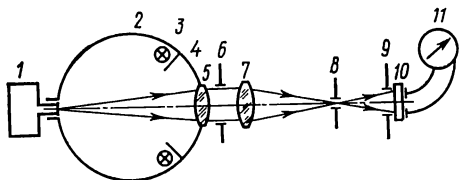


Рис. 101. Схема измерения коэффициента светорассеяния оптических систем фотоэлектрическим методом

Испытуемую систему, в нашем случае фотообъектив 7, устанавливают близко к объективу коллиматора, за которым располагается диафрагма 6, диаметр которой меньше свободного отверстия испытуемого объектива. В фокальной плоскости испытуемого объектива, где образуется изображение «черного тела», ставят диафрагму 8, ограничивающую посторонний свет и полностью пропускающую пучок лучей, от изображения «черного тела». Падающий на фотоэлемент 10 пучок лучей диафрагмируют ирисовой диафрагмой 9 до диаметра, меньшего диаметра фотоэлемента на 15—20%.

Первый отсчет A_1 , соответствующий величине рассеянного потока Φ_σ , берут по гальванометру при установке в фотометрическом шаре «черного тела», второй отсчет — A_2 , когда в отверстие шара вместо «черного тела» вставлена светлая пробка.

Коэффициент светорассеяния $\sigma = A_1/A_2$. Значения A_1 и A_2 получают как средние арифметические нескольких измерений и отсчетов по шкале гальванометра. Точность измерения 5%.

§ 33. Измерение децентрировки линз

Под децентрировкой линзы понимают несовпадение геометрической оси линзы с оптической осью. Геометрической осью является ось симметрии боковой поверхности линзы, а оптической — прямая,

соединяющая центры кривизны сферических поверхностей. Оптическая ось может быть смещена параллельно геометрической или быть наклонена к последней, что наиболее часто встречается на практике. Наклон осей вызывает разнотолщинность линзы по краям или так называемую косину линзы.

Величину децентрировки выражают в линейной или угловой мере. Строгое соблюдение расчетных допусков — важная технологическая задача при изготовлении оптических систем. Ошибки центрировки как отдельных линз, так и оптической системы в целом, состоящей из нескольких линз, снижают качество изображения.

Косина линзы образует клиновидность с углом

$$\theta \approx C_0/[f'(n-1)], \quad (81)$$

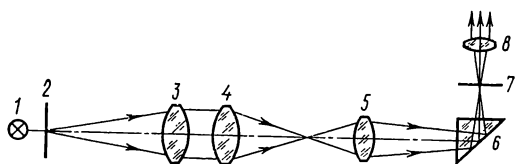


Рис. 102. Оптическая схема измерения величины децентрировки линз коллимационным методом

где C_0 — смещение главной точки линзы относительно геометрической оси; f' — фокусное расстояние линзы; n — показатель преломления стекла.

Для контроля децентрировки линз применяют оптические и механические

методы. Оптические методы осуществляются с помощью коллиматоров (коллимационный метод) и автоколлимационных приборов (автоколлимационный метод).

Механический или контактный метод применяют для контроля децентрировки линз большого диаметра (свыше 150—200 мм) при помощи косиномера [62]. Угол клиновидности определяется:

$$\theta = \Delta t/D,$$

где Δt — разность толщин; D — диаметр линзы.

При коллимационном методе в проходящем свете измеряют смещение главной точки между геометрической и оптической осями в задней главной плоскости, при автоколлимационном методе в отраженном свете измеряют смещение центров кривизны поверхностей с геометрической осью.

Коллимационный метод с использованием проходящего света применяют при склеивании и контроле децентрировки линз диаметром 70—150 мм.

Контролируемую линзу 4 (рис. 102) помещают в базовое кольцо, геометрическая ось которого совпадает с оптической осью коллиматора 1—3. В фокальной плоскости линзы формируется изображение перекрестия сетки 2, освещенное лампой 1, рассматриваемое через микроскоп 5—8 на сетке 7. Если линза децентрирована, т. е. главная точка не совпадает с геометрической осью, то при вращении линзы на 360° изображение перекрестия опишет круг диаметром d . Диаметр круга измеряют по сетке микроскопа.

Значение децентрировки

$$C_0 = d/2 = mt/(2\beta),$$

где m — число делений сетки микроскопа; t — цена деления сетки; β — увеличение объектива микроскопа. Подставляя значение C_0 в формулу (81), вычисляют клиновидность линзы.

Применение длиннофокусного микроскопа с дополнительным подвижным объективом позволяет контролировать децентрировку как положительных, так и отрицательных линз. В этом случае децентрировка

$$C_0 = d f'_d / (2 f'_m),$$

где f'_d и f'_m — соответственно фокусное расстояние дополнительного объектива и объектива микроскопа.

Автоколлимационный метод дает возможность с помощью автоколлимационной трубки проверить децентрировку каждой поверхности линзы в отраженном свете и получить точность измерения примерно в 2 раза выше, чем в случае применения коллимационного метода. При вращении линзы в базовом кольце на 360° автоколлимационное изображение перекрестия опишет круг диаметром d_A ; децентрировка $C_0 = d_A/4$.

Автоколлимационная трубка А. А. Забелина, широко используемая для контроля децентрировки линз в процессе их изготовления и склейки, может быть успешно применена и для контроля линз после снятия их со станка. При этом трубку следует установить на штативе прибора, контролируемую линзу положить на базовое кольцо и сцентрировать, перемещая призму.

Оптическая схема автоколлимационной трубки приведена на рис. 103. Пучок лучей идет от источника 7 через конденсор 6, отражается от зеркала 5 и освещает перекрестие на зеркальном слое кубика 4. Объективами 8 и 9 перекрестие проектируется в центр кривизны поверхности контролируемой линзы 10. Для совмещения предметной плоскости трубки 1—9 с центром кривизны поверхности линзы требуется переместить дополнительный объектив 9 или всю трубку на штативе. Автоколлимационное изображение перекрестия наблюдается с помощью микроскопа 1—3 небольшого увеличения. Вращая линзу в базовом кольце, определяют диаметр

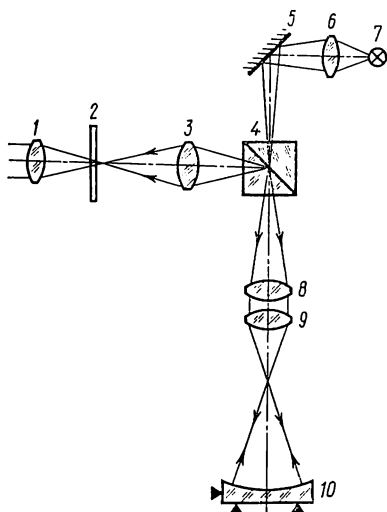


Рис. 103. Оптическая схема определения децентрировки линз автоколлимационным методом

круга «биения» автоколлимационного изображения d_A по сетке 2:

$$C_0 = d_A / 4 = mt / (4\beta),$$

где m — число делений сетки; t — цена деления; β — увеличение оптической системы 1—9.

Для контроля линз с малыми радиусами кривизны к прибору прилагается набор дополнительных объективов.

Проверка центрировки при склеивании двух линз производится обычно в проходящем свете на коллимационной установке. Требуется обеспечить высокую точность центрировки первой линзы, помещенной в базовое кольцо. Вторую (верхнюю) линзу, диаметр которой меньше первой, сдвигают по первой и, вращая их вместе в базовом кольце, добиваются неподвижного положения изображения перекрестия коллиматора или оставляют «биение» в пределах допуска.

Если при изготовлении линз точность центрировки на станке сохраняется в пределах 0,01—0,05 мм, то при последующем закреплении в оправы и сборке объективов возникают дополнительные погрешности из-за зазоров в оправках и смещений в общей оправе.

Для проверки качества центрировки объективов рассматривают дифракционную точку в фокальной плоскости контролируемого объектива. Дифракционная точка образована от «точечной» диафрагмы с диаметром отверстия 0,02—0,03 мм, расположенной в фокусе объектива коллиматора.

Схема установки для проверки центрировки подобна схеме, используемой при измерении фокусного расстояния объективов методом увеличения (см. рис. 89). Рассматривают дифракционное изображение точки также с помощью микроскоп-микрометра. При правильной центровке центральное дифракционное пятно яркое, окруженное двумя-тремя кольцами убывающей яркости. Деформация центрального пятна и боковых колец покажет наличие децентрировки.

Глава VI. Измерение аберраций оптических систем

Погрешности изображения, вызванные различиями в условиях преломления лучей у краев оптической системы и в центральной зоне ее, называются аберрациями. Вместе с неизбежными недостатками изготовления системы аберрации снижают качество изображения.

Различают аберрации хроматические и монохроматические. К хроматическим аберрациям относят хроматизм положения (продольная хроматическая аберрация) и хроматизм увеличения. К монохроматическим аберрациям относят сферическую аберрацию, кому, астигматизм (астигматическую разность), кривизну изображения и дисторсию. Кроме того, все аберрации делят на осевые и полевые. Осевые аберрации (хроматизм положения и сферическая аберрация) характеризуют положение точек изображения на оптической оси, полевые аберрации (хроматизм увеличения, кома, астигматизм, кривизна изображения и дисторсия) характеризуют качество изображения точек, расположенных вне оси.

Измерение аберраций — обязательный этап исследования оптической системы, изготовленной впервые. Разработчикам важно знать, насколько точно оптическая система соответствует расчетам, какие имеются отклонения и возможности дальнейшего их устранения. Аберрации могут быть измерены для оптических систем, характеристики которых не известны, или когда требуется более полно оценить качество изображения серийно выпускаемой системы, взятой в этом случае выборочно.

В зависимости от назначения оптической системы измеряют следующие аберрации: угловые (предпочтительно для зрительных труб и прожекторных зеркал), поперечные или продольные (для фотообъективов), волновые (для астрономической и микроскопической оптики, спектральных призм и др.).

Все существующие методы измерения аберраций можно разделить на две основные группы: методы измерения геометрических аберраций и методы измерения волновых аберраций [1, 19—21, 32, 36, 41, 45, 52, 53, 59, 65].

Интерференционный и теневой методы позволяют оценить качество оптической системы по всему отверстию, другие методы дают возможность исследовать систему по выбранным диаметральному сечениям или точкам отверстия.

Выбор метода для испытания оптической системы зависит от имеющегося оборудования и требуемой точности измерения аберраций. При применении первой группы методов наблюдают изменение положения точки изображения, при использовании методов, относящихся ко второй группе, — отклонение действительной волновой поверхности от идеальной сферической.

Методы измерения волновых аберраций по сравнению с методами измерения геометрических аберраций позволяют получить более точные результаты, однако для них требуется более сложная аппаратура и специальные условия работы.

Особые трудности возникают при измерении аберраций и оценке качества изображения гидросъемочных оптических систем, предназначенных для работы в воде [58]. При прохождении пучка лучей через плоскую поверхность стеклянной пластинки из воды в воздух возникает хроматизм увеличения и дисторсия. Поэтому для испытания гидросъемочных объектов необходимо применить специальные коллиматоры, компенсирующие хроматизм увеличения и дисторсию.

Наиболее широкое применение на практике получили методы визуальных фокусировок и интерференционный метод, в отдельных случаях для исследования астрономической оптики применяют теневой метод Фуко и метод Гартмана.

§ 34. Измерения геометрических аберраций. Метод визуальных фокусировок

Метод визуальных фокусировок, предложенный акад. В. П. Линником, является наиболее простым и производительным, не требует сложных дополнительных приспособлений к оптическим скамьям и

обеспечивает необходимую точность измерения аберраций объективов.

Метод основан на опыте Юнга, позволяющем получить две системы интерференционных полос от двух пар отверстий или щелей, симметрично расположенных относительно оптической оси.

Из физической оптики [19, 37] известно, что вследствие дифракции света от двух щелей образуются интерференционные полосы, расстояние a между которыми, например между центральной (нулевой) и соседней, равно:

$$a \approx f'\lambda/d,$$

где f' — фокусное расстояние испытуемого объектива или объектива зрительной трубы оптической скамьи; λ — длина волны света; d — расстояние между двумя щелями.

Из формулы видно, что с уменьшением расстояния между щелями интервал между интерференционными полосами увеличивается.

Распределение освещенности в интерференционной картине, рассматриваемой в фокальной плоскости объектива, вычисляется по формуле

$$E = E_0 \frac{\sin^2(\pi p \varphi / \lambda)}{(\pi p \varphi / \lambda)^2} \cos^2(\pi d \varphi / \lambda),$$

где E_0 — освещенность на оптической оси, принимаемая обычно за единицу; p — ширина щели; φ — угол дифракции.

Измерения аберраций объективов в зависимости от конструкции оптической скамьи могут быть выполнены прямым и обратным способом визуальных фокусировок. При прямом способе наблюдений на оптических скамьях ОСК-2 или ОСК-3 фокусировки (совмещение двух систем интерференционных полос в одну) ведут с помощью перемещения тубуса микроскопа; при измерении поперечной сферической аберрации — с помощью окулярного винтового микрометра. При обратном способе наблюдений используют перемещение окулярного тубуса зрительной трубы или винтовой окулярный микрометр.

При обратных наблюдениях результаты измерений продольной сферической аберрации должны быть уменьшены на величину, равную квадрату отношения фокусных расстояний объективов трубы f'_T и испытуемого объектива f'_H : $(f'_T/f'_H)^2$.

Измерение полевых аберраций в наклонных пучках лучей способом прямых наблюдений на оптических скамьях ОСК-2 или ОСК-3 возможно только при вращении испытуемого объектива вокруг задней узловой точки, расположенной над осью вращения объективодержателя и смещении тубуса или всего микроскопа по направляющим скамьи на величину, равную разности фокусных расстояний Δf на оси и по полю, т. е.

$$\Delta f = f'(1/\cos \omega - 1),$$

где f' — фокусное расстояние испытуемого объектива; ω — угол поворота объектива вокруг узловой точки.

Измерение aberrаций фотографического объектива. Рассмотрим измерение aberrаций фотообъектива способом обратных наблюдений на оптической скамье Гартмана с фокусным расстоянием объектива зрительной трубы $f' = 909,7$ мм.

Вначале измерений необходимо выполнить следующие установки скамьи и испытуемого объектива.

1. Щель диафрагмы расположить на оптической оси объектива зрительной трубы, установленной на бесконечность и закрепленной на нуль-пункте сектора (рис. 104). Для этого на объектив трубы надевают диафрагму с небольшим круглым отверстием в центре.

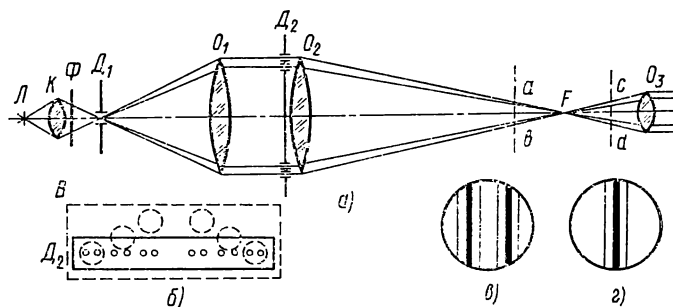


Рис. 104. Оптическая схема измерения сферической aberrации способом обратных наблюдений

Щелевую диафрагму D_1 освещают сильным источником света L . Наблюдая в трубу, передвигают диафрагму вправо и влево по малой линейке и устанавливают щель так, чтобы ее размытое изображение в виде светлой полосы было в середине поля зрения. После этого диафрагму закрепляют на линейке и отсчет по нониусу малой линейки записывают как нулевой отсчет.

2. Оптическую ось испытуемого объектива совместить или расположить параллельно оптической оси зрительной трубы. В рамку вставляют металлическую или деревянную пластинку с укрепленным на ней испытуемым объективом, обращенным первой поверхностью к объективу трубы. Наблюдая в окуляр трубы и вращая регулировочные винты рамки, добиваются такого положения испытуемого объектива, при котором яркая полоса света от щели снова будет в середине поля зрения трубы. При этом желательно, чтобы щель находилась приблизительно в фокусе испытуемого объектива (для этого передвигают ее по большой линейке). Совпадение осей можно проверить наблюдением совмещения в одну линию отраженных бликов от поверхностей линз объектива.

3. Переднюю узловую точку испытуемого объектива установить над вертикальной осью вращения зрительной трубы. Эта установка необходима при измерении aberrаций объектива в наклонных пучках лучей (комы, астигматизма и хроматизма увеличения). Перемещая рамку с испытуемым объективом O_1 по большой линейке,

устанавливают ее так, чтобы середина объектива O_1 была приблизительно над вертикальной осью вращения трубы. На объектив трубы вместо диафрагмы с отверстием в центре надевают зональную диафрагму D_2 , а щелевую диафрагму D_1 устанавливают в фокусе испытуемого объектива. Трубу поворачивают на некоторый угол, например $10-15^\circ$, в зависимости от величины угла поля зрения испытуемого объектива. Щелевую диафрагму с нулевого положения на малой линейке сдвигают в сторону вместе с источником света и направляют пучок лучей на щель параллельно оси зрительной трубы. Лучи света, проходящие через испытуемый объектив, спроецируются на зональной диафрагме в виде эллипса, который особенно хорошо наблюдать на листе белой бумаги, помещенном перед зональной диафрагмой. Устанавливают трубу в симметричное положение, повернув ее на тот же угол в другую сторону от нуля-пункта. Эллипс относительно центра зональной диафрагмы должен расположиться симметрично, а изображение щели (в виде светлой полосы) — в середине поля зрения трубы. В противном случае требуется переместить рамку с объективом по большой продольной линейке до получения описанного положения.

4. Щель диафрагмы поместить в фокусе испытуемого объектива. Зональную диафрагму с объектива трубы удаляют. Трубу и рамку со щелевой диафрагмой ставят на нуль-пункты. Перемещая муфту вместе с малой линейкой и щелевой диафрагмой вручную в осевом направлении по большой линейке, а после закрепления — более точно с помощью микрометричного винта, устанавливают щель диафрагмы в фокус испытуемого объектива, наблюдая резкое изображение щели. Затем на объектив трубы надевают зональную диафрагму и приступают к испытанию объектива.

На рис. 104, *а* приведена оптическая схема измерения сферической аберрации объектива способом обратных наблюдений. Диафрагма D_1 с раздвижной щелью, освещаемая электролампой L через конденсор K и светофильтр Φ , установлена вертикально в фокусе испытуемого объектива O_1 . Перед объективом зрительной трубы O_2 помещена зональная диафрагма D_2 с отверстиями, нанесенными по диаметру и по отношению щели расположенными перпендикулярно.

Продольную сферическую аберрацию измеряют обычно для зеленого светофильтра с длиной волны, для которой выполнен расчет объектива, по зонам, начиная с первой, расположенной вблизи оптической оси, и до крайней. Положение фокуса для первой зоны принимают приблизительно за гауссову плоскость, более точное положение ее определяют экстраполированием кривой аберрации до пересечения с осью. На каждой зоне выделяют две пары отверстий зональной диафрагмы с помощью дополнительной пластинки B (рис. 104, *б*) с отверстиями, распределенными по конусу. Наблюдая через окуляр O_3 , можно видеть две системы интерференционных полос до фокуса объектива трубы в плоскости ab или за фокусом в плоскости cd (рис. 104, *а*), с числом видимых полос в каждой системе три или пять (рис. 104, *в*). При фокусировке, перемещая окуляр-

ный тубус трубы, обе системы полос совмещают (рис. 104, з) и фиксируют отсчет по шкале и нониусу трубы с точностью до 0,1 мм. Должно быть не менее пяти совмещений (фокусировок) полос для каждой зоны и соответствующих им отсчетов. Количество зон, выделяемых при наблюдениях, может быть различно и зависит от диаметра свободного отверстия испытываемого объектива, от диаметра отверстий и расстояния между зонами. Чтобы построить график aberrации, нужно взять не менее трех-четырех зон.

