МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО РАН

В.В. Демин, И.Г. Половцев, Г.В. Симонова

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Том 1

Под редакцией проф., д-ра физ.-мат. наук И.В. Самохвалова

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 12.03.02 (200400) «Оптотехника», 12.03.03 (200700) «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.05 (200500) «Лазерная техника и лазерные технологии», магистратуры 12.04.02 (200400) «Оптотехника», 12.04.03 (200700) «Фотоника и оптоинформатика», 12.04.05 (200500) «Лазерная техника и лазерные технологии» и специальности 12.05.01 (200401) «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения»

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

ББК 22.34 я73
УДК 681.7. (075.8)
Д30

Рецензенты:
А.А. Тихомиров, д-р техн. наук, профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники ТУСУР, зам директора ИМКЭС СО РАН;
А.В. Войцеховский, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры квантовой электроники и фотоники Томского государственного университета;
В.А. Тарлыков, д-р техн. наук, профессор кафедры лазерной техники и биомедицинской оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В.
Д30 Оптические измерения : учеб. пособие : в 2 т. / под ред. И.В. Самохвалова. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2014. – Т. 1. – 580 с.

ISBN 978-5-94621-436-0

Учебное пособие содержит сведения по основам оптических измерений, информацию об оптических средствах и методах измерений, большое количество примеров из измерительной практики. Представлен справочный материал по нормативной и технической документации и геометрической оптике.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров – «Оптотехника», «Фотоника и оптоинформатика», «Лазерная техника и лазерные технологии», а также по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения». Представляет интерес для ученых и специалистов в области оптического приборостроения и измерительной техники.

ББК 22.34 я73
УДК 681.7. (075.8)

ISBN 978-5-94621-436-0 © Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В., 2014
© Томский государственный университет, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Трудно представить себе человеческую цивилизацию без измерений. А наука и техника при ближайшем рассмотрении оказываются состоящими из сплошных измерительных экспериментов. При такой трактовке трудно переоценить роль учебной дисциплины, связанной с измерениями, в формировании естественнонаучного мировоззрения студента.

Бурное развитие высоких технологий на рубеже XX–XXI вв. привело к качественным изменениям во всех отраслях человеческого знания. Компьютерная и микропроцессорная техника, системы технического зрения, полупроводниковые и лазерные источники света – все это составляет основу современных средств измерения. Традиционная учебная и техническая литература по оптическим измерениям, датируемая 80-ми гг. прошлого века, как правило, ограничивается оптическим производственным контролем и ориентируется на совсем иную элементную базу [5–7, 13, 15, 17, 25, 32, 37]. В данной книге авторы излагают собственный взгляд на многие вопросы, касающиеся этой отрасли, показывая, что понятие оптических измерений является гораздо более широким, чем это принято считать.

Материал книги структурирован по четырем главам.

В *первой главе* приводятся общие сведения: метрологическая терминология, классификация измерений, сведения о нормативном и техническом обеспечении процесса измерений. Рассматриваются вопросы обработки данных измерительного эксперимента, точечные оценки, метрологические характеристики средств измерений, функции преобразования, условия измерений, функции влияния, вводятся понятия измерительной задачи и производственного контроля.

Вторая глава посвящена основам оптических измерений. Здесь обсуждаются особенности оптических измерений, даются основные понятия: оптические измерительные изображения, измерительные наводки, разрешающая способность, передаточные функции оптических систем. Рассматриваются стандартные мерительные инструменты: отсчетные устройства, штриховые меры, штангенинструмент, микрометрический инструмент, измерительные скобы, угломеры. Приводятся описания и метрологические характеристики типовых приборов для оптических измерений: фотоприемные устройства, оптические столы и скамьи, телескопические приборы, микроскопы, спектральные приборы, длинномеры, рефрактометры, калориметры, поляриметры, мутномеры, рефлектометры, дифрактометры, интерферометры.

В *третьей главе* рассматриваются методы измерений, применяемые в оптической промышленности в целях контроля правильности изготовления оптических элементов и систем на различных стадиях технологического процесса, в частности:

– измерения оптических характеристик оптических материалов: показателя преломления и дисперсии, оптических и физических неоднородностей, бессвильности и пузырности, коэффициента поглощения;

– измерения геометрических размеров оптических деталей: толщины, диаметра, угла, фокуса, фокального отрезка, децентрировки, радиуса кривизны;

– технологический и аттестационный контроль формы оптических поверхностей и волновых фронтов: интерферометрические и теневые измерения плоских, сферических и асферических поверхностей. Здесь же рассмотрены базовые методы контроля формы поверхностей;

– измерения характеристик оптических систем: геометрических характеристик, энергетических характеристик, характеристик структуры оптического изображения.

В § 3.5 приведены методы измерения характеристик лазерного излучения: длины когерентности, радиуса когерентности, мощности и энергии излучения, длительности и формы импульса.

Четвертая глава посвящена практическому решению оптических измерительных задач из различных областей человеческих знаний с использованием современной материальной базы, иллюстрирующих отдельные положения пособия.

В приложениях представлены список нормативных и технических документов по оптическим измерениям, а также глоссарий по геометрической оптике, составленный по материалам классических книг [20, 26, 27, 71, 72].

При изложении материала особый упор сделан на современный технический уровень, ассортимент, нормативно-техническую базу. Значительная часть иллюстративного материала приведена из различных интернет-ресурсов, с обязательной ссылкой на интернет-адрес источника информации.

Авторы стремились максимально приблизить материал пособия к содержанию ФГОС-3 подготовки студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров – «Оптотехника», «Фотоника и оптоинформатика», «Лазерная техника и лазерная технология», а также по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

При этом наряду с изложением традиционных вопросов оптических измерений авторы показали:

– современный уровень измерительной техники;

– примеры современных разработок в данной области, которые уже нашли свое применение;

– возможность решения традиционных вопросов современными методами оптоэлектроники и компьютерного анализа оптической информации.

В пособии использовано большое количество справочного материала, который дополняется оригинальными работами из собственной практики авторов. Последнее обстоятельство представляется необходимым в современном учебном пособии. Такие места выделены в тексте шрифтом другого начертания и заливкой желтого цвета, которая означает, что материал является дополнительным к основному содержанию книги.

Настоящее пособие планируется издать в двух томах. В первом томе содержится теоретический материал.

Во втором томе, готовящемся к изданию, – методические рекомендации для лабораторного практикума по оптическим измерениям и задачи для самостоятельной работы в рамках ФГОС-3.

Большинство задач требует изучения материала настоящего пособия, выделенного заливкой желтого цвета.

Для удобства самостоятельной работы с пособием во втором томе предусмотрены ссылки на материал первого тома.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Введение

Измерения занимают важнейшее место в жизни современного человека, в его научной, познавательной и технической деятельности. Соответственно измерения можно разделить на бытовые, научные и технические.

В быту измерения сопровождают человека целый день, начиная с измерения температуры наружного воздуха, чтобы решить, как сегодня одеться по сезону. Затем, по дороге на работу, нужно измерить скорость автомобиля, чтобы не превысить скоростной режим. А заканчивается день измерением временного интервала для полноценного восстанавливающего сна с целью воспроизводства интеллектуальных и физических ресурсов организма.

Что касается науки, то измерения считаются тем фундаментом, на котором строится человеческое мировоззрение. Для этого есть две причины:

– законы явлений (или модели этих явлений) природы и общества как выражения количественных отношений между характеристиками явлений выводятся на основании измерений этих характеристик;

– верификация этих знаний производится на основании сопоставления отсчетов, полученных посредством интерполяции или экстраполяции моделей, с реальным состоянием дел. Критерием соответствия также являются результаты измерительного эксперимента.

В промышленности мы имеем дело с техническими измерениями, под которыми понимается проверка соответствия объекта (продукции) установленным техническим требованиям. При этом качество продукции, выпускаемой предприятиями, зависит от качества и количества измерений, с помощью которых контролируют-

ся параметры и характеристики выпускаемых изделий. По данным, приведенным в [1], затраты на измерения в некоторых отраслях превышают 50% себестоимости продукции, а трудоемкость контроля деталей составляет до 35% трудоемкости их изготовления.

Такая большая роль измерений в человеческом обществе связана с тем, что измерения служат для получения точного, объективного и легковоспроизводимого описания измеряемой величины. Принято считать, что ***измерение*** – совокупность операций для определения соотношения между двумя величинами одной природы (или размерности). Одна из них – измеряемая величина, а другая – эталонная, принятая за единицу и хранящаяся в техническом средстве, называемом средством измерений.

Отраслью науки, изучающей измерения, является ***метрология.*** Слово «метрология» образовано из двух греческих слов: «метрон» – мера и «логос» – знание. Метрология – это область технической физики, являющаяся научной основой измерительной техники. Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и оптимизация измерений.

Задачи метрологии:

– обеспечение единства и правильности измерения физических величин;

– оценка достоверности результатов измерения;

– разработка новых методов и средств измерений;

– определение значений универсальных физических констант.

Метрологическая суть измерения состоит в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой физической величины с ее единицей.

Единством измерений называют такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений обеспечивается на государственном уровне унификацией единиц физических величин. В России регламентирование единства измерений осуществляется с помощью государственных стандартов, часть из которых приведена в прил. 1.

Единицей физической величины служит физическая величина фиксированного размера, условно принятая для сравнения с ней однородных величин, которой присвоено числовое значение, равное

единице. В нашей стране действует международная система единиц СИ, на основе которой введен ГОСТ 8.417–02. Размер единицы физической величины передан средству измерения от нормативно утвержденного эталона или образцового средства измерений.

Пример 1.1.1. Классическим примером такого эталона является платино-иридиевый эталон длины – метр, который хранится во Франции (рис. 1.1.1).

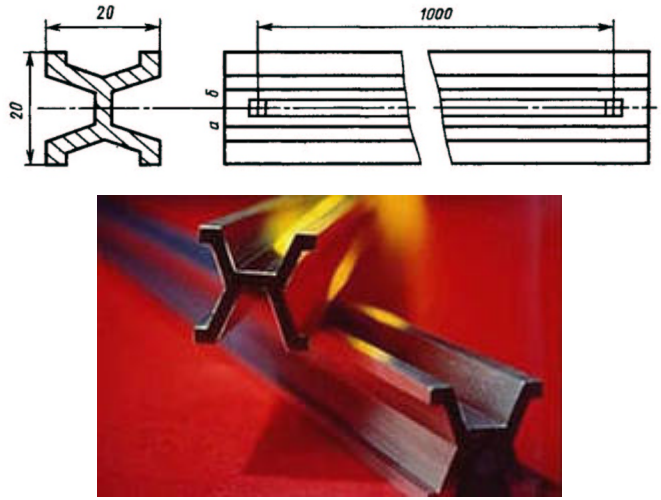


Рис. 1.1.1. Международный эталон метра [2], использовавшийся с 1889 по 1960 г. (URL: http://www.nist.gov)

Правильный размер каждой единицы определяется соответствующим государственным эталоном, воспроизводящим данную единицу физической величины с наивысшей точностью и передающим единицу рабочим средствам измерений через систему образцовых средств измерений.

Результат измерения содержит числовое значение измеряемой физической величины и величину погрешности измерения.

Физическая величина есть характеристика объекта, качественно общая для данной группы объектов, но количественно индивидуальная для каждого объекта. Выражается с использованием

шкалы соотношений, которая имеет ряд отметок (делений), количественно определяющих свойства или состояния измеряемых объектов, и нулевую отметку.

Предметом измерений являются:

– размер величины – количественное содержание свойства или состояния, соответствующего понятию величины;

– значение величины – это оценка данной физической величины через некоторое число принятых единиц этой физической величины;

– параметр – величина, характеризующая какое-либо свойство или состояние процесса, явления, объекта или устройства;

– коэффициент – величина, характеризующая отношение параметров;

– характеристика – функциональная зависимость, описывающая количественные признаки данного предмета или явления.

Цель измерения состоит в определении значения измеряемой величины с известной погрешностью.

Для выполнения измерения необходимо иметь:

– метод измерения;

– методику измерения;

– средство измерений.

Методом измерения называют совокупность приемов использования принципов и средств измерения

Под ***принципом измерения*** понимается комплекс знаний о совокупности физических явлений и технических достижений, на которых основаны данные измерения.

Методикой измерений называют установленную совокупность операций и условий, выполнение которых при измерении обеспечивает получение результатов измерений согласно данному методу.

Условия измерений – правила применения средств измерений, при соблюдении которых величины, влияющие на точность и выполнимость измерений, находятся в допустимых пределах.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее или хранящее одну или несколько единиц физических величин, размеры которых принимаются неизменными в течение известного промежутка времени.

Средства измерений могут быть: эталонные, образцовые, рабочие.

Эталонным средством измерения (эталоном) называют средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы измерения физической величины для передачи другим средствам измерений и официально утвержденное в качестве эталона.

Образцовые средства измерений – это меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, предназначенные для поверки и градуировки по ним других средств измерений и официально утвержденные в качестве образцовых.

Рабочие средства измерений применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц другим средствам измерений.

Средствами измерения являются:

– меры;

– измерительные приборы;

– измерительные преобразователи;

– измерительные установки;

– измерительные системы.

Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Пример 1.1.2. В отличие от современных технических средств, в традиционных весах, представленных на рис. 1.1.2, можно легко увидеть все составляющие средства измерений:

– средство измерения (сравнения) массы произвольного тела (объекта измерений) и меры (гири) – собственно весы;

– мера воспроизведения массы тела – гири;

– устройство индикации – стрелка;

– преобразователь – коромысло;

– устройство нониального отсчета – шкала в нижней части весов.

Измерительный прибор – это средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины в установленном диапазоне, имеющее нормированные метрологические характеристики. Имеет устройства преобразования величины в сигнал и устройства индикации.



Рис. 1.1.2. Весы – одно из самых древних средств измерений (URL: http://www.kipis.ru/info/index)

Поверенным считается прибор, прошедший государственную или ведомственную поверку. Результатом поверки является определение и занесение в паспорт прибора основной и дополнительной погрешности прибора.

Измерительным преобразователем называют техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, преобразующее измеряемую величину в другую величину или в сигнал измерительной информации. Входит в состав средства измерения.

Измерительной установкой называется совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин, расположенная в одном месте. Состоит из отдельных узлов, измерительных преобразователей и измерительных приборов. При вклю-

чении в измерительную установку образцовых средств измерений она превращается в ***поверочную установку***. Поверочная установка может не поверяться, но в этом случае основная и дополнительная погрешности должны быть определены по известным погрешностям отдельных узлов (параметров) установки в единицах соответствующих параметров.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных средств измерений с автоматизированной обработкой результатов. В состав современной измерительной системы могут быть включены:

– устройства сбора и передачи данных;

– устройства обратной связи для выработки сигнала регулирования;

– устройства обратной связи для управления технологическим процессом;

– система диагностики;

– устройство сигнализации о результатах контроля;

– система распознавания образов.

Такие измерительные системы называются ***информационно-измерительными***.

Довольно часто в качестве синонима слова «измерение» используются такие термины, как:

– оценивание;

– контроль;

– измерительное наблюдение.

Это на самом деле достаточно близкие (между собой и в отношении к измерениям) понятия, и каждое из них имеет не меньшее право на существование, но их следует различать.

Оценивание отличается от измерения отсутствием технического средства, хранящего единицу измеряемой величины, связанную с эталоном. Помимо этого, отсутствует определенность в оценке погрешности полученного значения оцениваемой величины. Таким образом, при оценивании производится оценка величины, а не ее измерение.

Контроль охватывает как количественную, так и качественную оценку продукции. И эта оценка может быть основана на результа-

тах измерений одной или нескольких величин, характеризующих эту продукцию. Как правило, современные методы контроля в обязательном порядке включают в себя измерения, и в этом смысле контроль – более широкое и универсальное понятие, нежели измерение, т.е. это измерения в том числе.

Измерительным наблюдением называют определение отдельных значений физической величины. А процесс измерения как раз состоит из совокупности нескольких измерительных наблюдений одной и той же величины с последующим определением результата измерения путем обработки совокупности результатов наблюдений с целью оценки значения истинной величины и вычисления погрешности ее измерения.

Необходимые ***признаки измерений***:

– принцип измерений – его теоретические основы, указывающие на возможности и принципиальные ограничения метода;

– математический аппарат для получения результата измерения, включающего значения измеряемой величины и погрешности ее определения;

– сведения об объекте измерения – его математическое и физическое описание (модели);

– средство измерения – функциональная схема измерительной установки, требования к ее характеристикам и параметрам ее элементов, единица измерения, эталон измеряемой величины;

– требования к условиям проведения измерения;

– методика измерения, включающая указания по:

- установке объекта,
- настройке установки,
- выполнению измерительных наблюдений и считыванию данных, их обработке,
- получению результата измерения.

В зависимости от природы сигнала, используемого для получения измерительной информации, различают измерения:

– электростатические;

– радиотехнические;

– акустические;

– радиоизотопные;

– магнитные;
– оптические;
– рентгеновские;
– электрические;
– магнитно-резонансные,
– электромагнитные,
– индуктивные и т.д.

Оптические измерения основаны на использовании оптических средств извлечения измерительной информации об исследуемом объекте, т.е. для получения измерительной информации используется оптический сигнал. При этом оптическим может быть метод измерения и / или средство измерения. Часто средство измерений называют оптическим только потому, что для отсчета показаний в нем используется отсчетный микроскоп (см. рис. 2.3.23).

Пример 1.1.3. В качестве примера такого средства измерений на рис. 1.1.3 приведена оптическая делительная головка.

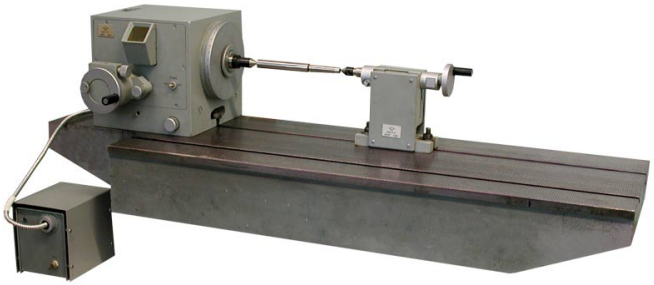


Рис. 1.1.3. Оптическая делительная головка для измерения угла поворота детали, зажатой в шпинделе. Предназначена для угловых измерений, делительных и разметочных работ. Угол поворота отсчитывается проекционным отсчетным микроскопом, результат отсчета наблюдается на экране в верхней части устройства (URL: http://www.npzoptics.ru)

Если оптическим является объект измерений (оптическая среда, оптический элемент или оптический прибор), то в этом случае используется термин ***оптический производственный контроль*** [3]. При этом в целях оптического производственного контроля могут

использоваться как оптические измерения, так и измерения, основанные на ином способе извлечения измерительной информации.

Измерения или средства измерения различают:

– по характеру взаимодействия с измеряемым объектом:
  - контактные,
  - бесконтактные;

– по количеству одновременно измеряемых величин:
  - поэлементные,
  - комплексные;

– по области применения (чаще применяются в отношении средств измерения):
  - универсальные,
  - специальные;

– по взаимосвязи измеряемой и искомой величин:
  - прямые,
  - косвенные,
  - совокупные;

– по методу считывания информации:
  - непосредственной оценки,
  - дифференциальный,
  - нулевой (противопоставления, компенсационный),
  - совпадений,
  - совместных измерений.

Контактные измерения – если измерительное средство имеет контакт с измеряемым объектом. ***Бесконтактные измерения*** – если измерительное средство не имеет контакта с измеряемым объектом.

Достоинства контактного метода:

– простота;

– экономичность;

– высокая производительность.

Недостатки – опасность повреждения измеряемой оптической поверхности.

Поэлементные (дифференциальные) измерения – если у детали сложной формы измеряется отдельно каждый из ее элементов или параметров.

Комплексные измерения – если определяется влияние комплекса элементов, из которых состоит деталь сложной формы и выявляются ее эксплуатационные показатели во взаимосвязи всех ее элементов.

Пример 1.1.4. При измерении резьбовой детали – болта – определяют отдельно значения диаметров (наружного, внутреннего и среднего), размер шага, угол профиля (рис. 1.1.4). Резьба характеризуется этими пятью размерами, которые определяются в поэлементном измерительном эксперименте.

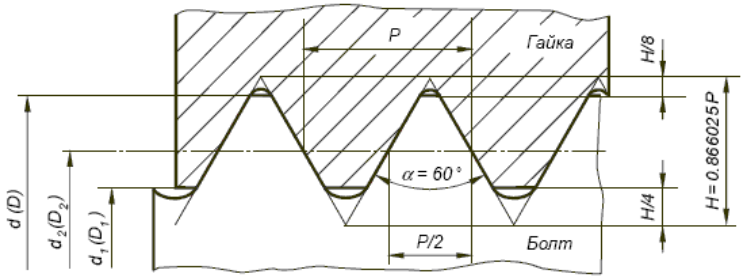


Рис. 1.1.4. Размеры, характеризующие резьбу: d – наружный диаметр болта; D – наружный диаметр гайки; d_1 – внутренний диаметр болта; D_1 – внутренний диаметр гайки; d_2 – средний диаметр болта; D_2 – средний диаметр гайки; α – угол профиля, p – шаг резьбы

Эти измерения достаточно трудоемки и квалифицированы. Тот же результат можно получить с помощью точно изготовленной гайки (калибра), резьба которой заранее известна. Например, если известно, что точно изготовленная гайка имеет резьбу М8х1, и из комплексного измерительного эксперимента известно, что эта гайка свинчивается с болтом, то этот болт имеет ту же резьбу, что и гайка. Комплекс размеров, характеризующих резьбу, может быть определен из ГОСТ 9150–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Нормы». Таким образом, один параметр М8х1 означает, что комплекс размеров, характеризующих этот болт, имеет стандартные значения, а именно: наружный диаметр болта $d = 8$ мм, внутренний диаметр болта $d_1 = 6{,}917$ мм, сред-

ний диаметр болта $d_2 = 7{,}350$ мм, угол профиля для метрических резьб, обозначаемых М, $\propto = 60°$, шаг резьбы $p = 1$ мм. Люфт, который в той или иной мере имеет место при свинчивании гайки с болтом, отражает ту степень доверия, которую следует испытывать к таким измерениям.

Универсальные измерения – измерения (средства измерения), имеющие показатели назначения для любых деталей или деталей широкого класса.

Специальные измерения – измерения (средства измерения), имеющие показатели назначения для деталей определенной конфигурации или для определенного класса деталей.

Пример 1.1.5. На рис. 1.1.5 представлены два измерительных микроскопа: универсальный измерительный микроскоп УИМ-21 и измерительный микроскоп специального назначения МПБ-2.



а



б

Рис. 1.1.5. Микроскопы измерительные: *а* – микроскоп специальный отсчетный МПБ-2, предназначен для измерения диаметра отпечатка (лунки), образуемого на поверхности различных металлов при определении твердости по методу Бринелля. Принцип действия микроскопа основан на сравнении изображения отпечатка, получаемого от вдавливания шарика в исследуемый материал под определенной нагрузкой, со шкалой сетки (URL: http://www.nv-lab.ru); *б* – микроскоп универсальный измерительный УИМ-21, предназначен для измерения линейных и угловых размеров разнообразных изделий в прямоугольных и полярных координатах (URL: http://www.chipmaker.ru)

Очевидно, что с помощью УИМ-21 можно решить, в том числе, задачу измерения отпечатка от вдавливания шарика в исследуемый материал, но решить задачу измерения параметров резьбы с помощью МПБ-2 очень проблематично.

В то же время рыночная стоимость МПБ-2 составляет 8,5 тыс. руб., а УИМ-21 стоит 2,5 млн руб. (цены 2013 г.). Так что специальные средства измерения, как правило, оказываются более целесообразными с экономической точки зрения, а также имеют лучшие метрологические характеристики, нежели универсальные аналоги.

Прямые измерения – измерения, проводимые прямым методом, когда искомое значение физической величины получают непосредственно из данных измерительного эксперимента. Прямые измерения позволяют непосредственно получить искомое значение физической величины.

Косвенные измерения – искомое значение физической величины определяют на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной определенной математической зависимостью. Числовое значение искомой величины находится путем расчета после подстановки в формулу найденных величин.

Метод непосредственной оценки состоит в прямом измерении всей искомой величины, значение которой определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Метод наиболее простой и распространенный.

Совокупные измерения (прямые или косвенные) состоят в том, что искомую величину находят решением системы уравнений, составленных по результатам ряда измерений величин при различающихся условиях. Искомые значения величин находят решением системы уравнений, связывающих измеренные и искомые величины. Совокупные измерения позволяют обойтись без аттестованного эталона. При этом количество измеренных величин больше, чем измеряемых. Следовательно, погрешность результата получается меньше, чем погрешность одного измерения.

Дифференциальный метод основан на регистрации измерительного сигнала, являющегося разностью измерительных сигна-

лов, поступающих от исследуемого объекта, и меры, хранящей известное значение измеряемой величины.

Компенсационный метод (нулевой) состоит в том, что эффект действия измеряемой величины уравновешивается эффектом действия известной величины (меры) так, что их взаимное действие сводится к нулю. Повышение точности достигается благодаря возможности фиксации нулевого положения прибора с высокой точностью.

При ***совместных измерениях*** величины измеряют несколько раз, при этом от одного измерения к другому меняют условия измерения. Искомые значения величин находят также решением системы уравнений, связывающих измеренные и искомые величины. Этот вид измерений очень похож на совокупные измерения, но при совместных измерениях количество измеренных величин равно количеству искомых.

Метод совпадений основан на сопоставлении двух периодических сигналов близкой частоты. При этом один периодический сигнал – основная шкала, второй – ***нониусная***. При отсчете по нониусу десятые доли деления шкалы определяются по порядковому номеру нониусного штриха, совпадающего с каким-либо штрихом шкалы (рис. 1.1.6, *в*; 2.2.14).

Пример 1.1.6. В табл. 1.1.1 приведены различные методы измерений и варианты использования рассмотренной терминологии.

Измерительные задачи – совокупность проблем, которые возникают тогда, когда ставится вопрос о необходимости выполнения измерений.

Процесс решения измерительных задач включает в себя следующие необходимые этапы (последовательность действий):

– формулировка задачи:
  - что нужно измерить,
  - с какой погрешностью;

– формулировка условий измерений;

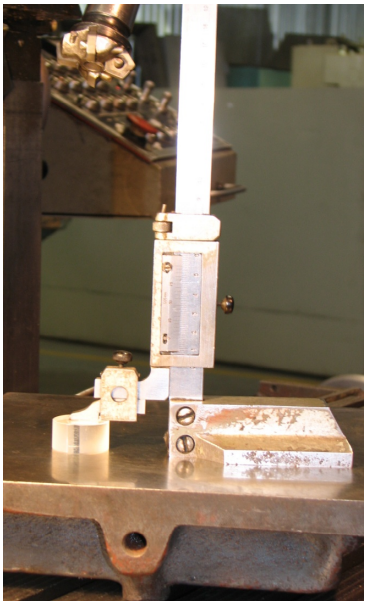
– анализ источников ошибок;

– выбор метода и средств измерений с учетом условий измерений:
  - прямой – косвенный,

○ контактный – бесконтактный,

○ оптический, акустический и т.д. (соответственно, оптическая измерительная задача, акустическая измерительная задача и т.д.);

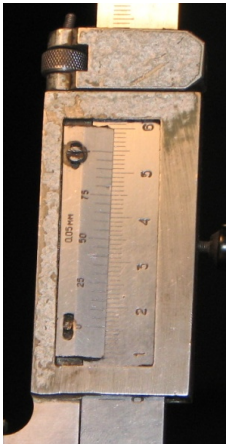
– анализ погрешностей с учетом метода измерений и источников ошибок.