Поперечную сферическую aberrацию измеряют при неподвижном положении окулярного тубуса трубы наведением перекрестия окулярного микрометра на середины двух интерференционных полос систем, образовавшихся при смене зон. Разность двух отсчетов по шкале и барабану винта, деленная пополам и на величину (f'_T/f'_H) , есть искомое значение поперечной сферической aberrации на зоне.

Продольную хроматическую aberrацию (хроматизм положения) измеряют на одной зоне, равной 0,7 радиуса свободного отверстия испытываемого объектива, используя сменные светофильтры. Чаще измеряют сферохроматические aberrации; как и при измерении продольной сферической aberrации, используют сменные светофильтры.

Пример записи и обработки измерений осевых сферохроматических aberrаций объектива «Индустар-13» ($f' = 300$ мм, $D : f' = 1 : 4,5$) приведен в табл. 22 и 23.

В табл. 23 приведены средние значения A , полученные для пяти отсчетов на каждой зоне (табл. 18), и по формуле

$$\Delta s' = A / (f'_T / f'_H)^2$$

вычислены aberrации $\Delta s'$, по которым можно построить графики. Однако удобнее получить aberrации $\Delta s'$, приведенные к гауссовой плоскости. В табл. 19 за гауссову плоскость принята первая зона $y = 4$ мм для зеленого светофильтра.

Графики сферохроматических aberrаций строят на миллиметровой бумаге, откладывая по оси абсцисс значения $\Delta s'$ или s' , а по оси ординат — зоны y в мм. Расстояние от перпендикуляра, восстановленного в нулевой зоне (начале) кривой, до любой ее точки (рис. 105, а) и есть продольная сферическая aberrация, а расстояние между кривыми для разных светофильтров — хроматическая разность сферических aberrаций. График хроматизма положения (вторичный спектр) построен для зоны $y = 20$ мм, соответствующей приблизительно 0,7 радиуса свободного отверстия объектива (рис. 105, б). По оси абсцисс отложены значения $\Delta s'$, по оси ординат λ в нм.

Если провести измерения сферических aberrаций по нескольким диаметральному сечениям объектива, то можно определить качество центрировки системы.

Для измерения астигматизма, кривизны изображения и комы поворачивают трубу на углы через каждые 5° в симметричные положения относительно осевого положения (нуль-пункта сектора).

№ при- емов	y зоны, мм						
	4	8	12	16	20	24	28

Отсчеты по нониусу (щель расположена вертикально)

Труба на нуль-пункте (60°), светофильтр красный, $\lambda = 640$ нм

1	344,5	343,9	339,8	334,5	329,5	325,5	326,1
2	345,6	344,1	340,5	334,0	328,5	325,8	326,1
3	344,9	343,5	340,4	334,1	329,4	325,0	325,8
4	345,0	343,7	339,9	334,4	329,0	325,4	326,0
5	344,7	344,0	340,1	334,5	328,6	325,5	325,9

Среднее значение отсчетов по нониусу

344,94	343,84	340,16	334,30	329,0	325,44	326,0
--------	--------	--------	--------	-------	--------	-------

Светофильтр зеленый, $\lambda = 540$ нм

1	343,5	341,5	334,1	331,1	327,1	323,1	324,1
2	344,8	340,8	334,5	330,8	327,5	323,5	325,0
3	343,3	341,1	334,7	330,5	327,0	323,4	324,9
4	345,1	341,0	334,0	331,2	326,9	323,3	324,8
5	344,6	340,9	334,2	331,0	327,3	323,5	324,5

Среднее значение по нониусу

344,26	341,06	334,30	330,92	327,16	323,36	324,66
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Светофильтр синий, $\lambda = 460$ нм

1	340,8	338,5	334,4	331,2	327,5	325,5	328,5
2	343,5	339,4	335,1	330,5	327,5	326,5	329,4
3	342,8	338,0	334,8	330,8	327,9	326,0	329,0
4	342,9	337,9	334,8	331,2	327,3	326,1	328,8
5	343,3	338,6	335,0	330,9	327,1	325,9	329,5

Среднее значение по нониусу

342,64	338,48	334,82	330,92	327,46	326,0	329,40
--------	--------	--------	--------	--------	-------	--------

Труба на нуль-пункте (60°), щель расположена вертикально

y, мм	Светофильтр зеленый, $\lambda = 540$ нм			Светофильтр красный, $\lambda = 640$ нм			Светофильтр синий, $\lambda = 460$ нм		
	A	s'	$\Delta s'$	A	s'	$\Delta s'$	A	s'	$\Delta s'$
4	344,26	37,87	0,00	344,94	37,94	+0,07	324,64	37,69	-0,18
8	341,06	37,52	-0,35	343,84	37,82	-0,05	338,48	37,28	-0,64
12	334,30	36,77	-1,10	340,16	37,42	-0,45	334,82	36,83	-1,04
16	330,92	36,40	-1,47	334,30	36,77	-1,10	330,92	36,40	-1,47
20	327,16	35,99	-1,88	329,00	36,19	-1,65	327,46	36,02	-1,85
24	323,36	35,57	-2,30	325,44	35,80	-2,07	326,00	35,86	-2,01
28	324,66	35,72	-2,16	325,98	35,86	-2,01	329,40	36,23	-1,63

Крайнее положение трубы ограничивается углом поля зрения испытываемого объектива.

Одновременно с перестановкой трубы перемещают по поперечной линейке щелевую диафрагму с источником света так, чтобы каждый раз изображение щели было в середине поля зрения и вертикально. Наблюдения ведут с одним светофильтром, например, с зеленым, по всем возможным зонам. Все наблюдения при вертикальном положении щели повторяют для щели в горизонтальном положении и зональной диафрагмы, повернутой на 90° .

Обработка результатов наблюдений, проведенных для наклонных пучков лучей, тождественна таковой для осевого положения трубы. Из двух симметричных положений трубы берут средние значения s' или $\Delta s'$ и строят по два графика aberrаций для вертикального и горизонтального сечения. По значениям $\Delta s'_0$, полученным экстраполированием каждой кривой до пересечения с осью для нулевой зоны, строят график астигматизма и кривизны изображения, откладывая по оси абсцисс $\Delta s'_0$ и по оси ординат углы ω . Расстояние от перпендикуляра, восстановленного в общем начале кривых при $\omega = 0^\circ$, до каждой кривой определяет кривизну изображения вертикального или горизонтального сечения, а расстояние между кривыми — величину астигматизма.

Кома для любого угла поля может быть измерена винтовым окулярным микрометром подобно измерению поперечной сферической aberrации.

Хроматизм увеличения или разность размеров изображений в фокальной плоскости объектива для различных цветов (длин волн света) измеряют в наклонных пучках лучей винтовым окулярным микрометром. Наличие хроматизма увеличения проявляется при смене светофильтров в виде смещения средней интерференционной полосы сфокусированных систем полос для выбранной зоны или смещения изображения щели при свободном или задиафрагмированном отверстии объектива без зональной диафрагмы на трубе; значение хроматизма определяют по формуле

$$\Delta l' = (A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}) / (f'_2 / f'_n)^2,$$

где A_{λ_1} и A_{λ_2} — соответственно отсчет по шкале и барабану

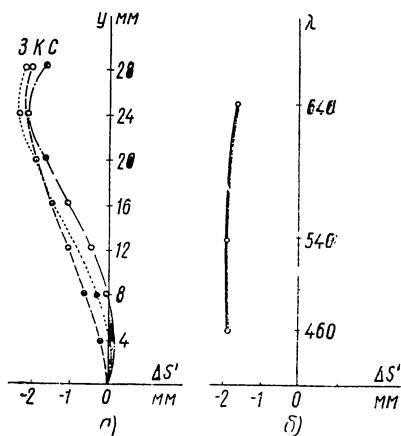


Рис. 105. Графики сферической и сферохроматической aberrаций:

а — графики сферохроматических aberrаций; б — вторичный спектр

микрометра при наведении на изображения щели для светофильтров с длинами волн λ_1 и λ_2 .

Точность измерения aberrаций объектива зависит от погрешностей совмещения интерференционных полос при фокусировке окулярным тубусом трубы и отсчета по его нониусу. Погрешность совмещения в поперечном направлении к оптической оси

$$\varepsilon = \Delta f_y (y/f'_y),$$

вдоль оси

$$\Delta f_y = \varepsilon f'_y / y,$$

где Δf_y — погрешность фокусировки на разных зонах y ; f'_y — зональное фокусное расстояние объектива зрительной трубы.

В табл. 24 приведены вычисленные для объектива «Индустар-13» средние квадратические погрешности фокусировки σ_f 10 наведений для каждой зоны и средние квадратические погрешности σ_P единицы веса, поскольку наведения при переходе от зоны к зоне неравноточны.

Таблица 24

№ зоны	y , мм	y^2	σ_f , мм	σ_f^2	P_y	$P_y \sigma_f^2$	σ_P , мм	s_f , мм
1	4	16	$\pm 0,957$	0,916	0,11	0,101	1,140	$\pm 0,06$
2	8	64	$\pm 0,503$	0,253	0,44	0,112	0,570	$\pm 0,03$
3	12	144	$\pm 0,297$	0,088	1,00	0,088	0,380	$\pm 0,02$
4	16	256	$\pm 0,249$	0,062	1,78	0,111	0,285	$\pm 0,014$
5	20	400	$\pm 0,249$	0,062	2,78	0,175	0,228	$\pm 0,011$
6	24	576	$\pm 0,204$	0,042	4,00	0,168	0,190	$\pm 0,009$
7	28	784	$\pm 0,186$	0,034	5,44	0,185	0,163	$\pm 0,008$

За единицу веса P_y принята погрешность фокусировки для зоны $y=20$ мм, соответствующая приблизительно 0,7 радиуса свободного отверстия объектива. Веса для остальных зон $P_y = y/400$.

Погрешность для зоны $y=20$ мм

$$\sigma_{P_{20}} = \sqrt{(\sum P_y \sigma_f^2) / (n - 1)},$$

где n — число наведений; погрешность для других зон

$$\sigma_P = \sigma_{P_{20}} 20/y.$$

Чтобы перейти к средней квадратической погрешности арифметической середины s_f , относящейся к испытываемому объективу, нужно погрешности σ_P разделить на выражение $\sqrt{n} (f'_r/f'_n)^2$. Результаты вычислений s_f приведены в последнем столбце табл. 24.

Измерение aberrаций зрительной трубы. В объективах телескопических систем особое внимание обращают на aberrации: сферическую, хроматическую и астигматизм на оси. Другие aberrации, например астигматизм, кривизна поля изображения и дисторсия,

не всегда имеют значение при малом поле изображения (не более $1-2^\circ$), поэтому их чаще всего не измеряют.

Значения aberrаций, полученные в результате измерений, вместе с основными оптическими постоянными позволяют оценить качество телескопической системы и ее соответствие техническому заданию.

Аберрации телескопической системы можно измерить геометрическими или волновыми методами. Следует выбирать метод, который наиболее доступен и не требует специального оборудования. Полученные значения aberrаций для осевых и внеосевых пучков лучей выражают в угловых или линейных величинах либо в диоптриях.

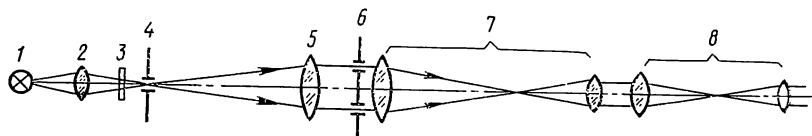


Рис. 106. Оптическая схема измерения осевых aberrаций зрительной трубы методом визуальных фокусировок

В случае идеальной телескопической системы, т. е. когда система не имеет aberrаций и центрирована, параллельный пучок лучей, направленный в объектив, выйдет из окуляра также параллельным. В противном случае из окуляра выйдет негомоцентрический пучок лучей; он будет сходящимся или расходящимся в зависимости от характера aberrаций.

Для измерения осевых aberrаций зрительной трубы используют метод визуальных фокусировок и схему установки, изображенную на рис. 106. В фокальной плоскости объектива 5 коллиматора 1—5 находится диафрагма 4 с раздвижной щелью, освещенная источником 1 через конденсор 2 и светофильтр 3. На пути параллельного пучка лучей, идущего из объектива коллиматора и падающего на объектив испытуемой телескопической системы 7, помещают зональную диафрагму 6 с парными щелевыми отверстиями, служащими для образования интерференционных полос. Наиболее выгодно использовать диафрагму с шириной щелей 1 мм и длиной 10—15 мм.

Пучок лучей, вышедший из окуляра испытуемой системы, поступает далее в объектив вспомогательной зрительной трубки 8, установленной на бесконечность, которая служит для измерения aberrаций. Чтобы избежать больших ошибок в измерениях, фокусное расстояние объектива вспомогательной трубки выбирают не менее фокусного расстояния объектива испытуемой телескопической системы.

При необходимости измерения внеосевых aberrаций (астигматизма, кривизны изображения, комы и др.) данную схему установки следует дополнить двумя поворотными секторами с градусными делениями. Один из секторов предназначен для установки трубы кол-

лиматора на выбранный угол, а другой — для установки вспомогательной зрительной трубки на тот же угол. При этом испытываемую систему устанавливают входным зрачком над осью вращения коллиматора, а выходным — над осью вращения вспомогательной трубки.

Чтобы лучше уяснить схему и метод измерения aberrаций, предположим, что из окуляра испытываемой системы 7 в объектив O_T вспомогательной трубки 8 поступает луч s с угловой aberrацией α (рис. 107). После прохождения объектива трубки O_T этот луч пересечет оптическую ось OO' в точке F на расстоянии Δf за главным

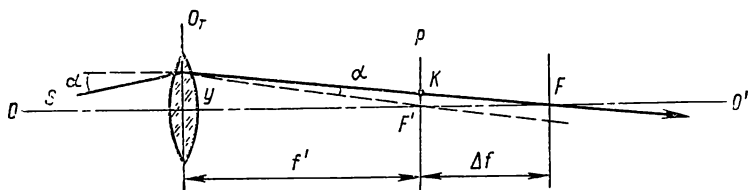


Рис. 107. К измерению внеосевых aberrаций зрительной трубки методом визуальных фокусировок

фокусом F' (или перед фокусом, если в объектив трубки поступает с угловой aberrацией α луч), а фокальную плоскость $F'P$ в точке K на расстоянии a от оптической оси. При этом допустим, что объективы коллиматора и вспомогательной трубки безaberrационны или aberrации их по сравнению с aberrациями испытываемой системы малы. В противном случае эти aberrации надо учитывать и вводить соответствующие поправки в окончательные результаты.

Если вспомогательная трубка снабжена окулярным микрометром, фокальная плоскость которого совпадает с плоскостью $F'P$, то, измеряя расстояния a , соответствующие различным зонам y , получаем значения поперечных aberrаций. Если у вспомогательной трубки имеется выдвижной окулярный тубус с отсчетной шкалой и нониусом, то можно измерить продольную сферическую aberrацию (отрезок Δf). Для этого, перемещая окулярный тубус трубки, нужно каждый раз фокусировать на интерференционные полосы от соответствующих зон и брать отсчеты по шкале. В обоих случаях полученные aberrации относятся к вспомогательной трубке; их следует привести к испытываемой системе, разделив на увеличение испытываемой зрительной трубки.

На практике удобно оперировать с угловыми aberrациями или с линейными, выраженными в диоптриях. Чтобы получить угловую aberrацию, нужно кроме высоты падения пучка лучей y на объектив вспомогательной зрительной трубки знать соответствующее расстояние L от главной плоскости объектива O_T до точки F совмещения интерференционных полос на оси: $L = f' + \Delta f$ — для расходящихся лучей или $L = f' - \Delta f$ — для сходящихся лучей, где f' — фокусное расстояние объектива вспомогательной трубки; Δf — разности отсчетов между положением трубки, установленной на бесконеч-

ность, и сфокусированной на интерференционные полосы для зон.

Угловая абберация α находится из отношения

$$\operatorname{tg} \alpha = y/L.$$

Высота падения пучка лучей y на объектив вспомогательной трубки находится делением высоты зоны пучка лучей, идущего к объективу испытуемой системы, на ее увеличение, известное заранее или полученное из промера диаметров входного и выходного зрачков. Для определения астигматизма и кривизны изображения по полю щелевую диафрагму, находящуюся в фокальной плоскости объектива коллиматора, и зональную диафрагму перед испытуемой системой требуется повернуть на 90° и установить горизонтально, если перед этим измерения были выполнены при их вертикальном расположении. Измерения значения a или $\Delta f'$ ведут для выбранной зоны, близкой к оптической оси, или для высоты, равной 0,7 радиуса входного зрачка объектива испытуемой системы. Чтобы выразить абберации в диоптриях, нужно произвести пересчет по формуле

$$D = \Delta f \cdot 1000 / f'^2.$$

В табл. 25 приведен пример вычисления угловой сферической абберации телескопической системы для трех светофильтров с длинами волн $\lambda = 465, 540$ и 696 нм. Фокусное расстояние объектива вспомогательной трубки равно 500 мм; $L = 500 + \Delta f'$.

Таблица 25

y , мм	$\lambda = 465$ нм, синий фильтр		$\lambda = 540$ нм, зеленый фильтр		$\lambda = 696$ нм, красный фильтр	
	α	α_{Π}	α	α_{Π}	α	α_{Π}
2,48	17'00,8"	00'02,1"	17'02,9"	00'00,0"	16'52,3"	00'00,6"
4,95	33'57,8"	16'54,9"	34'04,6"	17'01,7"	33'45,4"	16'42,5"
7,45	54'34,8"	37'31,9"	51'24,5"	34'21,6"	51'03,8"	34'00,9"
9,90	1°08'04,8"	51'01,9"	1°08'19,3"	51'16,4"	1°07'55,6"	50'52,7"

Значения α_{Π} вычислены при условии, что абберация для зеленого светофильтра $\lambda = 540$ нм на зоне $y = 2,48$ мм равна нулю.

Метод внефокальных наблюдений. В отличие от метода визуальных фокусировок, позволяющего находить фокус оптической системы для каждой зоны непосредственно в момент наблюдений, метод внефокальных наблюдений Гартмана дает возможность определять точки фокуса косвенным путем, для чего требуется провести наблюдения минимум в двух плоскостях вне фокуса системы. Количество плоскостей наблюдения можно увеличить, что повлечет повышение точности результата измерения, но увеличится и трудоемкость.

Пусть на рис. 108, *a* первая плоскость наблюдения находится перед фокусом, а вторая — за фокусом испытуемой системы F' . Расстояния между лучами, проектирующимися на плоскости *I* и *II* от

зоны объектива $2y$, соответственно равны l_1 и l_2 . Из треугольников a_1b_1F' и a_2b_2F' имеем

$$s_y = l_1 \Delta / (l_1 + l_2), \quad (82)$$

где Δ — расстояние между плоскостями наблюдения.

Значения s_y для каждой зоны объектива могут быть вычислены от плоскости I или II или от последней поверхности линзы объектива. Выбор плоскости отсчета не имеет значения, так как аберрации определяются по расстоянию Δ между ними.

Метод внефокальных наблюдений может быть осуществлен как визуальным, так и фотографическим способом. На рис. 108, *a* приведена схема установки объектива при прямых внефокальных наблюдениях.

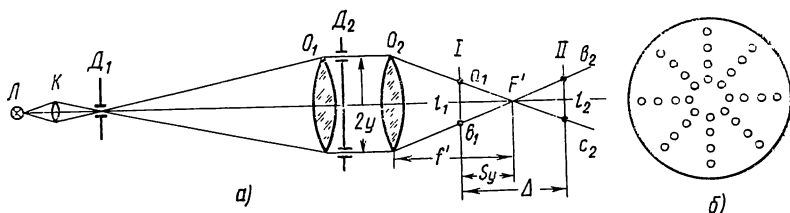


Рис. 108. Измерение аберраций оптических систем:

a — оптическая схема измерения осевых аберраций методом внефокальных наблюдений; *б* — зональная диафрагма

В фокусе объектива коллиматора O_1 находится диафрагма D_1 с круглым отверстием в центре, освещенная через конденсор K пучком лучей от источника L .

В параллельном ходе пучка лучей между объективом коллиматора O_1 и испытуемым объективом O_2 ставят зональную диафрагму D_2 с круглыми отверстиями, расположенными по четырем или более диаметрам (рис. 108, *б*). Диаметр отверстий диафрагмы должен быть $1/200$ — $1/400$ фокусного расстояния испытуемого объектива. С уменьшением отверстий увеличивается дифракция света от их краев, и изображения отверстий получаются нерезкими, затрудняющими наблюдения. Такую диафрагму надевают на объектив коллиматора, что у большинства конструкций оптических скамей предусмотрено.

На некотором расстоянии от точки F' (см. рис. 108, *a*) фокуса испытуемого объектива выбирают две плоскости I и II для наблюдения внефокальных изображений отверстий зональной диафрагмы. При визуальных наблюдениях расстояния l_1 и l_2 между симметричными зонами измеряют окуляр-микрометром.

При фотографическом способе получают два снимка на фотопластинках, устанавливаемых в плоскостях I и II , а затем на горизонтальном компараторе или измерительном микроскопе измеряют расстояния l_1 и l_2 . Для измерений этих расстояний с необходи-

мой точностью М. Ф. Романова * рекомендует выполнять съемку на пластинках, помещаемых от точки фокуса испытуемой системы на расстояниях, определяемых по формулам

$$s_1 = f' \frac{1}{df'_k/f' + 1}, \quad s_2 = f' \frac{1}{df'_k/f' - 1},$$

где s_1 и s_2 — соответственно расстояние от снимка до фокуса и за фокусом; f' и f'_k — фокусные расстояния испытуемого объектива и объектива коллиматора; d — расстояние между отверстиями на диафрагме, причем $d \geq f'_k/200$.

Выдвижное колено коллиматора оптической скамьи ставят на отсчет, соответствующий установке объектива на бесконечность, а поворотный рычаг — в осевое положение. Оптическую ось испытуемого объектива совмещают с оптической осью коллиматора и заднюю узловую точку устанавливают над осью вращения объективодержателя и поворотного рычага.

Для этого объектив в кольце держателя вращают вокруг оптической оси и следят за изображением светящейся точки (отверстия диафрагмы) на матовом стекле. Если ее положение остается неподвижным, то оптические оси совпадают, если же точка описывает круг, то юстировочными винтами объективодержателя перемещают кольцо с объективом до неподвижного положения ее изображения. При второй установке вращают объективодержатель с объективом вокруг вертикальной оси вращения и также следят в микроскоп за поведением изображения точки. Если оно ходит из стороны в сторону, то передвигают верхнюю часть держателя с объективом вдоль оптической оси до момента получения ее неподвижного положения, указывающего на то, что задняя узловая точка объектива находится над осью вращения объективодержателя и поворотного рычага.

После этого на объектив коллиматора надевают зональную диафрагму, определяют положение плоскостей внефокальных наблюдений (снимков), за источником света ставят выбранный светофильтр и матовое стекло заменяют кассетой с фотопластинкой. Экспозиции подбирают опытным путем. При испытании объектива на астигматизм, кривизну изображения и кому съемки ведут в наклонных пучках света с зеленым светофильтром.

Съемки начинают с осевого положения при $\omega = 0^\circ$ (нуль-пункта) и продолжают через каждые 5° в обе стороны до предельного положения в зависимости от угла поля изображения объектива.

Кассету с пластинкой соответственно следует каждый раз сдвигать на такую величину, чтобы один снимок не накладывался на другой. На рис. 109 приведены снимки, полученные объективом «Индустар-4» с $f' = 210$ мм и $D/f = 1:4,5$ для одной плоскости внефокальных изображений и углов поля зрения $\omega = 0, 5, 10, 15, 20^\circ$.

В табл. 26 приведены значения s_y , вычисленные по формуле (82) для вертикального сечения объектива для светофильтров с $\lambda = 440$,

* Романова М. Ф. Исследование параболических зеркал методом Гартмана. — Труды ГОИ им. С. И. Вавилова, 1927, т. VI, вып. 35.

475 и 550 нм. Значения $\Delta s_y'$ вычислены при приведенном к нулю $s_y = 23,27$ мм для синего светофильтра с $\lambda = 440$ нм на зоне $y = 4$ мм. Величины l_1 и l_2 измерены по негативам с помощью горизонтального компаратора со средней квадратической погрешностью $\sigma_\epsilon = 0,006$ мм; расстояние между положениями снимков $\Delta = 44$ мм измерено с погрешностью 0,01 мм.

Графики сферохроматических aberrаций и хроматизма положения (см. рис. 105) построены по данным табл. 26.

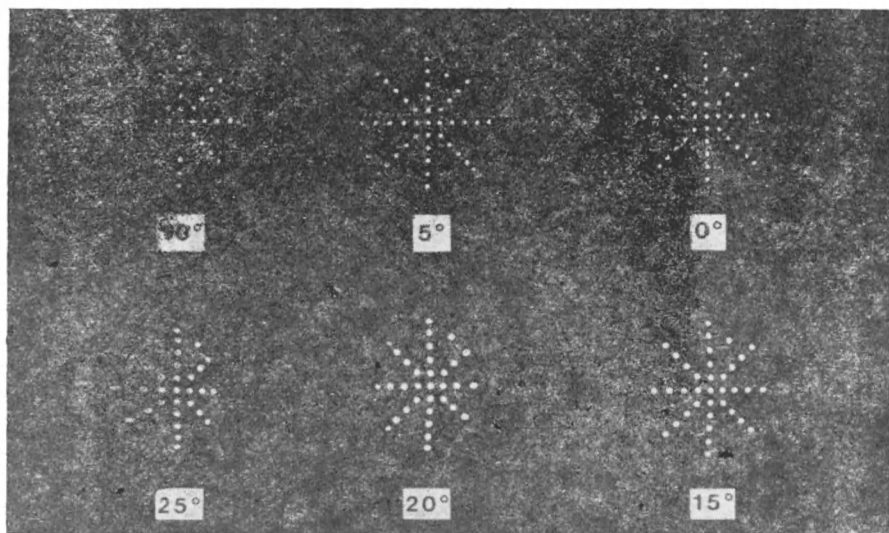


Рис. 109. Снимки, полученные испытуемым объективом для одной плоскости внефокальных наблюдений при фотографическом способе определения осевых aberrаций для различных углов ω поля зрения

Т а б л и ц а 26

y , мм	Вертикальное сечение, $\omega = 0^\circ$					
	$\lambda = 440$ нм		$\lambda = 475$ нм		$\lambda = 550$ нм	
	s_y	$\Delta s_y'$	s_y	$\Delta s_y'$	s_y	$\Delta s_y'$
4	23,47	0,00	23,45	−0,02	23,14	−0,33
8	23,05	−0,42	23,19	−0,28	23,01	−0,46
12	22,88	−0,59	22,79	−0,68	22,52	−0,95
16	22,70	−0,93	22,44	−1,03	22,13	−1,34
20	23,00	−0,47	22,44	−1,03	22,17	−1,30

В табл. 26 приведены результаты вычислений s_y астигматизма и кривизны изображения для углов поля до $\omega = \pm 25^\circ$, зоны $y = 4$ мм и синего светофильтра с $\lambda = 475$ нм. Значения s_y' являются средни-

Т а б л и ц а 27

Углы ω , град	s_y , мм		s'_y мм		$\Delta s'_y$, мм	
	Сечение					
	горизон- тальное	верти- кальное	горизон- тальное	верти- кальное	горизон- тальное	верти- кальное
-25	22,26	24,45	22,23	23,85	-1,18	+0,41
-20	23,19	22,66	23,51	22,53	+0,10	-0,92
-15	23,01	22,40	23,34	22,40	-0,07	-1,05
-10	23,08	22,79	23,08	22,84	-0,33	-0,61
-5	23,18	23,23	23,27	23,14	-0,14	-0,31
0	23,41	23,45	23,41	23,45	0,00	0,00
+5	23,36	23,06				
+10	23,07	22,88				
+15	23,67	22,40				
+20	23,85	22,39				
+25	22,20	23,58				

ми для симметричных углов $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$ и т. д., а $\Delta s'_y$ получены при приведенном к нулю s'_y для осевого положения $\omega = 0^\circ$.

На рис. 110 приведены графики, характеризующие астигматизм и кривизну изображения.

Т а б л и ц а 28

2 y , мм	$f'/(2y)$	σ_s , мм
8	26,25	$\pm 0,11$
16	13,12	$\pm 0,06$
24	8,75	$\pm 0,04$
32	6,56	$\pm 0,03$
40	5,25	$\pm 0,02$

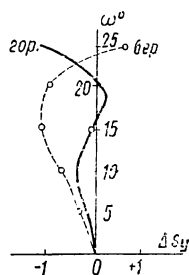


Рис. 110. Графики, характеризующие астигматизм и кривизну изображения

Точность измерения aberrаций методом внефокальных наблюдений зависит от погрешностей измерения величин l_1 , l_2 и Δ .

Из рис. 108, а имеем $f'/(2y) = s_y/l_1$; так как $s_y = l_1\Delta/(l_1 + l_2)$, то $f'/(2y) = \Delta/(l_1 + l_2)$.

Дифференцируя уравнение (82) по переменным s_y , l_1 и l_2 (Δ принято постоянным) и переходя к средней квадратической погрешности измерения расстояния s_y , получаем

$$\sigma_s = \sigma_s \frac{f'}{2y} \sqrt{\left(\frac{l_2}{l_1 + l_2}\right)^2 + \left(\frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)^2},$$

где σ_s — средняя квадратическая ошибка измерения расстояний l_1 и l_2 .

Значения $l_2/(l_1 + l_2)$ и $l_1/(l_1 + l_2)$ практически близки к 0,5, поэтому погрешность σ_s можем представить в виде

$$\sigma_s \approx 0,35 f' \sigma_s / y. \quad (83)$$

В табл. 17 приведены погрешности измерения аберрации для различных зон объектива, вычисленные по формуле (83) при $\sigma_e = 0,006$ мм.

Обратный способ внефокальных наблюдений повышает точность измерения аберраций.

Метод внефокальных наблюдений Гартмана довольно сложный и трудоемкий: на подбор экспозиции и сами экспозиции при съемке следов отверстий зональной диафрагмы требуется много времени; местные ошибки испытуемой системы не всегда могут быть обнаружены и точность измерения меняется от зоны к зоне. Однако метод Гартмана с успехом используется для контроля формы астрономических зеркал крупных телескопов (см. гл. III).

Теневой метод. Теневой метод дает возможность наглядно и просто наблюдать форму волнового фронта, образуемого всей поверхностью исследуемой системы, и обнаружить ее недостатки.

Предложенный в 1852 г. Л. Фуко теневой метод, или метод ножа и точки, позволяет произвести только качественную оценку формы поверхностей, главным образом, астрономических зеркал большого размера. Советский ученый Д. Д. Максutow развил и усовершенствовал этот метод [45]. Приняв контрастную чувствительность глаза $\gamma = 2\%$, он теоретически и экспериментально определил предельную точность метода ($0,015 \lambda$); заменил точку щелью, что позволило выявить малейшие искажения и зональные погрешности волнового фронта, применить светофильтры и количественно определить продольные сферические и хроматические аберрации не только зеркальных, но и линзовых систем (фото- и микрообъективов); замена ножа нитью еще более повысила точность измерения зональных ошибок.

Щель и нож или щель и нить следует помещать в анаберрационные точки испытуемой системы — в фокусе параболического или эллиптического зеркал или в центре сферического зеркала.

При исследовании параболической поверхности требуется в схему установки вводить дополнительную плоскую поверхность высокого качества, а при исследовании плоской поверхности — сферическую поверхность.

Для исследования фото- или микрообъективов щель должна быть помещена в фокусе объектива коллиматора, а нож или нить — вблизи фокуса контролируемого объектива. Щель освещают белым или монохроматическим светом, а нож, закрепленный в суппорте с отсчетным устройством, перемещают вдоль и поперек оси светового пучка в направлении s , как показано на рис. 111, *а*, отраженного от поверхности исследуемого сферического зеркала, до получения равномерного потемнения (рис. 111, *в*) выбранной зоны, показывающего положение центра кривизны. При перемещении ножа в положение *1* тень двигается в направлении ножа, закрывая нижнюю половину фронта волны (рис. 111, *б*); при перемещении в положение *2* тень двигается навстречу ножу, закрывая верхнюю половину фронта волны (рис. 111, *г*). Измеряя отклонения центров кривизны для

разных зон, находят значения продольных aberrаций. Если при перемещении ножа не появляется теневой рельеф, а наблюдается равномерно освещенный фон, то испытываемая поверхность имеет совершенную форму.

Зоны размечают по диаметру зеркала на полосе бумаги с вырезами или отметками непосредственно на поверхности.

При замене ножа нитью нужно взять достаточно узкую щель и тонкую нить, толщина которой равна ширине щели; возникающая дифракционная картина позволяет с высокой точностью совмещать центр теневого кольца выбранной зоны.

Щель с ножом или щель с нитью могут перемещаться одновременно, или независимо друг от друга. В последнем случае значение перемещения от зоны к зоне необходимо делить пополам. Зональные ошибки могут быть обнаружены при любой ориентировке ножа, в то время как азимутальные и местные ошибки — только при некоторой ориентировке ножа.

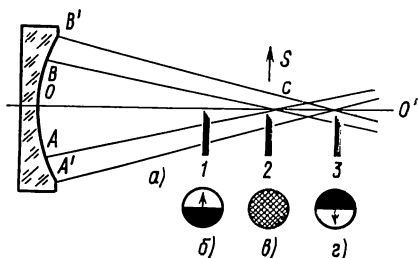


Рис. 111. К оценке формы поверхности методом Фуко

§ 35. Измерение волновых aberrаций

Интерференционный метод позволяет получить интерференционную картину, по которой можно определить волновую aberrацию исследуемой оптической системы по всему отверстию и оценить форму поверхности с высокой степенью точности.

Под волновыми aberrациями понимают отклонение деформированного фронта волны исследуемой системой от идеальной сферы. Как известно, плоская волна после прохождения реальной оптической системы превращается в сферическую, отличающуюся от идеальной сферической волны на некоторую разность хода, называемую волновой aberrацией.

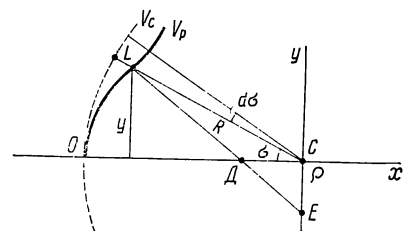


Рис. 112. К определению волновых aberrаций

Между волновой, продольной и поперечной aberrациями существует взаимосвязь, которую поясним с помощью рис. 112.

Пусть на рис. 112 центр C идеальной сферической поверхности v_c радиуса R совпадает с началом координат. Нормаль реальной волновой поверхности v_p пересекает ось Ox в точке D и ось Oy в точке E , образуя отрезки CD и CE , представляющие продольную $\Delta s'$ и поперечную ρ сферические aberrации.

Связь продольной и поперечной сферических aberrаций с волновой aberrацией L определяется выражениями

$$\Delta s' = -(R-L) \frac{dL}{dx} \quad \text{и} \quad \rho = -(R-L) \frac{dL}{dy}.$$

Принимая $OC = R = f$, где f — фокусное расстояние испытуемого объектива, и опуская L ввиду его малости по сравнению с f , запишем следующие приближенные формулы:

$$\Delta s' = -f \frac{dL}{dx} \quad \text{и} \quad \rho = -f \frac{dL}{dy}.$$

Так как $dx = f \sin \sigma d\sigma$ и $dy = f d\sigma$, то

$$\Delta s' = - \frac{dL}{\sin \sigma d\sigma} \quad \text{и} \quad \rho = - \frac{dL}{d\sigma}.$$

Откуда

$$dL = -\Delta s' \sin \sigma d\sigma \quad \text{или} \quad dL = -\rho d\sigma.$$

Угол $\sigma = y/f$, где y — высота зоны.

Волновая aberrация

$$L = - \int_0^{\sigma} \Delta s' \sin \sigma d\sigma \quad (84)$$

или

$$L = - \int_0^{\sigma} \rho d\sigma. \quad (85)$$

Формулы (84) и (85) справедливы в случае совпадения плоскости установки с параксиальным фокусом.

Предложенный Твайманом и Грином интерференционный метод, предназначен, главным образом, для качественной характеристики фотографических и микрообъективов [20].

Для измерения волновых aberrаций служит интерферометр Тваймана — Грина, построенный по схеме Майкельсона. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 113.

В фокусе объектива коллиматора 4 установлена диафрагма 3 с круглым отверстием, освещенная от монохроматического источника света 1 через конденсор 2. Параллельный пучок лучей падает под углом 45° на полупрозрачную пластинку 6 и разделяется ею на две части: отраженную и преломленную. Отраженная часть идет к референтному зеркалу 5, а преломленная — через пластинку 6, дефлектор (компенсатор) 7 и падает на испытуемый объектив 8. Пройдя объектив, плоская волна превращается в сферическую с центром, совпадающим с центром выпуклого сферического зеркала 9. Дефлектор 7 представляет собой компенсатор из двух клиньев, вращающихся один относительно другого, и служит главным образом для измерения дисторсии.

После отражения от зеркал 5 и 9 интерферирующие пучки встречаются на пластинке 6 и направляются ею в объектив 15 зрительной трубы, с помощью которой ведут визуальные наблюдения или фотографирование интерференционной картины, образуемой наложением плоской «эталонной» волны от зеркала 5 на деформированную волну (почти плоскую) от объектива 8.

Чтобы наблюдать интерференционную картину, нужно глаз 17 поместить за диафрагмой 16 и аккомодировать его на плоскость

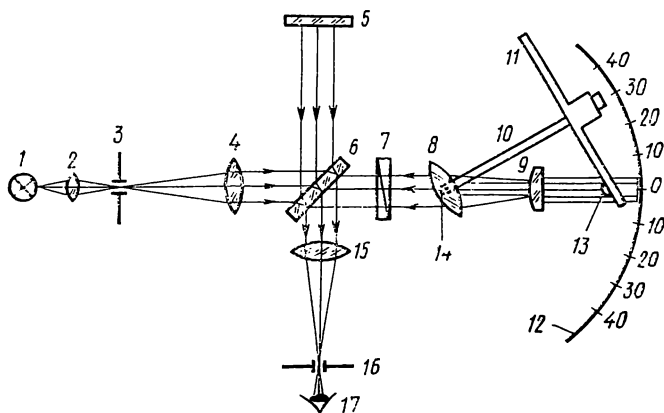


Рис. 113. Схема интерферометра Тваймана — Грина

зеркала 5 или входной зрачок испытуемого объектива 8. Глаз увидит интерференционные полосы, которые для хорошо центрированных линз испытуемого объектива 8 и при наблюдении на оптической оси переходят в кольца или прямые полосы. Также и в случае безабберационного объектива в поле зрения наблюдаются кольца Ньютона. В наклонных пучках, когда испытуемый объектив установлен под некоторым углом, интерференционная картина более сложная.