а



б

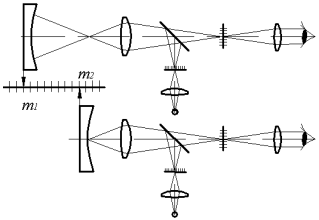
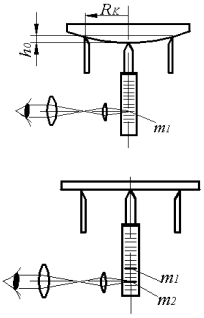


в

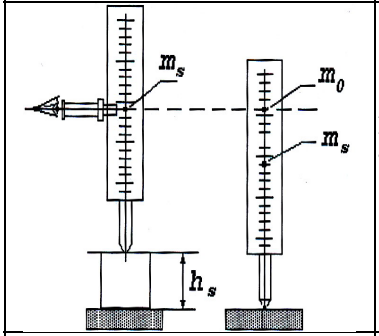
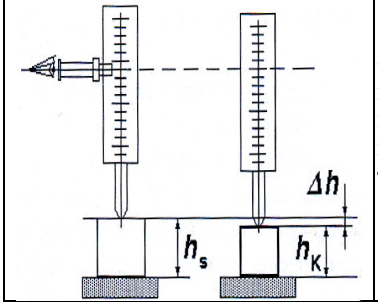
Рис. 1.1.6. Измерение толщины (*а*) плоскопараллельной стеклянной пластины ПМ-15, представляющей собой меру толщины, с помощью штангенрейсмаса (рис. 2.2.15, *д*) с нониусным отсчетом по методу совпадений. ПМ-15 лежит на разметочной плите. Толщина пластины 15,75 мм (заводская маркировка – *б*); отсчет по основной шкале штангенрейсмаса – 15 мм, по нониусной – 0,75 мм, цена деления основной шкалы – 1 мм, нониусной – 0,05 мм (*в*)

Таблица 1.1.1

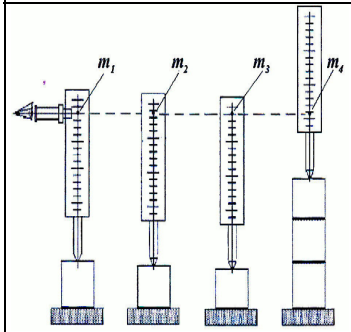
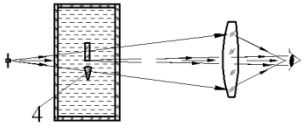
Примеры применения терминологии измерений

Схема измерений	Краткое описание метода измерений	Классификация, достоинства и недостатки
	Метод измерения радиусов кривизны сферической оптической поверхности с помощью автоколлимационного микроскопа (раздел 3.2.2, рис. 3.2.10)	Прямое, бесконтактное измерение. Высокая точность, но ограниченное применение: измерениям подлежат только полированные поверхности, выпуклые поверхности – только в пределах рабочего отрезка объектива, вогнутые поверхности – в пределах 10 м
	Измерение радиуса кривизны (раздел 3.2.2, рис. 3.2.7) посредством измерения стрелки прогиба кольцевым контактным сферометром (рис. 2.3.36)	Косвенное, контактное дифференциальное измерение. Измерение универсальное: поверхности как полированные, так и шлифованные с любым радиусом, но невысокая точность и возможность повреждения поверхности

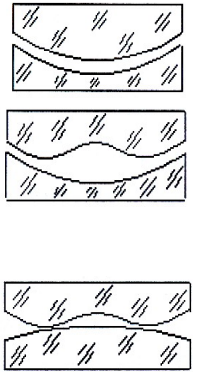
Продолжение табл. 1.1.1

Схема измерений	Краткое описание метода измерений	Классификация, достоинства и недостатки
	Измерение высоты детали с помощью оптического длинномера (раздел 2.3.6, рис. 2.3.35)	Прямое, контактное измерение методом непосредственной оценки. Основные источники погрешностей: неточность нанесения шкал, непостоянство условий измерения, в частности, связанное с колебаниями температуры
	С помощью оптического длинномера непосредственно измеряется не сама искомая толщина h_s, а ее отступление от меры толщиной h_k, известной с высокой точностью: $h_s = h_k + \Delta h$	Прямое, контактное, дифференциальное измерение. Повышение точности достигается благодаря уменьшению пределов измерения, причем уменьшается влияние погрешностей нанесения измерительных шкал и температурных колебаний

Продолжение табл. 1.1.1

Схема измерений	Краткое описание метода измерений	Классификация, достоинства и недостатки
	Измерение толщины трех концевых мер на контактном длинномере. Размеры h_1, h_2, h_3 находятся как решение системы уравнений $\begin{cases} h_1 = [m_1 + (m_4 - m_2 - m_3)]/2, \\ h_2 = [m_2 + (m_4 - m_1 - m_3)]/2, \\ h_3 = [m_3 + (m_4 - m_1 - m_2)]/2 \end{cases}$	Прямые, контактные, совместные измерения. Погрешность измерения уменьшается вдвое за счет выполнения четырех отсчетов вместо двух применительно к измерению каждого образца
	Измерение показателя преломления образца стекла произвольной формы *4* по методу Обреимова в иммерсионной жидкости (рис. 3.1.5, раздел 3.1)	Косвенные, бесконтактные дифференциальные измерения компенсационным методом. За счет иммерсии компенсируется влияние формы образца *4* на результат измерений. Высокая оперативность достигается за счет того, что количество полос невелико благодаря дифференциальной схеме

Окончание табл. 1.1.1

Схема измерений	Краткое описание метода измерений	Классификация, достоинства и недостатки
	Измерение ошибок изготовления оптических поверхностей по методу «трех эталонов» [5].Три оптических поверхности с неизвестными ошибками x_1, x_2, x_3 изготовления накладывают друг на друга в различных сочетаниях и измеряют по интерференционной картине отступления поверхностей друг от друга N_1, N_2, N_3 в соответствующих комбинациях по методу пробных стекол (рис. 3.2.8, раздел 3.3.2). Ошибки поверхностей находят из решения системы уравнений: $\begin{cases} N_1 = x_1 + x_2 \\ N_2 = x_1 + x_3 \\ N_3 = x_2 + x_3 \end{cases}$	Косвенные, контактные, совокупные измерения для полированных оптических поверхностей с близкой номинальной кривизной. Достоинства: не требуется эталонных поверхностей, но высока вероятность повреждения поверхности, не всегда задача является математически корректной, высокая трудоемкость получения результата

Заметим, что решение измерительной задачи не предполагает разработки методики измерений, а ограничивается лишь выбором средства измерений и метода. Методика измерения разрабатывается с использованием этого решения, а этапы могут меняться местами в процессе решения измерительной задачи в зависимости от ее специфики, но в том или ином виде должны быть представлены в любом решении.

Такой формализм может оказаться хорошим подспорьем при разработке новых методик и средств измерений (раздел 4).

1.2. Погрешности измерений

Важнейшее место в измерительном эксперименте занимают вопросы, связанные с погрешностями измерений.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

При определении погрешности измерений учитываются:

– погрешности средств измерений;

– методические погрешности;

– результаты измерительных наблюдений.

Погрешность измерения характеризуется абсолютной и относительной погрешностями.

Абсолютная погрешность – разность

$$\Delta x = x - x_0, \tag{1.2.1}$$

где x – измеренная величина, x_0 – ее истинное значение.

Относительная погрешность:

$$\Delta x_{\text{отн}} = \Delta x / x_0. \tag{1.2.2}$$

В качестве истинного значения x_0 чаще всего принимают среднее арифметическое из ряда измерений, т.е. $x_0 \cong x_{\text{ср}}$.

Принято выделять следующие составляющие погрешности измерений:

– $\Delta x_{\text{м}}$ – методическая;

– $\Delta x_{\text{и}}$ – инструментальная;

– $\Delta x_{\text{у}}$ – установочная;

– $\Delta x_{\text{в}}$ – вычислительная;

– $\Delta x_{\text{л}}$ – субъективная.

Методическими называют погрешности от неточности математической модели принципа измерения, что влечет за собой неточность соотношений, применяемых при обработке результатов измерительных наблюдений.

Инструментальные погрешности обусловлены несовершенством средств измерения и влиянием изменяющихся условий измерения. К этой группе относятся:

– погрешности изготовления измерительных шкал и других узлов прибора;

– погрешности работы источника излучения и приемника оптического сигнала.

Установочная погрешность обусловлена взаимным расположением объекта измерений и измерительного прибора. К этой группе относятся:

– погрешности юстировки и настройки;

– погрешности измерительных наводок и отсчетов.

Вычислительная погрешность обусловлена вычислительным процессом. К этой группе относят следующие погрешности:

– ошибки, связанные с дискретизацией;

– ошибки, связанные с округлением;

– погрешности численных методов.

Субъективная или личная погрешность обусловлена субъективными особенностями оператора, выполняющего измерения:

– невнимательность, в том числе связанная с условиями измерений;

– дефекты зрения (близорукость, дальнозоркость и т.д.);

– утомляемость.

При проведении оптических измерений выделяют следующие факторы, влияющие на результат, – ***источники погрешностей***:

– источники погрешностей, связанные с измеряемым объектом:

- особенности (например, шероховатость поверхности) объекта (рис. 4.3.3),
- неидеальность формы поверхности объекта (рис. 4.3.18),
- неоднородность материала (рис. 3.1.3),
- остаточные аберрации измеряемой оптической системы (рис. 3.2.13);

– источники погрешностей, связанные со средством и методом измерений:

- предел чувствительности метода (раздел 4.1),
- теоретические ошибки (рис. 3.3.6, табл. 3.3.2),
- инструментальные ошибки (рис. 3.2.8),
- ошибки, связанные с приемником изображения (рис. 2.3.2);

– источники погрешностей, возникающие под влиянием внешних условий (пример 1.3.3):

- температура,
- давление,
- влажность,
- вибрации.

Условиями измерений называется перечень факторов, влияющих на погрешность измерений.

Нормальными условиями измерений называется перечень источников погрешностей и диапазонов их изменения, при которых погрешность измерения имеет предписанное значение.

Термин «погрешность» в равной мере может быть применен как к методу измерений, так и к измерительному прибору. Следующие два термина применяются, как правило, только к средствам измерения.

Основной погрешностью средства измерения называется погрешность, определяемая в нормальных условиях его применения – условиях измерений.

Дополнительная погрешность средства измерений – это составляющая погрешности средства измерения, возникающая вследствие выхода за пределы нормальной области значений какой-либо из влияющих величин – условий измерений.

По своей сути и влиянию на конечный результат погрешности подразделяются на следующие группы:

– систематические погрешности;

– случайные погрешности;

– промахи.

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины; ее природа и характер известны, а влияние на результат может быть учтено во время измерения или при обработке данных измерительных наблюдений.

Влияние систематических погрешностей на результат измерения может быть исключено при их выявлении и устранении путем совершенствования средства и методики измерения. В частности:

– ошибки от неправильной установки нуля исключаются определением нуль-пункта (рис. 2.2.10);

– ошибки от неточного деления шкал исключаются путем:

  ○ введения в отсчеты поправок в соответствии с таблицей ошибок, которая задается в виде функции от измеряемой величины,

  ○ применения специальных мероприятий, позволяющих исключить ошибки из отсчетов посредством предварительной калибровки (раздел 4.4);

– ошибки от параллакса сеток устраняются юстировкой прибора, а при неустранимом параллаксе ограничивают возможность поперечного перемещения глаза с помощью диафрагмы с небольшим отверстием, помещенной в выходном зрачке прибора (рис. 2.3.17);

– ошибки от эксцентриситета лимба (несовпадение центра делений лимба с центром его вращения) устраняются методом противопоставления, который состоит в усреднении двух отсчетов по диаметрально противоположным индексам, в результате которого ошибки, имеющие в обоих отсчетах разные знаки и одинаковую величину, устраняются (рис. 2.3.20).

В тех случаях когда нет простых способов устранения систематических погрешностей, ужесточают допуски на изготовление измерительного прибора или разрабатывают специальные методики измерения, в результате применения которых уменьшается влияние систематических погрешностей на результат измерения.

Если есть несколько составляющих систематической погрешности, то суммарная погрешность при прямых измерениях $\Delta x^{\text{сист}}$ находится путем алгебраического суммирования, т.е. все систематические составляющие складываются со знаком

$$\Delta x^{\text{сист}} = \sum_i \Delta x_i^{\text{сист}}, \qquad (1.2.3)$$

где $x_i^{\text{сист}}$ – i-я составляющая систематической погрешности.

Случайной погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом по знаку и значению в серии повторных измерений одного и того же размера физической величины. Определение случайных погрешностей используется для оценки точности прибора и результата измерения.

Для независимых случайных погрешностей справедливы следующие положения:

– характеризуются степенью разброса данных измерительных наблюдений относительно среднего значения;

– выявляются при многократных отсчетах (измерительных наблюдениях);

– не могут быть полностью исключены, но их влияние на результат измерения уменьшается с увеличением числа отсчетов;

– в своей совокупности подчиняются законам теории вероятностей.

За меру случайной погрешности принимается s_x – ***средняя квадратическая погрешность единичного измерения*** – обобщенная характеристика абсолютной случайной погрешности измерений (рассеяния отсчетов), полученных в ряду из n независимых равноточных измерительных наблюдений одной и той же физической величины, вследствие влияния случайных погрешностей:

$$s_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \Delta x_i^{случ^2}}{n-1}}. \qquad (1.2.4)$$

Если есть несколько составляющих случайной погрешности, то суммарная погрешность $s_x^{\text{сум}}$ при прямых измерениях случайной величины x находится путем квадратичного суммирования:

$$s_x^{сум} = \sqrt{\sum_i \left(s_x^i\right)^2}, \quad (1.2.5)$$

где s_x^i – i-я составляющая случайной погрешности, имеющая случайный характер. Эта формула справедлива для случая, когда составляющие случайной погрешности никак не связаны друг с другом, что справедливо практически всегда для прямых измерений.

Если это не так, т.е. составляющие случайных погрешностей находятся в функциональной связи друг с другом, то необходимо учитывать корреляцию этих составляющих, что равносильно установлению функциональной связи между соответствующими составляющими. В свою очередь, наличие такой функциональной связи говорит о том, что мы имеем дело с косвенными измерениями. Тогда [9], если искомая величина x находится в функциональной связи с измеряемыми параметрами x_i в соответствии с соотношением

$$x = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots x_k), \quad (1.2.6)$$

а среднеквадратичные ошибки s_x^i в измерениях величин x_i малы по сравнению с измеряемыми величинами, то среднеквадратичное отклонение измеряемой величины и ее среднее значение определяются исходя из формул:

$$s_x^{\text{сум}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} s_x^i\right)^2}, \quad (1.2.7)$$

$$x_{\text{ср}}^{\text{сум}} = f\left(x_{1\text{ср}}, x_{2\text{ср}}, \dots, x_{i\text{ср}}, \dots x_{k\text{ср}}\right), \quad (1.2.8)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частная производная функции f, вычисленная при значениях переменных, равных средним значениям: $x_i = x_{i\,\text{ср}}$.

Используя полученные таким образом данные, можно в процессе проектирования измерительных приборов заранее рассчитать суммарную погрешность их показаний и устранить источники наибольших погрешностей или, наоборот, при заданной точности прибора назначить допуски на составляющие погрешности.

Вид формулы (1.2.7) для некоторых функциональных зависимостей приведен в табл. 1.2.1, а применения для конкретных методов измерений – в главе 3.

Таблица 1.2.1

Примеры вычисления погрешностей при косвенных измерениях

Формула, выражающая функциональную зависимость	**Вид функциональной зависимости**	**Формула для вычисления среднеквадратичного отклонения**
$x = \sum_{i=1}^{k} a_i x_{i2}$	Линейная	$s_x^2 = \sum_{i=1}^{k} a_i^2 \left(s_x^i\right)^2$
$x = \prod_{i=1}^{k} x_i^{\alpha_i}$	Мультипликативно-степенная	$s_x^2 = x^{\text{ср}2} \sum_i \frac{\alpha_i^2 \left(s_x^i\right)^2}{x_i^{\text{ср}2}}$
$y = e^{ax}$	Экспоненциальная	$s_y^2 = a^2 s_x^2 e^{2x^{\text{ср}}}$
$y = \ln(ax)$	Логарифмическая	$s_y^2 = \frac{s_x^2}{x^{\text{ср}2}}$
$y = \sin(ax)$	Синусоидальная	$s_y^2 = a^2 s_x^2 \cos^2(ax^{\text{ср}})$

Промахом называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях. Промахи могут быть вызваны неполадками аппаратуры (инструментальная составляющая погрешности) и грубыми ошибками оператора (субъективная составляющая погрешности). При обработке результатов измерений измерительные наблюдения с промахами отбрасываются.

Исправленные результаты измерений характеризуются тем, что из данных ряда измерений исключены систематические погрешности и промахи.

Измерения должны быть:

– правильными;

– достоверными;

– повторяемыми;

– воспроизводимыми;

– надежными;

– информативными.

Правильность измерений означает проведение измерительного эксперимента так, чтобы систематические погрешности при измерении были минимальными. Это достигается выбором соответствующего метода и средства измерения. Обычно применительно к конкретной измерительной задаче правильным считается тот результат измерения, погрешность которого не превышает установленного значения.

Достоверность измерений характеризует степень доверия, которого они заслуживают, и определяется оценочным значением границы случайной погрешности для заданной вероятности с применением положений математической статистики.

Повторяемость измерений (сходимость измерений) – характеристика качества измерений, отражающая степень близости результатов измерения одной и той же величины, полученных повторно одними и теми же средствами, одинаковым методом в одинаковых условиях.

Воспроизводимость результатов измерений – это характеристика качества измерений, отражающая степень близости результатов измерения одной и той же величины, полученных в разных местах, разными исполнителями, методами и средствами.

Информативность измерений:

$$I = L \Big/ s_x \text{ (бит)}, \tag{1.2.9}$$

где L – диапазон измерения; s_x – среднеквадратическая погрешность единичного измерения.

Для дальнейшего изложения необходимо напомнить некоторые положения теории вероятностей, имеющие отношение к существу вопроса.

Генеральной совокупностью называют полный набор всех возможных значений, которые может принимать случайная величина при бесконечном числе испытаний. Генеральную совокупность можно описать с помощью распределения вероятности появления в отдельном испытании некоторой конкретной величины x. Набор из n значений величин x_i, полученный из генеральной

совокупности в результате конечного числа испытаний, называют ***выборкой объема*** *n* из генеральной совокупности. ***Статистическая обработка результатов*** измерений величины x с использованием элементов теории вероятности имеет своей целью как можно более точное описание характеристик генеральной совокупности по отдельной выборке величин x_i. Такую же цель имеет ***планирование измерительного эксперимента***, направленное, в основном, на обоснование объема *n* и способа получения выборки [10].

Принято считать [17], что вполне надежный результат получается в результате обработки ряда из 100 измерений. В соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 считается, что производить более 15–20 измерений малоцелесообразно. Тем не менее выбор числа измерений должен быть практически обоснован. Одно из возможных обоснований базируется на построении ***гистограммы экспериментальных данных*** для графического представления выборки x_i случайной величины x. По оси абсцисс в гистограмме откладываются интервалы Δx, на которые разбивается область определения x_i, по оси ординат – отношение

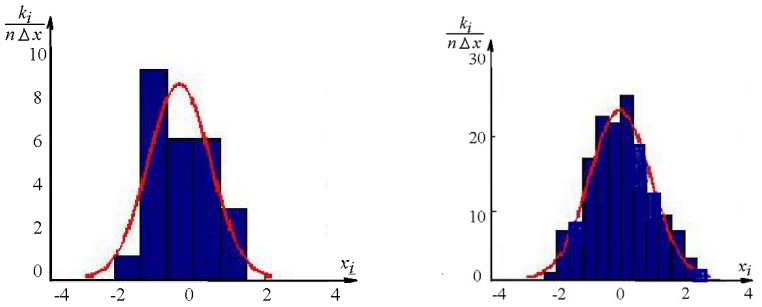
$$k_i / n \cdot \Delta x, \tag{1.2.10}$$

где k_i – количество измерений, попавших в интервал $\left[x_i - \Delta x/2 ; x_i + + \Delta x/2\right]$; *n* – объем выборки (рис. 1.2.1).

Таким образом, ордината гистограммы пропорциональна вероятности того, что случайная величина x примет значение x_i. Количество экспериментальных данных можно считать достаточным, если гистограмма, построенная по результатам эксперимента, однозначно может быть интерполирована кривой, которая называется ***кривой распределения случайной величины*** x.

Функция $f(x)$, описывающая кривую распределения, называется ***функцией плотности вероятности***. Поэтому когда говорят о том, что измерения величины x имеют случайный характер или что они подчиняются законам теории вероятности, то в первую очередь имеют в виду, что существует такая функция $f(x)$, которая

позволяет определить вероятность того, что результат измерения случайной величины x примет значение, лежащее в интервале $\left[x_i - {\Delta x}/{2}\,; x_i + {\Delta x}/{2}\right]$, по формуле $f(x_i)\Delta x$.



а *б*

Рис. 1.2.1. Гистограмма и кривая распределения случайной величины: *а* – экспериментальных данных недостаточно; *б* – экспериментальных данных достаточно для обработки результатов эксперимента (URL: http://ru.wikipedia.org)

В большинстве случаев случайные погрешности измерений подчиняются нормальному распределению, плотность вероятности которого описывается функцией Гаусса (рис. 1.2.2):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \qquad (1.2.11)$$

где x – результат единичного отсчета; $f(x)$ – плотность вероятности того, что случайная величина примет значение x; σ_x – ***дисперсия*** результатов измерения; M_x – ***математическое ожидание***.

Оценка истинного значения искомой величины и его погрешности является частным случаем статистической задачи нахождения параметров функции распределения на основании выборки.

Оценку a параметра a назовем ***точечной***, если она выражается одним числом. Любая точечная оценка, вычисленная на основании опытных данных, является их функцией и поэтому сама должна представлять собой величину с распределением, зависящим от распределения исходной случайной величины, в том числе от самого оцениваемого параметра, и от объема выборки n.

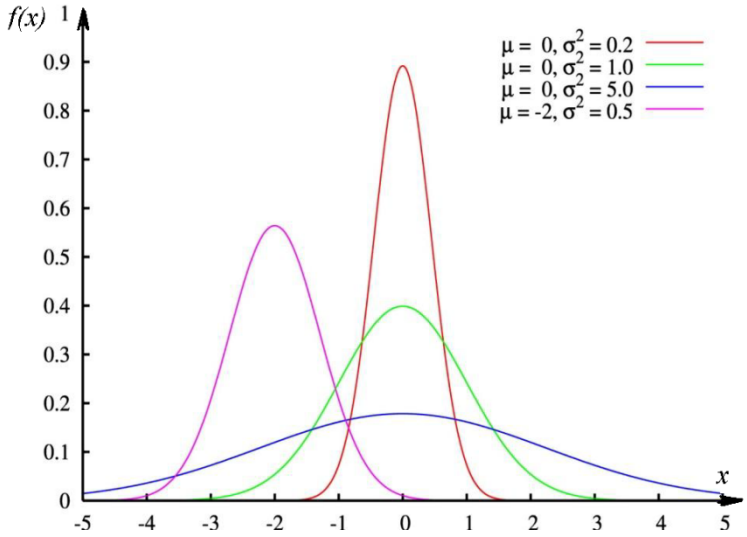


Рис. 1.2.2. Нормальное распределение физической величины при различных значениях параметров (URL: http://ru.wikipedia.org)

К точечным оценкам предъявляется ряд требований, определяющих их пригодность для описания самих параметров:

– оценка называется ***состоятельной***, если при увеличении числа наблюдений она приближается (сходится по вероятности) к значению оцениваемого параметра;

– оценка называется ***несмещенной***, если ее математическое ожидание равно оцениваемому параметру;

– оценка называется ***эффективной***, если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки данного параметра.

Получаемая в результате многократных наблюдений информация об истинном значении измеряемой величины и рассеивании результатов наблюдений представлена в выборке генеральной совокупности величины x и состоит из ряда результатов отдельных измерительных наблюдений: $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots x_n$, где n – число наблюдений. Погрешность измерений, так же как и результаты измерений, является случайной величиной. При выполнении ***равноточных измерений***, когда ко всем отсчетам следует относиться

с одинаковой степенью доверия, разброс случайных погрешностей при большом числе отсчетов чаще всего подчиняется закону нормального распределения с математическим ожиданием, равным 0. Результаты наблюдения формируются под влиянием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных.

Состоятельными, несмещенными и эффективными оценками параметров распределения случайной величины *x* являются:

– величина математического ожидания, т.е. истинного значения измеряемой величины *x*, является среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений. Таким образом, для случайной измеряемой величины *x* справедливо

$$x_0 = M_x \cong x_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \qquad (1.2.12)$$

– величина дисперсии результатов измерения, т.е. степени разброса случайной измеряемой величины, является ее среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_x \cong s_x = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \Delta x_i^2}{n-1}}. \qquad (1.2.13)$$

Эта оценка характеризует степень концентрации отдельных измерительных наблюдений относительно среднего арифметического и является ***характеристикой точности метода и средства измерения***;

– дисперсии погрешности измеряемой величины, т.е. степени разброса погрешностей измерения измеряемой величины, является ***средняя квадратическая погрешность результата измерения***

$$s_{x_{\text{ср}}} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \Delta x_i^2}{(n)\cdot(n-1)}} = \pm\frac{s_x}{\sqrt{n}}. \qquad (1.2.14)$$

Эта оценка характеризует случайную погрешность оценки математического ожидания случайной величины по среднему арифметическому значению отсчетов, полученных в ряду независимых равноточных измерительных наблюдений одной и той же физической величины *x*.

Поскольку в реальных измерениях размер выборки нельзя считать достаточно большим, т.е. выборка реального измерительного эксперимента не является ***представительной***, то погрешность случайных измерений, представляющая собой разность двух случайных величин: собственно измеряемой величины и оценки ее математического ожидания – не подчиняется нормальному распределению. Это распределение называется ***распределением Стьюдента***, которое переходит в нормальное при $n \to \infty$, т.е. когда выборка становится представительной. Причем когда говорят о распределении Стьюдента, то имеют в виду случайную величину

$$t = \frac{x - x_{\text{ср}}}{s_{x_{\text{ср}}}}. \tag{1.2.15}$$

Интервал значений $\left[M_x - \Delta x_{\text{д}};\ M_x + \Delta x_{\text{д}}\right]$ случайной величины x, в который с заданной вероятностью попадают измеренные значения, называется ***доверительным интервалом***. Вероятность того, что случайная величина попадет в процессе измерений в установленный доверительный интервал, называется ***доверительной вероятностью***.

Величина доверительного интервала зависит от доверительной вероятности $p_{\text{д}}$, объема выборки n, дисперсии погрешности измеряемой величины $s_{x_{\text{ср}}}$ и рассчитывается по формуле

$$\Delta x_{\text{д}} = t(p_{\text{д}}, n) s_{x_{\text{ср}}}, \tag{1.2.16}$$

где $t(p_{\text{д}}, n)$ – называется ***коэффициентом Стьюдента*** и определяется с помощью табл. 1.2.2.

Таким образом, ***результат измерения случайной величины*** $x_{\text{ист}}$ – это оценка истинного значения измеренной величины $x_{\text{ср}}$ и погрешности в виде доверительного интервала, за пределы которого с заданной вероятностью $p_{\text{д}}$ не выходит истинное значение измеренной величины:

$$x_{\text{ист}} = x_{\text{ср}} \pm t(p_{\text{д}}, n) s_{x_{\text{ср}}}. \tag{1.2.17}$$

Выше было сказано, что оптимальным считается выполнить измерения случайной величины 15–20 раз, в этом случае коэффициент

Стьюдента равен 3 и мы получаем ***правило «трех стандартов», или «3σ»***: погрешности, большие, чем $3s_{x_{\text{ср}}}$, маловероятны (их вероятность менее 0,1), следовательно, интервал $3s_{x_{\text{ср}}}$ считается интервалом практически возможных значений случайных погрешностей, и если отсчет имеет остаточную погрешность, превышающую величину $\pm 3s_{x_{\text{ср}}}$, то он квалифицируется как промах.

Таблица 1.2.2

Коэффициенты Стьюдента для вычисления доверительного интервала

n	$p_д$			
	0,68	0,95	0,99	0,999
2	2,0	12,7	63,7	636,6
3	1,4	4,3	9,9	31,6
4	1,3	3,2	5,8	12,9
5	1,2	2,8	4,6	8,6
6	1,2	2,6	4,0	6,9
7	1,1	2,4	3,7	6,0
8	1,1	2,4	3,5	5,4
9	1,1	2,3	3,4	5,0
10	1,1	2,3	3,3	4,8
15	1,1	2,1	3,0	4,1
20	1,1	2,1	2,9	3,9
30	1,1	2,0	2,8	3,7
50	1,1	2,0	2,7	3,5
100	1,0	2,0	2,6	3,4

Таким образом, при проведении прямого измерения некоторой физической величины необходимо выполнить следующие действия:

– провести многократные (15–20) измерения при одних и тех же условиях и записать результаты в таблицу, отбросив при этом явные промахи;

– рассчитать среднее значение по формуле

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i;$$

– вычислить среднеквадратичную ошибку среднего

$$s_{x_{\text{ср}}} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \Delta x_i^2}{(n)\cdot(n-1)}};$$

– задавшись требуемым уровнем доверительной вероятности $p_д$, определить коэффициент Стьюдента и величину доверительного интервала

$$\Delta x_д = t(p_д, n) s_{x_{ср}};$$

– записать результат измерений в виде

$$x_{ист} = x_{ср} \pm t(p_д, n) s_{x_{ср}}$$

при доверительной вероятности $p_д$.