Так как световая волна проходит испытуемый объектив дважды, то волновые aberrации удваиваются, поэтому одной интерференционной полосе соответствует волновая aberrация, равная $\lambda/2$, что необходимо иметь в виду при обработке интерферограмм. В случае совершенного объектива волновая поверхность, выходящая из него после отражения от выпуклого зеркала, плоская и все поле интерференции светлое или темное. Если центр выпуклого зеркала смещать вдоль оси, то появятся интерференционные кольца, а поперек оси — полосы.

При использовании интерферометра Тваймана — Грина необходимо провести следующие основные юстировки.

1. Установить оптическую ось объектива коллиматора параллельно направляющей прибора, перпендикулярно к линейке 11 и к оправе держателя испытуемого объектива.

2. Расположить центры диафрагмы 3 и держателей объектива коллиматора 4, испытуемого объектива 8 и выпуклого зеркала 9 на одной прямой линии.

3. Установить зеркало 5 перпендикулярно боковым направляющим прибора и перпендикулярно оси коллиматора.

4. Установить диагональное зеркало 6 под углом 45° к оптической оси объектива коллиматора.

Первая установка осуществляется с помощью двух плоскопараллельных стеклянных пластинок и автоколлимационного окуляра, вставленного вместо диафрагмы 3. Одна плоскопараллельная пластинка крепится к рамке держателя объектива 8, другая — к рабочей стороне линейки 11. Установив поворотный рычаг 10 на нулевой отсчет по сектору 12, наблюдают в окуляр отраженные изображения креста нитей от обеих пластинок. После совмещения их можно считать, что оптическая ось объектива коллиматора установлена перпендикулярно рамке держателя объектива 8 и линейке 11.

Центры диафрагмы 3 и держателей объектива коллиматора, испытуемого объектива и выпуклого зеркала совмещают с помощью съемных дисков с отверстиями в центре. Для этого один диск надевают на объектив коллиматора, а два других — на оправы держателей испытуемого объектива и выпуклого зеркала, удаленных на время проверки. Если осветить отверстие в диске на держателе выпуклого зеркала и поместить глаз за диафрагмой 3, то должны быть видны все отверстия, находящиеся на одной прямой линии.

Третья установка довольно проста: нужно зеркало 5 поставить в положение, при котором изображение направляющих прибора в зеркале являлось бы продолжением самих направляющих, т. е. сливалось в одну линию.

Правильность выполнения четвертой установки проверяется получением отраженного изображения перекрестия от зеркала 5 в поле зрения окуляра коллиматорной трубы. Изменяя наклон и поворот зеркала 6, совмещают отраженное изображение креста нитей с самим крестом.

Удалив автоколлимационный окуляр, приступают к установкам испытуемого объектива 8, при этом должны быть выполнены еще три условия:

- 1) центр выпуклого зеркала 9 совмещен с центром ролика 13;
- 2) задняя узловая точка испытуемого объектива расположена над осью вращения 14 поворотного рычага 10;
- 3) фокус испытуемого объектива совмещен с центром выпуклого зеркала 9.

Для выполнения первого условия необходимо выбрать выпуклое сферическое зеркало с таким радиусом кривизны, чтобы поверхность его была возможно ближе к испытуемому объективу.

Так как испытанию подвергают объективы с различными фокусными расстояниями, то прибор должен иметь несколько сменных сферических зеркал разных радиусов кривизны и монохроматический источник света — ртутную или водородную лампу с фильтра-

ми. Все три условия проверяют по интерференционной картине, наблюдаемой в зрительную трубу.

Если центр кривизны выпуклого зеркала совпадает с центром ролика 13 и фокус испытуемого объектива совмещен с центром выпуклого зеркала, то при вращении последнего в своей плоскости интерференционная картина остается без изменения, а число видимых полос наименьшее.

При нахождении задней узловой точки испытуемого объектива над осью вращения 14 поворотного рычага центр интерференционной картины должен сохранять неизменное положение во время вращении поворотного рычага с объективом на небольшие углы.

Испытания объектива заключаются в анализе интерференционной картины, форма которой зависит от недостатков объектива; для наблюдения картины используют телескопическую лупу, установленную за диафрагмой 16, при наилучшей фокусировке объектива и максимальной резкости колец. Наилучшей фокусировки добиваются перемещением выпуклого зеркала 8 вдоль оси до совмещения центра зеркала с фокусом испытуемого объектива при минимальном числе колец, соответствующем приближенно положению фокуса в гауссовой плоскости. Максимальную резкость интерференционных колец получают при равенстве оптических путей в обеих ветвях интерферометра перемещением референтного зеркала 5.

Интерференционная картина на оси и по полю объектива фиксируется вращением рычага 10 с объективом по сектору 12 через 5—10°. При фотографировании интерференционной картины требуется предварительно с помощью дефлектора скомпенсировать дисторсию, добиваясь в центральной части поля минимального числа полос. По фотоснимку на измерительном микроскопе определяют радиусы колец в диаметральной сечении. Визуальные измерения колец на интерферометре выполняют с помощью окулярного микрометра.

По полученным значениям строят графики, откладывая по оси ординат зоны y или углы $\sigma = y/f$, а по оси абсцисс — волновые aberrации L , выраженные числом длин волн $N\lambda/2$, где N — число колец. Волновые aberrации можно пересчитать в геометрические.

Имея кривую волновой aberrации для выбранной плоскости установки объектива, можно получить кривую для любой другой плоскости установки с помощью формулы

$$L' = L - \Delta s^2/2,$$

где Δ — величина смещения центра выпуклого зеркала.

На интерферометре Тваймана можно измерить и геометрические aberrации. Так, определение продольной сферической aberrации сводится к измерению величины смещения центра выпуклого зеркала, проходящего через фокусы, соответствующие выбранным зонам испытуемого объектива, на которых интерференционные кольца становятся наиболее широкими.

Хроматизм положения определяют по кривым продольной aberrации для нескольких длин волн. Дисторсию, астигматизм и кри-

визну изображения определяют при поворотах объектива на различные углы ω , фиксируемые по шкале сектора. Наличие дисторсии приводит к смещению центра фронта волны на некоторую величину, компенсируемую дефлектором 7 до совпадения центра кривизны фронта волны с центром выпуклого зеркала. Величина компенсации отсчитывается по шкале дефлектора.

Астигматизм и кривизна изображения обнаруживаются по различным положениям резких изображений полос интерференционной

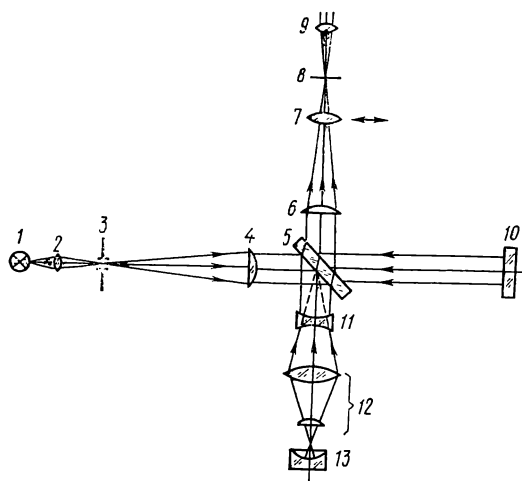


Рис. 114. Оптическая схема интерферометра для измерения волновых aberrаций микрообъективов

картины в вертикальном и горизонтальном сечениях. Если появилась дисторсия, то ее необходимо скомпенсировать дефлектором. Затем, перемещая выпуклое зеркало вдоль оси, совмещают его центр с центром фронта волны до получения максимально резкого изображения полос для вертикального и горизонтального сечений. Величина смещения центра выпуклого зеркала отсчитывается по шкале направляющих прибора.

Кроме измерения aberrаций на интерферометре можно определить фокусное расстояние объекти-

ва, отсчитав по шкале направляющих интервал от задней главной точки (центра вращения поворотного рычага) до центра выпуклого зеркала, а также проверить центровку объектива по форме колец интерференционной картины.

Особое значение интерференционный метод имеет для исследования микрообъективов, так как другие методы в этом случае малоэффективны. Для измерения волновых aberrаций микрообъективов в Государственном оптическом институте был построен малый интерферометр по схеме Тваймана — Грина [20, 32], оптическая схема которого изображена на рис. 114.

Пучок лучей от ртутной лампы 1 через зеленый светофильтр проектируется конденсором 2 на круглое отверстие диафрагмы 3 (диаметр 0,5 мм), находящейся в фокусе объектива коллиматора 4. Параллельный пучок лучей, упавший на полупрозрачную пластинку 5 под углом 45° , делится последней на два пучка: отраженный и преломленный, приблизительно равные по яркости. Отраженный пучок проходит отрицательную тубусную линзу 11 ($f' = 140$ мм) и испытуемый микрообъектив 12, сфокусированный на центр сфериче-

ского вогнутого зеркала 13 (линза с алюминированной сферической поверхностью). Преломленный пучок проходит пластинку 5 и, отразившись от плоского референтного зеркала 10, встречается с пучком лучей, отраженным от вогнутого зеркала 13. Оба пучка лучей собираются в фокусе объектива 6, строя изображение диафрагмы 3, рассматриваемое через окуляр 9. Чтобы наблюдать интерференционную картину, в ход лучей 5—6—9 помещается дополнительная линза Бертрана 7, приводящая в фокальную плоскость 8 окуляра 9 изображение выходного зрачка испытуемого объектива 12. Отрицательная тубусная линза 11 введена для сохранения тубусной длины объектива микроскопа. Юстировка прибора осуществляется с помощью автоколлимационного окуляра, устанавливаемого вместо окуляра 9.

В процессе работы необходимо уравнивать оптические пути лучей в обеих ветвях интерферометра, для чего зеркало 10 перемещают в продольном направлении. Оптические оси объективов зрительной трубы 6—9 и коллиматора 3—4 должны быть взаимно перпендикулярны. Требуется также точная фокусировка объектива на центр сферического вогнутого зеркала, так как малейшее смещение центра сферы с предметной точки объектива ведет к сильному искажению интерференционной картины. Отверстие диафрагмы 3 должно находиться строго в фокусе объектива коллиматора.

Процесс измерения волновых aberrаций для осевого пучка лучей аналогичен применяемому при исследовании фотообъективов.

§ 36. Измерение дисторсии объективов

Дисторсией объектива называется искажение изображения, вызванное непостоянством линейного увеличения по полю зрения.

Нарушение подобия изображения предмету — ортоскопии приводит к изменению масштаба изображения снимка, которое необходимо учитывать при составлении географических карт.

Величина дисторсии может быть как положительной, так и отрицательной, и если рассматривать квадратную сетку, то в первом случае изображение сетки имеет подушкообразную форму, во втором — бочкообразную. Различают дисторсию оптическую (абсолютную) и фотограмметрическую.

Для определения величины линейной оптической дисторсии служит выражение

$$\Delta l' = l' - l'_0, \quad (86)$$

где l' — истинная величина изображения предмета, взятая по решетке, установленной в фокальной плоскости объектива; l'_0 — величина идеального изображения, вычисленная по формуле

$$l'_0 = f'_0 \operatorname{tg} \omega. \quad (87)$$

Здесь f'_0 — фокусное расстояние объектива для параксиальных лучей; ω — угол, образованный пересечением главного луча с оптической осью.

Практически f'_0 определяют экстраполированием до оси кривой, построенной по значениям фокусных расстояний, которые находят по формуле

$$f'_\omega = l / \operatorname{tg} \omega.$$

Зная f'_0 , по формуле (87) вычисляют значения l'_0 и по формуле (86) значения $\Delta l'$ (табл. 29).

Условно за f'_0 можно принять f'_ω , полученное для первой зоны l_1 , и по значениям $\Delta l'$, взятым из табл. 29, построить кривую оптической дисторсии, откладывая по оси абсцисс углы ω и по оси ординат $\Delta l'$.

Т а б л и ц а 29

№ п/п	l , мм	ω	$\operatorname{tg} \omega$	f'_ω , мм	l' , мм	$\Delta l'$, мм
1	l_1	ω_1	$\operatorname{tg} \omega_1$	f'_{ω_1}	l'_1	$\Delta l'_1$
2	l_2	ω_2	$\operatorname{tg} \omega_2$	f'_{ω_2}	l'_2	$\Delta l'_2$
3	l_3	ω_3	$\operatorname{tg} \omega_3$	f'_{ω_3}	l'_3	$\Delta l'_3$
.
.
.
n	l_n	ω_n	$\operatorname{tg} \omega_n$	f'_{ω_n}	l'_n	$\Delta l'_n$
$\sum l$			$\sum \operatorname{tg} \omega$			

Фотограмметрическую дисторсию обычно находят в процессе определения элементов внутреннего ориентирования аэрофотокамеры или фототеодолита, исходя из фокусного расстояния камеры f'_k и главной точки снимка, фиксируемой координатными метками на прикладной рамке камеры и координатами Δx и Δy .

Фокусное расстояние камеры рассчитывают по одной из следующих формул:

при $\sum \Delta l' = \min$

$$f'_k = \sum l / \sum \operatorname{tg} \omega, \quad (88)$$

при $\sum \Delta l'^2 = \min$

$$f'_k = (\sum f'_\omega \operatorname{tg}^2 \omega) / (\sum \operatorname{tg}^2 \omega). \quad (89)$$

Вследствие децентрировки и неоднородности материала линз объектива имеет место отклонение оптической оси в пространстве изображений, ведущее, с одной стороны, к нарушению симметрии радиальной дисторсии и, с другой стороны, к образованию тангенциальной дисторсии, расположенной перпендикулярно радиальной. Тангенциальная дисторсия

$$\Delta l'_m = f'_k \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega} \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ — угол, измеренный в перпендикулярной плоскости.

Для измерения фотограмметрической дисторсии применяют визуальные или фотографические методы. Последние наиболее близки к реальным условиям работы камеры, в этом и состоит их преимущество.

К визуальным относятся гониометрический и автоколлимационный методы, к фотографическим — лабораторный и полевой.

Гониометрический метод. Гониометрический метод применяют в лабораторных условиях, при этом используют оптические скамьи, снабженные угломерными устройствами, или большие гониометры, обеспечивающие точность измерения углов $2-3''$.

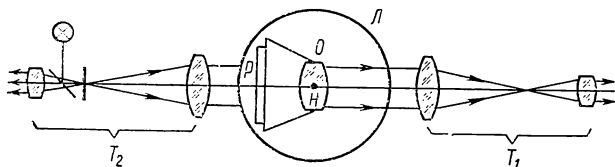


Рис. 115. Схема измерения фотограмметрической дисторсии гониометрическим методом

Испытуемый объектив O , отъюстированный в камере, устанавливают (рис. 115) передней узловой точкой H над осью вращения лимба L параллельно оптической оси визирной оси зрительной трубы T_1 . В плоскости прикладной рамки камеры укрепляют измерительную решетку R с сеткой квадратов со сторонами 5 или 10 мм, ориентированную главными направлениями по координатным меткам так, чтобы центральное перекрестие как можно точнее совпадало с главной точкой, которая предварительно может быть определена автоколлимационным методом. Плоскость прикладной рамки должна совпадать с фокальной плоскостью объектива, найденной фотографически по наилучшей разрешающей способности и контрасту, и быть перпендикулярной визирной оси автоколлимационной трубы T_2 . При этом в поле зрения трубы T_2 автоколлимационное изображение перекрестия окуляра должно быть совмещено с самим перекрестием. Визирные оси труб T_1 и T_2 совмещают при юстировке скамьи или гониометра. Углы ω измеряют в горизонтальной плоскости по главному направлению линии решетки, ориентированной перпендикулярно оси вращения лимба, в прямом и обратном ходе лучей.

Для измерения дисторсии по другим направлениям (радиусам) требуется камеру с объективом повернуть на 45 и 90° вокруг оптической оси.

При измерениях дисторсии на оптической скамье с неподвижными зрительными трубами T_1 и T_2 объектив в камере вращается вместе с лимбом. При измерениях на большом гониометре камера может оставаться неподвижной, а вращается зрительная труба с алидадой.

По измеренным углам ω и интервалам решетки вычисляют фокусное расстояние камеры f_k' по формуле (88) или (89), используя

для нахождения фотограмметрической радиальной дисторсии $\Delta l_p'$ формулу

$$\Delta l_p' = l'' - l = f'_k \operatorname{tg} \omega - l.$$

Для измерения тангенциальной дисторсии на оптической скамье необходимо иметь дополнительное устройство, позволяющее вращать испытуемый объектив передней узловой точкой над осью вращения лимба в двух взаимно перпендикулярных направлениях, с вертикальным кругом для отсчета углов наклона. Можно измерить тангенциальную дисторсию, снабдив зрительную трубу T , винтовым окулярным микрометром и перемещая перекрестие в вертикальном направлении. Можно измерить угол φ или линейную величину Δ , взяв отсчеты по барабану микрометра, тогда тангенциальная дисторсия определяется формулой

$$\Delta l_m' = \Delta f'_k / f'_T,$$

где f'_T — фокусное расстояние объектива зрительной трубы. Нарушение симметрии радиальной дисторсии вследствие децентрировки линз объектива и других недостатков изготовления, особенно заметное для камер с широкоугольными и сверхширокоугольными объективами, не позволяет точно совместить начало координат O_1 (центра перекрестия решетки) (рис. 116) с действительным положением главной точки камеры O [72]. Величину смещения Δ главной точки можно определить по формуле

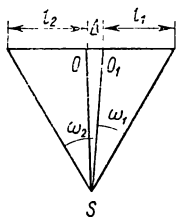


Рис. 116. Совмещение начала координат широкоугольных объективов при измерении дисторсии

$$\Delta = \frac{\Delta l_2' - \Delta l_1'}{2} \operatorname{ctg}^2 \omega,$$

где $\Delta l_1'$ и $\Delta l_2'$ — линейные дисторсии, вычисленные для зон l_1 и l_2 ; ω — среднее значение углов ω_1 и ω_2 данных зон.

Автоколлимационный метод. Автоколлимационный метод измерения оптической дисторсии основан на получении отраженного изображения точки фокуса F' (рис. 117) объектива от плоского зеркала $З$, установленного за объективом O в параллельном ходе лучей, и определении величины смещения точки фокуса от осевого положения при вращении на различные углы объектива вокруг задней узловой точки H' , расположенной над вертикальной осью лимба L угломерного инструмента.

Объектив задней узловой точки над осью вращения лимба устанавливают последовательным перемещением объектива и автоколлимационного микроскопа M вдоль направляющих оптической скамьи и поворотом объектива над осью вращения вместе с лимбом на симметричные углы. Добиваются такого положения, когда при небольших углах поворота объектива точка фокуса F' , изображенная в виде перекрестия, отраженного от зеркала, была бы непо-

движна. Предметная плоскость микроскопа при этом должна быть строго совмещена с фокусом объектива. Вращая объектив на симметричные углы от осевого положения, например, через $\pm 5^\circ$ или $\pm 10^\circ$ до крайних положений, измеряют отклонения a точки фокуса от осевого положения с помощью отсчетной шкалы. Дисторсию определяют по формуле

$$\Delta l' = a / (4\beta \cos \omega),$$

где $a = m\tau$; m — число делений шкалы; τ — цена деления; β — увеличение объектива микроскопа; ω — угол поворота объектива.

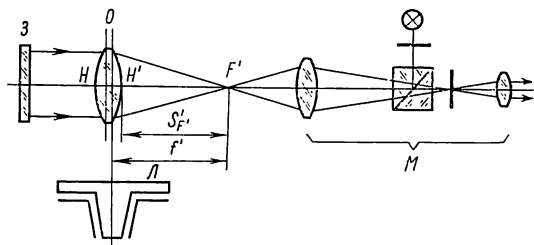


Рис. 117. Схема измерения дисторсии автоколлимационным методом

При наличии отсчетной шкалы на направляющих оптической скамьи можно с достаточной точностью измерить фокусное расстояние f' и задний фокальный отрезок $s'_{F'}$. Значение f' определяется разностью между отсчетом от оси вращения лимба до точки фокуса F' , значение $s'_{F'}$ — разностью отсчетов при наведении микроскопа на вершину задней поверхности объектива и на фокус.

Фотографический метод. В Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэрофотосъемки и картографии разработана специальная многоколлиматорная фотографическая скамья. Она позволяет фиксировать на фотопластинках, прижатых к прикладной рамке камеры, марки коллиматоров. Коллиматоры расположены в одной плоскости под заданными углами, оптические оси которых сходятся в одну точку. Изображения марок фиксируются на снимке по полю испытуемого объектива [3]. Радиальную и тангенциальную дисторсию измеряют с помощью универсального измерительного микроскопа УИМ-21.

Фотографический метод, реализуемый в полевых условиях, основан на получении снимка искусственных объектов местности с последующим измерением отрезков на снимке и углов на местности между соответствующими объектами с учетом положения точки, из

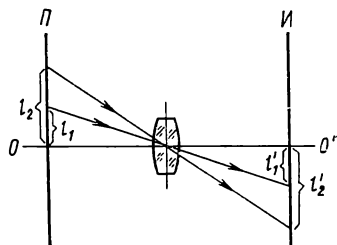


Рис. 118. К измерению дисторсии репродукционного объектива

которой велась съемка камерой. Углы измеряют с помощью теодолита.

Измерение дисторсии репродукционного объектива значительно отличается от измерения дисторсии фотографического объектива. Репродукционный объектив строит изображение предметов, находящихся на конечном расстоянии. Поэтому дисторсию приходится измерять для нескольких заданных масштабов увеличения. Для этого по измеренным отрезкам l' в плоскости изображения $И$ (рис. 118) и соответствующих отрезков l на решетке в плоскости предмета $П$ определяют линейное увеличение $\beta=l'/l$. Далее, исходя из условия равенства суммы квадратов линейных дисторсий минимальному значению ($\sum l'^2 = \min$) находят вероятнейшее увеличение

$$\beta_{\text{в}} = (\sum \beta l'^2) / \sum l'^2.$$

Затем вычитают $\beta_{\text{в}}$ каждого линейного увеличения и умножают на соответствующий отрезок l , в результате получают искомую линейную дисторсию $\Delta l'$:

$$\Delta l' = (\beta - \beta_{\text{в}}) l.$$

В ходе измерений и вычислений составляют таблицу по следующей схеме (табл. 30).

Т а б л и ц а 30

№ п/п	l , мм	l' , мм	β	l^2	$\beta l'^2$	$\beta - \beta_{\text{в}}$	$\Delta l'$, мм
1	l_1	l'_1	β_1	l_1^2	$\beta_1 l_1'^2$	$\beta_1 - \beta_{\text{в}}$	$\Delta l'_1$
2	l_2	l'_2	β_2	l_2^2	$\beta_2 l_2'^2$	$\beta_2 - \beta_{\text{в}}$	$\Delta l'_2$
3	l_3	l'_3	β_3	l_3^2	$\beta_3 l_3'^2$	$\beta_3 - \beta_{\text{в}}$	$\Delta l'_3$
.
.
.
n	l_n	l'_n	β_n	l_n^2	$\beta_n l_n'^2$	$\beta_n - \beta_{\text{в}}$	$\Delta l'_n$
				$\sum l^2$	$\sum \beta l'^2$		

Перед измерениями мерительную решетку в плоскости предмета и фотопластинку в плоскости изображения устанавливают перпендикулярно оптической оси объектива OO' и центр решетки (перекрестие) совмещают с оптической осью.

Определение отрезков l' по изображениям решетки на снимке производят на любом измерительном микроскопе или компараторе, а если снимок больше чем 20×20 см, то можно использовать масштабную линейку.

§ 37. Измерение aberrаций прожекторных зеркал (отражателей)

Прожектор служит для освещения удаленных объектов. По характеру применения прожекторы делятся на три группы: а) дальнего действия; б) ближнего действия или заливающего света и в) осветительные. По устройству оптической системы различают прожекторы зеркальные, линзовые и зеркально-линзовые.

Каждый зеркальный прожектор состоит из отражателя и источника света. Источником света служат дуговые лампы с нормальными и специальными угольными электродами, электролампы и газосветные лампы.

На практике применяют отражатели двух видов: стеклянные и металлические. Первые используются в прожекторах дальнего действия, вторые — преимущественно в прожекторах заливающего света. Отражатели больших размеров, как правило, имеют зеркальное покрытие: стеклянные — на тыльной стороне, а металлические — на внешней стороне, обращенной к источнику света.

Металлические отражатели чаще всего алюминировуют или хромируют. Внешнюю поверхность стеклянных отражателей малых размеров нередко алюминировуют. Основным недостаток таких покрытий — недостаточная механическая и химическая устойчивость.

Стеклянные отражатели представляют собой тела вращения, образованные вращением двух кривых вокруг оптической оси. Одна из кривых при вращении образует переднюю или внешнюю поверхность, вторая — заднюю (тыльную) поверхность. Точку пересечения оси с передней поверхностью называют центром отражателя.

В зависимости от формы кривых различают сферические, параболические, гиперболические и эллиптические отражатели.

Основным фактором, определяющим форму светового пучка, отбрасываемого отражателем, является качество отражающей поверхности, которое, в свою очередь, зависит от оптических свойств поверхности и от точности обработки последней.

Качество поверхностей отражателей оценивается продольной сферической aberrацией и астигматизмом. Наличие aberrаций у отражателя приводит к увеличению рассеянного света, следовательно, уменьшению полезного светового пучка.

Если параллельный пучок лучей падает на зеркало с идеальной параболической поверхностью, то после отражения все лучи соберутся на оптической оси в фокусе. При наличии отклонения от идеальной параболической поверхности, или когда зеркало имеет сферическую поверхность, отраженные лучи пересекут оптическую ось в разных точках; совокупность отраженных лучей, пересекаясь между собой, образует поверхность вращения, называемую каустической поверхностью (каустикой). Наиболее узкая часть каустики, указанная стрелками на рис. 119, называется шейкой или кружком наименьшего рассеяния.

Если источник света S в виде светящейся точки поместить за фокусом F зеркала Z (рис. 120), то отраженный пучок лучей откло-

нится от идущего параллельно оптической оси OO' на некоторый угол δ и пересечет оптическую ось в точке S' . Угол отклонения δ образует так называемую угловую аберрацию, связанную с продольной аберрацией Δf :

$$\Delta f = \rho \sin \delta / \sin \varphi,$$

где ρ — радиус-вектор исследуемой зоны; φ — угол охвата. Так как $\sin \varphi = h/\rho$, $\rho = x + f$, то

$$\Delta f = \rho^2 \sin \delta / h = (x + f)^2 \sin \delta / h.$$

Для параболы $x = h^2/(2p)$, где $p = 2f$ — параметр параболы, x и h — координаты точки K .

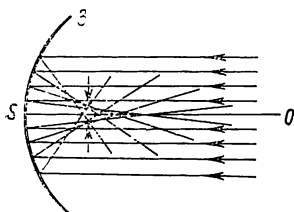


Рис. 119. Каустика прожекторного зеркала

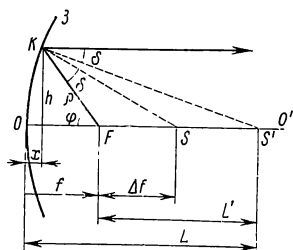


Рис. 120. К измерению аберраций прожекторных зеркал

Заменяя вследствие малости угла $\sin \delta$ на δ , а величину x — значением $h^2/(4f)$, получаем:

$$\Delta f = (h^2/(4f) + f)^2 \delta / h.$$

Из подобия треугольников FKS и FKS' (см. рис. 120) имеем

$$L' = \rho^2 / (\Delta f), \quad (90)$$

где L' — расстояние от точки фокуса F до точки пересечения S' луча с оптической осью. Так как

$$\rho^2 = h^2 + (f - x)^2 = h^2 + f^2 - \frac{h^2}{2} + \left(\frac{h^2}{4f}\right)^2 = \left(f + \frac{h^2}{4f}\right)^2,$$

то, подставляя ρ^2 в (90), имеем

$$L' = \frac{1}{\Delta f} \left(f + \frac{h^2}{4f}\right)^2.$$

Величина допуска на аберрацию определяется, в основном, производственными возможностями. Так, например, для параболических зеркал диаметром 200 и 300 см допускаемая угловая аберрация для всех зон зеркала соответственно равна $7'$ и $6'$, 5.

Допуск на продольную абберацию получают пересчетом допуска на угловую абберацию. Так, например, для отражателя с $f=865$ мм и диаметром 20 см допуск определяется значениями, приведенными в табл. 31.

Астигматизм в данном случае определяется как разность между максимальным и минимальным значениями продольной абберации.

Для отражателей диаметром 150, 200 и 300 см допуск на астигматизм 6,9—12 мм.

Т а б л и ц а 31

№ зоны	h , см	Δf , мм	№ зоны	h , см	Δf , мм
1	15	10,4	6	60	3,2
2	20	7,8	7	70	3,0
3	30	5,4	8	80	2,8
4	40	4,2	9	90	2,7
5	50	3,6	10	100	2,7

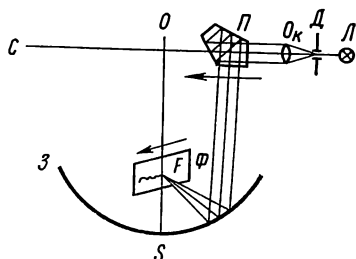


Рис. 121. Оптическая схема фоторегистрации аббераций прожекторных зеркал методом Б. Г. Леонова

В настоящее время известны следующие методы измерения аббераций прожекторных зеркал: фотографирование экрана с сеткой квадратов (метод В. Н. Чиколева), с помощью которого можно только качественно оценить поверхность зеркала или сравнить с эталонным зеркалом, метод Гартмана, фоторегистрация аббераций методом Б. Г. Леонова [1] и др.

Метод фоторегистрации наиболее надежен. Он основан на автоматической записи кривой абберации по диаметральному сечению на фотопластинку абберографа, разработанного Б. Г. Леоновым.

При работе испытуемый отражатель 3 (рис. 121) устанавливают на специальных подушках центрирующего устройства прибора до совмещения оптических осей прибора и отражателя. Центрировка осуществляется проектированием края отражателя на перекрестие юстировочного экрана вращением и перемещением центрирующего механизма штурвалами и суппортами прибора. Проекция края отражателя на экране не должна смещаться по высоте и в стороны от перекрестия. Более точная центрировка производится с помощью двух юстировочных короткофокусных коллиматоров, помещенных на центральной части балки прибора, которая несет фоторегистрирующий механизм.

Два узких пучка лучей, идущих из коллиматоров и отраженных поверхностью отражателя, должны совпадать в одной проекции на экране молочного стекла, установленном нормально к оптической оси и в фокальной плоскости отражателя.

Пучок лучей от источника Л (см. рис. 121) освещает отверстие диафрагмы Д, находящееся в фокусе объектива коллиматора О_K.

Фокусное расстояние объектива коллиматора 90 мм, диаметр отверстия диафрагмы 0,01—0,02 мм.

Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива коллиматора, направляется пентапризмой P на зеркало параллельно его оптической оси OS . Отражаясь от зеркала, пучок лучей фокусируется на фотопластинку Φ , плоскость которой параллельна оптической оси зеркала Z .

Т а б л и ц а 32

Границы зон, град	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
М, %	0	3	9	17	28	43

Прибор устроен так, что пентапризма и фотопластинка перемещаются взаимно перпендикулярно, как показано стрелками на рис. 121, отношение длин путей 10:1. Это позволяет на пластинке 13×18 см записать кривую aberrации отражателя диаметром до 300 см.

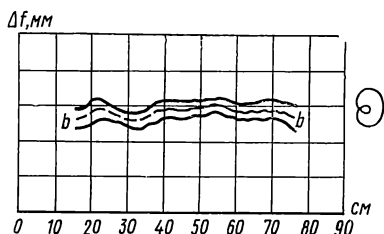


Рис. 122. Аберрограмма параболического зеркала

Интервалы смещения пентапризмы и фотопластинки могут быть отсчитаны по шкалам направляющих. При записи кривой продольной aberrации на фотопластинке через каждые 10 мм фиксируются отметки в виде коротких разрывов на кривой, которые образуются в результате отключения освещения отверстия в коллиматоре в моменты размыкания электросети кареткой пентапризмы, движущейся мимо контактов по направляющей прибора. Эти

отметки используют для контроля основного масштаба съемки с помощью сетки, проецируемой на фотопластинку, по которой затем и определяют величину aberrации и фокусного расстояния отражателя по зонам. Запись кривых aberrации начинают с определения астигматизма на зоне, наиболее «ценной» в световом отношении, обычно находящейся ближе к краю зеркала (табл. 32). Для этого пентапризму оставляют в покое и, вращая испытуемый отражатель вокруг оси, экспонируют путь отраженного пучка лучей на неподвижную фотопластинку, на которой образуется замкнутая кривая, напоминающая улитку, называемую кривой «улитки» астигматизма или аберрограммой зоны. Максимальный вертикальный диаметр «улитки» характеризует астигматизм отражателя. При отсутствии астигматизма на пластинке фиксируется точка.

Продольная (радиальная) aberrация записывается для двух радиусов отражателя, соответствующих максимальному и минимальному значениям астигматизма. При этом отражатель остается не-

подвижным, а перемещаются пентапризма и фотопластинка. Пучок лучей, идущих из коллиматора, перемещается параллельно самому себе вдоль радиуса отражателя. Чем меньше астигматизм, тем ближе кривые, записанные на фотопластинке.

На рис. 122 показана аберрограмма с двумя кривыми продольной абберации и «улитка» астигматизма (справа на рис. 122) для параболического отражателя диаметром 150 см и $f_d = 631$ мм.

Для определения продольной абберации по аберрограмме нужно найти f_d — действительное фокусное расстояние отражателя и получить методом интерполяции из двух кривых одну среднюю кривую продольной абберации. Фокусное расстояние f_d вычисляют, учитывая коэффициент ценности M зон, по формуле

$$f_{\pi} = (\sum f'_h M) / 100, \quad (91)$$

где f'_h — зональное фокусное расстояние отражателя; M — коэффициент ценности зон отражателя в процентах, равный произведению коэффициента M_c ценности зоны на коэффициент абберации $M_{\Delta f}$ по зонам; 100 — сумма коэффициентов ценности зон, %.

В центральной области отражателя фокусное расстояние не определяется, так как эта область экранируется источником света и в работе не участвует.

Действительный фокус зеркала располагается ближе к фокусам тех зон, в которых коэффициенты световой ценности и абберации больше.

Значения f_h снимают с аберрограммы по зонам, измеряя расстояния a от средней кривой продольной абберации (штриховая линия bb на рис. 122), до прямой, обозначающей номинальное (расчетное) фокусное расстояние отражателя, прибавляя или вычитая при этом a . Коэффициенты ценности зон M берут из табл. 32, составленной на основании многих опытов, проведенных для параболического зеркала с углом охвата 120° .

Вычисленное по формуле (91) значение f_d наносят на аберрограмму в виде прямой линии, от которой и измеряют истинные значения продольной абберации $\Delta f = f_{\pi} - f_d$ (табл. 33).

Т а б л и ц а 33

h , см	17	25	33	40	45	50	55	60	65	70	75
Δf , мм	−2,5	−0,9	−0,4	−0,9	−0,8	−0,9	−0,9	−0,8	−0,9	0,0	−1,5

§ 38. Оценка качества изображения оптической системы

Качество изображения оптической системы зависит как от дифракции света, так и от несовершенства системы (наличия остаточных аббераций, дефектов стекла), сборки и центрировки.

Важной количественной характеристикой качества изображения служит разрешающая способность. В последнее время в дополнение к разрешающей способности вводится более объективная характеристика — оптическая передаточная функция. Она показывает, с какими искажениями по амплитуде и фазе объектив передает сигналы синусоидальной формы, характерные для предмета с синусоидальным распределением яркости [4, 11, 35].

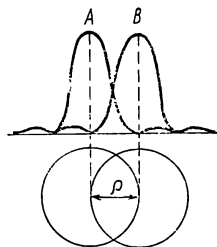


Рис. 123. К распределению световой энергии в дифракционном изображении точки

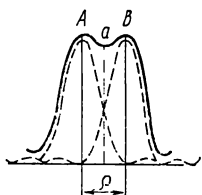


Рис. 124. Предельное положение изображений двух светящихся точек, построенных идеальной оптической системой

Остаточные aberrации вызывают перераспределение световой энергии в дифракционной картине, а внутренние дефекты объектива приводят к образованию вредного рассеянного света, накладывающегося на оптическое изображение, что понижает разрешающую способность и контраст изображения.

Разрешающей способностью оптической системы называется способность системы изображать отдельно две точки или две линии, расположенные в пространстве предметов. Мерой разрешающей способности служит наименьшее линейное или угловое расстояние между двумя точками (линиями), изображения которых отдельно строятся оптической системой.

Оптическую систему принято считать совершенной, если разрешающая способность ограничена только дифракцией света на краях оправы или апертурной диафрагмы. Дифракция света, обусловленная волновой природой света, нарушает прямолинейное распространение света; светящаяся точка изображается в виде круглого пятна, называемого кружком Эри, окруженного темными и светлыми кольцами убывающей яркости. Около 84 % световой энергии сконцентрировано в центральном пятне, 7 % — внутри первого светлого пятна и 9 % — в остальных кольцах [65].

Радиус ρ первого темного кольца в плоскости изображения определяется выражением

$$\rho = 1,22 \lambda f' / D,$$

где λ — длина волны света; f' — фокусное расстояние испытуемой системы; D — диаметр действующего отверстия системы.

Величина ρ равна расстоянию между центрами изображения двух точек A и B (рис. 123); ρ можно определить по формуле

$$\rho = 0,61 \lambda / \sin \sigma',$$

где σ' — апертурный угол в пространстве изображений.

При $\lambda = 0,56$ мкм

$$\rho \cong 0,34 / \sigma', \quad (92)$$

где ρ измеряется в микрометрах.

Угловая величина радиуса первого темного кольца

$$\psi = \rho / f',$$

при $\lambda = 0,56$ мкм

$$\psi = 140'' / D, \quad (93)$$

где D выражено в миллиметрах.

Из формулы (93) следует, что угловая величина радиуса первого темного кольца при постоянной длине волны света зависит только от диаметра D действующего отверстия объектива.

Изображения двух светящихся точек, построенные оптической системой, представляют собой два диска с нерезкими краями. По мере сближения точек диски соприкасаются, потом перекрываются и затем сливаются.

Глаз может видеть две точки в плоскости изображения раздельно при некотором минимальном расстоянии ρ между ними и необходимой разности освещенностей в точке минимума a и максимумов A или B (рис. 124). Контрастная чувствительность для среднего глаза равна 5%. Отношение освещенности в точке a к освещенности в точке A или B достигает 85%.

Обычно расстояния между центрами светлых дисков принимают равным радиусу первого темного кольца ρ . В этом случае максимум освещенности дисков падает на первые темные кольца, а отношение освещенности в точке минимума a к освещенности в точке максимума A или B составляет 75%.

Если рассматривать дифракционное пятно вдоль оптической оси системы, то в любом сечении оно имеет круглую форму с чередующимися темными и светлыми кольцами. Светлые центры колец находятся приблизительно посередине между темными центрами, расстояние между которыми

$$\Delta f = 2\lambda / \sigma'^2,$$

при $\lambda = 0,56$ мкм $\Delta f \approx 1,1 / \sigma'^2$, где Δf выражается в мкм.