Пример 1.2.1. Используя распределение Стьюдента, можно определить уровень брака при работе информационно-измерительной системы. Задача, которая решается с помощью информационно-измерительной системы, заключается в управлении технологическим процессом изготовления некоего промышленного изделия по результатам контроля физической величины x, номинальное значение x_0 которой обеспечивается технологическим процессом. Согласно документации на изделие последнее считается годным, если размер x укладывается в поле допусков $\Delta x_д$. То есть в переводе на язык статистики в результате работы информационно-измерительной системы формируется некоторая совокупность изделий с определенными размерами $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots x_n$, где n – объем выборки. ***Уровень брака*** также имеет статистическое толкование. Под этим термином будем понимать вероятность попадания размеров деталей в процессе их изготовления за границы доверительного интервала, определяемого $\Delta x_д$.

Алгоритм действий в этом случае является обратным по сравнению с алгоритмом, реализуемым при измерениях случайной величины:

– Сформировать представительную выборку деталей, случайным образом изъятых из технологического процесса. Причем детали не обязательно должны иметь одинаковый номинальный размер x_0. Выполнить у всех изделий измерение размера x с помощью средства измерений, имеющего повышенный класс точности, получив тем самым набор случайных величин $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots x_n$.

– Вычислить отклонения размеров x_i от номинального значения x_0

$$\Delta x_i = x_i - x_0.$$

Обратим внимание на то, что в данном случае для нахождения Δx_i использована не оценка, а собственно x_0. Так что в данном случае мы имеем дело с той чрезвычайно редкой ситуацией в измерительных задачах с применением статистических методов обработки результатов измерений, когда известно истинное значение измеряемой величины.

– Вычислить среднеквадратичную ошибку результата измерения величины x

$$s_x = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \Delta x_i^2}{n-1}}.$$

Здесь нужно иметь в виду, что в информационно-измерительных системах речь идет не об измерениях, а об измерительных наблюдениях, поэтому по каждому факту изготовления деталей измерение является однократным, так что здесь речь идет об оценке степени концентрации отдельных измерительных наблюдений относительно среднего арифметического, что является ***характеристикой точности метода и средства измерения***, т.е. информационно-измерительной системы. Использование для этой цели $s_{x\,\text{ср}}$ было бы неправильным.

– Найти значение коэффициента Стьюдента из соотношения

$$t(p_\text{д}, n) = \frac{\Delta x_\text{д}}{s_x}. \qquad (1.2.18)$$

– По таблице коэффициентов Стьюдента определить доверительную вероятность $p_\text{д}$ для объема выборки n. Тогда уровень брака определится из соотношения

$$\frac{n_\text{бр}}{n} = (1 - p_\text{д}). \qquad (1.2.19)$$

1.3. Метрологические характеристики средств измерений

Для того чтобы иметь возможность оценить измерительные возможности конкретного средства измерений, а также легко со-

поставлять между собой различные реализации этих средств, служат метрологические характеристики.

Метрологическими характеристиками средств измерений называются такие характеристики их свойств, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. Для решения различных измерительных задач применяются разнообразные средства измерений. Выбор того или иного средства измерений зависит от:

– особенностей поставленной измерительной задачи;
– условий измерений;
– требований к точности;
– требований к оперативности;
– требований к наглядности;
– требований к степени автоматизации;
– объемов измерений.

Соответственно перечень метрологических характеристик средств измерений, предназначенных для решения той или иной задачи, зависит от ее особенностей. Номенклатура метрологических характеристик регламентируется ГОСТ 8.009–84. Здесь приводятся те из них, которые актуальны в отношении оптических измерений.

Функция преобразования (градуировочная характеристика средства измерений, передаточная характеристика, уравнение преобразования, характеристическая кривая) представляет собой зависимость между значениями величин на выходе y (***информативного параметра выходного сигнала***) и входе x средства измерений (***информативного параметра его входного сигнала***). Функция преобразования $y = f(x)$ может быть представлена в виде формулы, таблицы или графика (рис. 2.3.2).

Градуировочная характеристика средства измерений может быть линейной или нелинейной. Чаще всего стремятся иметь линейную зависимость, т.е. $y = kx$. Нелинейность уравнения преобразования стараются скомпенсировать с помощью измерительного преобразователя с такой градуировочной характеристикой, чтобы совместная характеристика преобразования стала линейной. Линейная градуировочная характеристика может как проходить через

начало координат $(y = 0; x = 0)$, так и иметь смещение по оси x или y, в этом случае говорят о средстве измерений со ***смещенной шкалой*** (подавленным нулем).

Для средств измерений нормируется номинальная функция преобразования. Она приписывается средству измерений на основе анализа совокупности таких средств. Реальная градуировочная характеристика конкретного образца средства измерения может несколько отличаться от номинальной. Погрешность показаний прибора, связанная с этим отличием, называется погрешностью измерительного преобразователя по выходу, или ***рен***.

Коэффициент преобразования (часто используется термин «чувствительность измерительного прибора») определяется как отношение приращения выходного сигнала Δy на выходе измерительного прибора (преобразователя) к вызвавшему это приращение изменению входного сигнала Δx (входного сигнала преобразователя). В общем случае чувствительность определяется как

$$S = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \qquad (1.3.1)$$

и представляет собой тангенс угла наклона касательной к функции преобразования в точке измерения входного сигнала x. Для линейной градуировочной характеристики чувствительность S = const, для нелинейных характеристик чувствительность является переменной величиной, различной для разных значений x.

Для измерительных приборов и мер с переменным значением часто вместо чувствительности указывают цену деления шкалы. ***Цена деления*** представляет собой разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Цена деления есть величина, обратная чувствительности. В приборах с линейной градуировочной характеристикой цена деления постоянна в диапазоне измерений и носит название ***постоянная прибора***. Для получения значения величины входного сигнала в соответствующих единицах надо умножить отсчет (величину выходного сигнала) в делениях на постоянную прибора.

Порог чувствительности средства измерений определяется как наименьшее изменение входного сигнала, вызывающее изме-

нение величины выходного сигнала, которое может быть обнаружено с помощью данного средства измерений без каких-либо дополнительных устройств (пример 2.3.2, рис. 1.3.1). Порог чувствительности может быть принят за основную погрешность средства измерений. Наличие порога чувствительности оптических измерительных приборов связано с ограниченными возможностями оптических систем, приемников изображения и механизмов прибора. Основные причины этих ограничений:

– волновые свойства света;
– квантовый механизм взаимодействия излучения с веществом;
– трение в механических частях оптического прибора;
– свойства глаза или приемников оптического излучения.

Пример 1.3.1. Отклонение формы полированной оптической поверхности от номинального значения измеряется в интерферометрах (раздел 2.3.8) посредством наблюдения интерференции двух волновых фронтов, а именно: отраженного от контролируемой поверхности и отраженного от эталонной поверхности. Пример интерференционной картины приведен на рис. 1.3.1.

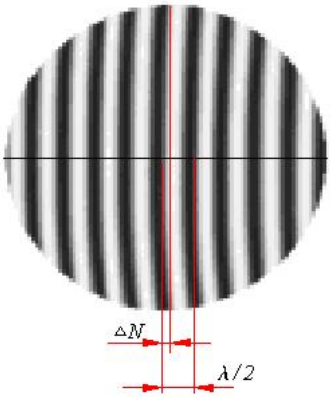


Рис. 1.3.1. Интерферограмма оптической поверхности, полученная в интерферометре, работающем на $\lambda = 0{,}63$ мкм. Искривление полос составляет $\Delta N = 0{,}3$ полосы, следовательно, исследуемая поверхность имеет отклонение от эталона 0,1 мкм

Искривление полос интерферограммы, выраженное в долях полосы ΔN , – величина выходного сигнала, свидетельствует об измеряемом отклонении стрелки прогиба Δ исследуемой поверхности от номинального значения, задаваемого эталонной поверхностью интерферометра Δ. ***Цена интерференционной полосы*** (т.е. количество метрических единиц, укладывающихся в стрелке прогиба величиной в одну полосу) составляет $\lambda/2$ и является постоянной интерферометра. Так что

$$\Delta = \lambda/2 \cdot \Delta N. \qquad (1.3.2)$$

Предельное искривление полосы, различимое глазом, составляет 0,1 полосы – наименьшее значение выходного сигнала визуального интерферометра. Следовательно, порог чувствительности этого прибора $\Delta_{\text{пор}} = 0{,}03$ мкм.

Вариация выходного сигнала средства измерений – разность между двумя математическими ожиданиями информативного параметра выходного сигнала y средства измерений, получающимися при измерениях величины, имеющей одно и то же значение x, с плавным медленным подходом к этому значению со стороны меньших M_y^- и больших значений M_y^+:

$$W = abs\left(M_y^+ - M_y^-\right). \qquad (1.3.3)$$

В отличие от чувствительности вариация характеризуется изменением не входного, а выходного сигнала. Существование вариации связано с зазорами в кинематических цепях прибора и гистерезисными явлениями.

Условия применения средств измерений – характеристики среды, в которой это средство измерений находится при эксплуатации. Изменение внешних условий приводит к изменению метрологических характеристик. Величины, которые влияют на метрологические характеристики помимо измеряемой величины, называют ***влияющими величинами***. Влияющими величинами могут быть:

– температура;

– влажность;

– атмосферное давление;
– нестабильность напряжения источника питания;
– напряженность внешних магнитных и электрических полей;
– вибрации;
– ускорения;
– уровень внешней засветки;
– условия освещения и т.д.

Влияющие величины могут не нести информации об измеряемой величине, но при этом влиять на результаты измерений. В документации на средства измерений обычно указывают области значений влияющих величин, обеспечивающих работоспособность и сохранность средств измерений.

Пример 1.3.2. Лабораторные условия эксплуатации предполагают:
– температура окружающего воздуха в пределах +15...+25°С;
– относительная влажность воздуха от 45 до 75%;
– атмосферное давление (860–1060) 10^2 Па.

Условия применения могут быть:
– нормальные;
– рабочие;
– предельные.

При работе средства измерений в нормальных условиях воздействием влияющих величин на результаты измерений можно пренебречь. Метрологические характеристики погрешностей и динамические характеристики средств измерений обычно нормируются для нормальных условий эксплуатации. Считается, что погрешность в этих условиях определяется только конструкцией прибора. Часто такую погрешность называют основной погрешностью.

Обычно средства измерений продолжают нормально выполнять функции в более широкой области значений влияющих величин. В этом случае для средств измерений указываются рабочие условия эксплуатации. Метрологические характеристики средств измерений в рабочих условиях могут существенно изменяться под воздействием влияющих величин.

Функция влияний представляет собой зависимость изменений метрологической характеристики средства измерений от измене-

ний влияющих величин в пределах рабочих условий эксплуатации. По ГОСТ 8.009–84 функции влияния должны нормироваться отдельно для каждого влияющего фактора и могут выражаться в виде формул, таблиц или графиков. С помощью функций влияния можно оценить погрешность средства измерений при работе его в тех или иных конкретных условиях. Погрешность, обусловленная воздействием влияющих величин, часто называется дополнительной погрешностью средства измерений.

Пример 1.3.3. Лазерная измерительная система LSP30-3D на основе двухчастотного лазерного интерферометра предназначена для использования при исследовании геометрии машин и аппаратов [12] с целью их диагностики. Принципиальная схема работы подобных систем приведена на рис. 1.3.2.

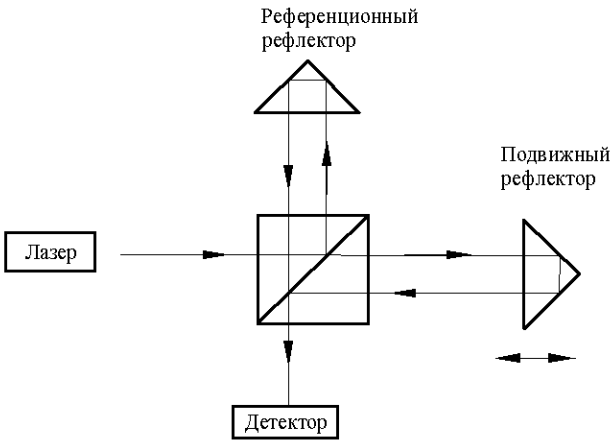


Рис. 1.3.2. Принципиальная схема интерферометра Майкельсона (URL: http://www.lasertex.eu)

Когерентный свет от лазера после светоделительного кубика попадает на два отражателя: стационарный референтный рефлектор и подвижный рефлектор, выполненные в виде триппель-призм (уголковых отражателей). После отражателей соответствующие волновые фронты возвращаются в прибор и в плоскости детектора (фотоприемника) образуют интерференционную картину. При перемещении

подвижного рефлектора детектор считает импульсы, возникающие при перемещении полос интерференционной картины в его плоскости. Расстояние, на которое переместился подвижный рефлектор, согласно формуле (П 166) определяется из соотношения

$$l = \frac{N \cdot \lambda}{n}, \qquad (1.3.4)$$

где N – количество импульсов, зарегистрированных детектором при перемещении рефлектора на расстояние l; λ – длина волны лазера; n – показатель преломления среды, в которой перемещался подвижный рефлектор.

Таким образом, мы имеем дело с косвенными измерениями с линейной функцией преобразования: измеряемая величина N на выходе измерительного прибора – количество импульсов; искомая величина L на входе измерительного прибора – перемещение подвижного рефлектора; коэффициент преобразования (цена деления шкалы) задается отношением $\frac{\lambda}{n}$. В коэффициенте преобразования присутствуют две физические величины в качестве параметров: λ – длина волны лазера, использованного в средстве измерения; n – показатель преломления среды, в которой распространяется лазерное излучение.

Погрешность измерения описываемой лазерной измерительной системы определяется следующими моментами:

– погрешность измерения величины N определяется возможностями детектора и метода измерений. Применение гетеродинной схемы и ряд других технических ухищрений позволяют обеспечить погрешности измерения длины, связанной с погрешностью измерения входного сигнала, не более 1 нм;

– погрешность, связанная с длиной волны, минимизируется за счет использования специального метрологического He-Ne лазера со стабилизацией частоты. В этом случае:

- номинальное значение длины волны $\lambda = 632{,}991354$ нм;
- относительная погрешность, с которой известна длина волны, составляет $\pm 0{,}02 \cdot 10^{-6}$, т.е. $\lambda = 632{,}99135 \pm 1{,}2 \times \times 10^{-5}$ нм. Это также очень точное значение, поэтому данную составляющую погрешности измерения можно считать незначительной;

– показатель преломления среды является тем параметром измерений, через который влияющие величины осуществляют свое воздействие на результат измерения, при этом они не несут никакой информации об измеряемой величине. Эти влияющие величины достаточно очевидны: t – температура; H – относительная влажность; P – давление среды, находящейся в пространстве, в котором перемещается подвижный рефлектор. Функции влияния определяются с помощью эмпирической формулы Эдлена [36]:

$$n(t,P,H) = 1 + 2{,}8775 \cdot 10^{-7} \cdot P \times$$
$$\times \frac{1 + 10^{-6} \cdot P \cdot (0{,}613 - 0{,}00997t)}{1 + 0{,}003661 \cdot t} - \qquad (1.3.5)$$
$$- 3{,}033 \cdot 10^{-9} H \cdot e^{0{,}057627 \cdot t}.$$

Из (1.3.5) для нормальных условий (T = 293 K (t = 20°C), P = 1000 hPa (750,063 мм рт. ст.), H = 50%) отдельно для каждой влияющей величины получим:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -0{,}93 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{°\mathrm{C}}\right],$$
$$\frac{\partial n}{\partial P} = 0{,}27 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{h\mathrm{Pa}}\right], \qquad (1.3.6)$$
$$\frac{\partial n}{\partial H} = -0{,}96 \cdot 10^{-8} \left[\frac{1}{\%}\right].$$

Используя эти формулы, можно записать функции влияния и найти диапазон нормальных условий эксплуатации, при которых погрешность измерений длины не выходит за пределы основной погрешности 10 нм. Для расширения диапазона условий эксплуатации измерения длины с помощью лазерного интерферометра могут сопровождаться измерением температуры, давления и влажности. Это позволяет существенно расширить диапазон условий эксплуатации посредством корректировки значения n с помощью формулы Эдлена. В этом случае рабочий диапазон будет определяться погрешностью соответствующих средств измерения – датчиков давления влажности и температуры.

Пределы измерения – это наименьшее (***нижний предел измерений***) и наибольшее (***верхний предел измерений***) значения измеряемой величины, которые могут быть измерены данным сред-

ством измерений. Для преобразователей верхним и нижним пределами преобразования следует считать соответственно наибольшее и наименьшее значения входной и выходной величины, в пределах которых нормировано уравнение преобразования или коэффициент преобразования.

Диапазон измерения – это интервал значений измеряемого параметра, в пределах которого возможно проведение измерений без превышения предписанной погрешности. Различают полный и рабочий диапазоны измерения измеряемой величины. Диапазон, в котором относительная погрешность измерений не превышает значений основной погрешности $\Delta x_{\text{отн}}^{\text{осн}}$, называется ***рабочим диапазоном изменения*** измеряемой величины.

Диапазон измерений, в котором относительная погрешность не превышает 100%, называется ***полным диапазоном***. Нижний порог полного диапазона является порогом чувствительности прибора, который представляет собой предельно малую измеряемую величину $x_{\text{н.п}}$ с относительной погрешностью $\Delta x_{\text{отн}}(x_{\text{н.п}}) = 100\%$.

Во многих измерительных приборах имеются специальные устройства, позволяющие изменить диапазон измерения, иногда в очень широких пределах. В этих случаях следует говорить об общем диапазоне измерения, охватываемом измерительным прибором, и об отдельных диапазонах, которые часто называют ***поддиапазонами***.

Пример 1.3.4. Общий диапазон измерения 0–100 делится на поддиапазоны 0–0,1; 0–1; 0–10; 0–100 или общий диапазон 0–5 делится на поддиапазоны 0–1; 1–2; 2–3; 3–4; 4–5.

Часто измерительный прибор имеет участки, на которых его погрешность не нормирована (обычно в начале и конце шкалы). В таком случае для прибора указывается еще и ***диапазон показаний*** – область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы. Диапазон показаний всегда шире диапазона измерений. Для однозначных мер вместо диапазона значений воспроизводимых величин используют понятие ***номинальное значение меры***, т.е. значение величины, указанное на мере или приписанное ей.

Класс точности средств измерения – принятое обозначение допускаемой основной погрешности средства измерений, определяющей гарантированные границы значений погрешностей. Чем мень-

шие погрешности имеет средство измерений, тем более высокий класс ему присваивается. Класс точности является обобщенной характеристикой, и поскольку в соответствии с ГОСТ 8.009–84 нормирование характеристик погрешностей производится на основе методов математической статистики, то при назначении класса точности должны быть учтены следующие метрологические характеристики:

– систематическая составляющая погрешности, которая является таковой для конкретного прибора, но если ее рассмотреть на множестве приборов одного наименования, она является случайной с математическим ожиданием, равным номинальному значению;

– случайная составляющая погрешности;

– вариация выходного сигнала.

Учет всех метрологических характеристик необходим при измерениях высокой точности и производится в метрологической практике. В повседневной производственной практике широко пользуются классом точности. Соответствие погрешности средств измерений приписанному им классу точности во время эксплуатации проверяется при периодических поверках. Основные способы установления пределов допускаемых погрешностей и обозначения классов точности средств измерения установлены ГОСТ 8.401–80. Выраженные в процентах погрешности могут иметь значения: 6, 4, 2.5, 1.5, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001. Значение класса точности маркируют на шкале прибора.

Часто под метрологическими характеристиками понимают такие свойства измерительного прибора, которые напрямую влияют на метрологические характеристики, описанные выше. Такая ситуация характерна для оптических измерений и используется в данном пособии.

Кроме метрологических характеристик, с учетом этого уточнения при эксплуатации средств измерения важно знать и неметрологические характеристики: показатели надежности, электрическую прочность, сопротивление изоляции, устойчивость к климатическим и механическим воздействиям, время установления рабочего режима, экономичность и др. [11]. Рассмотрим некоторые из них.

Для измерительных приборов обычно указывается время установления показания: промежуток времени с момента начала изме-

рения до момента установления показаний (т.е. когда переходные процессы закончились). Величина, обратная этому времени, получила название ***быстродействие средства измерения***. Быстродействие выражается числом, равным максимальному числу измерений с помощью данного прибора в секунду. Время измерения стрелочных измерительных приборов составляет обычно 4 с, а быстродействие цифровых измерительных приборов может достигать величин 10^6 измерений в секунду. Высокое быстродействие дает возможность измерять «мгновенные» значения быстроменяющихся величин, а также повышать точность измерений введением дополнительных вычислительных устройств для обработки большого числа единичных измерений.

Надежность средств измерений. Под надежностью средств измерений понимают его способность сохранять эксплуатационные параметры в установленных пределах в течение заданного времени. Выражается надежность средств измерения с помощью таких характеристик, как:

– вероятность безотказной работы;

– интенсивность отказов;

– среднее время безотказной работы;

– время восстановления.

Условия хранения и транспортирования – условия эксплуатации, при которых возможны хранение и перевозка средств измерений в нерабочем состоянии. Предельные условия хранения и транспортирования задаются областью значений влияющих величин. Однако после возвращения средств измерений в рабочие условия эксплуатации их метрологические характеристики не должны измениться. Предельные условия характеризуются наиболее широкими областями значений влияющих величин, выход влияющих величин за предельные условия приводит обычно к выходу из строя средств измерений.

Экономичность средств измерений – оправданная экономическая стоимость получения результата измерений.

Эргономичность средств измерений – простота и удобство конструкций в обращении и получении результата измерений.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Особенности оптических измерений

Среди всех известных видов измерений оптические выделяются благодаря следующим специфическим особенностям:

– наиболее высокая точность по сравнению с известными методами и средствами измерений, поскольку пороговая чувствительность и точность методов оптических измерений находятся на уровне длины волны применяемого излучения;

– бесконтактность;

– наглядность в интерпретации.

Оптические методы измерений применяются во многих областях науки и техники, в том числе в задачах оптического производственного контроля.

Если рассматривать оптические измерения безотносительно к измерительным задачам, то обобщенно можно выделить следующие основные этапы в процессе оптического измерения:

– создание оптического изображения, связанного с измеряемыми параметрами объекта. При этом под изображением может пониматься любое распределение интенсивности – сфокусированное изображение, теневая картина, интерференционная картина и т.д.;

– определение (считывание) необходимых координат элементов изображения путем оптических измерительных наводок (наведений, установок);

– обработка данных, полученных в результате оптических измерительных наводок на изображение, с целью определения истинных значений измеряемых величин;

– анализ погрешностей измерений с целью определения достоверности полученных результатов.

Если последние два этапа носят характер общий для всех измерений и все необходимые вопросы рассмотрены в разделе 1.2, то первые два этапа характерны только для оптических измерений и являются предметом обсуждения в данном разделе.

2.1.1. Функциональная схема прибора для оптических измерений

Функциональная схема средства измерений – схема, поясняющая принцип измерения и содержащая узлы, необходимые для выполнения измерения.

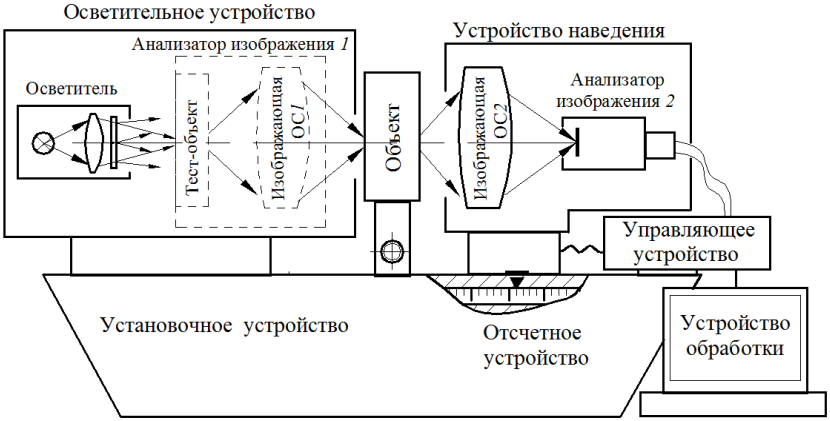


Рис. 2.1.1. Функциональная схема прибора для оптических измерений [5]

На рис. 2.1.1 представлена функциональная схема условного прибора для оптических измерений. Здесь и далее будем придерживаться терминологии, принятой в [6].

– Осветительное устройство – его назначение состоит в создании и формировании светового потока, в дальнейшем получающе-

го под воздействием испытуемого объекта информацию об измеряемом параметре и обращающегося в оптический сигнал:

- тестовый объект – это типовой объект заданной, обычно правильной формы (точка, перекрестие, растр, решетка), который служит для имитации реального объекта при анализе метрологических характеристик средства измерения;
- изображающая оптическая система *1* – предназначена для создания изображения тестового объекта в плоскости размещения объекта.

– Устройство наведения – предназначено для конструктивного оформления отдельных частей средства измерений, чаще всего изображающей оптической системы *2* и анализатора изображения:

- анализатор изображения – как правило, двухкаскадный, состоит из собственно анализатора *1* (сетки, марки, сканирующей щели, экрана, растра и т.д.) и приемника излучения (изображения) – анализатор *2*. Анализатор изображения (модуль-анализатор) вырабатывает на выходе сигнал, который может указывать момент выполнения оптической измерительной наводки, например совпадение изображения объекта и окулярного перекрестия;
- изображающая оптическая система *2* – предназначена для создания изображения объекта и тестового объекта в плоскости приемника и анализатора изображения *2*.

– Установочное устройство – служит для перемещения отдельных узлов измерительного прибора относительно друг друга. Состоит из направляющих, передаточного механизма и привода. Основные требования к установочным устройствам – чувствительность, точность и отсутствие значительного трения. Установочное устройство функционально связано с тем узлом, которому придано рабочее смещение.

– Отсчетное устройство – предназначено для получения отсчета (т.е. определения по внутреннему эталону измерительного прибора числа, соответствующего выполненному наведению на объект), передачи отсчета на вход устройства обработки информации и его регистрации. Для отсчётных устройств характерны узлы, развертывающие шкалу прибора для определения её дробных частей. Развертывающие узлы и системы делятся на:

- механические,
- оптико-механические,
- оптические,
- электронные.

В оптико-механических развертывающих узлах выполняется операция наведения на штрих основной шкалы, аналогичная наведению на объект, поэтому отсчетные системы можно рассматривать как «прибор в приборе» со своими устройствами подсветки и наведения. Очень часто средство измерений относят к оптическим из-за того, что оптическим является только развертывающий узел (см. рис. 1.1.3).

– Устройство обработки информации – совокупность аналоговых или аналого-цифровых преобразователей, встроенных в прибор микропроцессоров или отдельно расположенных компьютеров, снабженных специально разработанными программами. В визуальных приборах обработку информации производит оператор.

– Управляющее устройство измерительного прибора – предназначено для управления всем процессом измерения от настройки прибора до получения результата измерения. Процесс измерения представляет собой последовательность движений, которые можно разделить на настроечные и рабочие. Конструктивно управляющее устройство может быть совмещено с устройством обработки информации, например компьютером.

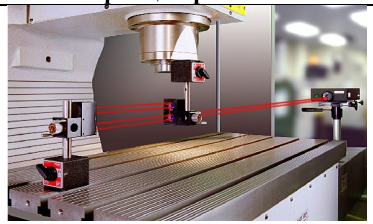
В табл. 2.1.1 приведены варианты интерпретации представленной здесь обобщенной терминологии в различных современных оптических средствах измерений конкретного назначения.

Работа оператора с оптическим средством измерения включает следующие этапы:

– ***Грубая настройка прибора***, в том числе:
- настройка освещения,
- центрирование,
- фокусирование и развороты вокруг оптической оси отдельных узлов прибора,
- установка всего прибора по отвесу,
- установка объекта измерения.