Разрешающую способность оптических систем определяют с помощью штриховых или радиальных мир, представляющих собой стеклянные пластинки с нанесенными светлыми штрихами (рис. 125) или секторами (рис. 126) на темном фоне. Выпускают стандартные штриховые миры шести номеров. Каждая мира состоит из 25 элементов, оцифрованных по краям и имеющих по четыре группы штрихов с шириной штриха, меняющейся от одного элемента к другому. Под шириной штриха понимают осевое расстояние между двумя соседними темными или светлыми полосами, т. е. суммарная ширина темной и светлой полос равна ширине одного штриха. Группы штрихов в каждом элементе расположены по четырем направлениям: вертикальному, горизонтальному и под углом 45° в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вместо оцифровок 3, 11, 15 и 23 миры имеют штриховые отметки, называемые базами B .

Ширина штриха от номера к номеру миры меняется в следующем порядке: № 1 — от 50 до 200, № 2 — от 25 до 100; № 3 — от 12,5 до

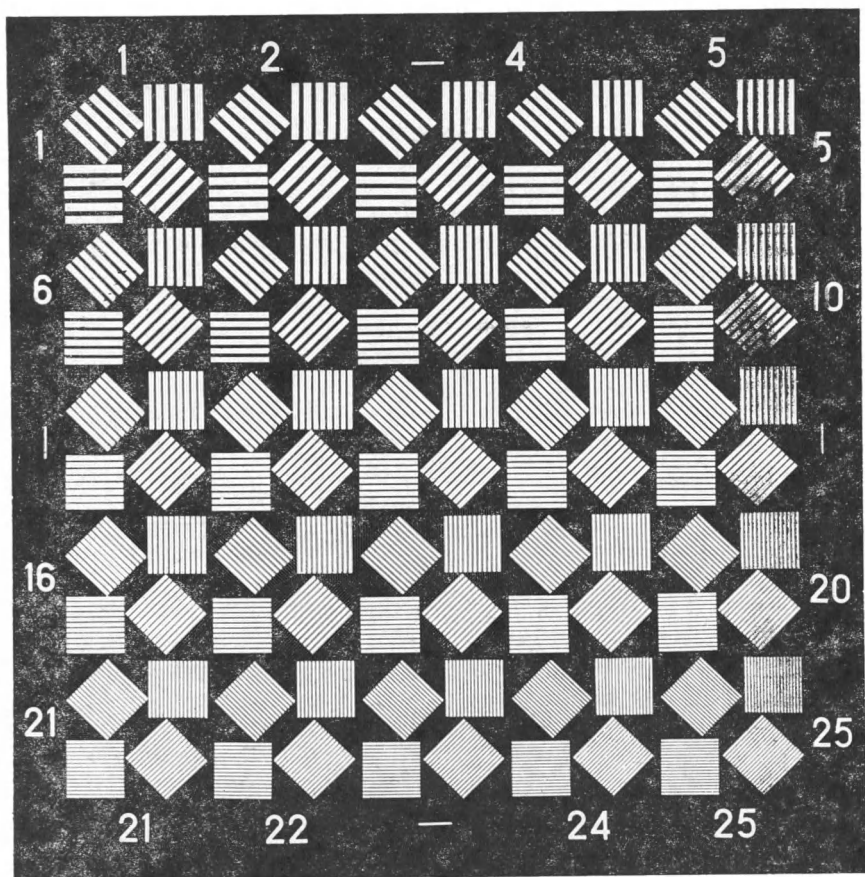


Рис. 125. Штриховая мира

50, № 4 — от 6,3 до 25, № 5 — от 3,1 до 12,5 и № 6 — от 1,6 до 6,3 штрихов на 1 мм.

Ширина штриха от элемента к элементу изменяется приблизительно на 6%. В стандартной мире в каждой из четырех групп элемента берется не менее 5 штрихов одинаковой длины, равной девятикратной ширине штриха. Все шесть номеров стандартных мир имеют абсолютный контраст $K=1$.

Если известно фокусное расстояние объектива коллиматора, используемого для определения разрешающей способности телескопических си-

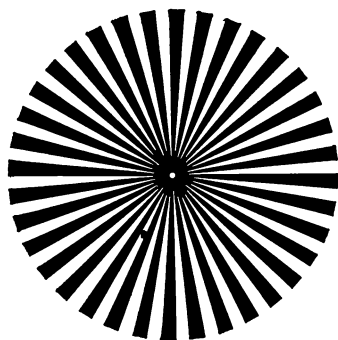


Рис. 126. Радиальная мира

стем, то можно заранее составить таблицу угловых величин ψ'' штрихов для всех 25 элементов каждой из шести мир, рассчитанных по формуле

$$\psi'' = a \cdot 206265 / f'_k, \quad (94)$$

где a — ширина штриха в мм; f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора.

Определение разрешающей способности объективов и телескопических систем. Разрешающую способность телескопической системы или отдельного объектива определяют визуально для центра

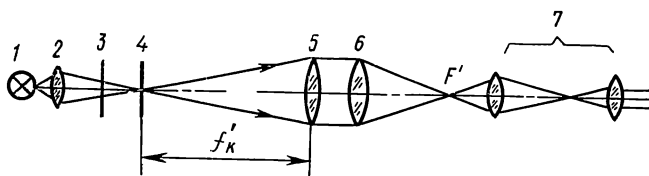


Рис. 127. Схема установки для определения разрешающей способности объектива

поля на оптической скамье с длиннофокусным объективом коллиматора, фокусное расстояние которого в 3—4 раза больше испытуемого объектива.

Схема установки для определения разрешающей способности объектива изображена на рис. 127. Штриховая (или радиальная) мира 4 устанавливается в фокальной плоскости объектива 5 коллиматора и освещается источником света 1 через конденсор 2 и матовое стекло 3.

Фокальная плоскость объектива коллиматора должна быть определена фокусировкой трубы на бесконечно удаленный объект. Наиболее простым и удобным способом фокусировки является автоколлимационный, осуществляемый с помощью плоскопараллельной пластинки, которую прижимают вплотную к оправе объектива, и автоколлимационного окуляра, установленного в выдвижном колене трубы коллиматора. Перемещая последний, добиваются наиболее точного совмещения автоколлимационного изображения марки окуляра с его перекрестием. Такое положение, соответствующее установке коллиматора на бесконечность, фиксируется отсчетом по шкале выдвижного колена трубы. Испытуемый объектив, закрепленный в объективодержателе оптической скамьи, приводят в соосное положение с объективом коллиматора как можно ближе к последнему.

Изображение мира, построенное в фокальной плоскости испытуемого объектива, рассматривают через микроскоп 7 с увеличением в 50—100 \times , снабженный винтовым окуляр-микрометром. Вначале окуляр устанавливают на резкое видение его шкалы и перекрестия, а затем, перемещая рейтер с микроскопом по направляющим оптической скамьи или только тубус микроскопа кремальберным винтом,

добиваются отчетливого изображения мира. Апертура объектива микроскопа должна быть равна или несколько больше апертуры испытуемого объектива. Например, для объектива с относительным отверстием 1 : 5 апертура микроскопа 0,1—0,2. Может оказаться, что все 25 элементов мира разрешаются или, наоборот, совершенно не разрешаются, тогда берут миру с большим или меньшим номером, по которой можно будет найти предельно разрешаемый элемент, расположенный в том или ином ряду. В этом элементе штрихи всех четырех направлений должны быть видны раздельно. По номеру разрешаемого элемента из таблицы, рассчитанной по формуле (94), находят величину разрешающей способности испытуемого объектива в угловой мере. Если такой таблицы нет, то разрешающую способность определяют измерением интервала группы штрихов любого направления в разрешаемом элементе винтовым окуляр-микрометром, работающим совместно с объективом микроскопа, т. е. как микроскоп-микрометр. Следует иметь в виду, что цена деления барабана окуляр-микрометра меняется в зависимости от увеличения объектива микроскопа, поэтому ее надо определять при каждой смене объектива. Для нахождения цены деления измеряют известный интервал шкалы или объект-микрометра (шкалы с ценой деления 0,01 мм), установленной в предметной плоскости микроскопа.

Значение цены деления барабана τ вычисляют по формуле

$$\tau = tn/a,$$

где t — цена деления шкалы или объект-микрометра; n — число измеренных делений в выбранном интервале шкалы; a — разность отсчетов по шкале и барабану окуляр-микрометра при шаге винта 1 мм.

Затем окулярным микрометром измеряют интервал l группы разрешаемых штрихов в элементе мира и по формуле

$$l' = l\tau/m \quad (95)$$

находят ширину l' одного штриха в изображении. Здесь m — число штрихов в группе разрешаемого элемента мира.

Угловую величину разрешающей способности испытуемого объектива находят по формуле

$$\psi' = l' 206265/f',$$

где f' — фокусное расстояние испытуемого объектива; l' — ширина измеренного штриха в плоскости изображения.

Чтобы определить разрешающую способность в штрихах на 1 мм, нужно взять величину, обратную l' : $N = 1/l'$, штр/мм, или измерить величину изображения базы B' мира (расстояние между крайними штриховыми отметками), и вычислить N по формуле

$$N = 60 K/B',$$

где K — коэффициент номера элемента стандартной мира, взятой из табл. 34.

Таблица 34

В качестве примера приведем результаты измерения разрешающей способности объектива с $f' = 602$ мм, диаметром входного зрачка $D = 80$ мм; $D : f' = 1 : 7,5$. В табл. 35 приведены результаты измерения цены деления барабана винтового окуляр-микрометра ($n = 70$, $\tau = 0,01$ мм).

В табл. 36 приведены результаты измерений группы штрихов 8-го элемента мира № 2 (число штрихов $m = 6,5$).

Средняя величина ширины штриха $l' = 0,0098$ мм получена по формуле (95). Зная фокусное расстояние испытуемого объектива $f' = 602$ мм, находим разрешающую мир по формуле $\psi' = l' 206265 / f' \approx 3,4''$.

№ элемен- та	K	№ элемен- та	K
1	1,0	14	2,1
2	1,06	15	2,2
3	1,12	16	2,4
4	1,19	17	2,5
5	1,26	18	2,6
6	1,3	19	2,8
7	1,4	20	3,0
8	1,5	21	3,2
9	1,6	22	3,4
10	1,7	23	3,6
11	1,8	24	3,8
12	1,9	25	4,0
13	2,0		

способность в угловой

Таблица 35

№ приемов	Отсчеты		Разность отсчетов a	τ , мм
	A_1	A_2		
1	769,5	103,0	666,5	0,00105
2	770,0	105,0	665,0	0,00105
3	768,0	102,0	666,0	0,00105
4	768,5	103,0	665,5	0,00105
5	769,0	103,5	665,5	0,00105
Среднее	769,0	103,3	665,7	0,00105

Таблица 36

№ приемов	Отсчеты		l	l' , мм
	A_1	A_2		
1	491,0	430,3	60,7	0,00977
2	84,5	24,5	60,0	966
3	86,2	25,0	61,2	985
4	86,2	25,2	61,0	982
5	86,1	24,5	61,6	992
Среднее	486,8	425,9	60,9	0,00980

Теоретическая разрешающая способность безаберрационного объектива $\psi = 120''/D = 120''/80 = 1'',5$; фактически же получено значение $3,4''$, что указывает на низкое качество объектива.

Разрешающую способность телескопической системы (зрительной трубы, бинокля, теодолита, нивелира и др.) можно определить также на оптической скамье. Фокусное расстояние объектива коллиматора выбирают в зависимости от увеличения контролируемой системы. Так, при увеличении системы до $10\times$ фокусное расстояние объектива должно быть равно 600 мм, от 10 до $20\times$ — 1000 мм, от 20 до $45\times$ — 1600 мм и от 45 до $60\times$ — 2500 мм.

Контролируемую телескопическую систему 6 (рис. 128) устанавливают на оптическую скамью соосно с объективом 5 коллиматора и фокусируют по изображению штриховой миры 4, расположенной в фокальной плоскости объектива коллиматора. Изображение миры, находящееся в фокальной плоскости F объектива телескопической системы, рассматривают через окуляр с помощью вспомогательной зрительной трубы 7 с увеличением, позволяющим исключить ограниченность разрешающей способности глаза наблюдателя на результаты измерений.

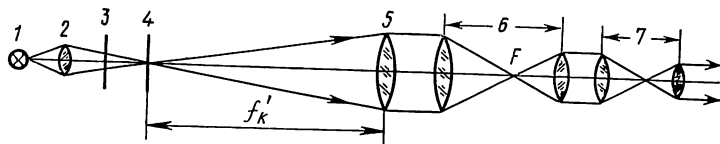


Рис. 128. Схема установки для определения разрешающей способности телескопической системы

Необходимо учитывать, что диаметр выходного зрачка телескопической системы может быть больше диаметра зрачка глаза, тогда разрешающая способность ψ определяется выражением

$$\psi = \psi_{\text{гл}} / \bar{\Gamma}$$

где $\psi_{\text{гл}}$ — разрешающая способность глаза; $\bar{\Gamma}$ — увеличение телескопической системы.

Принимая $\psi_{\text{гл}} = 60''$, получаем

$$\psi = 60'' / \bar{\Gamma}.$$

Так как окуляр не влияет на разрешающую способность объектива зрительной трубы, то методика ее определения для окуляра такая же, как и для отдельного объектива.

Разрешающую способность телескопической системы можно определить и без длиннофокусного коллиматора. Для этого миру устанавливают не ближе чем на 30-кратном фокусном расстоянии от объектива трубы и ведут такие же наблюдения, как если бы мира находилась в фокусе объектива коллиматора.

В этом случае величина разрешающей способности

$$\psi'' = l \, 206265 / L,$$

где l — размер разрешаемого штриха миры, мм; L — расстояние от объектива трубы до миры, мм.

Кроме разрешающей способности по изображению штрихов миры можно одновременно оценить качества изображения испытуемого объектива и выявить недостатки в изображении: астигматизм, кривизну изображения, кому, ореолы, хроматизм, двоение изображения, фон, созданный рассеянным светом, размытость изображения и т. д.

Астигматизм определяется разностью между разрешающей способностью объектива для вертикальных и горизонтальных штрихов. Так, если разрешающая способность в вертикальной плоскости составляет 5,5'', а в горизонтальной 3,5'', то астигматизм равен 2''.

Кривизна изображения определяется разностью между разрешающей способностью на оптической оси и по полю; например, при 0° на оси для вертикальных штрихов разрешающая способность объектива равна 5,5'', а при 3°—19,5''. Следовательно, кривизна изображения для вертикальных штрихов составляет 14,0''.

При наличии комы штрихи миры и точки на ней вытянуты в одну сторону. Сферическая аберрация характеризуется ореолами, образующимися вокруг изображения штрихов, а хроматизм объектива — цветной окраской краев изображения в виде фиолетовых, зеленых и красных полос. Фон наблюдается в виде слабого бесцветного или цветного рассеянного света по всему полю.

Оценка качества изображения нередко имеет субъективный характер и во многом зависит от опытности наблюдателя.

Определение разрешающей способности лупы и микроскопа. Лупа предназначена для рассматривания мелких предметов. Диаметр действующего отверстия лупы в большинстве случаев больше диаметра зрачка глаза, особенно у луп малого и среднего увеличения [66]. Разрешающая способность лупы

$$\psi''_л = \psi''_н / \bar{\Gamma},$$

где $\psi''_н$ — разрешающая способность нормального глаза; $\bar{\Gamma}$ — увеличение лупы.

Разрешающая способность нормального глаза равна приблизительно 60''.

Если увеличение лупы 6 \times , то ее разрешающая способность равна 10''. Практически разрешающую способность лупы определяют, рассматривая через нее штриховую миру, расположенную вблизи фокальной плоскости, изображение которой находится на расстоянии наилучшего видения, равного 250 мм. Оценку ведут по отдельно видимым штрихам элемента миры.

Разрешающую способность объектива микроскопа определяют в линейной мере. Для несамосветящихся объектов предел разрешения

$$d \approx \lambda / A,$$

где A — числовая апертура, равная произведению показателя преломления n среды между объективом и предметом и $\sin \sigma$.

При наблюдении периодической структуры наименьшее расстояние d согласно теории Аббе [37, 65] зависит от апертуры объектива и апертуры конденсора:

$$d = \lambda / (A + A_k),$$

где A_k — числовая апертура конденсора.

Если апертура конденсора равна апертуре объектива, то разрешающая способность микроскопа для самосветящихся объектов определяется формулой

$$d = \lambda / (2A).$$

Из приведенных формул следует, что, чем короче длина волны света и больше апертура объектива, тем выше разрешающая способность объектива микроскопа.

Для увеличения разрешающей способности микроскопа можно использовать иммерсионные жидкости, которые заполняют пространство между рассматриваемым предметом и объективом микроскопа. Благодаря этому числовая апертура объектива микроскопа может быть доведена до 1,6, а предельное разрешаемое расстояние при $\lambda = 0,56$ мкм — до $d = 0,17$ мкм.

Разрешающую способность объектива микроскопа часто определяют при рассмотрении мелкоструктурных естественных препаратов, например крыльев бабочек и диатомовых водорослей. Используют также решетки (миры) — стеклянные пластинки, состоящие из 19 групп нормальных штрихов различной ширины.

Выбранный естественный препарат или решетку помещают на предметный столик и рассматривают в микроскоп. Определение разрешающей способности микроскопа при рассмотрении естественных препаратов носит только качественный характер. Количественную оценку дает штриховая мира.

Номер известного элемента миры или измеренное расстояние между двумя соседними темными или светлыми штрихами миры, помещенной в предметной плоскости объектива, характеризует разрешающую способность микроскопа.

Т. И. Соколова [1] предложила автоколлимационный метод определения разрешающей способности объективов микроскопов по штриховым мирам с малым числом штрихов на мм (40—100 лин/мм), помещаемым в плоскости изображения испытуемого объектива. При этом разрешающая способность объектива в пространстве изображения

$$d = 0,61 \lambda / A', \quad (95')$$

где A' — числовая апертура объектива в пространстве изображения, равная A/β — апертуре объектива в пространстве предметов, деленная на увеличение объектива. Таким образом, формулу (95) можно представить в виде

$$d = 0,61 \lambda \beta / A.$$

Из этой формулы видно, что разрешающая способность объектива в пространстве изображения в β раз меньше, чем в пространстве предметов, и что могут быть применимы миры с небольшим числом штрихов на мм. Для испытания объективов с различным увеличением и апертурой достаточно иметь набор из трех штриховых мир с девятью элементами штрихов. Так, например, для испытания объективов $90 \times 1,30$; $90 \times 1,25$ мира должна иметь 44—36 штрихов на 1 мм.

Схема установки для автоколлимационного метода изображена на рис. 129. Пучок лучей от источника света L , пройдя конденсор K , освещает мир M и падает на куб-призму Π . Здесь частично отражается от полупрозрачной гипотенузы куба и проходит испытуемый объектив O . В предметной плоскости, где установлено плоское зеркало $З$, объектив строит уменьшенное изображение мира. Отразившись от зеркала и снова пройдя испытуемый объектив, пучок лучей идет через призму-куб и строит в фокальной плоскости M' окуляра O_K автоколлимационное изображение мира в масштабе 1:1. Расстояния от объектива микроскопа O до мира M и до ее изображения M' равны.

Величина разрешающей способности объектива оценивается по разрешаемому элементу мира, значение которого известно из предварительных измерений или может быть измерено в плоскости изображения M' винтовым окуляр-микрометром.

Заменяя в схеме (рис. 129) плоское зеркало на сферическое, можно определить также внеосевую разрешающую способность объектива, т. е. по полю.