Таблица 2.1.1

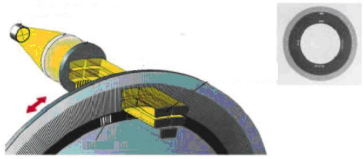
Узлы различных оптических средств измерений

Наименование прибора	**Назначение прибора**	**Схема, поясняющая принцип работы**	**Наименование узлов**
Лазерный интерферометр HPI-3D (URL: http://www.laserrtex.eu, www.stankin.ru)	Нанометрическое измерение перемещений: калибровка станков с ЧПУ, калибровка контрольно-измерительных машин, измерения геометрии машин	 Описание работы см. в примере 1.3.3	**Осветитель** – лазер **Тест-объект** – точечное отверстие пространственного фильтра **Изображающая оптическая система *1*, *2*** – светоделительный кубик **Анализатор изображения *1*** – референтный рефлектор **Объект** – подвижный рефлектор, установленный на перемещающийся объект **Анализатор изображения *2*** – фотодетектор **Устройство наведения** – корпус интерферометра **Устройство обработки** – счетчик полос **Отсчетное устройство** – устройство перемещения объекта с подвижным рефлектором **Развертывающие узлы** – системы, обеспечивающие работу интерферометра в режиме гетеродинирования **Установочное устройство *1*** – магнитное основание устройства наблюдения **Установочное устройство *2*** – магнитное основание светоделителя с референтным рефлектором **Установочное устройство *3*** – магнитное основание подвижного рефлектора

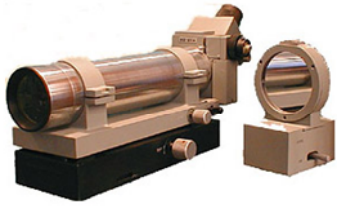
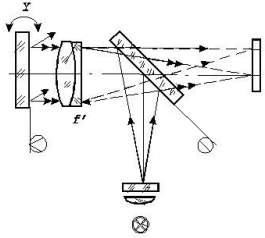
Продолжение табл. 2.1.1

Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Измерительный микроскоп CW-1010V серии Smart Vision (URL: http:/www.acm-service)	Бесконтактный контроль геометрии, размеров и качества поверхности различных деталей в режиме 2D	 Описание устройства и работы измерительного микроскопа см. в разделе 2.3.4	**Осветитель** – некогерентный источник света **Тест-объект** – устанавливается на место объекта при определении цены деления развертывающих узлов **Изображающая оптическая система *1*** – конденсор осветителя **Объект** – деталь произвольной формы **Изображающая оптическая система *2*** – микрообъектив **Анализатор изображения** – ПЗС-матрица **Устройство наведения** – корпус микроскопа **Устройство обработки** – орган зрения оператора, микропроцессор **Отсчетное устройство** – микровинты предметного столика, оснащенные фотоимпульсными энкодерами (рис. 2.2.7) **Развертывающие системы** – технические средства, обеспечивающие сканирование измеряемой сцены вдоль выделенного направления матрицы, получение фотометрического профиля и выделение границ изображения измеряемого объекта **Установочное устройство *1*** – предметный столик **Установочное устройство *2*** – реечный механизм фокусировки микроскопа

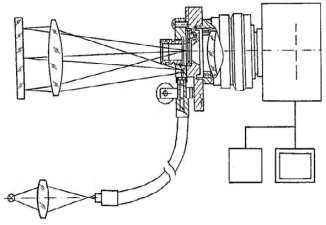
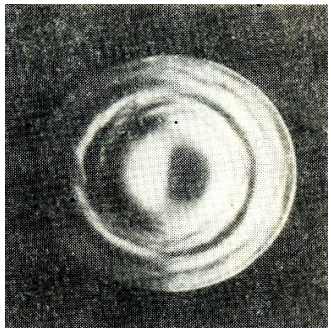
Продолжение табл. 2.1.1

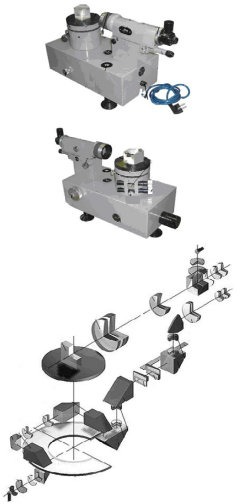
Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Фотоимпульсный датчик (энкодер) DGS-60 [44] (URL: http:/www.sick-automation.ru)	Измерение параметров работы электропривода: скорости и угла поворота вала с целью позиционирования и контроля углового положения	  Описание устройства и работы фотоимпульсных датчиков см.в разделе 2.2.2	**Осветитель** – светодиод, коллимирующая линза **Тест-объект** – сканирующая маска **Изображающая оптическая система *1*** – коллимирующая линза осветителя **Объект** – нет **Изображающая оптическая система *2*** – нет **Анализатор изображения *1*** – диск с метками **Анализатор изображения *2*** – фотоприемное устройство, оно же – устройство наблюдения **Устройство обработки** – электронные узлы **Отсчетное устройство** – вал энкодера, совмещенный с валом двигателя **Развертывающие узлы** – контрольные метки **Установочное устройство** – корпус датчика

Продолжение табл. 2.1.1

Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Автоколлиматор АКУ-0,5 (URL: http:/www.optic-systems.ru)	Применяется для работ, требующих точных измерений малых угловых величин: непрямолинейность горизонтальных и вертикальных направляющих, отклонений от плоскостности, взаимного расположения осей и плоскостей изделий в пространстве	  Описание устройства и работы автоколлиматоров см.в разделе 2.3.3	**Осветитель** – некогерентный источник **Тест-объект** – сетка осветителя **Изображающая оптическая система *1*** – светоделитель + объектив коллиматора **Объект** – контротражатель **Изображающая оптическая система *2*** – объектив коллиматора + светоделитель **Анализатор изображения *1*** – сетка окуляра **Анализатор изображения *2*** – глаз наблюдателя **Устройство наведения** – корпус автоколлиматора **Устройство обработки** – орган зрения оператора **Отсчетное устройство** – сетка окуляра **Развертывающие узлы** – окуляр микрометра **Установочное устройство *1*** – магнитное основание устройства наблюдения **Установочное устройство *2*** – магнитное основание контротражателя **Установочное устройство *3*** – кремальерный механизм окулярной части

Продолжение табл. 2.1.1

Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Теневой прибор [4]		  Описание устройства теневого прибора см.в разделе 2.3.1	**Осветитель** – светодиод с конденсором + волоконнооптический жгут **Тест-объект** – щель или точечная диафрагма **Изображающая оптическая система *1*** – контролируемая деталь **Объект** – контролируемая деталь **Изображающая оптическая система *2*** – объектив TV-камеры, связывающий плоскость входного зрачка контролируемой детали и плоскость фотоприемной матрицы **Анализатор изображения *1*** – визуализирующая диафрагма **Анализатор изображения *2*** – фотоприемная матрица, видеоконтрольное устройство **Устройство наведения** – TV-камера с объективом и фотоприемной матрицей **Устройство обработки** – орган зрения оператора + компьютер **Отсчетное устройство** – микровинты двухкоординатного столика со встроенным цифровым отсчетом + структура фотоприемной матрицы **Развертывающие узлы** – устройства и средства ПО, обеспечивающие сканирование измеряемой сцены вдоль выделенного направления матрицы, получение фотометрического профиля и выделение границ **Установочное устройство** – держатель конролируемой детали и трехкоординатный столик с цифровым отсчетом по двум координатам

Наименование прибора	**Назначение прибора**	**Схема, поясняющая принцип работы**	**Наименование узлов**
Гониометр Г5М (URL: http:/www.mi-kron.narod.ru)	Измерение углов между нормалями к плоским полированным граням твердых прозрачных и непрозрачных тел и пирамидальности призм	 Описание устройства и работы гониометров см. в разделе 2.3.3	**Осветитель** – некогерентный источник **Тест-объект** – сетка осветителя **Изображающая оптическая система *1*** – светоделитель + объектив коллиматора **Объект** – призма **Изображающая оптическая система *2*** – объектив коллиматора + светоделитель **Анализатор изображения** – сетка окуляра **Устройство наведения** – корпус автоколлиматора **Устройство обработки** – орган зрения оператора **Отсчетное устройство *1*** – отсчетный микроскоп **Отсчетное устройство *2*** – лимб (круговая шкала) установочного устройства **Развертывающие узлы** – нониальный отсчет, узлы, обеспечивающие наблюдение противоположных участков шкалы в одном поле зрения, – метод совпадений **Установочное устройство** – предметный столик

Продолжение табл. 2.1.1

Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Интерферометр GPI™ Series (URL: http:/www.zygo.com)	Вертикально скомпонованный интерферометр с совмещенными ветвями для контроля плоских и сферических оптических поверхностей	 Описание устройства и работы интерферометров см. в разделе 2.3.8	**Осветитель** – лазер с коллиматором и фильтром пространственных частот, встроенный калибр – длина волны этого лазера **Тест-объект** – точечное отверстие пространственного фильтра **Анализатор изображения *1*** – эталонная оптическая поверхность **Изображающая оптическая система *1*** – силовой объектив, формирующий лазерный пучок с требуемой расходимостью **Объект** – контролируемая оптическая поверхность **Изображающая оптическая система *2*** – силовой объектив + zoom-объектив TV-камеры, создающая изображение выходного зрачка контролируемой детали в плоскости анализатора **Анализатор изображения *2*** – фотоприемная матрица, видеоконтрольное устройство **Устройство наведения** – корпус интерферометра **Устройство обработки** – орган зрения оператора + компьютер **Отсчетное устройство** – нет **Развертывающие узлы** – нет **Установочное устройство *1*** – держатель контролируемой детали **Установочное устройство *2*** – держатель эталонной детали

Окончание табл. 2.1.1

Наименование прибора	Назначение прибора	Схема, поясняющая принцип работы	Наименование узлов
Сферометр Super Spherotronic (URL: http:/ www.trioptics.ru)	Измерение радиуса кривизны сферических поверхностей косвенным методом по стрелке прогиба	  Описание устройства и работы сферометров см. в разделе 2.3.6	**Осветитель** – некогерентный осветитель **Тест-объект** – эталонная плоскость **Изображающая оптическая система *1*** – нет **Объект** – измерительная шкала **Изображающая оптическая система *2*** – объектив, формирующий изображение шкалы в плоскости сетки отсчетного микроскопа **Анализатор изображения** – сетка отсчетного микроскопа в визуальном варианте, счетчик штрихов – в фотоэлектрическом **Устройство обработки** – орган зрения оператора + компьютер **Отсчетное устройство** – шток, связанный с измерительной шкалой **Развертывающие узлы** – нониальный отсчет в визуальном варианте **Установочное устройство** – набор колец

– ***Тонкая настройка прибора***, в том числе:
  - фокусирование при поперечных измерениях,
  - центрирование при продольных измерениях.

– ***Рабочее смещение и наведение***. Непосредственно измеряемой величиной в наводящих измерительных оптических приборах служат продольные и / или поперечные координаты на объекте и интенсивность как функция от координат. При измерении координат рабочее смещение представляет собой движение вдоль измеряемой координаты – ***измерительную наводку***.

– ***Снятие отсчета***. Для визуальных отсчетных устройств операция представляет собой совмещение перекрестия сетки отсчетного устройства со штрихом шкалы, а затем считывание данных.

– ***Обработка*** результатов измерительных наблюдений.

2.1.2. Оптические измерительные изображения

Оптическим измерительным (оптико-измерительным) изображением называется изображение, сформированное оптической схемой средства измерений и связанное с измеряемыми параметрами объекта.

Оптическое измерительное изображение может располагаться в пространстве предметов в любой плоскости, расположенной после изображающей или анализируемой системы, поскольку информация об измеряемом объекте представлена в любом сечении световой волны, преобразованной объектом. Для удобства извлечения информации и интерпретации результатов в оптических средствах измерения представлены два положения оптического измерительного изображения:

– в плоскости изображения, сформированного в фокусе изображающей оптической системы 2, – изображение тест-объекта или точечного источника;

– в плоскости выходного зрачка измеряемого объекта или в плоскости его изображения, сформированного изображающей оптической системой 2, – интерференционная или теневая картина.

Измерения, выполненные в оптическом измерительном изображении, сформированном в фокусе, считаются прямыми. А в из-

мерительном эксперименте при этом регистрируется распределение интенсивности световой волны. Отметим, что в задачах оптического производственного контроля методами оценки качества изображения учитываются все без исключения факторы, участвующие в формировании структуры реального оптического изображения. В этом состоит существенное и основное достоинство прямых методов.

Оптические измерения, выполненные в плоскости выходного зрачка, являются косвенными, а в измерительном изображении регистрируется теневая или интерференционная картина, по которой рассчитываются амплитуда и фаза световой волны.

К достоинствам косвенных методов можно отнести:

– возможность по известной топографии отклонений волнового фронта аналитически рассчитать большинство характеристик качества изображения (раздел 2.1.3);

– возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения.

Недостатки косвенных методов:

– высокая трудоемкость расшифровки данных;

– сложный математический аппарат обработки данных;

– дорогостоящее программное обеспечение;

– отсутствие информации о вторичных факторах, а именно:

  - мелкоструктурные дефекты оптических поверхностей (например, возникающие при ретуши крупногабаритной оптической поверхности малым полировальником),
  - остаточная шероховатость,
  - мелкоструктурные дефекты оптических сред (свили, неоднородности, включения, мутность),
  - дефекты оптических покрытий,
  - дефекты склеек,
  - рассеянный свет в системе,
  - блики в оптической системе,
  - свет, отраженный от элементов оправы оптической системы и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

Измеряемые характеристики в том и другом случае не являются независимыми. Для случая, когда речь идет об измерении характе-

ристик оптических систем, т.е. объектом измерений является оптическая система или оптическая поверхность, их взаимосвязь задается с помощью передаточных характеристик (раздел 2.1.3).

Оптические измерительные изображения, формируемые в фокусе изображающей оптической системы, представляют собой результат некогерентного сложения распределения интенсивности в изображении объекта и функции энергетического пропускания анализатора изображения. Для метрологических характеристик средства измерений, в особенности визуальных оптических приборов, большое значение имеет сочетание формы объекта измерений и анализатора изображения. Поэтому в практике оптического приборостроения имеется несколько видов анализаторов изображения – ***сеток*** или ***марок***. Наиболее часто встречающиеся из них приведены на рис. 2.1.2.

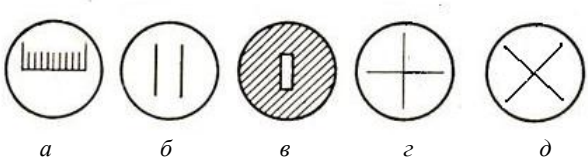


Рис. 2.1.2. Измерительные сетки, применяемые в оптических измерительных приборах: *а* – шкала; *б* – бисектор на светлом фоне; *в* – бисектор на темном фоне; *г* – перекрестье; *д* – крест

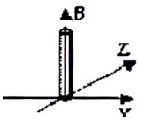
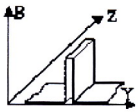
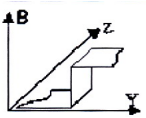
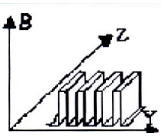
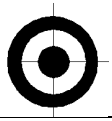
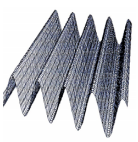
Оптимальный выбор сетки позволяет в несколько раз улучшить чувствительность наводок. Проблема оптимального выбора сетки тесно связана с видом анализируемого объекта. Практическая оптика ограничивается следующими типовыми элементами: точка, линия, полуплоскость и периодическая линейная решетка – ***меандр*** различной частоты (табл. 2.1.2). Эти типовые изображения называются ***тест-объектами или мирами***, и их конфигурация выбирается с учетом специфики решаемой измерительной задачи (раздел 3.4.3).

Наиболее универсальный тест-объект при исследовании качества изображения оптических систем – «светящаяся точка». Изображение тест-объекта «светящаяся точка» – это пятно рассеяния

оптической системы. Наблюдение кружка рассеяния, формируемого исследуемой системой, позволяет обнаруживать аберрации системы с чувствительностью на уровне до 0,1λ. Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся точка», есть двумерная функция, носящая название ***функция рассеяния точки*** (ФРТ).

Таблица 2.1.2

Тест-объекты для создания оптических измерительных изображений

	Светящаяся точка	**Светящаяся линия**	**Полуплоскость**	**Линейная решетка**
Тест-объект				
Функция распределения яркости в объекте				
Изображение тест-объекта				
3D-модель функции распределения интенсивности в изображении				

Тест-объект «светящаяся линия» реализуется в виде щелевой диафрагмы малой ширины, освещенной проходящим светом, и служит для моделирования часто встречающегося в практике объекта в виде длинной одиночной линии (рис. 2.1.3).

Изображение тест-объекта «светящаяся линия» есть фигура рассеяния в форме размытого изображения одиночной линии.

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся линия», есть квазиодномерная функция, носящая название ***функция рассеяния линии*** (ФРЛ). Смысл термина «квазиодномерная» здесь заключается в том, что поскольку линия имеет практически бесконечную длину, информативным является только направление ее ширины.



Рис. 2.1.3. Оптические измерительные изображения для объекта измерений в виде линии

При необходимости характеризовать четкость деталей изображения, создаваемого исследуемой системой, рассматривают структуру изображения тест-объекта, представляющего собой прямолинейную границу черного и светлого полей, так называемого ***пограничного теста***, или полуплоскости. Распределение яркости в полуплоскости есть функция скачка. Распределение освещенности в изображении полуплоскости есть квазиодномерная ***краевая функция***. Ее график называется ***пограничная кривая***. Величиной, определяющей четкость деталей изображения, является ***резкость изображения.*** Резкость характеризуется углом наклона пограничной кривой, в свою очередь определяемой структурой пятна рассеяния. Тест-объект «полуплоскость» описывает часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты: например край непрозрачного объекта на освещенном фоне (рис. 2.1.4), на который выполняются оптические измерительные наводки.



Рис. 2.1.4. Оптическое измерительное изображение для объекта измерений в виде полуплоскости

Тест-объект «линейная решетка», или ***меандр***, реализуется в виде прямолинейных параллельных штрихов на освещенном фоне, при этом ширина темных штрихов равна ширине светлых. Тест-объект, состоящий из различным образом ориентированных линейных решеток с различным периодом, называют ***мира Фуко*** (рис. П.33). Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «линейная решетка», есть квазиодномерная функция с полутоновым распределением интенсивности.

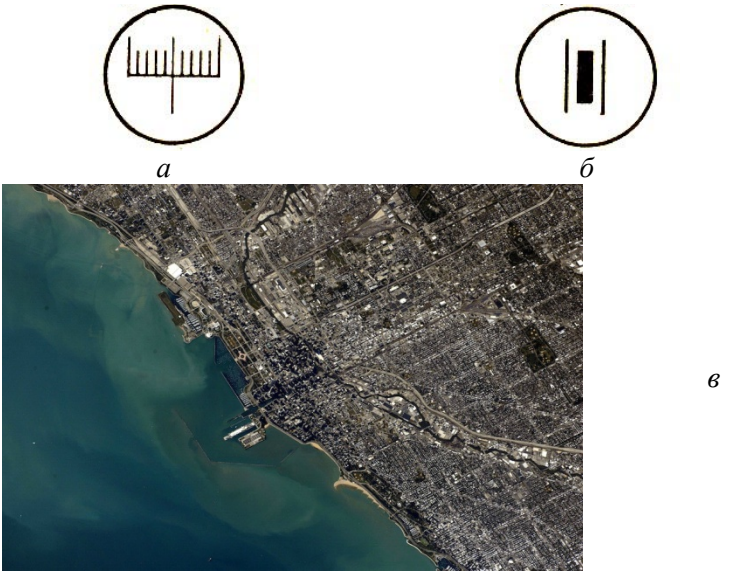


Рис. 2.1.5. Оптические изображения, описываемые с помощью меандра: *а* – оптическое измерительное изображение шкалы; *б* – оптическое измерительное изображение штриха в бисекторе; *в* – космическая съемка г. Чикаго с борта МКС, *фото Ф. Юрчихина* (URL: http://bigpicture.ru/?p=225245)

С помощью меандра описываются часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты, например такие, как шкала, бисектор, периодические структуры на аэрокосмических снимках земной поверхности (рис. 2.1.5).

Теневые оптические измерительные изображения в выходном зрачке (теневые картины) образуются в теневом приборе

(пример 2.3.1) с помощью анализаторов *1*, получивших название ***визуализирующие диафрагмы***, и тест-объектов. В зависимости от положения визуализирующих диафрагм относительно каустики, созданной изображающей системой *1*, различают:

– сфокусированные диафрагмы, расположенные в каустике;

– расфокусированные диафрагмы, расположенные вне каустики:

- до каустики по ходу лучей – предфокальное положение,
- после каустики – зафокальное.

Различное сочетание тест-объектов теневого прибора, визуализирующих диафрагм и анализаторов изображения *2* позволяет получать различные варианты оптического измерительного изображения, адаптированные для решения тех или иных измерительных задач (табл. 2.1.3). Ввиду того, что теневые измерения проводятся с высококачественными оптическими системами, теневые измерительные изображения достаточно устойчивы к положению плоскости, в которой они наблюдаются. Поэтому вопрос о фокусировке изображающей оптической системы *2* решается так, как того требует методика измерительного эксперимента, а именно:

– если исследуется оптическая система, то теневые изображения наблюдаются в ее выходном зрачке;

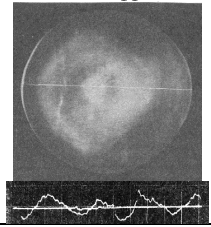
– если измерения производятся с каким-то иным объектом, то изображающая оптическая система фокусируется на этот объект.

Интерференционные оптические измерительные изображения в выходном зрачке (интерферограммы) образуются в интерферометре (раздел 2.3.8) в результате интерференции волновых фронтов: предметного и опорного. Предметный фронт формируется объектом – измеряемой деталью, опорный – анализатором *1* (эталонной поверхностью). Вид интерференционного оптического измерительного изображения зависит от настройки интерферометра.

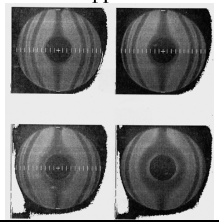
Интерферометр устроен таким образом, что если эталонная и измеряемая оптические детали изготовлены идеально (т.е. уравнения, описывающие форму поверхностей, имеют вид, эквивалентный теоретическому) и интерферометр настроен идеально, то разность фаз интерферирующих волновых фронтов постоянна в любой точке выходного зрачка.

Таблица 2.1.3

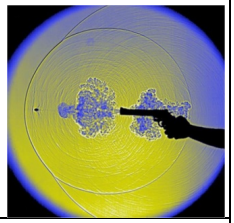
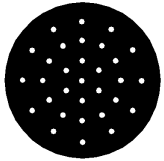
Оптические измерительные теневые изображения

		Тест-объект			
		Светящаяся точка	**Светящаяся линия (щель) нерегулируемая**	**Светящаяся линия (щель) регулируемая**	**Светящаяся решетка**
Сфокусированная диафрагма	Полуплоскость (нож Фуко) с анализатором 2 – визуально	Качественный метод Максутова	Качественный метод Максутова–Фуко 		
Сфокусированная диафрагма	Полуплоскость (нож Фуко) с анализатором 2 – TV-камера			Количественный метод Фуко–Филбера для сферических точных волновых фронтов 	

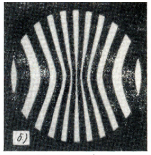
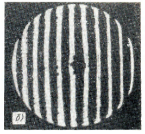
Продолжение табл. 2.1.3

		Тест-объект			
		Светящаяся точка	**Светящаяся линия (щель) нерегулируемая**	**Светящаяся линия (щель) регулируемая**	**Светящаяся решетка**
Сфокусированная диафрагма	Нить с анализатором 2 – TV-камера + отсчетное устройство продольного перемещения		Количественный метод щели и нити Максутова для контроля асферических волновых фронтов 		
Сфокусированная диафрагма	Круглый экран или диафрагма	Фазово-контрастные методы темного и светлого поля соответственно в микроскопии			

Продолжение табл. 2.1.3

		Тест-объект			
		Светящаяся точка	**Светящаяся линия (щель) нерегулируемая**	**Светящаяся линия (щель) регулируемая**	**Светящаяся решетка**
Расфокусированная диафрагма	Решетка-меандр				Метод Теплера для контроля газовых струй и воздушных потоков 
Расфокусированная диафрагма	Экран с отверстиями 	Количественный метод Гартмана			

Окончание табл. 2.1.3

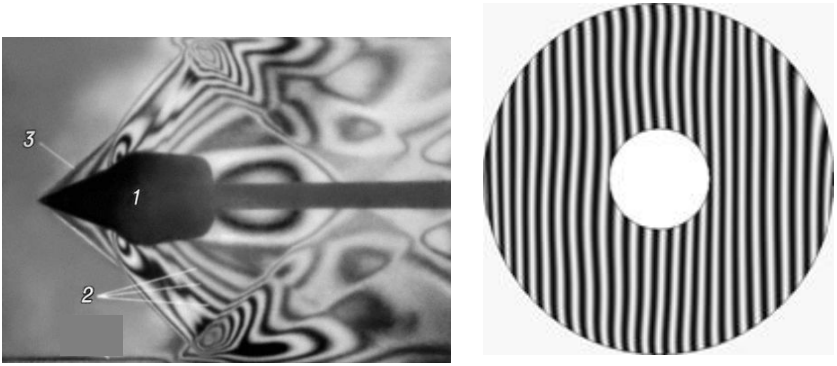
		Тест-объект			
		Светящаяся точка	**Светящаяся линия (щель) нерегулируемая**	**Светящаяся линия (щель) регулируемая**	**Светящаяся решетка**
Расфокусированная диафрагма	Решетка-меандр		Качественный метод Ронки для контроля сферических волновых фронтов		
	Криволинейная решетка 		Нуль-тест Ронки для контроля асферических волновых фронтов 		

Поэтому все изменения в результирующей интерференционной картине с реальным предметным фронтом обусловлены набегом фазы в каждой точке волнового фронта, вызванным отклонением реального фронта от теоретического. В этом случае говорят, что интерферометр настроен на ***бесконечно широкую полосу***. Этот термин появился из-за того, что при интерференции волновых фронтов, распространяющихся по одному и тому же направлению и имеющих неизменный во всех точках набег фазы, результирующая интерференционная картина представляет собой одну-единственную полосу – темную или светлую, в зависимости от соотношения фаз интерферирующих волн. В оптическом производственном контроле применяется термин ***настройка интерферометра на кольца***.

Если рабочий или опорный пучок были повернуты на какой-то угол, то результирующая интерференционная картина будет наблюдаться на фоне регулярной системы равноотстоящих друг от друга параллельных полос. Шаг и ориентация этих полос определяются величиной угла поворота. Такая настройка интерферометра называется настройкой на ***полосы конечной ширины***. В этом случае отклонения в реальной предметной волне проявляются в виде искривлений в системе полос (***настройка интерферометра на полосы***).

На рис. 2.1.6 показаны два интерференционных измерительных изображения различных объектов, полученных при разных настройках соответствующих интерферометров. Отсюда видно, что, изменяя настройки, можно адаптировать интерферометр к специфике решаемой измерительной задачи. Более того, в практической интерферометрии хорошо известно, что от правильности выбора числа и конфигурации интерференционных полос очень сильно зависит погрешность интерференционных измерений.

Поскольку опорный и предметный волновые фронты имеют достаточно протяженную общую пространственную область, то и интерференционные измерительные изображения существуют в любой плоскости, перпендикулярной оптической оси в этой области. При определенных условиях, обсуждаемых в разделе 2.3.8, эти изображения очень близки и трудноотличимы. Поэтому вопрос о ***локализации*** интерференционных полос, как правило, нечасто обсуждается в литературе.



а *б*

Рис. 2.1.6. Интерферограммы при настройке интерферометра на: *а* – бесконечно широкую полосу. Фото представляет собой интерферограмму обтекания модели *1* сверхзвуковым потоком (URL: http://www.help-rus-student.ru); *б* – полосы конечной ширины. Фото представляет собой результат исследования вторичного зеркала, изготовленного для проекта VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) (URL: http://www.lzos.ru). *2* – области ламинарного потока с полосами конечной ширины; *3* – граница потока

Подробно он освещен в [19]. Здесь же заметим, что под этим термином понимается плоскость, на которую сфокусирована изображающая система *2* для наблюдения измерительного интерференционного изображения. В зависимости от специфики решаемой задачи в практике измерений плоскость локализации может быть расположена:

– в плоскости выходного зрачка контролируемой поверхности, если угловая апертура контролируемой детали не больше апертуры эталонной детали;

– в плоскости выходного зрачка эталонной поверхности, если угловая апертура эталонной детали не больше апертуры контролируемой детали;

– в плоскости объекта;

– в бесконечности.

2.1.3. Передаточные характеристики оптических систем

Выше было сказано, что оптические измерительные изображения для задач оптического производственного контроля, регистрируемые в фокусе и в плоскости выходного зрачка, не являются независимыми. Эта связь задается посредством передаточных характеристик оптических систем. Этот вопрос имеет отношение не только к практике оптических измерений, он скорее является теоретическим и междисциплинарным, поэтому здесь ограничимся определениями и перечислением отдельных положений из этой области. За подробностями можно обратиться, например, к книге [20]. В аспекте же данного пособия оптические передаточные функции представляют интерес потому, что они являются предметом оптических измерений.

Пусть некая изображающая система, заданная на рис. 2.1.7, своим выходным зрачком освещается точечным источником света, т.е. тест-объект – светящаяся точка. Световое излучение от этой точки после прохождения изображающей оптической системы в ее выходном зрачке создает электромагнитное колебание с комплексной амплитудой $F'(\beta',\gamma')$ такое, что в т. A' с координатами (x', z') формируется изображение этого тест-объекта.

Если $E'(y', z')$ – комплексная амплитуда световой волны в плоскости изображения точечного источника, то причинно-следственные связи между $F'(\beta',\gamma')$ и $E'(y', z')$ задаются преобразованием Фурье:

$$E'(y', z') = c_1 \frac{R\sqrt{D'_{p'}}}{\lambda} \iint_{S_p} F(\beta',\gamma') exp[ik(\beta' y' + \gamma' z')]\, d\beta' d\gamma', \quad (2.1.1)$$

где переменные $\beta' = \frac{m'}{R}$ и $\gamma' = \frac{M'}{R}$ носят название ***направляющих косинусов***; R – радиус кривизны волнового фронта; $D'_{p'}$ – диаметр выходного зрачка.

Функция $F'(\beta',\gamma')$ может быть представлена в общем виде:

$$F'(\beta',\gamma') = cP'^{1/2}(\beta',\gamma')\exp[ikW(\beta',\gamma')], \quad (2.1.2)$$

где c – некая константа, характеризующая яркость светящейся точки; $W(\beta',\gamma')$ – обозначение ***волновой аберрации***; $P'(\beta',\gamma')$ – пропускание по зрачку.

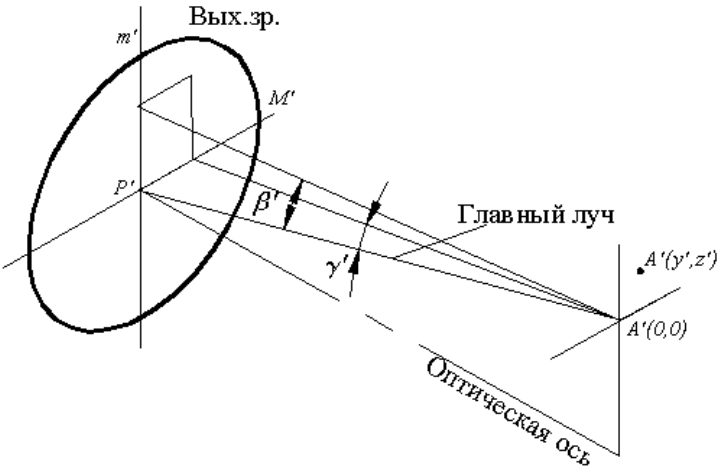


Рис. 2.1.7. К вопросу о передаточных характеристиках оптических систем

Функция $P'(\beta',\gamma')^{1/2}\cdot e^{ikW(\beta',\gamma')}$ носит название ***зрачковой функции***. Причем, как правило, $P'(\beta',\gamma') = \text{const}$, и тогда зрачковая функция определяется волновой аберрацией $e^{ikW(\beta',\gamma')}$, где $k = 2\frac{\pi}{\lambda}$ – волновое число. Зрачковая функция не зависит от тест-объекта и является характеристикой оптической системы.

Обозначим $D'(x',z') = |E'(y',z')|^2$ – распределение освещенности в изображении точечного источника и

$$D'_0(0,0) = cR^2\,\frac{D'_{p'}\left[\pi A'^2\right]^2}{\lambda^2} - \qquad (2.1.3)$$

освещенность в осевой точке изображения, сформированного этой же самой оптической системой при освещении ее тем же самым источником света, но при отсутствии в ней аберраций, т.е. $W(\beta',\gamma') = 0$.

Тогда при $A' = \sin\sigma'_{A'}$ – задняя апертура изображающей оптической системы назовем ***функцией рассеяния точки*** нормированное соотношение

$$\Phi PT(y',z') = \frac{D'(x',z')}{D'_0(0,0)} = \\ = \frac{\left|\iint_{S_p} F(\beta',\gamma')\exp[ik(\beta' y'+\gamma' z')]d\beta' d\gamma'\right|^2}{R^2\frac{D'p'\left[\pi A'^2\right]^2}{\lambda^2}}. \quad (2.1.4)$$

Если объект произвольный и характеризуется яркостью $I(y,z)$, то освещенность в его изображении описывается с точностью до константы с помощью ФРТ соотношением

$$I'(y',z') = \iint_{-\infty}^{\infty} I(y,z)\cdot \Phi PT(y'-y, z'-z)dydz, \quad (2.1.5)$$

где $I'(y',z')$ – распределение освещенности в изображении объекта конечных размеров.

Определим ***оптическую передаточную функцию*** ОПФ(μ,ν) с помощью соотношения

$$ОПФ(\mu,\nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} \Phi PT(y',z')\exp[2\pi(\mu y' + \\ +\nu z')]\ dy'dz', \quad (2.1.6)$$

тогда ОПФ выражается через зрачковую функцию с помощью функции автокорреляции

$$ОПФ(\mu,\nu) = \iint_{S_p} F(\beta',\gamma')\cdot F^*(\beta'-\lambda\mu,\gamma'-\lambda\nu)d\beta' d\gamma', \quad (2.1.7)$$

здесь $\mu = k\beta'$, $\nu = k\gamma'$ – ***пространственные частоты изображения***.

Если $i'(\mu,\nu)$ – фурье-образ распределения энергии в изображении объекта конечных размеров, то, зная ОПФ и фурье-образ функции пропускания объекта $i(\mu,\nu)$, можно рассчитать фурье-образ освещенности изображения $i'(\mu,\nu)$ по формуле

$$i'(\mu,\nu) = i(\mu,\nu)\cdot ОПФ(\mu,\nu), \quad (2.1.8)$$

и собственно распределение освещенности изображения

$$I'(y', z') = \iint_{-\infty}^{\infty} i(\mu, \nu) \cdot ОПФ(\mu, \nu) \cdot \exp[2\pi(\mu y' + \nu z')]\, d\mu d\nu. \quad (2.1.9)$$

В общем виде ОПФ – комплексная функция, поэтому ее можно записать в виде

$$ОПФ(\mu, \nu) = ЧКХ(\mu, \nu)\exp[i ЧФХ(\mu, \nu)]. \quad (2.1.10)$$

Обозначим:

– контраст гармонического объекта с пространственными частотами μ, ν

$$K(\mu, \nu) = \frac{I(\mu, \nu)_{\max} - I(\mu, \nu)_{\min}}{I(\mu, \nu)_{\max} + I(\mu, \nu)_{\min}}; \quad (2.1.11)$$

– контраст его изображения

$$K'(\mu, \nu) = \frac{I'(\mu, \nu)_{\max} - I'(\mu, \nu)_{\min}}{I'(\mu, \nu)_{\max} + I'(\mu, \nu)_{\min}}, \quad (2.1.12)$$

где $I(\mu, \nu)_{\max}$, $I'(\mu, \nu)_{\max}$ – максимальные значения яркости предмета и освещенности его изображения на частотах μ, ν; $I(\mu, \nu)_{\min}$, $I'(\mu, \nu)_{\min}$ – их минимальные значения.

Частотно-контрастной характеристикой назовем отношение

$$ЧКХ(\mu, \nu) = \frac{K'(\mu, \nu)}{K(\mu, \nu)}. \quad (2.1.13)$$

Частотно-фазовая характеристика – сдвиг фаз между гармоническим объектом и его изображением. Как правило, ЧФХ = 0, но в современных оптических системах это не всегда верно.

Итак, ***оптическими передаточными функциями*** называются:

– волновая аберрация оптической системы (часто ее называют остаточной волновой аберрацией, предполагая, что это остаток от расчета и от техпроцесса изготовления);

– функция зрачка, характеризующая изображающие свойства изображающей оптической системы;

– функция рассеяния точки – структурная функция, характеризующая квадратичный отклик изображающей оптической системы на импульсный сигнал в координатной системе координат;

– оптическая передаточная функция – структурная функция, характеризующая квадратичный отклик изображающей оптической системы на импульсный сигнал в частотной системе координат;

– частотно-контрастная характеристика – структурная функция, характеризующая способность изображающей оптической системы по передаче контраста гармонического сигнала;

– частотно-фазовая характеристика – структурная функция, характеризующая способность изображающей оптической системы передавать фазу гармонического сигнала.

Поскольку все эти характеристики взаимосвязаны, то, измерив остаточную аберрацию изображающей оптической системы, можно:

– рассчитать все передаточные функции;

– проанализировать работу изображающей оптической системы с тест-объектом;

– проанализировать работу изображающей оптической системы с объектом произвольной формы.

Это дает основание делать вывод о связи оптических измерительных изображений, формируемых в выходном зрачке изображающей оптической системы и в ее фокусе. Однако в этом есть некоторая неопределенность, которая связана с тем, что и волновая аберрация, и функция зрачка – амплитудные функции, а все остальные – квадратичные. Поэтому прямые преобразования производятся легко, а обратные нет. Эта необратимость в оптике называется ***фазовой проблемой*** и относится к числу так называемых некорректных задач. То есть тех задач (в том числе измерительных), которые требуют для своего решения некоей дополнительной информации, определяемой, например, априорным путем (рис. 3.4.20). Этот вопрос находится далеко за пределами настоящего пособия, тем не менее упомянуть об этом представляется необходимым.

2.1.4. Оптические измерительные наводки

Оптическая измерительная наводка – это процесс взаимного позиционирования, т.е. совмещения элементов двух изображений:

– того, на которое наводятся, – изображение измеряемого объекта;

– того, которым наводятся, – изображение измерительной марки.

В зависимости от направления рабочего смещения различают следующие виды наводок:

– ***поперечная измерительная наводка***, осуществляемая посредством поперечных смещений измерительного прибора или поворотов;

– ***продольная измерительная наводка***, осуществляемая путем совмещения вдоль оптической оси перекрестия прибора и изображения объекта в одной плоскости.

Измерительные наводки – процесс и термин, характерные только для оптических измерений. Осуществляется оптическая измерительная наводка с помощью установочного устройства, при этом смещение измеряется с помощью отсчетного устройства. Исключительность этого понятия заключается в том, что с его помощью характеризуются такие метрологические характеристики оптических измерительных приборов, как чувствительность и точность. Выше было показано, что точность прибора, по определению, характеризуется относительной погрешностью измерений, а с другой стороны, также по определению, абсолютная погрешность определяет минимальный различимый прибором измерительный сигнал, т.е. порог чувствительности. Так что между всеми этими терминами связь такова, что точность и порог чувствительности характеризуют свойства прибора, а погрешность измерений – величина, измеряемая для оценки этих характеристик в процессе оптических наводок. Поэтому очень часто, говоря о погрешности измерительных наводок в оптических измерениях, имеют в виду порог чувствительности и точность оптических измерений. Нередко в книгах по оптическим измерениям под чувствительностью оптических наводок понимают именно порог чувствительности, и это противоречие с современной терминологией следует иметь в виду.

При изучении установочной погрешности измерительных наводок оптического измерительного прибора необходимо учитывать следующие факторы:

– свойства оптического излучения, распространяющегося в приборе;

– параметры и свойства прибора, определяющие:

- дифракцию на зрачке,
- аберрации изображающей оптической системы или ***остаточные аберрации***, имеющие два проявления, а именно:
  - ✓ аберрации, связанные с остатком от расчета при проектировании оптической системы,
  - ✓ ошибки изготовления оптической системы,
- структуру и характеристики оптических измерительных изображений, связанных с
  - ✓ видом тест-объекта,
  - ✓ видом анализатора;

– особенности регистрации световых явлений (и оптических изображений), формируемых оптическим измерительным прибором:

- порог контрастной чувствительности приемника оптического измерительного изображения (в классических оптических измерениях это обычно глаз),
- способ измерительных наводок.

С аберрациями изображающих оптических систем поступают очень просто: если оптическая система предполагается для использования в целях оптических измерений, то ее изображающие свойства не должны отличаться от свойств идеальной оптической системы. Поскольку естественный предел для изображающих свойств таких систем устанавливает явление дифракции на апертуре, то их называют ***дифракционно-ограниченными***. В этом случае аберрации являются столь малыми, что их влияние на процесс измерительных наводок ничтожно, и этим влиянием пренебрегают. Для случая ***аберрационно-ограниченных оптических систем*** этого делать нельзя, и при изучении их изображающих свойств следует использовать реальные передаточные характеристики с учетом остаточных аберраций (раздел 2.3.8).

Для дифракционно-ограниченных изображающих систем теория чувствительности оптических измерительных наводок строится на основе рассмотрения дифракционной структуры изображения, подробно рассмотренной в [21]. Если предметом является светящаяся точка (точечное отверстие), то в плоскости изображения точечного отверстия, построенного дифракционно-ограниченной системой, образуется ***каустика***. За размер изображения точки в фокусе дифракционно-ограниченной системы принимается центральное пятно – ***пятно Эри*** (рис. П.31) с размерами:

– поперечный размер пятна Эри

$$r''_{э}{}'' = 0{,}61\,{\lambda}/{A'}; \tag{2.1.14}$$

– продольный размер пятна Эри

$$\rho'_{э} = 2\,{\lambda n'}/{A'^2}, \tag{2.1.15}$$

где A' – числовая апертура изображающей оптической системы со стороны пространства изображений, определяемая согласно соотношению (П.47): n' – показателем преломления среды, $\sigma'_{A'}$ – задним апертурным углом оптической системы.

Неопределенность в положении предмета (погрешность позиционирования оптической системы относительно объекта) может быть выражена аналогичными соотношениями:

– поперек оси

$$r_{э} = 0{,}61\,{\lambda}/{A}\,; \tag{2.1.16}$$

– вдоль оси

$$\rho_{э} = 2\,{\lambda n}/{A^2}, \tag{2.1.17}$$

где A – числовая апертура изображающей оптической системы со стороны пространства предметов, определяемая согласно соотношению (П.46): n – показателем преломления среды, σ_A – передним апертурным углом оптической системы.

Таким образом, в соотношениях (2.1.14)–(2.1.17) учитываются:

– свойства оптического излучения, распространяющегося в приборе, – λ;

– параметры и свойства прибора, определяющие дифракцию на зрачке, – n, n', A, A'.

Размеры пятна Эри в пространстве предметов есть оценка возможностей оптической системы для выполнения продольных и поперечных наводок. Если рассматривать измерительную наводку прибора на тест-объект **без использования измерительной марки** как случайный процесс, а она таковой является, то пятно Эри определяет доверительный интервал $3s_{x_{\text{ср}}}$, за пределы которого с очень высокой вероятностью $p_{\text{д}} = 99\%$ не выходит истинная настройка прибора (1.2.17), осуществляемая с помощью установочного устройства. При этом если x – измерительное наблюдение, регистрируемое с помощью отсчетного устройства, то под $x_{\text{ср}}$ следует понимать номинальное положение измерительного прибора, осуществляющего наводки, $s_{x_{\text{ср}}}$ – среднеквадратичное отклонение результата. Вероятность того, что наводка выйдет за пределы пятна Эри, менее 0,1, следовательно, такая наводка может квалифицироваться как промах. Этот вывод дает основание для использования размеров пятна Эри для оценки качества настройки оптического прибора: если n = 10–15 наводок и $3s_{x_{\text{ср}}}$ больше размеров пятна Эри, следует сделать вывод о том, что один или несколько из вышеперечисленных факторов, влияющих на порог чувствительности наводок, не имеет оптимального значения.

Вид дифракционной функции рассеяния зависит от вида объекта измерительных наводок. Помимо ФРТ, различают функции рассеяния линии – ФРЛ, функции рассеяния края – пограничная кривая. Эти функции могут быть получены из ФРТ посредством интеграла свертки (2.1.5) с функцией пропускания соответствующего тест-объекта. Эти действия выполнены неоднократно различными авторами, и результат освещен в многочисленной литературе по оптическим измерениям. Здесь ограничимся очевидным выводом о том, что r, r' и ρ, ρ′ для этих функций рассеяния вычисляются по аналогичным формулам, что вытекает из интеграла (2.1.5), разница проявляется только в числовом коэффициенте (табл. 2.1.4), кото-

рый и учитывает структуру и характеристики оптических измерительных изображений для дифракционно-ограниченных изображающих систем.

С функциями рассеяния непосредственно связана такая характеристика оптических систем, как ***разрешающая способность***, под которой понимается свойство оптической системы раздельно изображать элементарные и близко расположенные изображения: точки или линии. Важнейшее значение для теоретической оценки разрешающей способности имеет понятие ***разрешения по Рэлею*** (рис. П.32), согласно которому на пределе разрешения центральный максимум одного дифракционного изображения должен накладываться на первый минимум другого дифракционного изображения. Тогда для различных тест-объектов имеем значения разрешающей способности, приведенные в табл. 2.1.4.

Таблица 2.1.4

Разрешающая способность для различных тест-объектов, $\lambda = 0,55$ мкм и $n = 1$

Объект	Разрешающая способность в пространстве предметов		Модель изображения
	в линейной мере, мкм	в угловой мере, угл. сек.	
Две близко расположенные точки	$\varepsilon_т = r_э = {}^{0,32}/_{A}$	$\varphi_т = {}^{138}/_{D_p}$	
Две близко расположенные линии	$\varepsilon_л = r_л = {}^{0,29}/_{A}$	$\varphi_т = {}^{129}/_{D_p}$	

Разрешающая способность в табл. 2.1.4 обозначена буквами ε и φ соответственно в линейной и угловой мере. Индексы «т» и «л» означают, что эта разрешающая способность относится к тест-объекту в виде точки или линии. Численный коэффициент получается после подстановки в (2.1.16), (2.1.17) (и их аналоги для линий) значений длины волны $\lambda = 0,55$ мкм и приведения радиан к секундам для разрешающей способности в угловой мере.

Разрешающая способность по Рэлею в оптическом приборе с дифракционно-ограниченной изображающей системой может быть реализована только в том случае, если приемник, с помощью которого регистрируется изображение тест-объекта, имеет соответствующий размер пикселя.

Пример 2.1.1. В визуальных оптических приборах приемником является сетчатка глаза. Если изображающая оптическая система является дифракционно-ограниченной, то её разрешающая способность в угловой мере согласно табл. 2.1.4 в пространстве изображений равна

$$\varphi'_m = {}^{138}/_{D'_{p'}}. \qquad (2.1.18)$$

С учетом того, что в визуальных оптических приборах создается оптимальная освещенность объекта измерений и отсчетных шкал, равная 50–250 лк, зеленым светом с длиной волны $\lambda = 0{,}55$ мкм, а диаметр выходного зрачка выбирается равным диаметру зрачка глаза для нормального освещения – 2 мм, разрешающая способность дифракционно-ограниченного визуального оптического прибора составляет

$$\varphi'^{\text{ВП}}_{\text{т}} = 69 \text{ угл. сек.} \approx 60 \text{ угл. сек.}$$

С другой стороны, в условиях такой нормальной освещенности глаз (раздел 2.3.1 и П.2.7.1) имеет колбочковый механизм зрения, следовательно, линейный размер пикселя равен размеру колбочки, т.е. составляет 5 мкм для колбочек желтого пятна (обозначенного на рис. 2.3.6, *б* цифрой *2*). Тогда при заднем фокусном расстоянии глаза ~ 22,785 мм и показателе преломления студенистой влаги $n'_{\text{гл}} = 1{,}33$ получим угловой размер колбочки со стороны пространства предметов для глаза:

$$\varphi_{\text{колб}} = \frac{1{,}33 \cdot 180 \cdot 3600 \text{ угл. сек} \cdot 5 \text{ мкм}}{22{,}785 \cdot 10^3 \text{ мкм} \cdot 3{,}14} \cong 60 \text{ угл. сек.}$$

Разрешение по Рэлею для глаза со стороны пространства предметов составляет:

$$\varphi_{\text{гл}} = {}^{138}/_{D_{\text{гл}}} \cong 60 \text{ угл. сек.}$$

И наконец, хорошо известен экспериментальный факт, что практическая угловая разрешающая способность нормального глаза в нормальных условиях со стороны пространства предметов составляет

$$\varphi_{гл} = 1 \text{ угл. мин.}$$

Отсюда следует, что глаз – дифракционно-ограниченная система с оптимальным матричным приемником световой энергии, а приборы для визуальных оптических измерений конструируются с учетом свойств глаза.

Разрешающая способность, установленная с помощью дифракционных функций, – теоретический предел, который, в принципе, достижим в наблюдении малых объектов с помощью оптических изображающих систем без привлечения дополнительной информации. В связи с этим представляется уместным упомянуть об одном современном методе оптических измерений.

Пример 2.1.2. Один из способов достижения «сверхразрешения» (лучше, нежели предсказывает критерий Рэлея) связан с регистрацией спекл-структур от некоррелированных источников. При быстрой регистрации наблюдается интерференция в пределах дифракционных изображений, период такой интерференционной картины зависит от расстояния между источниками. Следовательно, измерив этот период, можно определить данное расстояние. Причем оно может быть меньше, чем дифракционный предел, характеризующий размер пятен спекл-структуры (рис. 2.1.8). Подобная методика реализована в астрономических наблюдениях для измерения двойных звезд по методу Лабейри [22]. Термин «сверхразрешение» взят в кавычки, поскольку речь идет не о наблюдении сверхмалых объектов, а об измерении расстояния между ними.

Также, как в этом примере, можно утверждать, что разрешающая способность изображающей оптической системы, конечно, важна для измерительной наводки и определяет ее порог чувствительности, но не равна ему, поскольку в образовании оптического измерительного изображения при наводке принимает участие не только тест-объект, но и измерительная марка – анализатор.

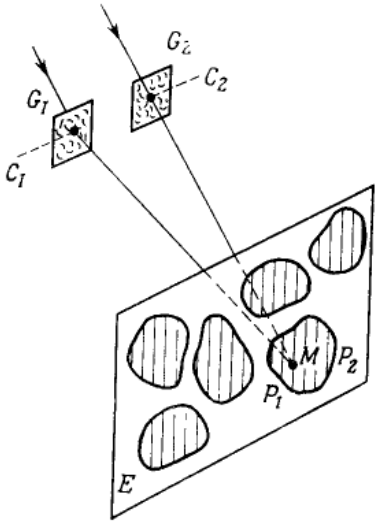


Рис. 2.1.8. Измерение расстояния между близко расположенными источниками, образующими нескоррелированные спекл-структуры, угловой размер пятен которых больше углового размера расстояния [22]

Порогом чувствительности продольной или поперечной наводки называется наименьшее расстояние между изображением объекта измерения и измерительной маркой (центром перекрестия, краем темного и светлого полей, серединой отсчетного штриха), при котором наблюдатель уверенно устанавливает факт их несовмещения. Порог чувствительности продольной наводки выражается в линейной мере, а поперечной – как в угловой, так и в линейной мерах. Как и в примере 2.1.2, здесь идет речь о несколько иной измерительной операции с малыми объектами с привлечением дополнительной информации. В этом случае очень большое значение имеют такие факторы, как способ измерительных наводок, вид оптического измерительного изображения, свойства приемника изображения, с помощью которого контролируется измерительная наводка, алгоритм обработки измерительной информации, расположение пикселей (упаковка) приемника изображения.

Пример 2.1.3. На рис. 2.1.9 приведен фрагмент модели оптического измерительного изображения, в котором реализованы поперечная и продольная наводки бисектора измерительной марки на штрих изображения тест-объекта. Суть этой измерительной операции в установке штриха ровно в центр расстояния между штрихами бисектора, при этом контраст в изображении собственно штриха является максимальным.

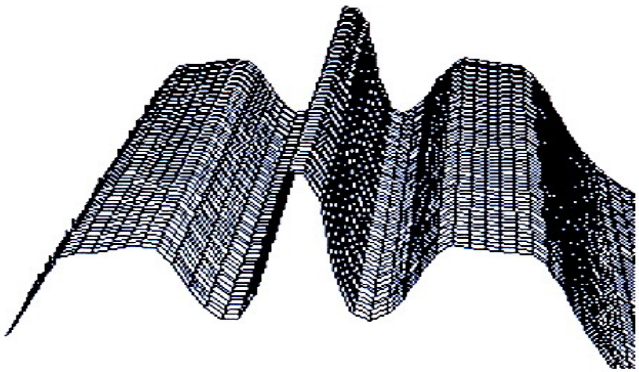


Рис. 2.1.9. Модель поперечной измерительной наводки бисектора на штрих [5]

При смещении штриха влево или вправо (поперечной наводке) относительно середины нарушаются симметрия в освещенности измерительного изображения и погрешность установки. Порог чувствительности поперечной наводки зависит от способности приемника регистрировать изменение освещенности в полях изображения, между которыми находится граница раздела – изображение штриха. При продольном смещении оптического прибора (продольной наводке) происходит размытие изображения штриха, а именно увеличение полуширины, уменьшение освещенности в максимуме и увеличение освещенности в минимумах, и порог чувствительности продольной наводки зависит от способности приемника регистрировать изменение контраста.

На основании вышеизложенного можно записать выражения для порога чувствительности оптических наводок в пространстве предметов:

– для поперечных наводок:

○ в линейной мере, мкм

$$T = k \cdot \varepsilon_т = {k \cdot 0{,}32}/{A}; \quad (2.1.19)$$

○ в угловой мере, угл. сек.

$$\tau = k \cdot \varphi_т = {k \cdot 138}/{D}; \quad (2.1.20)$$

– для продольных наводок

○ в линейной мере, мкм

$$\Delta z = l \cdot \rho_т = l \cdot {n}/{A^2}, \quad (2.1.21)$$

где k, l – коэффициенты, учитывающие вид измерительной марки, свойства приемника оптического измерительного изображения, алгоритмы обработки измерительной информации. Значения этих коэффициентов могут быть определены различными методами:

– посредством практических измерений (табл. 2.1.5);

– посредством компьютерного моделирования (см. рис. 2.1.9);

– путем теоретического рассмотрения с использованием каких-либо эвристических критериев (2.1.22).

Пример 2.1.4. В табл. 2.1.5 приведены значения практического порога чувствительности, принятые для визуальных оптических измерительных приборов и установленные на основе статистической обработки данных многочисленных измерений.

Если оптический прибор предназначен для визуальных измерений, то его порог чувствительности к продольным и поперечным наводкам может быть определен из положения, сформулированного А.Н. Захарьевским: человеческий глаз в нормальных условиях способен реагировать на взаимное смещение волновых фронтов, равное

$$\Delta W = 0{,}1 \text{ мкм}. \quad (2.1.22)$$

Тогда, пользуясь известными соотношениями (П.153) и (П.161), связывающими волновую аберрацию с дефокусировкой и поперечным смещением, получим соответственно для порога чувствительности продольных и поперечных наводок визуальных приборов в пространстве предметов ***формулы Захарьевского***:

– для дефокусировки (порога чувствительности продольных наводок)

$$\Delta z_з = 2\Delta W / \sin^2\sigma_A = 0{,}2 \text{ мкм} \cdot n / A^2 ; \quad (2.1.23)$$

– для поперечного смещения (порога чуствительности поперечных наводок) в линейной мере

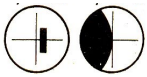
$$T_з = \Delta W / \sin\sigma_A = 0{,}1 \text{ мкм} / A ; \quad (2.1.24)$$

– для поперечного смещения (порога чувствительности поперечных наводок) в угловой мере в радианах

$$\tau_з = 0{,}1 \cdot 10^{-3} / D . \quad (2.1.25)$$

Таблица 2.1.5

Практический порог чувствительности визуальных оптических приборов в пространстве изображений [25]

Форма совмещаемых объектов		**Погрешность совмещения в угловой мере, угл. сек.**
Совмещение двух тонких штрихов, нониусная установка		10–15
Совмещение перекрестья с краем изображения предметов или границей освещенностей		30–60
Нониальная чувствительность, совмещение соприкасающихся штрихов и щелей		10
Совмещение штриха и биссектора или штриха с изображением освещенной щели		6–8

При D' = 2 мм (визуальные наблюдения) имеем порог чувствительности поперечных наводок в угловой мере в пространстве формирования измерительных изображений $\tau'_з = 10$ угл. сек., что достаточно хорошо согласуется с данными табл. 2.1.5.

2.2. Мерительный инструмент

Этот раздел представлен здесь по той причине, что в практике оптических измерений большое место занимают линейно-угловые измерения, выполняемые с помощью достаточно простых в обращении и в устройстве средств измерения, которые можно назвать термином «мерительный инструмент». Помимо этого, тенденция развития средств измерений такова, что в современном мерительном инструменте все чаще используются оптические средства, а это уже непосредственно тема данного пособия.

2.2.1. Меры

Плоскопараллельные концевые меры длины (плитки) по ГОСТ 9038–90 представляют собой прямоугольные параллелепипеды или цилиндры с двумя плоскими взаимно параллельными измерительными поверхностями, имеющие разную толщину и выполненные из нержавеющей стали или иных материалов с малым коэффициентом линейного расширения. Плитки предназначены для хранения единицы длины и передачи размеров от эталона до изделия при проверке калибров, установки отсчета индикаторов, калибровки измерительных устройств, выполнения дифференциальных измерений длины и т.д. Номинальным размером концевой меры является срединная длина, т.е. длина перпендикуляра, опущенного из середины одной из измерительных поверхностей меры на противоположную измерительную поверхность. На мерах 5,5 мм и менее значение номинальной длины нанесено на одной из измерительных поверхностей, на мерах более 5,5 мм – на нерабочей поверхности.