Определение разрешающей способности фотографического объектива. Разрешающая способность фотографического объектива определяется в линейной мере числом штрихов или линий, раздельно видимых в интервале 1 м, по формуле

$$N = 1/d = D/(1,22 \lambda f').$$

Разделив числитель и знаменатель на D и принимая $\lambda = 0,56$ мкм, находим:

$$N = 1475/K, \quad (96)$$

где $K = f'/D$ — диафрагменное число.

Формула (96) служит для оценки разрешающей способности совершенных (безабберационных) объективов в центре поля. Если система имеет значительный угол ω поля зрения, то разрешающая способность по полю изменяется в зависимости от направления штрихов мира и их проекции в плоскости изображения.

Для штрихов, расположенных в меридиональной (вертикальной) плоскости, разрешающая способность

$$N_B = \frac{1475}{K} \cos^3 \omega. \quad (97)$$

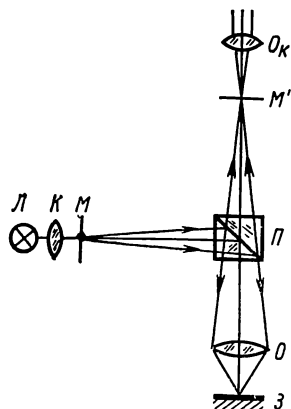


Рис. 129. Определение разрешающей способности объективов микроскопов автоколлимационным методом

Для штрихов, расположенных в сагиттальной (горизонтальной) плоскости, разрешающая способность

$$N_r = \frac{1475}{K} \cos \omega. \quad (98)$$

Здесь N_v и N_r — соответственно число штрихов в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Из практики известно, что все реальные фотографические объективы имеют значительные остаточные аберрации и светорассеяние, которые понижают разрешающую способность объектива.

Дифрагмирование (уменьшение действующего отверстия объектива) приводит к повышению разрешающей способности за счет устранения влияния аберраций от крайних зон, но до известного предела, затем начинает сказываться действие дифракции света, и разрешающая способность снова уменьшается.

Так как фотографические объективы предназначены для построения изображения на фотослое, то разрешающую способность определяют фотографическим методом. Для определения разрешающей способности объектива желательно использовать слои, с которыми объектив должен работать на практике. Вследствие зернистости фотослоя фотографическая разрешающая способность значительно меньше визуальной.

Из опыта известно, что фотографическая разрешающая способность объектива зависит не только от разрешающей способности фотослоя, но и от контраста и формы миры, условий освещения и проявления.

Под контрастом миры понимают отношение разности между E_{\max} и E_{\min} освещенностями к максимальной освещенности, измеренными в серединах светлой и темной полос:

$$K = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\max}.$$

Зная разрешающую способность фотослоя N_c и объектива $N_{\text{виз}}$ (визуальную), можно подсчитать ожидаемую $N_{\text{фс}}$ фотографическую разрешающую способность объектива по приближенной формуле

$$1/N_{\text{фс}} \approx 1/N_c + 1/N_{\text{виз}}.$$

Фотографическую разрешающую способность объектива определяют с помощью коллиматора. В фокальную плоскость объектива коллиматора помещают штриховую миру (см. рис. 125). Фокусное расстояние объектива коллиматора должно быть в 3—4 раза больше испытываемого.

Испытуемый объектив, укрепленный в кольце объективодержателя, устанавливают задней узловой точкой над осью вращения поворотного рычага оптической скамьи. При испытании телеобъектива последний устанавливают так, чтобы при вращении его вместе с поворотным рычагом передняя поверхность объектива не выходила из светового пучка, идущего от объектива коллиматора.

На оправу испытываемого объектива, в ходе пучка лучей или между мирой и источником света, ставят тот светофильтр, который

должен работать с объективом. С помощью микроскопа и матового стекла фокусируют объектив до резкого изображения мира в центре поля. После удаления микроскопа и матового стекла помещают кассету, заряженную фотопластинкой или пленкой.

Съемки мира выполняют с одинаковыми выдержками при осевом (центральной) положении объектива, устанавливая его в симметричные относительно оси положения. Установка объектива под углом к оси производится, например, через 5° , если угол поля зрения объектива больше 20° , или через $2,5^\circ$, если этот угол меньше 20° .

В случае сильного падения освещенности на краях изображения, когда появляются трудности в дешифровании снимков и оценке разрешающей способности, миру экспонируют при переменных выдержках с таким расчетом, чтобы оптическая плотность изображения была приблизительно одинакова по полю и равна единице.

Так как визуальная фокусировка не совпадает с фотографической, то после первого цикла съемок мира производят расфокусировку объектива, смещая его вдоль оси от первоначального положения (визуального фокуса) каждый раз на величину $\Delta f'$. Так, для объективов с $f' = 300$ мм расфокусировка ведется через 0,2—0,3 мм, для объективов с $f' = 200$ мм — через 0,1—0,05 мм.

Расфокусировку объектива можно производить с помощью коллиматора (что более удобно), смещая выдвижку с мирой на величину

$$\Delta f'_k = (f'_k / f')^2 \Delta f',$$

где f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора; f' — фокусное расстояние испытуемого объектива.

Таким образом, для всех смещений объектива получают несколько снимков мира, которые затем дешифруют с помощью микроскопа 15—20 \times увеличения.

Снимки дешифруют от крупных штрихов мира к мелким. За предельное разрешение принимают тот элемент мира, в котором штрихи разрешены по всем четырем направлениям и в каждом направлении можно сосчитать число штрихов. При оценке качества изображения или при определении астигматизма снимки дешифруют до предельно разрешаемых штрихов любого направления. В случае провала или инверсии в изображении мира за предельное значение разрешения принимают предшествующий элемент без провалов и инверсий.

Под провалом понимают случай, когда среди разрешаемых элементов встречается элемент, в котором штрихи неразличимы. Под инверсией понимают случай обращения черных штрихов в белые. Эти явления возникают чаще всего от особенностей распределения освещенности в изображении штрихов мира. В результате расшифровки всех снимков выбирают плоскость наилучшего изображения объектива.

Для целей аэрофотосъемки плоскость наилучшего изображения выбирают по максимальной разрешающей способности по полю. В табл. 37 приведена фотографическая разрешающая способность

$N_{\text{фс}}$, выраженная числом штрихов на мм, объектива «Руссар-29», по полю со смещениями объектива $\Delta f' = 0,05$ мм ($f' = 70$ мм, $D/f' = 6,8$ мм, пластинка «Изоорто»). Значения $\Delta f'$ со знаком плюс обозначают удаления объектива от визуального фокуса и с минусом — приближения к фокусу.

Для каждого ряда полученных значений $N_{\text{фс}}$ можно построить график, откладывая по оси абсцисс углы поворота, а по оси ординат — $N_{\text{фс}}$, штр/мм.

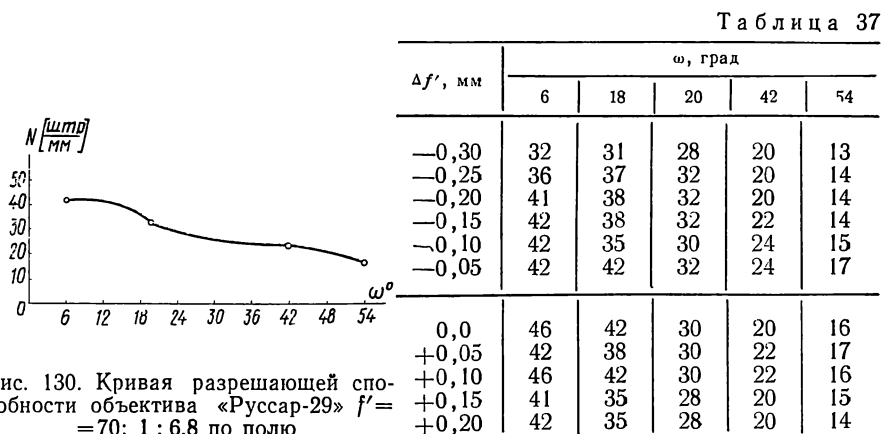


Рис. 130. Кривая разрешающей способности объектива «Руссар-29» $f' = 70$; $1 : 6,8$ по полю

Таблица 38

Направление штрихов	Углы, град			
	20	30	40	55
	Поправочные коэффициенты			
Горизонтальное	0,940	0,866	0,766	0,574
Вертикальное	0,883	0,750	0,587	0,329
Под углом 45°	0,903	0,901	0,615	0,463

На рис. 130 изображен график для плоскости наилучшего изображения, построенный с учетом наибольшего контраста изображения по полю, при смещении объектива от визуального фокуса на 0,05 мм (см. черту в табл. 37).

При определении фотографической разрешающей способности объектива с углом поля зрения больше 50° требуется вводить поправки на изменение проекции изображения различных направлений штрихов миры в фокальной плоскости объектива при углах поворота и изменения положения последнего по отношению к миру коллиматора.

В табл. 38 приведены поправочные коэффициенты, вычисленные по формулам (97) и (98), на которые следует умножать полученные значения $N_{\text{фс}}$ по различным направлениям. Поскольку оценка разрешающей способности производится по элементу со штрихами, различимыми по четырем направлениям, то можно поправочные коэффициенты взять средние для элементов, состоящих из вертикальных и горизонтальных штрихов.

Определение фотографической разрешающей способности испытуемого объектива по радиальной мере сводится к измерению диаметра кружка размытия α на снимке по двум взаимно перпендикулярным направлениям и вычислением их среднего значения. Измерения ведут на любом измерительном микроскопе с увеличением 15—20 \times . Чтобы получить разрешение, выраженное числом штрихов на мм, можно использовать формулу

$$N = n/(\pi d),$$

где n — число пар (темный плюс светлый) секторов. (На рис. 126 изображено 36 секторов.)

Пересчет в угловую меру производят по формуле

$$\varphi'' = \pi d \cdot 206265 / (f' n),$$

где f' — фокусное расстояние испытуемого объектива.

Определение разрешающей способности проекционного объектива. Проекционный объектив должен обладать хорошим исправлением аберраций, повышенной ортоскопией, высокой разрешающей способностью, равномерным распределением освещения в изображении по полю и минимальным виньетированием.

Разрешающую способность проекционного объектива определяют так же, как и разрешающую способность фотографического объектива — путем фотографирования штриховой меры. Однако проекционные объективы, используемые в диаскопах или эпидиаскопах, целесообразно проверять по разрешающей способности, рассматривая изображение меры на экране, устанавливаемом на расстоянии, соответствующем кратности увеличения объектива. Наблюдатель, рассматривающий проекционное изображение на минимальном расстоянии L до экрана, должен видеть отдельно штрихи элемента меры.

Разрешающая способность объектива N , выраженная числом штрихов на миллиметр, определяется по формуле

$$N \geq \beta / (\varphi_{\text{гд}} L),$$

где β — линейное увеличение; $\varphi_{\text{гд}}$ — разрешающая способность глаза в радианах, равная $\approx 0,0003$; L — минимальное расстояние от глаза наблюдателя до экрана. При кинопроекции минимальное расстояние $L = 1,5$ ширины рабочей части экрана.

При испытании эпидиаскопического прибора в отраженном свете штриховая мера должна быть изготовлена на фотобумаге с максимальным контрастом.

§ 39. Оптическая передаточная функция и ее измерение *

Применение преобразования Фурье в теории оптического изображения привело (по аналогии с теорией связи) к понятию переда-

* § 39 написан Г. В. Креопаловой.

точной функции в оптике. Процесс образования изображения, создаваемого оптической системой (объективом), стали рассматривать подобно преобразованию сигналов линейными электрическими элементами. В этом случае объектив рассматривают как линейный элемент, на входе которого имеется синусоидальный сигнал определенной амплитуды и заданной частоты. На выходе согласно общей теории линейных систем сигнал также будет синусоидальным, но с измененной амплитудой и сдвинут по фазе по отношению к входному сигналу.

Для оптических систем в отличие от систем теории связи или автоматического регулирования вместо синусоидального входного сигнала, изменяющегося как функция времени, рассматривают предмет с синусоидальным распределением яркости, а в качестве выходного сигнала — изображение, созданное объективом с синусоидальным распределением освещенности. Следовательно, временную частоту заменяют пространственной частотой и одномерную систему (время) двухмерной (плоскостью). Учитывая сказанное, оптическая передаточная функция $\tilde{A}(N_x, N_y)$ по определению передаточной функции есть отношение выходного сигнала к входному в частотном представлении:

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = \tilde{E}(N'_x, N'_y) / \tilde{L}(N_x, N_y), \quad (97')$$

где $\tilde{E}(N_x, N_y)$ и $\tilde{L}(N_x, N_y)$ — соответственно распределение освещенности изображения (выходной сигнал) и яркости предмета (входной сигнал), преобразованные по Фурье (\sim означает преобразование); N'_x, N'_y — пространственные частоты изображения, N_x, N_y — пространственные частоты предмета по направлениям координатных осей, равные обратной величине периода изменения яркости предмета или освещенности изображения в мм^{-1} (линиях на мм), при этом пространственная частота в пространстве предметов N и пространственная частота в пространстве изображений N' связаны линейной зависимостью:

$$N' = \beta N, \quad (98')$$

где β — линейное увеличение оптической системы.

Таким образом, оптическая передаточная функция определяет степень действия системы на сигнал синусоидальной формы, т. е. характеризует изменение сигналов, проходящих через оптическую систему, по амплитуде и фазе для различных пространственных частот.

Если распределение яркости предметов выразить функцией $L(x, y)$, то распределение освещенности $E(x', y')$ изображения для некогерентного излучения можно получить в виде суммы освещенностей, даваемых каждым из изображений точечных объектов. При условии, что аберрации оптической системы незначительно изменяются по полю, т. е. при соблюдении условия изопланатизма, освещенность изображения любой точки предмета с координатами x, y можно представить функцией $A(x' - x^*, y' - y^*)$, называемой функцией рассеяния, где координаты x^* и y^* относятся к плоскости изображения: $x^* = \rho x$, $y^* = \beta y$. Математическое выражение оптической

передаточной функции можно получить из основного уравнения образования изображения, рассматривая предмет как совокупность самосветящихся точечных объектов (некогерентное излучение). Учитывая, что предмет неограничен, можно записать:

$$E(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x' - x^*, y' - y^*) L(x, y) dx dy.$$

Это выражение называют сверткой функций A и L . Известно, что если функция равна свертке двух других функций, то ее преобразование Фурье равно произведению преобразований Фурье этих функций:

$$\tilde{E}(N_x, N_y) = \tilde{A}(N_x, N_y) \tilde{L}(N_x, N_y)$$

или

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = \tilde{E}(N_x, N_y) / \tilde{L}(N_x, N_y),$$

т. е. получено выражение, аналогичное соотношению (97), где $\tilde{A}(N_x, N_y)$ — преобразование Фурье функции рассеяния объектива. Следовательно, оптическая передаточная функция выражена преобразованием Фурье функции рассеяния объектива:

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(x', y') e^{-i2\pi(N_x x' + N_y y')} dx dy \dots \quad (99)$$

Из (99) следует, что непериодическая функция $A(x', y')$ представлена совокупностью бесконечного числа бесконечно близких по пространственной частоте синусоидальных составляющих. Используя формулу Эйлера, выражение (99) можно записать с помощью модуля и аргумента:

$$\tilde{A}(N_x, N_y) = |\tilde{A}(N_x, N_y)| e^{i\varphi(N_x, N_y)} = T(N_x, N_y) e^{i\varphi(N_x, N_y)}$$

Модуль $T(N_x, N_y)$ оптической передаточной функции (ОПФ) показывает зависимость амплитуды сигнала от пространственной частоты и может быть назван амплитудно-частотной характеристикой оптической системы. Так как амплитуда сигнала пропорциональна коэффициенту передачи контраста (коэффициенту передачи модуляции), то $T(N_x, N_y)$ называют также частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) или функцией передачи модуляции (ФПМ). Коэффициент передачи контраста (модуляции) определяют отношением контраста изображения к контрасту предмета на определенной пространственной частоте, при этом контраст синусоидального объекта вычисляется по формуле

$$K = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где I_{\max} и I_{\min} — соответственно максимальная и минимальная интенсивности (яркость предмета или освещенность изображения).

Аргумент $\varphi(N_x, N_y)$ ОПФ является фазо-частотной характеристикой оптической системы, показывающей зависимость изменения

фазы сигнала, прошедшего через оптическую систему, от пространственной частоты. Аргумент ОПФ называют функцией передачи фазы (ФПФ), или частотно-фазовой характеристикой, или просто фазовой характеристикой оптической системы. Для примера на рис. 131 дано графическое представление ФПМ — $T(N)$ и ФПФ — $\varphi(N)$ по одному направлению плоскости изображения.

Если функция рассеяния $A(x', y')$ симметрична, то, как легко можно убедиться из формулы (99), $\varphi(N_x, N_y) = 0$. При несимметричной функции $A(x', y')$, что имеет место при наличии несимметричных aberrаций (например,

абберации кома), функция $\varphi(N_x, N_y)$ отлична от нуля. В высококачественных объективах фазовые изменения незначительны. Для таких объективов определяющей характеристикой является ФПМ. При исследованиях объективов по ФПМ используют различные графические представления зависимости коэффициента передачи модуляции

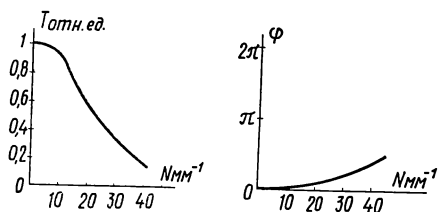


Рис. 131. Графики функций передачи модуляции $T(N)$ и функции передачи фазы оптической системы $\varphi(N)$

(КПМ) от пространственной частоты, позволяющие выделить выбранные для оценки качества изображения параметры.

Например, при оценке качества изображения, создаваемого объективом в одной плоскости (плоскость наилучшего изображения), результаты измерений представляют в виде кривых зависимость КПМ (T_N) от пространственной частоты (N) для точки на оси, точек поля в двух главных сечениях (меридиональном и сагиттальном), для различных длин волн λ , для различных относительных отверстий и т. д. [35]. ФПМ объектива представляют в виде фокусирующих кривых, показывающих зависимость T_N от расфокусировки Δ для различных пространственных частот в разных точках поля в меридиональном и сагиттальном сечениях и т. д. Сопоставляя ФПМ для различных плоскостей установки, точек поля, спектральных областей, можно определить астигматизм, кривизну поля, хроматическую и сферическую aberrации объектива.

Оптическая передаточная функция дает наиболее полную и наглядную информацию об оптической системе. Достоинством ОПФ является также и то, что оценка сложных систем по ОПФ, состоящих из отдельных линейных элементов, производится по ОПФ всей системы в целом. Произведение ОПФ каждого элемента определяют ОПФ всей системы:

$$\tilde{A}_c(N) = \prod_{i=1}^n A_i(N),$$

где n — число элементов; N — пространственная частота для одного направления.

Например, если фотоаппарат рассматривать как оптико-механическую систему, состоящую из следующих основных элементов: объектива, затвора, фотопленки, каждый из которых можно охарактеризовать своей передаточной функцией, то ФПМ фотоаппарата

$$T_{\phi}(N) = T_o(N) \cdot T_z(N) \cdot T_{пл} = (N),$$

где $T_o(N)$, $T_z(N)$, $T_{пл}(N)$ — соответственно ФПМ объектива, затвора и пленки.