Рабочие поверхности измерительных мер имеют очень малую шероховатость и хорошую плоскостность. Эти свойства имеют две цели: снижение погрешности измерений с помощью плиток, а также обеспечение притираемости плиток. ***Притираемость концевых мер*** – прочное сцепление их между собой, обусловленное молекулярным взаимодействием поверхностей в присутствии тонкого слоя смазки. Толщина масляной пленки на поверхности при

промывке плиток в бензине составляет ~0,02 мкм. Благодаря свойству концевых мер притираться имеется возможность составлять из отдельных мер блоки необходимых размеров.

По точности изготовления концевые меры длины выпускаются основных классов: 0, 1, 2, 3. Класс точности концевых мер определяется величинами допустимых отклонений срединной длины, отклонений от плоскопараллельности измерительных поверхностей, а также качеством притираемости. Класс набора мер определяется низшим классом отдельной меры, входящей в набор. Для концевых мер, находящихся в эксплуатации, устанавливаются дополнительные классы: 4 и 5. По специальному заказу могут быть изготовлены еще более точные меры длины класса 00.

В зависимости от погрешности, допущенной при аттестации мер, установлены пять разрядов: 1–5. Для каждого из разрядов определены методы и средства измерений и, как следствие, погрешность. Наименьшую погрешность имеют меры 1-го разряда.

При использовании концевых мер по классам за действительный размер принимается номинальный размер. При этом допускается ошибка, равная сумме отклонений срединных длин, используемых в блоке мер. В данном случае существенно упрощаются расчеты.

При применении мер по разрядам за размер меры принимается действительное значение меры, указанное в аттестате. В этом случае в погрешность измерений, осуществляемых с помощью концевых мер, входят не погрешности изготовления, а погрешности измерения срединных длин. Применение мер по разрядам существенно повышает точность измерений (в 2–4 раза), но существенно увеличивает трудоемкость подсчетов.

Инструментальная промышленность выпускает различные наборы концевых мер длины. Всего выпускается 21 набор стальных мер (от 4 до 112 шт.) и 8 наборов с мерами из твердого сплава (от 4 до 112 шт.).

Оптическая промышленность выпускает аналог концевых мер, изготовленных из стекла с низким коэффициентом линейного расширения (рис. 2.2.1). Маркируются эти средства измерения – ПИ. ПИ – ***пластины плоскопараллельные стеклянные интер-***

ференционные по ГОСТ 2923–75, предназначенные для проверки интерференционными методами притираемости и плоскостности концевых мер.



Рис. 2.2.1. Пластина интерференционная в футляре
(URL: http://www.ricinstryment.ru)

2.2.2. Отсчетные устройства

Основой мерительного инструмента являются отсчетные шкалы, представляющие собой простейшие отсчетные устройства. ***Шкала*** – совокупность отметок, расположенных вдоль какой-либо линии и изображающих ряд последовательных чисел, соответствующих значениям измеряемой величины и хранящих значение эталона измеряемой величины. Шкалы служат для измерения рабочего смещения измерительного прибора. Фиксация положения измерительного прибора и считывание данных со шкалы производятся с помощью специального указателя. Шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Равномерные шкалы имеют постоянные интервалы деления шкалы по ее длине. В неравномерных шкалах интервалы непостоянны и могут увеличиваться или уменьшаться на различных участках шкалы. Отметки шкалы представляют собой знаки (штрихи, точки, риски и т.д.), соответству-

ющие отдельным значениям измеряемой величины. Разность значений измеряемой величины, соответствующая двум соседним делениям шкалы, называется ***ценой деления шкалы***. Чем меньше цена деления, тем более точно снимается отсчет по шкале. Для уменьшения цены деления средства измерения очень часто, помимо основной шкалы, используют дополнительную – для нониального отсчета. Измерительные шкалы изготавливают из металла с малым коэффициентом линейного расширения или из стекла.

Линейный промежуток между центрами двух соседних отметок шкалы называют ***интервалом***.

Отметки, соответствующие значениям чисел изображаемых шкалой, называют:

– нулевому значению – ***нуль шкалы***;

– наименьшему значению – ***начало шкалы***;

– наибольшему значению – ***конец шкалы***.

Диапазоном показаний (измерений по шкале) называют область значений шкалы, ограниченную ее начальным и конечным значениями.

В мерительном инструменте для линейно-угловых измерений, в зависимости от назначения, применяются линейные (деления расположены по прямой линии) и угловые (деления расположены по окружности) шкалы.

Для уменьшения субъективной погрешности и создания благоприятных условий для визуальных измерительных наблюдений при снятии отсчетов со шкал, а также с целью уменьшения габаритных размеров отсчетных устройств в средствах измерения могут быть использованы средства оптического увеличения – отсчетные микроскопы (лупы).

Для повышения чувствительности измерений шкала может быть оборудована преобразователем, осуществляющим преобразование одного вида рабочего движения в другое, т.е. преобразование одной шкалы в другую, например линейной – в круговую. Очень часто преобразователь совмещает в себе частично функции установочного и развертывающего устройства (см. раздел 2.1). В этом случае он является полноценным измерительным прибором. Преобразователи могут быть механическими, оптико-электронными и т.д.

Наиболее распространенным в оптических измерениях механическим преобразователем – отсчетным устройством является микрометрический винт – ***микровинт*** (рис. 2.2.2), имеющий резьбу с мелким и точным шагом, обычно шаг резьбы равен 0,5 мм. Микрометрическая пара выполняется в виде резьбовой гайки и микрометрического винта, соединенного с отсчетным барабаном.

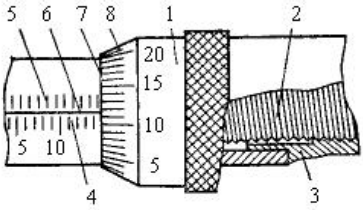


Рис. 2.2.2. Микровинт и его отсчетное устройство [23]: *1* – отсчетный барабан; *2* – микрометрический винт; *3* – микрометрическая гайка; *4* – линейная шкала для отсчета целых миллиметров; *5* – дополнительная шкала для отсчета целых оборотов микрометрического винта; *6* – продольный штрих; *7* – торец барабана; *8* – круговая шкала отсчетного барабана

Винтовая пара используется для преобразования продольного перемещения винта в круговые перемещения шкалы барабана. Измеряемый размер определяется по углу поворота барабана. Для отсчета целого числа оборотов микровинта служит продольная основная шкала, которая расположена на запрессованной в корпус втулке, называемой ***стеблем***. Стебель является гайкой для микрометрического винта и одновременно обеспечивает его центрирование и направление по наружному диаметру. Основная шкала сдвоенная, состоит из двух шкал с интервалом в 1 мм (для облегчения отсчета), сдвинутых относительно друг друга на 0,5 мм и расположенных по обе стороны от продольного штриха на стебле, т.е. интервал деления основной шкалы равен шагу микрометрического винта. Указателем для отсчета по этой шкале является торец барабана, закрепленного на микровинте. Для отсчета долей оборота микровинта служит круговая шкала с 50 радиальными делениями – разворачивающий узел. Указателем для отсчета по этой шкале является продольный штрих, нанесенный на стебле.

Окулярный винтовой микрометр служит для измерения изображения объектов, рассматриваемых в микроскоп. Устройство этого оптического отсчетного инструмента показано на рис. 2.2.3. В фокальной плоскости окуляра расположены две плоскопараллельные пластинки. Неподвижная пластинка *4* имеет 8-миллиметровую шкалу с ценой деления 1 мм. Подвижная шкала *2* снабжена перекрестием и бисектором. Шкала и перекрестие с бисектором нанесены на обращенных друг к другу поверхностях пластинок и видны в поле зрения одновременно. Пластинка *4* находится в оправе, закрепленной в кожухе *5*; пластинка *2* установлена на ползуне *1*. Перемещение ползуна осуществляется с помощью микровинта *7*, снабженного барабаном *6*, шкала которого имеет цену деления 0,01 мм. Шаг микровинта равен 1 мм. Таким образом, поворот барабана на одно деление соответствует перемещению перекрестия на 0,01 мм. Микрометр устанавливается на корпусе микроскопа и закрепляется с помощью хомутика *8* винтом.

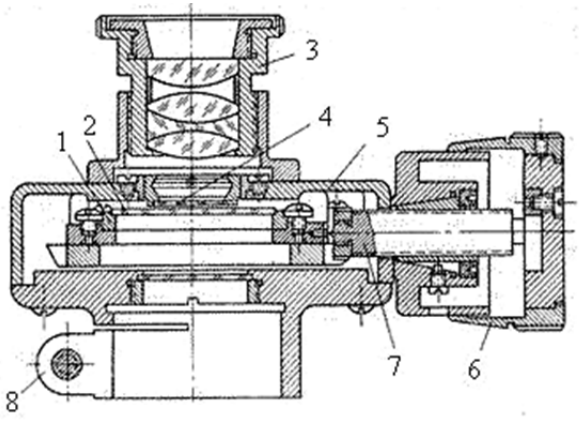


Рис. 2.2.3. Окулярный винтовой микрометр МОВ-1-15х

Индикаторная головка – преобразователь (индикатор) линейного перемещения в круговое относится также к механическим преобразователям. Схема индикаторной головки часового типа по ГОСТ 577–68 представлена на рис. 2.2.4.

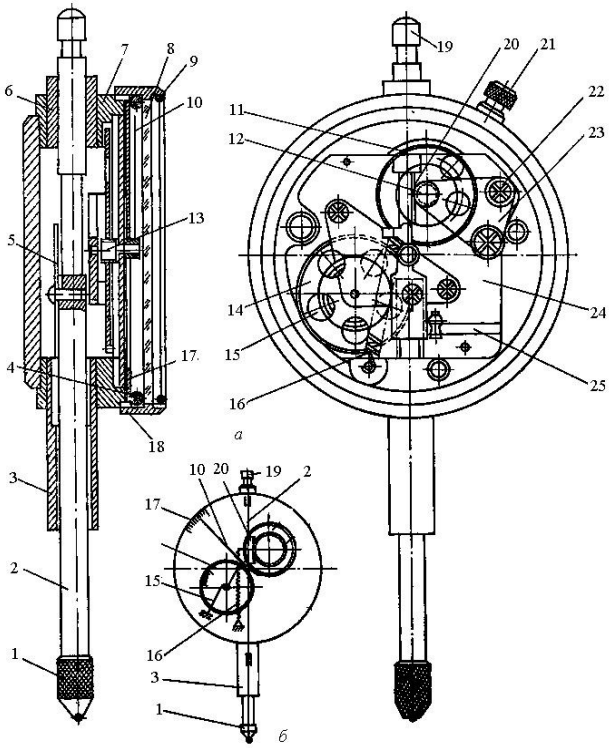


Рис. 2.2.4. Конструкция (*а*) и кинематическая схема (*б*) индикатора часового типа [23]: измерительный наконечник *1*, измерительный стержень *2*, гильза *3*, пружина *4*, ограничительная накладка *5*, направляющая втулка *6*, корпус *7*, стекло *8*, пружинное кольцо *9*, основная стрелка *10*, зубчатое колесо *11* с большим числом зубьев $z = 100$, зубчатое колесо с малым числом зубьев – ***триб*** *12* с $z = 16$, триб *13* с $z = 10$, зубчатое колесо *14* со стрелкой – счетчиком оборотов основной стрелки, спиральная пружина *15*, шкала *17*, ободок *18*, головка *19* отвода измерительного стержня, зубчатая рейка *20* измерительного стержня, стопор шкалы *21*, колонки *22*, мосты *23*, плато *24*, штифт *25*

Принцип действия индикаторной головки состоит в том, что поступательное движение измерительного стержня *2* посредством реечного механизма, находящегося в зацеплении с зубчатым колесом *12*, преобразуется во вращение стрелки *10* с помощью достаточно сложного механизма зубчатых передач – ***редуктора***, состо-

ящего из зубчатых колес *12*, *11*, *13*. Этот механизм имеет развертывающий узел – зубчатое колесо *14*, обеспечивающее возможность измерения количества оборотов основной стрелки. Счетчик оборотов основной стрелки установлен на оси зубчатого колеса *14*. Поворот основной стрелки *10*, насаженной на ось зубчатого колеса *13*, фиксируется по основной круговой шкале, поворот стрелки счетчика фиксируется по дополнительной круговой шкале. Принцип работы часового индикатора подробно рассмотрен, например, в [23], там же приведены различные варианты исполнения измерительных головок в зависимости от вида преобразования:

– рычажно-зубчатые ГОСТ 18833–73;

– пружинные (ГОСТ 28798–90) – ***микрокаторы***;

– рычажно-зубчатые малогабаритные (ГОСТ 14712–79) – ***микаторы***;

– рычажно-пружинные (ГОСТ 14711–69) – ***мини-каторы***;

– измерительные головки с оптическим рычагом (ГОСТ 5405–75) – ***оптикаторы***.

Оптикаторы сочетают в своей конструкции механический и оптический рычаги. Механический рычаг связывает измерительный стержень прибора с поворачивающимся зеркалом. Оптическая система преобразует малые перемещения зеркала в удобные для отсчета перемещения светового пятна на шкале прибора.

Промышленность выпускает (рис. 2.2.5):

– головки часового типа с ценой деления 10 мкм, рассчитанные на пределы измерения длины: 0–10; 0–5; 0–2 мм;

– головки рычажно-зубчатые с ценой деления 1 и 2 мкм, рассчитанные на пределы измерения 0–1; 0–2; 0–0,16; ±0,1; ±0,05 мм;

– микрокаторы с ценой деления 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 мкм, рассчитанные на пределы измерения ±0,004; ±0,006; ±0,015; ±0,03; ±0,06; ±0,15; ±0,3 мм;

– микаторы с ценой деления 0,2; 0,5; 1 мкм, рассчитанные на пределы измерения ±0,01; ±0,025; ±0,05 мм;

– мини-каторы с ценой деления 2 и 1 мкм, рассчитанные на пределы измерения ±0,08; ±0,04 мм;

– оптикаторы с ценой деления 1 и 0,2 мкм, рассчитанные на пределы измерения ±0,1; ±0,025 мм.



а *б* *в*

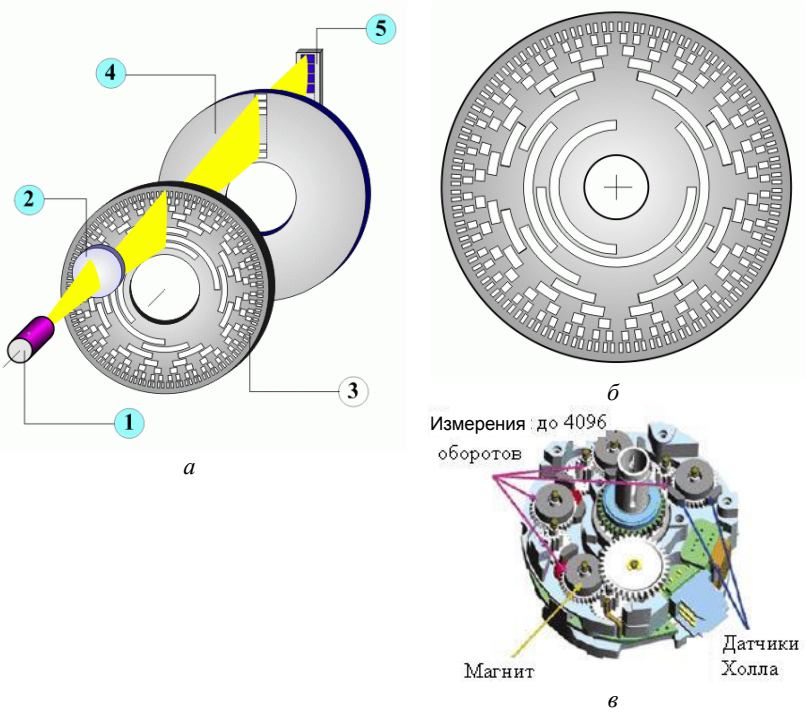
Рис. 2.2.5. Индикаторные головки (*а*) (URL: http://www. mikrometr.ru); штативы (*б*) и стойки (*в*) к ним (URL: http://www/petrofort.com)

Развитие отсчетных устройств связано с появлением широкого ассортимента круговых (датчик угла, датчик поворота, датчик угол-код) и линейных оптико-электронных преобразователей – ***фотоимпульсных (фотоэлектронных) датчиков перемещений (преобразователей, энкодеров).*** Фотоимпульсные преобразователи угловых и линейных перемещений широко применяются в продукции станкостроительных заводов, в измерительных машинах и робототехнических комплексах, автоматизированных установках электронной промышленности, системах технологического и производственного контроля, в приборах для научных исследований, а также во всевозможных измерительных устройствах, работающих в жестких условиях

эксплуатации и требующих высокоточной регистрации линейных или угловых параметров движения их элементов. Поскольку на выходе такого преобразователя формируется цифровой электрический сигнал, пропорциональный измеряемому перемещению [51], подобные устройства успешно встраиваются в информационно-измерительные системы.

Абсолютные датчики углового положения – позволяют решать задачи прецизионных измерений не только величин угловых перемещений, но и без потери точности могут обеспечить «жесткую» координатную привязку различного рода позиционируемых объектов при их статическом положении. При этом каждому значению углового положения вала (преобразуемого угла) ставится в соответствие значение числового эквивалента, который формируется на выходе датчика в виде сигнала цифрового кода. Указанное взаимно однозначное соответствие сохраняется как при движении вала, так и при его неподвижном положении и не требует возвращения вала в начальную позицию. Таким образом, значение кода не теряется после выключения и включения питания датчика, восстанавливается после прохождения помехи или превышения допустимой скорости вращения вала, ограничиваемой правильным считыванием кода. Это свойство выгодно отличает абсолютные датчики углового положения от инкрементных угловых преобразователей. Эталоном угловой меры в абсолютных датчиках служит установленный на входном валу измерительный лимб с кодовой шкалой, имеющей однодорожечную или многодорожечную кольцевую структуру (рис. 2.2.6, *б*).

Конструктивно абсолютный датчик (рис. 2.2.6, *а*) включает в себя два кинематически связанных функциональных звена: оптико-механический узел, оптико-электронное считывающее устройство. Оптико-механический узел датчика представляет собой корпусную деталь с прецизионными направляющими, обеспечивающими вращательное движение вала и жестко связанной с ним кодовой радиальной шкалы *3* (измерительный лимб), центрированной по отношению к оси вращения вала.



а *б* *в*

Рис. 2.2.6. Конструкция абсолютных угловых энкодеров: *а* – считывающее устройство (URL: http://www.skbis.ru); *б* – кодирующая маска-анализатор; *в* – многооборотный энкодер (URL: http://www.sensorika.ru)

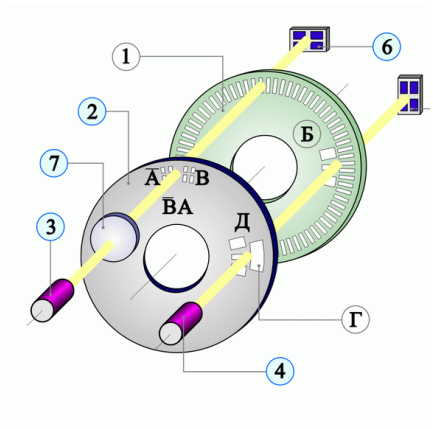
Оптико-электронное считывающее устройство содержит узел осветителя (светодод *1*, конденсор *2*) и считывающее фотоприемное устройство (матрицу фотоприемников *5* с установленной перед ней анализирующей маской *4*), а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприемников. Формируемый осветителем *1*, *2* пучок лучей создаёт в плоскости анализирующей маски *4* теневое измерительное изображение кодовой шкалы *3*. При вращении оптико-механического узла относительно оптико-электронного считывающего устройства в электронной схеме вырабатывается кодированный сигнал, содержащий информацию об угле поворота.

По диапазону измерений абсолютные датчики углового положения делятся на однооборотные и многооборотные. В датчиках первого типа кодирование углового положения вала осуществляется в пределах изменения угла поворота от 0 до 360°. В многооборотных датчиках рабочий диапазон превышает 360°. Как правило, используется один датчик точного отсчёта и один или несколько датчиков грубого отсчёта. Точный отсчёт используется для преобразования в цифровой код в пределах одного оборота вала, а грубые – для счёта числа оборотов. В конструкции многооборотных датчиков предусматриваются двоичные редукторы для организации счета числа оборотов (рис. 2.2.6, *в*). Для уменьшения погрешностей, вносимых редукторами и датчиками грубого отсчёта, применяются электронные методы согласования грубых и точных отсчётов.

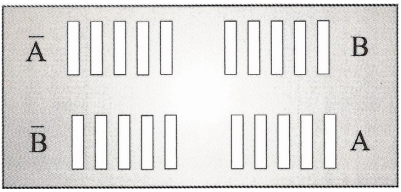
Инкрементные оптоэлектронные преобразователи угловых перемещений используют в качестве меры длины радиальную шкалу, являющуюся носителем регулярного и кодового растров. Принцип работы преобразователей угловых перемещений основан на регистрации относительной величины прошедшего через растровое сопряжение потока оптического излучения. Этот поток представляет собой координатно-периодическую функцию взаимного углового положения регулярного растра шкалы и растров окон анализатора. Возможность нанесения штрихов растров с субмикронной точностью на материалы с малым коэффициентом линейного расширения, стабильность их геометрического положения, достаточно высокая степень защищенности конструктивного исполнения, а также их высокая устойчивость к внешним воздействиям обеспечили растровым преобразователям перемещений широкий спектр областей промышленного и научного применения (рис. 2.2.7, *в*).

Конструктивно инкрементный датчик включает в себя два кинематически связанных функциональных звена: оптико-механический узел, оптико-электронное считывающее устройство (рис. 2.2.7, *а*). Оптико-механический узел датчика представляет собой корпусную деталь с прецизионными направляющими, обеспечивающими вращательное движение вала и жестко связанной с

ним радиальной растровой шкалой *1* (измерительный лимб), центрированной по отношению к оси вращения вала.



а



б



в

Рис. 2.2.7. Конструкция инкрементных угловых энкодеров (URL: http://www.skbis.ru): *а* – считывающее устройство; *б* – анализатор; *в* – датчик в корпусе

Неподвижное оптико-электронное считывающее устройство содержит узел осветителя *3*, *4* (светодиод), конденсор *7* и считывающее фотоприемное устройство (квадрантный фотодиод *5*, *6* с растровым анализатором *2*), а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприемников. Формируемый осветителем пучок лучей создаёт в плоскости квадрантного светодиода измерительное изображение измерительного лимба и анализатора (рис. 2.2.7, *б*). При вращении оптико-механического узла относительно оптико-электронного считывающего устройства в электронной схеме вырабатываются сигналы, содержащие информацию об угле поворота. Окна A, $\bar{A}$, B, $\bar{B}$ служат для определения

знака угла поворота, их конфигурация позволяет обеспечить контроль перемещения с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра. Окна *Б* и *Д* служат для счета оборотов. Для повышения точности используется два или четыре диаметрально расположенных канала считывания.

Оптоэлектронные преобразователи линейных перемещений используют в качестве меры длины линейную стеклянную шкалу, являющуюся носителем регулярного и кодового растров. В основу работы преобразователей перемещения положен метод оптоэлектронного сканирования штриховых растров. При относительном перемещении шкалы и анализатора сопряжения регулярного растра шкалы с растрами анализатора модулируют проходящие через них потоки излучения, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками. Растровая шкала содержит две параллельные информационные дорожки: регулярного растра и референтных меток.

Возможность нанесения штрихов растров с субмикронной точностью на материалы с малым коэффициентом линейного расширения, а также стабильность их геометрического положения позволяют создавать преобразователи 3–4-го классов точности (рис. 2.2.8, *в*).

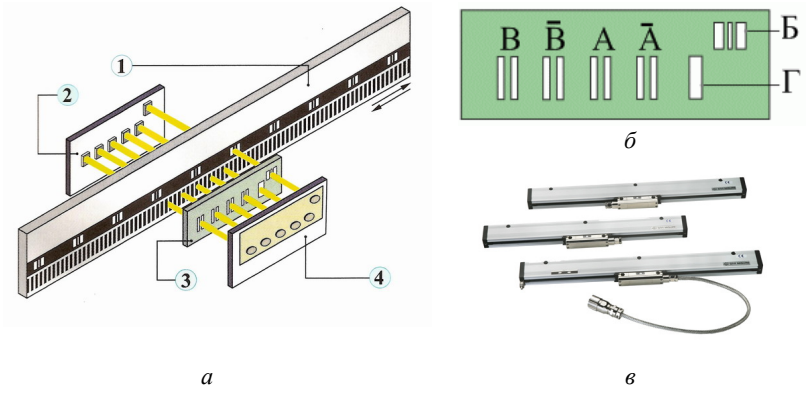


Рис. 2.2.8. Конструкция преобразователей линейных перемещений:
а – считывающее устройство (URL: http://www.skbis.ru); *б* – анализатор;
в – датчики для промышленного применения (URL: http://www.givimisure/ru)

Оптико-механический узел датчика представляет собой корпусную деталь с жестко связанной с ним штриховой линейной растровой шкалой *1* (рис. 2.2.8, *а*). Оптико-электронное считывающее устройство содержит: узел осветителя *4*, состоящий из 6 светодиодов, растровый анализатор *3* и считывающее фотоприемное устройство *2*, состоящее из 6 фотодиодов, а также электронную схему выделения и обработки сигналов фотоприемников. Формируемый осветителем пучок лучей создаёт в плоскости фотоприемного устройства измерительное оптическое изображение, состоящее из измерительной растровой шкалы и шкалы растрового анализатора. При движении оптико-электронного считывающего устройства относительно растровой шкалы в электронной схеме вырабатываются сигналы, содержащие информацию об угле поворота. Окна A, $\bar{A}$, B, $\bar{B}$ анализатора (рис. 2.2.8, *б*) служат для определения направления перемещения. Их конфигурация позволяет обеспечить контроль перемещения с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра. Окно *Б* и соответствующая дорожка референтных меток растровой шкалы используются для задания собственного начала отсчета.

Часто в современных оптических средствах измерения фотоимпульсные датчики комбинируют с традиционными техническими средствами. Так, например, в измерительных микроскопах (табл. 2.3.7) используется микровинт в качестве транслятора, т.е. устройства, осуществляющего рабочее смещение, – установочное устройство, а измерение перемещения производится не с помощью шкал микровинта, а круговым фотоимпульсным датчиком, конструктивно совмещенным с гайкой микровинта.

Промышленностью выпускаются (URL: http://www.skbis.ru) фотоэлектрические преобразователи со следующими характеристиками:

– диапазон измеряемых перемещений для линейных датчиков – до 3220 м, дискретность отсчета 0,1 мкм при 20 мкм периоде регулярного растра;

– угловые датчики позволяют выполнять измерения с дискретностью до 3 600 000 отсчетов на оборот.

2.2.3. Инструмент для измерения длин

Брусковые штриховые меры длины применяются для непосредственных измерений в качестве шкал приборов и станков, а также как образцовые для поверки измерительных приборов линейных измерительных преобразователей. Брусковые меры выполняются одно- и многозначными. Однозначные меры имеют два штриха, расстояние между которыми определяет длины меры, многозначные – шкалу штрихов с деци-, санти- и миллиметровыми интервалами. Промышленностью в соответствии со стандартом выпускаются брусковые меры с номинальной длиной 60–2 000 мм. Меры изготавливаются из инвара, стекла, стали. По ГОСТ 12069–90 предусмотрено девять типов поперечного сечения брусковых мер классов точности 0,1, 2, 3, 4, 5 (рис. 2.2.9). В зависимости от условий аттестации штриховые меры длины могут быть 1, 2, 3-го разрядов.



Рис. 2.2.9. Типы поперечного сечения брусковых штриховых мер

Допускаемые отклонения от номинальной длины брусковых штриховых мер в зависимости от класса точности составляют 0,5–25 мкм для длин до 200 мм и 1,5–80 мкм для длин 2 000 мм. Некоторые меры имеют интервалы между штрихами 0,1 или 0,2 мм. В этом случае в комплект входят лупы с увеличением не менее 7×.



Рис. 2.2.10. Линейка контрольная визуально-цифровая КЛВЦ
(URL: http://www.instrumentalist.ru)

Современным аналогом брусковых штриховых мер является линейка КЛВЦ (рис. 2.2.10), представляющая собой многозначную

меру длины с дискретностью отсчета 0,01 мм. КЛВЦ оборудована цифровым отсчетным устройством с произвольной установкой нуль-пункта для устранения систематической ошибки от неправильной установки нуля. Линейки изготавливают четырех модификаций в зависимости от диапазона измерений и пределов допускаемой абсолютной погрешности измерений.