Для экспериментального определения ОПФ (модуля ФПМ и аргумента ФПФ) разработан ряд методов, основанных на использовании гармонического анализа изображения, интерференции, голо-

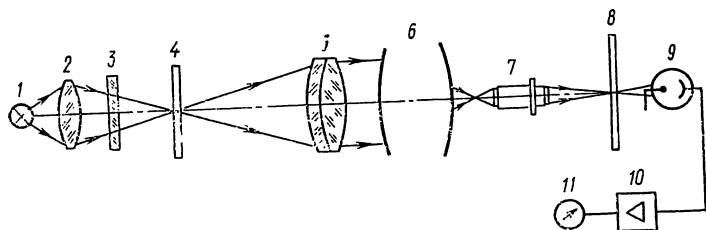


Рис. 132. Принципиальная схема измерения функции передачи модуляции оптической системы фотоэлектрическими методами

графии. Практическое применение нашли фотоэлектрические методы, основанные на гармоническом анализе изображения, создаваемом исследуемым объективом. Принцип таких методов заключается в том, что бесконечно удаленный тест-объект проецируется исследуемым объективом в плоскость наилучшего изображения, где сканируется анализатором изображения. Затем световой поток преобразуется фотоэлектронным приемником, передающим электрические сигналы с усилением (или без) на регистрирующий прибор, фиксирующий амплитуду модулированного светового потока, пропорциональную КПМ. Принципиальная схема установки для определения ОПФ приведена на рис. 132. Тест-объект 4, расположенный в фокальной плоскости объектива коллиматора 5, освещается с помощью конденсора 2 источником света 1. Изображение тест-объекта, созданное исследуемым объективом 6 в плоскости наилучшего изображения, проецируется микрообъективом 7 в плоскость сканирующего анализатора 8.

Световые сигналы, пройдя через фотоэлектронный приемник 9, преобразуются в электрические, последние поступают на усилитель 10 и регистрируются прибором 11. В качестве регистрирующего прибора может быть использован гальванометр, измеряющий амплитуду сигнала, осциллограф или самописец, фиксирующие весь сигнал. Светофильтр 3 используют для согласования спектральных характеристик источника света и приемника.

При измерении ОПФ используют одномерные объекты, в которых яркость меняется в одном направлении, поэтому будем рассмат-

ривать пространственную частоту по одной координате в направлении сканирования.

В установках для измерения ОПФ в качестве тест-объекта 4 используют решетки, яркость которых изменяется по синусоидальному закону вдоль одной из координатных осей. Решетки имеют различные пространственные частоты. При этом анализатором является сканирующая щель, ширина которой не должна превышать четверти периода решетки с наибольшей пространственной частотой. Также используют точечный объект или щель, изображение которых представляет собой соответственно пятно или линию рассеяния. Тогда анализатором служит маска (решетка), пропускание которой изменяется по синусоидальному закону. Изменяя пространственные частоты решетки и измеряя амплитуды модулированных сигналов для различных пространственных частот, проводят гармонический анализ функции распределения освещенности в изображении точечного источника или щели, т. е. определяют ФПМ.

ФПФ, которая характеризует поперечный сдвиг изображения, измеряется с помощью специальных отметок на тест-объекте или с помощью опорного сигнала на анализаторе. Отметки и опорный сигнал обеспечивают отсчет начальной фазы. Сложность изготовления синусоидальных решеток и зависимость результатов измерения от точности их изготовления привели к применению простых периодических решеток с прямоугольным распределением яркости, изготовление которых не представляет трудности.

В зависимости от способа выделения синусоидальных составляющих различают метод непосредственного сканирования, метод гармонического анализа электрическим фильтром, метод гармонического анализа пространственным фильтром.

Метод непосредственного сканирования. В качестве тест-объекта 4 (рис. 132) используют прямоугольные миры. Функцию $L(x)$ распределения яркости в прямоугольной миры можно разложить с помощью ряда Фурье на отдельные синусоидальные составляющие, которые передаются объективом с различными коэффициентами передачи модуляции:

$$L(x) = \frac{L}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi x}{p} + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{2\pi x}{p} + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{2\pi x}{p} + \dots \right),$$

где p — период изменения яркости; x — текущая координата в направлении периодичности. Амплитуды синусоидальных составляющих (гармоник) пропорциональны $1, 1/3, 1/5, \dots$; пространственные частоты соответственно равны $1/p, 3/p, 5/p, \dots$. Пространственную частоту прямоугольной миры определяют по числу светлых или темных полос, приходящихся на 1 мм.

Выделяя первую гармонику прямоугольной миры путем пропускания сигнала через электрический фильтр, настроенный на временную частоту этой гармоники, и меняя миры, имеющие различные пространственные частоты, производят изменение ОПФ по синусоидальным сигналам.

Пространственную частоту варьируют, либо заменяя прямоугольные миры с различными пространственными частотами, настраивая электрический фильтр на первую гармонику каждой миры, либо используют прямоугольные миры с переменной частотой штрихов. В последнем случае необходимо изменять скорость сканирования изображения так, чтобы временная частота f оставалась постоянной:

$$f = Nv = \text{const},$$

где v — скорость сканирования изображения; N — пространственная частота первой гармоники прямоугольной решетки в плоскости изображения исследуемого объекта.

Кроме того, непрерывное изменение пространственной частоты осуществляется наклоном штрихов прямоугольной решетки с постоянной пространственной частотой относительно ограничительной щели, при этом пространственная частота

$$N = \sin \theta / p,$$

где p — период прямоугольной решетки; θ — угол наклона штрихов решетки к ограничительной щели. При изменении угла наклона от 0 до 90° пространственная частота меняется от 0 до максимальной величины, равной частоте прямоугольной решетки. Временная частота остается постоянной.

Также используют радиальную миру, при этом пространственная частота меняется в результате смещения центра вращения перпендикулярно направлению сканирования. В этом случае в качестве анализатора используют небольшое круглое или прямоугольное отверстие, чтобы уменьшить ошибку от сходимости штрихов, возрастающую по мере приближения к центру.

Изменяют пространственную частоту с помощью оптических систем переменного увеличения при условии, что качество системы не вносит искажений в изображение.

ФПМ измеряют по прямоугольным мирам, не выделяя гармоник изображения. В этом случае пересчет полученных результатов производят по формуле Кольтмена

$$T(N) = \frac{\pi}{4} \left[M(N) + \frac{1}{3} M(3N) - \frac{1}{5} M(5N) + \frac{1}{7} M(7N) - \dots \right],$$

где $M(N)$ — коэффициент передачи модуляции при данной пространственной частоте, измеренный по прямоугольной миры.

Метод гармонического анализа электрическим фильтром. В качестве тест-объекта используют прямоугольную решетку с разными по ширине светлыми и темными штрихами и с постоянной пространственной частотой:

$$N = d/p, \quad d \ll p,$$

где d — ширина светлых штрихов.

Количество гармоник, которые можно выделить из такой прямоугольной решетки с пространственными частотами $N, 2N, 3N, \dots$,

kN (согласно ряду Фурье) можно определить по отношению p/d .

Амплитуды гармоник уменьшаются согласно формуле спектра амплитуд прямоугольных периодических сигналов:

$$C_k = 2 \frac{\sin k\pi (d/p)}{k\pi (d/p)}, \quad k=1, 2, 3, \dots,$$

$$C_k = 0, \quad k = p/d.$$

Пространственную частоту изменяют с помощью электрического фильтра, настроенного на временную частоту:

$$f_0 = N'v,$$

где N' — пространственная частота первой гармоники в плоскости изображения; v — скорость сканирования изображения решетки щелью.

На выходе электрического фильтра образуется гармоника с временной частотой f , а высшие гармоники отфильтровываются. Амплитуда гармоники пропорциональна КПМ для синусоидальной решетки с пространственной частотой N_1' . При уменьшении скорости перемещения решетки уменьшается временная частота прямоугольных сигналов, а так как электрический фильтр настроен на частоту f_0 , то он пропустит гармонику с временной частотой f_0 .

При уменьшении скорости в два раза пройдет гармоника с частотой

$$f_0 = (v/2) 2N_1 = \text{const},$$

т. е. вторая гармоника прямоугольной решетки с пространственной частотой $2N$; при уменьшении в три раза — третья гармоника с пространственной частотой $3N$ и т. д. Таким образом, электрический фильтр осуществляет гармонический анализ изображения прямоугольной решетки с постоянной пространственной частотой.

Рассмотренный метод позволяет получить дискретный ряд пространственных частот, определяемый разложением в ряд Фурье функции распределения яркости заданной прямоугольной решетки. Можно расширить пространственные частоты, изменяя увеличение оптической системы согласно формуле (98) и полагая $\beta = f'_k / f'_{об}$, где f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора; $f'_{об}$ — фокусное расстояние испытуемого объектива. Изменяя f'_k , получим другой ряд пространственных частот.

Метод гармонического анализа пространственным фильтром. Метод основан на разложении функции рассеяния исследуемой оптической системы на синусоидальные составляющие с помощью пространственного и электрического фильтров.

В качестве тест-объекта используют светящуюся точечную диафрагму или щель, распределение яркости в которых можно рассматривать как δ -функцию (для щели в направлении сканирования).

Преобразование Фурье δ -функции есть совокупность синусоидальных составляющих с постоянной единичной амплитудой. Ана-

лизатором служит прямоугольная решетка с переменной пространственной частотой. Выделяя первую гармонику прямоугольных сигналов для каждой пространственной частоты с помощью электрического фильтра, можем измерить ОПФ, т. е. ее амплитудную и фазовую характеристики. Таким образом, разложение функции распределения освещенности в изображении светящейся точки (линии) происходит с помощью пространственного и электрического фильтров. В качестве пространственного фильтра удобно использовать радиальный растр (радиальную миру) с большим количеством штрихов, который обеспечивает плавное изменение пространственных частот. Радиальную миру на определенном радиусе можно рассматривать как прямоугольную решетку со светлыми и темными штрихами одинаковой ширины. Пространственная частота зависит от радиуса радиальной миры:

$$N = m / (2\pi R),$$

где m — число пар секторов растра; R — радиус растра, на котором расположено изображение точечной диафрагмы.

Временная частота остается постоянной: $f_0 = mn = \text{const}$, где n — частота вращения растра (об/с).

С помощью метода гармонического анализа пространственным фильтром можно получить непрерывный спектр пространственных частот и быстро измерить ФПМ [35].

ФПМ позволяет оценивать качество объектива как на стадии расчета, так и при исследованиях опытных образцов, а также решать задачу контроля качества объективов в процессе производства. Качество объектива по ФПМ оценивают, исходя из условия: чем больше значения КПМ в пределах исследуемого диапазона пространственных частот, тем с лучшим контрастом можно получить изображение, создаваемое объективом. При этом наилучшее качество характеризуется дифракционной ФПМ, т. е. ФПМ дифракционно-ограниченной, безаберрационной оптической системы.

Определяя плоскость изображения по максимальному КПМ для различных точек поля (y), находят кривизну поля, по несовпадению плоскости изображения в меридиональном и сагиттальном сечениях судят об астигматизме для различных пространственных частот. Расфокусировочные кривые позволяют определить смещение плоскости изображения при различных относительных отверстиях, глубину резкости при различных пространственных частотах. ФПМ дает огромную информацию при исследованиях объективов. Однако для контроля серийной продукции объем измерений необходимо свести к минимуму. Качество контролируемого серийного объектива характеризуют одной или двумя заданными пространственными частотами с определенными КПМ, полученными для каждого типа объективов, как наиболее характерными в диапазоне пространственных частот создаваемого изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М., 1968.
2. Афанасьев В. А., Усов В. С. Оптические приборы и методы контроля пря-молинейности в инженерной геодезии. М., 1973.
3. Афремов В. Г. Определение фотограмметрической дисторсии фотографиче-ским способом. — Геодезия и картография, 1968, № 3, с. 46—56.
4. Ащеулов А. Т. Характеристики качества оптических систем. — Оптико-меха-ническая промышленность, 1960, № 6, с. 1—10; № 7, с. 10—13.
5. Бахшеева Г. Ф., Миронова Л. Н., Степин Ю. А. Рефрактометр для инфра-красной области спектра. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 5, с. 33—35.
6. Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П. Теория оптических систем. М., 1973.
7. Белоглазов А. А., Орнис А. Н. Коллимационные и автоколлимационные уст-ройства для контроля линз. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 10, с. 57—62.
8. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдения. М., 1965.
9. Борбат А. М. и др. Оптические измерения. Киев, 1967.
10. Буйнов Г. Н. и др. Голографический интерференционный контроль асфери-ческих поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 4, с. 6.
11. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М., 1971.
12. Губель Н. Н. и др. Интерферометры для контроля сферических поверхностей с большим углом охвата. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 1, с. 31—34.
13. Доладугина В. С. О чувствительности стандартной установки для измерения видимости теней от свилей в стекле. — Оптико-механическая промышленность, 1958, № 10, с. 24—29.
14. Духопел И. И. Интерференционный метод и приборы для контроля плоско-стей оптических деталей. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 9, с. 63—69.
15. Духопел И. И., Федина Л. Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей. — Оптико-механи-ческая промышленность, 1973, № 8, с. 50—58.
16. Духопел И. И., Константиновская К. В., Федина Л. Г. Методы контроля формы асферических поверхностей вращения. — Оптико-механическая про-мышленность, 1975, № 7, с. 64—74.
17. Евласов С. Е. Фотоэлектрический метод исследования качества поверхностей оптических деталей. — Оптико-механическая промышленность, 1960, № 3, с. 7—12.
18. Заказнов Н. П., Горелик В. В. Изготовление асферической оптики. М., 1978.
19. Захарьевский А. А. Интерферометры. М., 1952.
20. Захарьевский А. Н., Федин А. А. Интерферометр для испытания объективов микроскопа. — Оптико-механическая промышленность, 1959, № 3, с. 1—4.
21. Зверев В. А. и др. Технологический контроль главного зеркала БТА методом Гартмана. — Оптико-механическая промышленность, 1977, № 3, с. 3—5.

22. Знаменский Б. Ф. Рефлектометр с нормальным падением света. — Оптико-механическая промышленность, 1971, № 7, с. 29—30.
23. Знаменская М. А., Кривовяз Л. М., Юрщик А. Н. Контроль однослойных просветляющих пленок. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 10, с. 65—67.
24. Зубаков В. Г., Манукян Ж. Б. Настольный интерферометр для контроля плоскостей оптических деталей. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 4, с. 50—51.
25. Иношин А. И., Королькова Л. Е., Степанов В. М. Фотоэлектрический метод контроля радиусов полированных поверхностей линз. — Оптико-механическая промышленность, 1963, № 7, с. 8—12.
26. Иоаннисиани Б. К. Телескоп с зеркалом диаметром 6 метров (предпосылки, проблемы, решения). — Оптико-механическая промышленность, 1976, № 7, с. 25—31.
27. Карлин О. Г., Сюткин В. А. Применение сферических и асферических пробных стекол для контроля асферических поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 3, с. 37—39.
28. Карлин О. Г., Липовецкий Л. Е., Сюткин В. А. Измерение деталей с асферическими поверхностями на сферометре ИЗС-7. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 4, с. 39—41.
29. Кацнельсон Л. Б. Методы контроля оптической толщины интерференционных пленок, наносимых в вакууме. — Оптико-механическая промышленность, 1969, № 4, с. 50—58.
30. Кацнельсон Л. Б., Петров А. А., Фурман Ш. А. Монохроматор для контроля толщин интерференционных пленок, наносимых в вакууме. — Оптико-механическая промышленность, 1970, № 6, с. 24—27.
31. Коган Т. И. Контроль точных углов прямоугольных призм с помощью интерферометра. — Оптико-механическая промышленность, 1970, № 9, с. 54—55.
32. Коломийцов Ю. В. Интерферометры. Л., 1976.
33. Коломийцов Ю. В. и др. Оптические приборы для измерения линейных и угловых величин в машиностроении. М., 1964.
34. Коломийцов Ю. В., Духопел И. И. Бесконтактный интерференционный метод контроля сферических поверхностей линз. — Оптика и спектроскопия, 1956, т. 1, вып. 1, с. 94—101.
35. Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем. М., 1978.
36. Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А. Практика оптической измерительной лаборатории. М., 1974.
37. Ландсберг Г. С. Оптика. М., 1976.
38. Ларионов Н. П., Лукин А. В., Мустафин К. С. Голографический контроль формы непотроганных поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 3, с. 35—37.
39. Левин Б. М., Духопел И. И. Интерферометр для контроля плоскостей и плоскопараллельности. — Оптико-механическая промышленность, 1958, № 6, с. 13—15.
40. Лейхин М. В., Молочников Б. И. Автоматические рефрактометры. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 12, с. 59—65.
41. Линник В. П., Коломийцов Ю. В. Интерференционные методы измерения и контроля, разработанные в СССР. — Оптико-механическая промышленность, 1957, № 5, с. 24—32.
42. Логачева Л. Н. Автоматический интерференционный компаратор для измерения штриховых микр. — Измерительная техника, 1965, № 7, с. 53—57.
43. Логачева Л. Н. Измерение углов призм, изготовленных из монокристаллов. — Измерительная техника, 1966, № 10, с. 90—91.

44. Лукин А. В., Мустафин К. С., Рафиков Р. А. Контроль профиля асферических поверхностей с помощью одномерных искусственных голограмм. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 6, с. 67—68.
45. Максотов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. Л. — М., 1948.
46. Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические измерения. М., 1968.
47. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М., 1976.
48. Мотовилов О. А. Об измерении абсолютных значений коэффициентов зеркального отражения. — Оптико-механическая промышленность, 1968, № 2, с. 19—22.
49. Нечаева А. И., Захарова В. К. Бесконтактный метод измерения радиусов кривизны сферических, цилиндрических и торических поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1962, № 11, с. 25—27.
50. Обреимов И. В. О применении френелевой дифракции для физических и технических измерений. М., 1945.
51. Осмельченко А. И. Об измерении малых углов отклонения стеклянных клиньев с высокой точностью. — Оптико-механическая промышленность, 1965, № 2, с. 33—34.
52. Папьянц К. А. Метод скрещенных спектральных призм для быстрой оценки аберраций оптических систем. — Оптико-механическая промышленность, 1958, № 6, с. 7—12.
53. Папьянц К. А. Оптическая схема прибора для быстрого получения кривых аберраций фотографических объективов. — Оптико-механическая промышленность, 1958, № 2, с. 1—5.
54. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л., 1968.
55. Погарев Г. В. Руководство к лабораторным работам по курсу «Оптические измерения». Л., 1963.
56. Пуряев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М., 1976.
57. Пуряев Д. Т. Универсальный линзовый компенсатор для контроля качества сферических поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1975, № 10, с. 26—30.
58. Русинов М. М. Несферические поверхности в оптике. М., 1973.
59. Савин В. А., Федина Л. Г. Неравноплечий интерферометр и его применение для исследования оптики крупных астрономических инструментов. Новая техника в астрономии. Л., 1970, вып. 3, с. 207—212.
60. Семибратов М. Н. Технологичность несферических оптических поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1972, № 4, с. 35—38.
61. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л., 1975.
62. Соколова Н. С. О контроле центрировки и деформации линз при сборке объективов. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 8, с. 39—42.
63. Соснов А. Н. и др. Механический прибор для контроля радиусов кривизны цилиндрических оптических поверхностей. — Оптико-механическая промышленность, 1973, № 6, с. 41—43.
64. Тараканов Н. А. Контроль параболических линз на сферометре ИЗС-7. — Изв. вузов. Сер. «Приборостроение», 1960, № 4, с. 85—91.
65. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. — М. — Л., ч. I, 1948; ч. II, 1952.
66. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М., кн. I, 1965; кн. II, 1966.
67. Формообразование оптических поверхностей. — Сборник статей/Под ред. К. Г. Куманина. М., 1962.
68. Цеснек Л. С. О контроле параметров асферических поверхностей способом теневого сечения. — Оптико-механическая промышленность, 1960, № 6, с. 44—46.