Измерительные металлические рулетки выполняются из инвара, нержавеющей стали и светлополированной стальной ленты длиной 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 м. Они выпускаются 2-го и 3-го класса точности. Допускаемые отклонения действительной длины миллиметровых делений рулеток должны быть не более ±0,15 и ±0,2 мм, сантиметровых – не более ±0,3 и ±0,4 мм для 2-го и 3-го классов точности соответственно.

Лазерные рулетки (лазерные дальномеры) – современные электронно-оптические приборы, используемые для определения дальности до любого предмета на местности (рис. 2.2.11). В зависимости от модели прибора дальномеры могут производить вычисления объемов и площадей помещений, а также иметь различный набор сервисных функций. Принцип работы лазерного дальномера состоит в том, что к объекту посылается зондирующий импульс, он же запускает временной счетчик в дальномере. Когда отраженный объектом импульс приходит к дальномеру, то он останавливает работу счетчика. По временному интервалу автоматически высвечивается перед оператором расстояние до объекта.

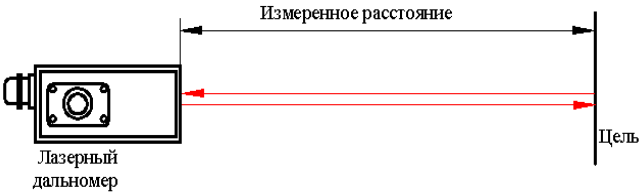


Рис. 2.2.11. Схема измерений с помощью лазерного дальномера

Пример 2.2.1. Лазерный дальномер DIMETIX FLS (рис. 2.2.12) разработан специально для применения в жестких условиях экс-

плуатации: в промышленности и на открытом воздухе. Выполнен в прочном корпусе, который обеспечивает класс защиты от пыли IP65. DIMETIX FLS имеет:

– последовательный интерфейс ввода-вывода (RS 232 и RS 422);

– интерфейс Profibus;

– высокоточный аналоговый интерфейс;

– два программируемых цифровых выхода;

– цифровой выход для сигнализации ошибки, напряжение питания 24–30 В;

– опционную функцию подключения подогрева корпуса [31] .



Рис. 2.2.12. Лазерный дальномер DIMETIX FLS-CH30 600503 (URL: http://www.sotmarket.ru)

Эти возможности дальномера в сочетании с великолепными метрологическими характеристиками позволяют применять его в многочисленных отраслях промышленности: автомобильной, бумажной, металлургии, строительстве и т.д. Погрешность измерений, достигнутая в лучших образцах, составляет ~1 мм при длине свыше 150 м без учета ошибки, связанной с рефракцией воздуха [36].

Измерительные металлические линейки изготавливаются из стальной пружинной термообработанной ленты со светлополированной поверхностью длиной до 1 м с ценой деления 1 мм. Метал-

лические измерительные линейки должны иметь отклонения между любыми штрихами не более ±0,1 мм для линеек длиной до 300 мм; ±0,15 – для линеек длиной от 300 до 500 мм и ±0,2 – для линеек длиной от 500 до 1000 мм.

Объект-микрометры (рис. 2.2.13) предназначены для использования в качестве тест-объекта для определения цены деления микроскопа. Они представляют собой металлическую пластину, в центр которой вклеена стеклянная пластина со шкалой, имеющей интервалы между делениями 0,01 мм. Объект-микрометры бывают для работы в отраженном свете и просветные.



Рис. 2.2.13. Объект-микрометр для работы в отраженном свете (URL: http://www.laboratorium.dp.ua)

Стеклянные штриховые линейки имеют пять интервалов по 25 мм общей длиной 125 мм. Интервал 60–61 мм имеет 10 делений через 0,1 мм. Ширина штрихов 0,006 мм, допускаемое отклонение на расстоянии между любыми штрихами ±0,002 мм, точность аттестации не ниже 0,0005 мм. Линейки применяются для поверки инструментальных микроскопов и измерения характеристик оптических систем (рис. 3.2.14).

Динаметр – стеклянная оптическая шкала, снабженная окуляром для повышения точности поперечных наводок.

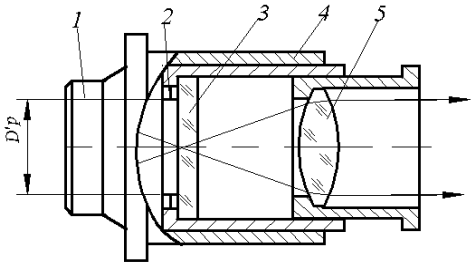


Рис. 2.2.14. Динаметр Рамсдена: *1* – окуляр измеряемой системы; *2* – выходной зрачок измеряемой системы; *3* – стеклянная шкала в подвижном тубусе; *4* – неподвижный тубус; *5* – окуляр

Пример 2.2.2. На рис. 2.2.14 в качестве примера приведена принципиальная схема динаметра Рамсдена, применяемого для измерений размеров зрачков $D'_{p'}$ оптических систем. Динаметр представляет собой окуляр *5* с увеличением 10–15 крат, в фокальной плоскости которого установлена стеклянная шкала *3*, перемещающаяся относительно лупы для обеспечения резкого видения штрихов шкалы. Совместно с окуляром шкала перемещается относительно неподвижного тубуса *4*, который устанавливается на торец окуляра оптического прибора *1*. На цилиндрической поверхности оправы лупы нанесены штрихи с интервалом 1 мм для отсчета расстояния от торца тубуса до стеклянной шкалы.

К ***штангенинструментам*** общего назначения относятся: штангенциркули (ГОСТ 166–89), штангенглубиномеры (ГОСТ 162–90), штангенрейсмасы (ГОСТ 164–90). Конструкции штангенинструментов представлены на рис. 2.2.15. Приемы и правила работы с ними подробно освещены, например, в [23].

Штангенциркули типа ШЦ-1 предназначены для измерения внутренних и наружных размеров, глубин отверстий и пазов. Имеют пределы измерений 0–125 мм, цена деления нониальной шкалы 0,1 мм.

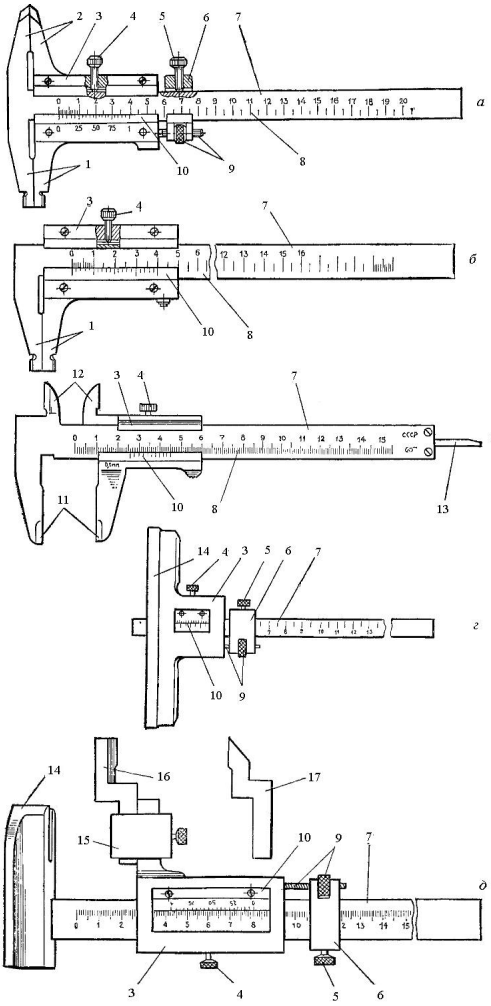


Рис. 2.2.15. Штангенинструменты [23]: штангенциркули ШЦ-11 (*а*); ЩЦ-111 (*б*); ШЦ-1 (*в*); штангенглубиномер (*г*); штангенрейсмас (*д*): *1* – губки для наружных и внутренних измерений; *2* – губки для наружных измерений и разметки; *3* – рамка; *4* – стопорный винт для зажима рамки микрометрической подачи; *6* – рамка микрометрической подачи; *10* – нониус; *11* – губки для наружных измерений; *12* – губки для внутренних измерений; *13* – линейка глубиномера; *14* – основание; *15* – хомутик; *16* – измерительная ножка; *17* – разметочная ножка

Штангенциркули типа ШЦ-11 предназначены для измерения внутренних и наружных размеров. Имеют пределы измерений 0–160; 0–200; 0–250; 0–315 мм, цена деления нониальной шкалы 0,05 мм.

Штангенциркули типа ШЦ-111 предназначены для измерения внутренних и наружных размеров. Имеют пределы измерений 0–160, 0–200, 0–250 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,05 мм, а также: 0–315, 0–400, 0–500, 250–630, 250–800, 320–1 000, 500–1 250, 500–1 600, 800–2 000 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,1 мм.

Штангенглубиномеры ШГ предназначены для измерения глубин отверстий и пазов, высоты деталей, расстояний до буртиков или выступов. Имеют пределы измерений 1–160, 0–250, 0–400 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,05 мм.

Штангенрейсмасы ШР предназначены для измерения высоты деталей, установленных на разметочной плите (см. рис. 1.1.6), и разметки. Имеют пределы измерений 0–250 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,05 мм; 40–400, 60–630 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,05 и 0,1 мм; 100–1 000, 600–1 600, 1 500–2 500 мм с ценой деления нониальной шкалы 0,1 мм.

Измерения с помощью штангенинструментов являются контактными. Принцип измерения размеров с помощью штангенциркуля состоит в том, что измерительные поверхности штангенинструмента приводятся в соприкосновение с измеряемым объектом (зажимают его). Отсчет показаний производится по основной шкале и по нониусу. При измерениях внутренних размеров к показаниям шкалы необходимо прибавлять толщину измерительных ножек, которая маркирована на инструменте. Для проведения разметочных работ с целью обеспечения точной установки губок некоторые штангенинструменты оснащены механизмом микрометрической подачи.

Отсчетным устройством классического штангенинструмента является линейная шкала с нониусом, однако современная инструментальная промышленность производит штангенинструменты, оснащенные различными преобразователями. Варианты таких устройств приведены в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1

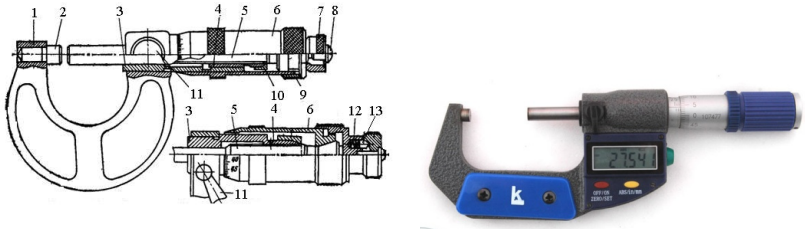
Штангенинструменты с преобразователями (URL: http://chtangel.90mb.ru)

Марка, тип преобразователя, метрологические характеристики	Изображение
Штангенциркуль со стрелочным индикатором ШЦК-1. Предназначен для измерения наружных и внутренних поверхностей, а также для измерения глубины отверстий и уступов. Диапазон измерений 0–150 мм. Погрешность 0,03. Погрешность при измерении глубины, мм, – 0,05	
Штангенциркуль электронный ШЦЦ-1. Инструмент предназначен для проведения высокоточных измерительных работ, для проверки размеров деталей и заготовок. Электронное табло с большим циферблатом с легкостью позволяет сделать быстрые измерения. Погрешность измерения данного прибора составляет 0,01 мм	

В настоящее время выпускается несколько типов ***микрометрических инструментов***, отличающихся назначением, конструктивным исполнением, пределами измерения: микрометры гладкие (ГОСТ 6507–90), микрометры рычажные (ГОСТ 4381–87), микрометрические глубиномеры (ГОСТ 7470–92). Конструкции основных микрометрических инструментов, применяемых в задачах оптического производственного контроля, представлены на рис. 2.2.16–2.2.18. Приемы и правила работы с ними подробно освещены, например, в [23].

Микрометры гладкие МК (см. рис. 2.2.16) предназначены для измерения наружных размеров. Имеют пределы измерений 0–25; 25–50; 50–75; 75–100 мм с пределами допускаемой погрешности измерений ±0,004 мм; 100–125, 125–150, 150–175, 175–200 мм с пределами допускаемой погрешности ±0,005 мм; 200–225, 225–250, 250–275, 275–300 мм с пределами допускаемой погрешности ±0,006 мм; 300–400 мм с пределами допускаемой погрешности

±0,008 мм; 500–600 мм с пределами допускаемой погрешности 0,01 мм. Цена деления шкалы 0,01 мм.



а *б*

Рис. 2.2.16. Микрометры: *а* – микрометр гладкий механический. Конструктивные элементы: *1* – корпус-скоба; *2* – измерительная пятка; *3* – стебель микровинта; *4* – микрометрическая гайка; *5* – микрометрический винт; *6* – барабан; *7* – кольцо трещотки; *8* – крепежный винт трещотки; *9* – трещотка; *10* – гайка регулировки зазора в микрометрической паре; *11* – стопорное устройство; *12* – тарированная пружина обеспечения постоянства измерительного усилия; *13* – штифт со скосом; *б* – микрометр гладкий электронный (URL: http://www/kalibron.ru)

Микрометры рычажные МР (рис. 2.2.17) со встроенным в корпус отсчетным устройством предназначены для измерения наружных размеров до 100 мм. Имеют пределы измерения 0–25, 25–50, 50–75, 75–100 мм с пределом допускаемой погрешности показаний 0,003 мм, цена деления шкалы – 0,002 мкм.

Микрометры рычажные МРИ, оснащенные отсчетным устройством, предназначены для измерения наружных размеров от 100 до 2 000 мм. Имеют пределы измерения 100–125, 125–150, 150–200 мм с пределом допускаемой погрешности показаний ±0,005 мм; 200–250, 250–300, 300–400 мм с пределом допускаемой погрешности показаний 0,006 мм; 400–500 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,007 мм; 500–600 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,01 мм; 600–700 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,012 мм; 700–800 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,014 мм; 800–900 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,016 мм; 900–1 000 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,0018 мм; 1 000–1 200 мм с пределом допускаемой погрешности ±0,02 мм; 1 200–1 400 с пределом допус-

каемой погрешности 0,025 мм; 1 400–1 600 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,028 мм; 1 600–1 800 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,032 мм; 1 800–2 000 мм с пределом допускаемой погрешности измерений ±0,036 мм. Цена деления шкалы до 500 мм – 0,002 мм, остальных – 0,01 мм.



Рис. 2.2.17. Микрометр рычажный, оснащенный отсчетным устройством (URL: http://ntce-tools.ru)

Микрометрические глубиномеры ГМ (рис. 2.2.18) предназначены для измерения глубины пазов и канавок, высоты уступов. Имеют пределы измерения 0–100 мм с пределом допускаемой погрешности измерения 0,005 мм; 0–150 мм с пределом допускаемой погрешности измерения 0,006 мм, цена деления шкалы 0,01 мм.

Измерения длин с помощью микрометрических инструментов являются контактными и прямыми. В случае гладкого микрометра измеряемая деталь размещается между пяткой скобы и торцом микровинта. После этого, при плавном вращении трещотки по часовой стрелке, микровинт доводится до соприкосновения с измеряемой деталью. При соприкосновении слышится пощелкивание механизма трещотки (3–4 щелчка), свидетельствующее о замыкании размерной цепи. При измерениях рычажным микрометром замыкание размерной цепи регистрируется с помощью индикаторной головки.

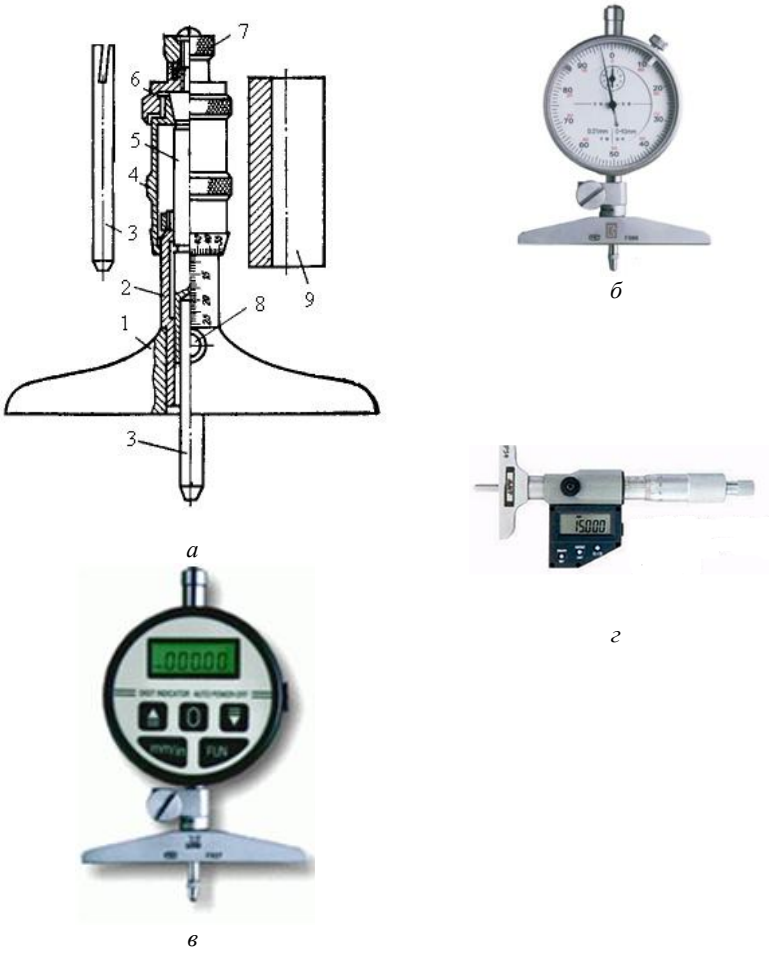


Рис. 2.2.18. Глубиномеры: *а* – микрометрический (*1* – основание, 2 – стебель, *3* – сменные измерительные стержни, *4* – барабан, *5* – микровинт, *6* – корпус трещотки, *7* – трещотка, *8* – стопор; *9* – установочная мера); *б* – с индикаторной головкой; *в* – электронный; *г* – микрометрический с цифровым отсчетом (URL: http:// www.ecometer.ru)

В случае микрометрического глубиномера к верхней поверхности измеряемой детали прижимается рукой основание глубиноме-

ра, а другой рукой производится замыкание измерительной цепи с помощью трещотки микрометра. Поскольку пределы измерений по шкале отсчетного устройства составляют 25 мм для всех микрометрических инструментов, для расширения диапазона контролируемых размеров могут быть использованы концевые установочные меры при установке положения 0. В этом случае измерения становятся дифференциальными.

2.2.4. Измерительные скобы

При массовом производстве, когда требуется измерять одни и те же наружные размеры, широко применяют измерительные инструменты жесткой конструкции – измерительные скобы. По своему устройству и назначению измерительные скобы (ГОСТ 11098–75) очень напоминают рычажные микрометры. Однако существенно отличаются от последних тем, что имеют переставную заднюю пятку и конструктив, предназначенный для выполнения принципиально дифференциальных измерений. Приемы и правила работы с ними подробно освещены, например, в [23].

Измерительные скобы рычажные со встроенным в корпус отсчетным устройством (рис. 2.2.19) предназначены для измерения наружных размеров до 150 мм. Имеют пределы измерения 0–25, 25–50, 50–75, 75–100, 100–125, 125–150 мм с пределом допускаемой погрешности показаний 0,002 мм, цена деления шкалы – 0,002 мм, пределы измерений отсчетного устройства ±0,14 мм.

Измерительные скобы индикаторные, оснащенные измерительными головками (рис. 2.2.20), предназначены для измерения наружных размеров до 1000 мм. Имеют пределы измерения 0–50, 50–100 мм с допускаемой погрешностью ±0,008 мм; 100–200 мм с допускаемой погрешностью измерения 001 мм; 200–300, 300–400 мм с допускаемой погрешностью измерения 0012 мм; 400–500, 500–600 мм с допускаемой погрешностью измерений 0,015 мм, пределы измерения отсчетного устройства 3 мм; 600–700, 700–850, 850–1000 мм с допускаемой погрешностью измерений 0,02 мм, пределы измерения отсчетного устройства 5 мм.

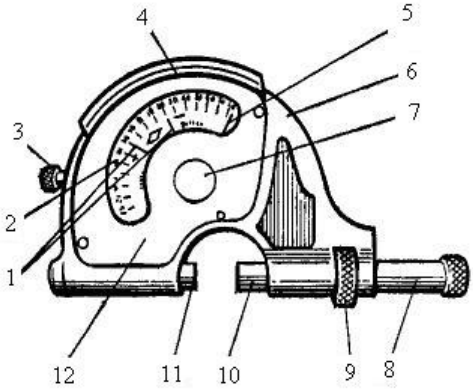


Рис. 2.2.19. Рычажная измерительная скоба [23]: *1* – указатель пределов поля допуска; *2* – шкала; *3* – арретир; *4* – теплоизоляционная накладка; *5* – стрелка; *6* – корпус скобы; *7* – колпачок механизма перестановки указателей; *8* – колпачок-стопор переставной пятки; *9* – гайка; *10* – пятка переставная; *11* – пятка подвижная; *12* – крышка



Рис. 2.2.20. Индикаторная измерительная скоба с цифровым индикатором (URL: http://ntce-tools.ru): *1* – корпус; *2* – переставная пятка; *3* – подвижная пятка; *4* – зажим индикатора; *5* – индикаторная головка

Измерения размеров с помощью измерительных скоб являются прямыми, контактными и дифференциальными. Измерениям предшествует настройка скобы на номинальный измеряемый размер с помощью концевых мер. Для этого концевая мера необходимой длины помещается между подвижной пяткой и переставной, гайка переставной пятки вращается до тех пор, пока стрелка отсчетного устройства не совместится с нулевым штрихом шкалы. После установки переставная пятка фиксируется колпачком-

стопором и удаляется концевая мера. При установке между подвижной и переставной пятками измеряемого объекта стрелка отсчетного устройства фиксирует отличие длины реальной детали от концевой меры. Для того чтобы не повредились измерительные поверхности пяток скобы, концевых мер и поверхности измеряемой детали, подвижная пятка отводится арретиром. Упор для измеряемой детали при настройке скобы устанавливается так, чтобы линия измерений проходила через ось измеряемой детали.

2.2.5. Угломеры

Для измерения углов контактным прямым методом применяются приборы с угломерной шкалой: нониусные (ГОСТ 5378–88) и оптические (ГОСТ 11197–73) угломеры.

Угломер нониусный УН предназначен для измерения наружных углов в диапазоне 0–180° с ценой деления 2’ и внутренних в диапазоне 40–180° с ценой деления 5’.

Угломер оптический УО предназначен для измерения внутренних и наружных углов в диапазоне 0–180° с ценой деления 10’.

Угломер оптический УО-2 предназначен для измерения внутренних и наружных углов в диапазоне 0–180° с ценой деления 5’ и представлен на рис. 2.2.21.

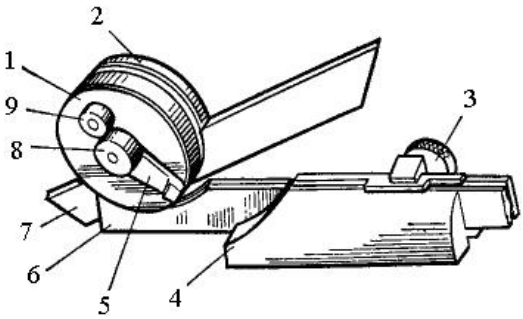


Рис. 2.2.21. Угломер оптический УО-2 [23]: *1* – крышка; *2* – корпус; *3* – зажимной винт; *4* – съемная призматическая подставка; *5* – зажимной рычаг; *6* – сдвоенная линейка; *7* – сменная линейка; *8* – рукоятка фиксации сменной линейки; *9* – отсчетный окуляр

Измеряемая деталь размещается на сдвоенной линейке одной гранью. При этом сменная линейка должна быть раскреплена (отпущена рукоятка фиксации). Деталь сдвигается в сторону сменной линейки до полного ее прилегания ко второй грани измеряемого угла детали. Взаимное положение линеек фиксируется зажимным винтом, и деталь отделяется от детали. Для отсчета показаний окуляр прикладывается к глазу и окно для подсветки шкал направляется в сторону источника света. В поле зрения угломера УО-2 видны две наложенные шкалы: лимба с ценой деления 2 град и минутная с ценой деления 5 угл. мин. Отсчет производится по шкале лимба в пределах минутной шкалы.

2.3. Типовые приборы для оптических измерений

В этом разделе приводятся описания различных оптических средств измерения, имеющих различные показатели назначения и метрологические характеристики. Физические принципы измерений, заложенные в конструкцию приборов, определяют оптическую схему. А метрологические характеристики определяются конструктивными особенностями и требованиями к составным частям, в том числе оптическим. Описанные здесь средства измерений могут использоваться в измерительной практике сами по себе, а могут быть представлены в составе измерительных систем.

2.3.1. Фотоприемные устройства

Фотоприемные устройства – важнейшая часть оптических средств измерения, предназначенная для получения измерительной информации. В зависимости от технической оснащенности и метрологического назначения их можно разделить на:

- фотоприемники:
  - приемники световой энергии – фотоумножители, фотодиоды, фоторезисторы и т.д.,

- приемники изображений – матрицы и линейки ПЗС, фотодиодные матрицы и линейки, видиконы, фотоматериалы;

– устройства фоторегистрации:
- интегральные физические – фотометры,
- изображений:
  - ✓ физические – измерительные фото-, видео-, телевизионные камеры,
  - ✓ физиологические – глаз.

Пример 2.3.1. На рис. 2.3.1 в качестве примера использования фотоприемных устройств для целей оптических измерений приведено техническое решение малогабаритного телевизионного теневого прибора. С его помощью реализуются различные теневые методики контроля формы волновых фронтов (см. табл. 2.1.3).

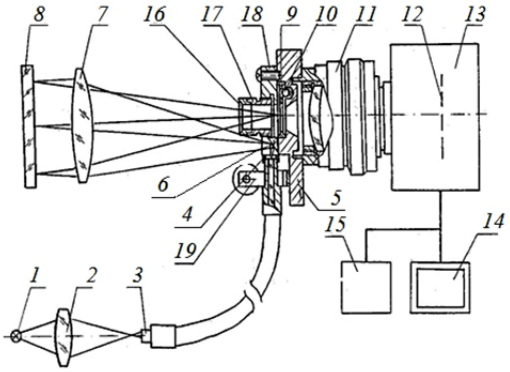


Рис. 2.3.1. Фотоэлектрический теневой прибор [86] со световолоконным осветителем

Входной торец *3* световолоконного жгута через конденсор *2* оптически сопряжен с источником света *1*, а к выходному торцу жгута приклеена щелевая диафрагма *4*. Узел развязки *6* освещающего и исследуемого волновых фронтов выполнен в виде призмы с зеркальным напылением гипотенузной грани и приклеен катетной гранью к насадке *5*. Насадка *5* имеет паз для размещения блока диафрагм, выполненного в виде ползуна *9* с визуализирующими диафрагмами, выполненными в виде ножа, нити и др. Пластина *18*

прикреплена с помощью винтов к насадке *5* и служит для присоединения к насадке втулки *17* с решеткой Ронки или с криволинейным экраном. Насадка закреплена на оправе проекционного объектива *11*. Объектив закручивается в посадочное место TV-камеры *13* и осуществляет оптическое сопряжение плоскости детали *8* с фоточувствительным элементом *12* камеры *13*.

Телевизионная камера служит для наблюдения и оцифровки изображения и метрологической привязки координат деталей теневого изображения к точкам поверхности детали и является физическим устройством фоторегистрации изображений. А фотоприемником в ней является видикон. По своим метрологическим характеристикам (динамический диапазон) телевизионная камера на видиконе имеет преимущество перед матричными видеокамерами, но уступает им в метрике (точности определения координат). В то же время такая камера уступает глазу по динамическому диапазону. А глаз проигрывает и тому и другому устройству в том, что теневые измерения, выполняемые с помощью глаза, являются качественными и субъективными.

Фотоприемники. Для обеспечения метрологических и эксплуатационных характеристик средств измерения приемники должны иметь определенные свойства, обеспечивающие:

– спектральный диапазон, требуемый для данного измерения;
– диапазон измеряемых характеристик;
– погрешность измерений, шумы, порог чувствительности;
– чувствительность;
– разрешающую способность;
– размер фотоприемной области;
– энергетическое согласование.

Пример 2.3.2. Характеристики процесса преобразования фотометрического сигнала описываются с помощью ***характеристической кривой*****,** представляющей собой, по сути дела, функцию преобразования или калибровочную характеристику. В качестве примера на рис. 2.3.2 приведена типичная характеристическая кривая галогенидосеребряной пленки, применяемой в фотопроцессе. Галогенидосеребряные фотоматериалы являются физическим устройством фоторегистрации изображений, которое уже давно используется в целях оптических измерений.

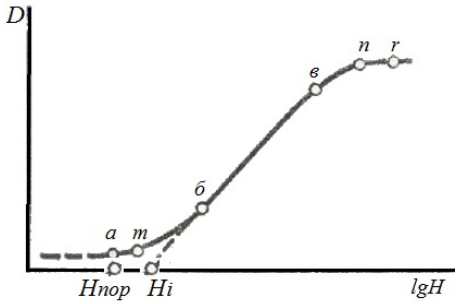


Рис. 2.3.2. Типичная характеристическая кривая фотоматериала

По заданным освещенностям E в оптическом изображении воспроизводимого объекта и продолжительности экспонирования материала – t определяются экспозиции $H = E \cdot t$, получаемые материалом при фотографической съемке. После проявления экспонированной пленки можно определить оптические плотности $D = \lg\tau$ почернений, возникших на ней в результате действия света и последующей обработки. Здесь τ – пропускание фотоматериала после экспозиций и химико-фотографической обработки. Естественно, что оптические плотности зависят от экспозиций. Эта связь однозначна при данном способе экспонирования и проявления и описывается с помощью характеристической кривой. Аналогичные кривые можно построить и для матричных фотоприемников. Только в этом случае по оси абсцисс откладывается экспозиция, а не ее логарифм, а по оси ординат – измеренная величина накопленного заряда в соответствующем пикселе матричного приемника.

Характеристическая кривая замечательна тем, что, используя ее особые точки, можно определить характеристики приемника. Участок постоянной и наименьшей плотности, параллельный оси абсцисс, получил название области ***вуали***. Любая его ордината представляет оптическую плотность вуали или уровень шума D_0 данного материала. Влево этот участок может быть продолжен бесконечно, а справа ограничен точкой a – ***порогом почернения***, или порогом чувствительности. Она выражает оптическую плотность, которая на предельно малую величину превышает плотность вуа-

ли, и вызывается действием экспозиции $H_{\text{пор}}$, названной ***пороговой экспозицией***. Следующая область кривой – отрезок *а–б* с возрастающей крутизной – носит название ***нижнего криволинейного участка***, или ***области недодержек***. Затем следует прямолинейная часть кривой *б–в*, а за ней – ***верхний криволинейный участок*** *в–п*, или ***область передержек***, крутизна на котором падает до нуля. Границе верхнего криволинейного участка – точке *r* – соответствует ***максимальная оптическая плотность***, получаемая на данном материале, – $D_{\max}$. Последняя часть кривой, лежащая правее точки *r* и имеющая отрицательную крутизну, – ***область солярizации***.

Первая производная функции $D = D(\lg H)$, выражающая крутизну характеристической кривой или чувствительность фотоприемника, называется ***градиентом характеристической кривой***:

$$\gamma = \frac{dD}{d(\lg H)}. \qquad (2.3.1)$$

При градиенте $\gamma \leq 0{,}2$ наклон кривой настолько невелик, что по фотографическому значению ее часть, имеющую такой градиент, можно приравнять к области вуали. Это значение градиента называется ***минимально полезным***. Точки кривой, в которых $\gamma = 0{,}2$, носят названия нижней и верхней полезных. Они ограничивают так называемую ***полезную часть кривой***, или ***полный диапазон экспозиций*** (см. раздел 1.3). Часть кривой, ограниченная прямолинейным участком *б–в*, называется ***диапазоном линейности***, или ***рабочим дипазоном*** (см. там же). Точка *i*, получаемая в результате пересечения продолжения прямолинейной части кривой с осью абсцисс, называется ***точкой инерции***. Соответствующая ей экспозиция обозначается H_i. Значение градиента в рабочем диапазоне называется ***коэффициентом контрастности фотоматериала***. ***Светочувствительность*** – это числовая характеристика материала, определяемая из соотношения

$$S = {}^{k}/_{H_{\text{кр}}}, \qquad (2.3.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности; $H_{\text{кр}}$ – ***критериальная экспозиция***.

Значения k и $H_{кр}$ зависят от принятой системы определения светочувствительности в стране и вида фотоматериала. В России светочувствительность черно-белых фотоматериалов определяется по ГОСТ 10691.0–73–10691.4–73. Нельзя путать понятия чувствительности и светочувствительности.

Эти свойства указываются в сопроводительной документации на материал или изделие. Как правило, они не соответствуют требуемым метрологическим характеристикам, и не всегда это соответствие удается установить аналитически, поэтому чаще всего вопрос об использовании того или иного фотоприемника в средствах измерения и его метрологических характеристиках в связи с этим решается экспериментальным путем. То же самое можно сказать не только о фотоприемных устройствах, но и об источниках света для оптических средств измерений. Причина здесь в том, что по показателям назначения как приемники, так и источники света имеют гораздо более широкую область применения, нежели оптические измерения.

Фотоприемные устройства как таковые представляют собой предмет самостоятельного курса, здесь же ограничимся рассмотрением свойств некоторых устройств, часто используемых для целей оптических измерений.

Фотодиод – полупроводниковый прибор, электрические свойства которого изменяются под действием падающего на него светового излучения.

Пример 2.3.3. В качестве примера сопроводительной документации ниже приведены характеристики на кремниевый фотодиод ФД-7К (рис. 2.3.3):

Максимальный темновой ток при 25°С, А	$2{,}5\times10^{-6}$
Напряжение шума, В/Гц$^{1/2}$	$0{,}61\times10^{-6}$
Интегральная токовая чувствительность, А/лм	6×10^{-3}
Диапазон спектральной чувствительности, нм (не указывается в документации, но следует из материала полупроводника, в данном случае – кремниевый)	400–1 200
Рабочее напряжение, В	27
Сопротивление изоляции, мОм	100
Электрическая прочность изоляции выводов, В	180
Удельный пороговый поток, лм/см Гц$^{1/2}$	$1{,}6\times10^{-9}$

Максимальное допустимое напряжение, В	30
Емкость, пФ	600
Гарантийная наработка, ч	4 000
Гарантийный срок, лет	10
Фоточувствительная площадка, мм^2	78,5
Температурный диапазон, °С	–60...+75

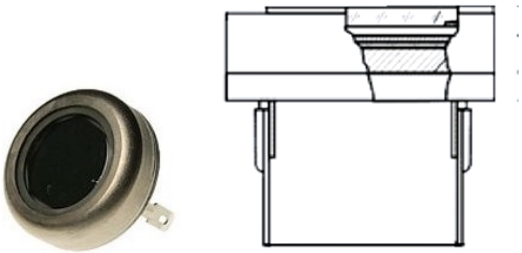


Рис. 2.3.3. Кремниевый фотодиод ФД-7К (URL: http://www.elmikom.ru)

Отличительные особенности этого устройства:

– большая фотоприемная площадка;

– диапазон спектральной чувствительности, адаптированный к спектральной чувствительности глаза;

– широкий линейный диапазон.

Матрица ПЗС, или фотоприемная матрица, – специализированная аналоговая или цифроаналоговая интегральная микросхема, состоящая из фотодиодов, предназначенная для преобразования спроецированного на неё оптического изображения в аналоговый электрический сигнал или в поток цифровых данных (при наличии АЦП непосредственно в составе матрицы). Является основным элементом современных устройств фоторегистрации и элементов измерительной техники, ориентированной на обработку изображений. Разрешение матрицы определяется размером ее минимального светочувствительного элемента – ***пикселя***.

Пример 2.3.4. Строение пикселей у матриц разных производителей разное. На рис. 2.3.4 в качестве примера приведена структура пикселя ПЗС-матрицы с карманом *n*-типа, состоящего из не-

скольких ***субпикселей***, предназначенных для регистрации излучения разных длин волн. Спектральная чувствительность субпикселей устанавливается за счет использования светофильтров.

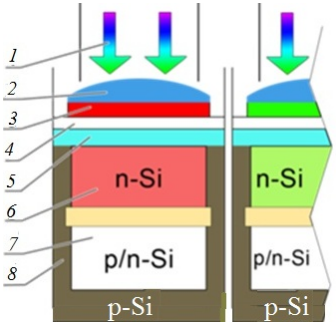


Рис. 2.3.4. Схема пикселя ПЗС-матрицы с карманом *n*-типа:
1 – световой поток, прошедший через объектив устройства; *2* – микролинза; *3* – красный светофильтр субпикселя; *4* – прозрачный электрод из поликристаллического кремния или сплава индия и оксида олова; *5* – оксид кремния; *6* – кремниевый канал *n*-типа – зона внутреннего фотоэффекта; *7* – зона потенциальной ямы (карман *n*-типа), где собираются электроны из зоны *6*; *8* – кремниевая подложка *p*-типа (URL: http://www.wikipedia.ru)

К характеристикам матриц, отражающим их свойства с точки зрения применимости в измерительной технике, относятся:

– динамический диапазон,
– чувствительность,
– порог чувствительности,
– размер пикселя,
– физический размер матрицы.

Следует отметить, что сама по себе фотоприемная матрица реализовать все эти свойства не может, поскольку для своей работы требует использования различных устройств, обеспечивающих получение информации: источники питания, устройства обеспечения развертки, аналого-цифровые преобразователи и т.д. Поэтому чаще всего, когда говорят о фотоприемной матрице, на самом деле имеют в виду ***фоточувствительный прибор с фотоприемной матрицей***, т.е. устройство, которое обеспечивает функционирование матрицы и получение

с нее электрического цифрового сигнала, предназначенного для ввода в устройство визуализации или последующей обработки.

Такие фоточувствительные приборы в зависимости от времени получения информации и соответственно показателей назначения могут быть двух типов:

– ***фотокамеры*** (фотоаппараты) – где регистрируется единичный кадр, а время для подготовки к считыванию следующего кадра достаточно большое;

– ***видеокамеры*** – регистрируется последовательность кадров в режиме реального времени.

Динамический диапазон (рабочий диапазон матрицы) характеризует способность матрицы различать в изображении, проецируемом на её регистрирующую поверхность, тона изображения. При расширении динамического диапазона количество оттенков зарегистрированного изображения будет увеличиваться, а переходы между ними будут максимально соответствовать изображению, формируемому объективом. Характеристика, описывающая способность ПЗС-элемента накопить заряд определённой величины, называется ***глубиной потенциальной ямы*** (well depth), и именно от неё зависит динамический диапазон матрицы.

Как и для фотопленки, одной из важнейших характеристик ПЗС-матрицы является чувствительность – способность определенным образом реагировать на оптическое излучение. Чем выше чувствительность, тем меньшее количество света требуется для реакции регистрирующего устройства. Для отдельного ПЗС-элемента под реакцией на свет следует понимать генерацию заряда. Очевидно, что чувствительность ПЗС-матрицы складывается из чувствительности всех её пикселей и оценивается с помощью двух параметров:

– ***интегральная чувствительность***, представляющая собой отношение величины фототока (в миллиамперах) к световому потоку (в люменах) от источника излучения, спектральный состав которого соответствует вольфрамовой лампе накаливания. Этот параметр позволяет оценить чувствительность сенсора в целом;

– ***монохроматическая чувствительность***, т.е. отношение величины фототока (в миллиамперах) к величине световой энергии

излучения (в миллиэлектронвольтах), соответствующей определённой длине волны. Набор всех значений монохроматической чувствительности для интересующей части спектра составляет спектральную чувствительность – зависимость чувствительности от длины волны света. Таким образом, спектральная чувствительность показывает возможности сенсора по регистрации оттенков определённого цвета.

Чувствительность пикселя матрицы зависит от:

– освещаемой площади светочувствительной области (fill factor);

– ***квантовой эффективности*** (quantum efficiency), т.е. отношения числа зарегистрированных электронов к числу упавших на поверхность сенсора фотонов.

На квантовую эффективность влияют следующие процессы:

– коэффициент отражения – величина, отображающая долю тех фотонов, которые отразятся от поверхности сенсора. При возрастании коэффициента отражения доля фотонов, участвующих во внутреннем фотоэффекте, уменьшается;

– ***проникающая способность*** фотонов в полупроводник. Фотоны, проникшие в материал слишком глубоко, не образуют носителей заряда. Это свойство характеризуется ***коэффициентом поглощения***, который зависит как от материала полупроводника, так и от длины волны падающего света, а именно: «длинноволновые» частицы проникают гораздо глубже «коротковолновых».

В условиях слабого освещения на динамический диапазон влияет порог чувствительности, который, в свою очередь, определяется ***уровнем чёрного***, т.е. значением сигнала, которое будет показывать фотоприемник при отсутствии света (фотоэлектрический аналог вуали фотоматериала). Этот минимальный сигнал фотоприемника является ***шумом***, так как он мешает правильному восприятию и отображению информации, и для того чтобы изображение хорошо передавало структуру исходного сигнала, необходимо, чтобы уровень сигнала существенно превосходил уровень шумов, характерных для данного устройства. В связи с этим важной характеристикой матрицы является ***порог чувствительности*** – параметр, характеризующий минимальную величину светового сигнала, ко-

торый может быть зарегистрирован. Чем меньше этот сигнал, тем выше порог чувствительности. Главным фактором, ограничивающим порог чувствительности, является ***темновой ток*** (dark current).

Понятно, что единицы измерения светочувствительности ПЗС-матриц отличаются от принятых в кинофототехнике обозначений. Именно поэтому производители цифровых фотоприемных приборов в характеристиках изделия указывают ***эквивалентную светочувствительность*** галогенидосеребряного материала по (2.3.2). Возможности цифровой камеры позволяют для каждого кадра устанавливать оптимальное значение эквивалентной светочувствительности. Достигается это посредством усиления видеосигнала, исходящего с матрицы. Однако данная функция имеет и негативный эффект, проявляющийся в том, что параллельно с усилением фототока растёт и уровень паразитных зарядов, т.е. растет уровень темнового тока (шума). Он является следствием термоэлектронной эмиссии и возникает в ПЗС-элементе при подаче потенциала на электрод, под которым формируется потенциальная яма.

Существует зависимость темнового тока от температуры сенсора – при нагревании матрицы на 9 градусов по Цельсию её темновой ток возрастает в два раза. Для охлаждения матрицы используются различные системы теплоотвода (охлаждения). В полевых приборах, массогабаритные характеристики которых сильно ограничивают применение систем охлаждения, иногда в качестве теплообменника используется металлический корпус камеры. В лабораторной технике ограничений по массе и габаритам практически нет, более того, допускается достаточно высокое энергопотребление охлаждающих систем, которые, в свою очередь, делятся на пассивные и активные.

Пассивные системы охлаждения обеспечивают лишь «сброс» избыточного тепла охлаждаемого устройства в атмосферу. При этом система охлаждения играет роль проводника тепла, обеспечивающего более эффективное его рассеивание. Очевидно, что температура охлаждаемого устройства не может стать ниже, чем температура окружающего воздуха. Эта особенность является основным недостатком пассивных систем. Простейшим примером

системы пассивного теплообмена является радиатор, изготавливаемый из материала с хорошей теплопроводностью – чаще всего из металла. Поверхность, контактирующая с атмосферой, имеет форму, обеспечивающую как можно большую площадь рассеивания.

Активные системы охлаждения за счет электрических либо химических процессов обеспечивают устройству температуру ниже температуры окружающего воздуха. Фактически активные системы «вырабатывают холод». При этом в атмосферу выделяется тепло как охлаждаемого устройства, так и системы охлаждения. Активное охлаждение обеспечивается системами Пельтье, работа которых основана на использовании эффекта Пельтье, когда при наличии разности потенциалов на концах двух проводников, изготовленных из разных материалов, на стыке этих проводников (в зависимости от полярности напряжения) выделяется либо поглощается тепловая энергия.

В мобильных полевых приборах используется метод, основанный на так называемых черных пикселях (dark reference pixels). Эти пиксели представляют собой покрытые непрозрачным материалом столбцы и строки по краям матрицы. Усредненное значение для всех фототоков черных пикселей считается уровнем темнового тока. Очевидно, что при разных условиях эксплуатации (температура окружающей среды и самой камеры, ток аккумуляторов и т.д.) уровень темнового тока будет разным. При использовании его в качестве «точки отсчёта» для каждого пикселя, т.е. вычитая его значение из фототока, можно определить, какой именно заряд создан упавшими на ПЗС-элемент фотонами.

Подавляя тем или иным способом темновой ток, следует помнить о другом факторе, ограничивающем порог чувствительности. Им является тепловой шум (thermal noise), создаваемый даже при отсутствии потенциала на электродах одним лишь хаотичным движением электронов по ПЗС-элементу. Экспозиции большой длительности ведут к постепенному накапливанию блуждающих электронов в потенциальной яме, что искажает истинное значение фототока. И чем «длиннее» выдержка, тем больше «заблудившихся» в яме электронов.

Технология производства ПЗС-матриц обладает рядом особенностей. В частности, практически в каждом ПЗС-элементе уровни

как темнового тока, так и теплового шума не такие, как в соседних пикселях. Поэтому степень искажения фототоков паразитными зарядами распределена по матрице хаотическим образом. Положение усугубляется практически всегда присутствующей несогласованностью в подаче перемещающих потенциалов на электроды переноса. Всё это ведёт к появлению у каждого отдельного сенсора присущего только ему шума фиксированного распределения (fixed pattern noise), выражающегося в виде раскиданных по всему кадру пикселей постороннего цвета, яркость которых напрямую связана с выдержкой – чем дольше длится экспонирование, тем резче выделяются на снимке точки с паразитными зарядами. Наиболее заметные пиксели называются ***горячими*** (hot pixels). Существует прием, позволяющий частично нейтрализовать шум фиксированного распределения, – регистрация последнего в серии кадра при закрытом объективе. Полученную «маску» из раскиданных на черном фоне горячих пикселей затем можно использовать для «изъятия» паразитных зарядов из кадра. Этот метод аппаратно реализуется в системе шумоподавления с помощью ***темного кадра*** (dark frame).

Когда внутренний фотоэффект приводит к избыточному количеству электронов, превышающему глубину потенциальной ямы, заряд ПЗС-элемента начинает «растекаться» по соседним пикселям. Это явление называется ***блюмингом*** и отображается на изображении в виде пятен белого цвета и правильной формы, и чем больше избыточных электронов, тем крупнее пятна. Таким образом, в результате блюминга пересветка изображения приводит к снижению разрешающей способности. В современных камерах подавление блюминга осуществляется посредством системы электронного дренажа (overflow drain), основная задача которой – отвод избыточных электронов из потенциальной ямы – ***антиблюминг***.

Матрица оцифровывает (разделяет на кусочки – «пиксели») то изображение, которое формируется объективом прибора. Но если объектив в силу недостаточно высокой разрешающей способности передаёт две светящиеся точки объекта, разделённые третьей чёрной, как одну светящуюся точку на три подряд расположенных пикселя, то говорить о точном разрешении изображения прибором не приходится.

В фотографической оптике для оценки разрешающей способности системы объектив–пленка применяется ***формула Катца*** [3]:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{N} + \frac{1}{M'}, \qquad (2.3.3)$$

где M – разрешающая способность фотоприемника, выраженная в линиях на миллиметр (или же в пикселях на дюйм); N – разрешающая способность объектива (в его фокальной плоскости); K – результирующее разрешение системы объектив – фотоприемник.

Это соотношение максимально при $N = M$, и тогда разрешение равно $K = {}^{N}/_{2}$, поэтому желательно, чтобы разрешающая способность объектива соответствовала разрешающей способности фотоприемника.

У матричных приемников разрешающая способность определяется размером пикселя, который варьируется у современных устройств в пределах 0,0025–0,0080 мм. Поскольку две точки будут различаться в том случае, если между ними находится третья (не засвеченная) точка, то разрешающая способность соответствует расстоянию в два пикселя, т.е.

$$M = {}^{1}/_{2p},$$

где p – размер пикселя.

Физические размеры приемников изображения определяются размером отдельных пикселей матрицы, которые в современных фотосенсорах имеют величину 0,005–0,006 мм. Чем крупнее пиксель, тем больше его площадь и количество собираемого им света, поэтому тем выше его светочувствительность и лучше отношение сигнал / шум. Необходимое разрешение деталей изображения определяет общее количество пикселей, которое в современных фотоматрицах достигает десятков миллионов пикселей, и тем задаёт ***физические размеры матрицы***. Таким образом, физические размеры матрицы определяют диапазон изменения измеряемой величины.

Размеры фотосенсоров чаще всего обозначают как ***типоразмер*** в дюймах, например, 1/1,8" или 2/3". Типоразмер фактически больше реального физического размера диагонали сенсора. Эти

обозначения происходят от стандартных обозначений размеров видиконов телекамер в 1950-х гг. Они выражают не размер диагонали самой фотоприемной области, а внешний размер колбы передающей трубки. Считается, что в грубом приближении можно принять, что диагональ составляет две трети типоразмера.

Во время считывания накопленного в матрице заряда происходит смазывание изображения, поскольку в процессе считывания к полезному накопленному сигналу добавляется накапливаемый, искажающий полезный сигнал. Радикальным решением этой проблемы является пространственное разделение процессов накопления и переноса зарядов в структуре матрицы. В конструкции таких приборов содержатся фоточувствительные ячейки, затвор параллельного переноса накопленных зарядов из фотоячеек в элементы регистра переноса и защищенный от света регистр переноса. В течение времени накопления разрешающий затвор закрыт, на фоточувствительные ячейки подано смещающее напряжение и там осуществляется накопление. Во время накопления считывающий регистр может либо работать, вынося к выходу ранее накопленные зарядовые пакеты, либо не работать. После окончания накопления заряд переносится в регистр и считывается. Новый цикл накопления может начаться либо сразу после переноса заряда в регистр, либо после полного считывания регистра. В такой конструкции время считывания может равняться времени накопления.

Выше отмечалось, что порог чувствительности матрицы связан с габаритами её регистрирующей области. Чем больше светочувствительная площадь каждого элемента, тем больше света попадает на него и тем чаще происходит внутренний фотоэффект, таким образом, возрастает порог чувствительности всего сенсора. Механизм считывания требует использования части пикселя для организации регистра накопления за счет уменьшения светочувствительной площади пикселя. Для того чтобы не менять светочувствительность матрицы, в ее конструкцию вводятся микролинзы (см. рис. 2.3.4), эффективно увеличивающие считывающую область каждого пикселя до размеров самого пикселя.

Пример 2.3.5. Линейные фотоприемные устройства имеют очень широкое применение в измерительных устройствах. Такие приемники производят различные российские и зарубежные фир-

мы, среди которых можно отметить: KODAK (США), SONY (Япония), DALSA (Канада), Perckin Elmer (Reticon) (США), Samsung (Корея), THOMSON (Франция), ЦНИИ «Электрон» (г. Санкт-Петербург), ГУП НПП «Пульсар» (г. Москва) (на технологической базе завода «Микрон» (г. Зеленоград)). Практически у всех зарубежных производителей имеются различные серии линеек ПЗС, которые включают приборы форматом от 512 до 8 000 и более пикселей. При этом типичные размеры фотоприемных элементов составляют либо 13×13 (14×14) мкм для коротких линеек, либо 7×7 мкм (8×8 мкм) для длинных линеек. Для регистрации цветных изображений разработаны приборы, содержащие три раздельные линейки ПЗС на одном кристалле. Фоточувствительные элементы расположены параллельно друг другу с шагом 8–12 пикселей и совмещены со спектральными RGB-фильтрами. В результате при сканировании каждая из трех линеек выдает информацию в своём спектральном диапазоне R, G или B.

В табл. 2.3.1 приведены некоторые линейки ПЗС, в основном большого формата, которые могут быть использованы для целей оптических измерений. Для специальных применений выпускаются приборы не с квадратными, а с прямоугольными фотоприемными пикселями, например: 13×26, 13×250 и даже 13×2 500 мкм.

Резюмируя вышесказанное, следует заметить, что современные физические устройства фоторегистрации изображений настолько разнообразны и имеют такое количество регулируемых параметров, адаптирующих их к условиям решаемой задачи, что при разработке и эксплуатации средств измерения на их основе так или иначе возникает вопрос, а насколько метрологически обеспечены измерения. Например, линейна ли характеристика прибора в диапазоне чувствительности и не искажается ли она устройствами автоматической регулировки светочувствительности или антиблюминга. Поэтому в средствах измерения следует:

– использовать те камеры, которые производятся с маркировкой ***метрологические***;

– обязательно проводить процедуру проверки работоспособности и метрологических характеристик, имеющих значение для решения измерительной задачи в тех или иных условиях эксплу-

атации и учета фактических характеристик устройства – ***калибровку***.

Таблица 2.3.1

Линейные микросхемы ПЗС

Фирма	Тип прибора	Организация	Формат, пиксели	Размер эл-та, мкм	Макс. частота, МГц
Пульсар	1200ЦЛ6	Черно-белая линейка	2048 × 1	12×12	2 × 10
Пульсар	1200ЦЛ4	4-спектральная	2048 × 4	15×15	2 × 10
Электрон	ФППЗ2048Л	2 ч/б линейки с МОП-приемником	2048 × 2	13×50	20
SONY	ILX531A	Черно-белая линейка	5150 × 1	7 × 7	2 × 20
SONY	ILX508A	Черно-белая линейка	7926 × 1	7 × 7	2 × 12,5
SONY	ILX532A	Черно-белая линейка	7500 × 1	7 × 7	2 × 20,0
SONY	ILX724K	Три линейки с RGB-фильтрами	2700 × 3	8 × 8	3 × 5,0
SONY	ILX530K	Три линейки с RGB-фильтрами	7926 × 3	8 × 8	3 × 40,0
SONY	ILX734K	Три линейки с RGB-фильтрами	10500×3	8 × 8	3 × 3,0
RETICON	RL4000P, RL8000P	Черно-белая линейка	4096 × 1 8192 × 1	7 × 7	2 × 20
DALSA	IL-C7	Черно-белая линейка	4096 × 1	7 × 7	2 × 30,0
DALSA	IL-C8	Черно-белая линейка	6000 × 1	10 × 10	2 × 20,0
THOMSON	TH7833A	Черно-белая линейка	4096 × 1	7 × 7	4 × 10,0
THOMSON	TH7808B	Черно-белая линейка	5184 × 1	7 × 7	2 × 10,0
THOMSON	TH7834B	Черно-белая линейка	12000 × 1	6,5 × 6,5	4 × 5,0
THOMSON	TH7821A	Три линейки с RGB-фильтрами	8640 × 3	7 × 7	3 × 5,0

Окончание табл. 2.3.1

Фирма	Тип прибора	Организация	Формат, пиксели	Размер эл-та, мкм	Макс. частота, МГц
KODAK	KLI5001F	Черно-белая линейка	5000 × 1	7 × 7	2 × 12,5
KODAK	KLI8811	Черно-белая линейка	8800 × 1	7 × 7	4 × 30
KODAK	KLI6003	Три линейки с RGB-фильтрами	6000 × 3	12 × 12	3 × 8,0
KODAK	KLI8013	Три линейки с RGB-фильтрами	8000 × 3	9 × 9	3 × 8,0
KODAK	KLI10203HQ	Три линейки с RGB-фильтрами	10200 × 3	7 × 7	3 × 10,0
KODAK	KLI14,403	Три линейки с RGB-фильтрами	14404 × 3	5 × 5	3 × 10,0

В заключение следует отметить, что метрологическое предназначение систем фоторегистрации заключается в измерении фотометрического распределения и определения координат в изображении. В то же время традиционный для оптических средств измерения приемник – глаз человека – не делает ни того ни другого, он только контролирует наводку оптического прибора путем сравнения либо с эталонным значением, либо с предыдущей картинкой. Другими словами, визуальные измерения построены на дифференциальном принципе.

Устройства фоторегистрации. Глаз (рис. 2.3.5) играет важнейшую роль в практике оптических измерений. Принято считать, что глаз является самым совершенным и непревзойденным по некоторым параметрам прибором для оптических измерений.

Глаз – динамическая система, адаптирующаяся к условиям зрения, с одной стороны. А с другой стороны, глаз – это биологический объект, поэтому одинаковых глаз не бывает, как не бывает одинаковых людей. Поэтому здесь и в литературе приводятся некие номинальные значения его характеристик, в том числе метрологических. Процесс адаптации глаза имеет четыре аспекта, имеющих значение в рамках настоящего изложения:

– настройка на положение объекта – ***аккомодация***, осуществляемая с помощью кольцевых мышц, деформирующих хрусталик и тем самым меняющих его фокусное расстояние;

– изменение световой чувствительности сетчатки под действием изменяющихся условий освещения:

- за счет активизации различных чувствительных элементов, а именно: высокочувствительных палочек (сумеречное зрение) – ***темновая адаптация*** – и низкочувствительных колбочек (дневное зрение) – ***световая адаптация***,
- за счет изменения концентрации светочувствительного вещества (родопсина – зрительного пурпура розового цвета в палочках или йодопсина в колбочках),
- за счет перемещения темного пигмента в слое сетчатки: чем выше освещенность, тем ближе он перемещается к наружной поверхности сетчатки, частично заслоняя ее клетки от светового воздействия, и наоборот;

– изменение диаметра отверстия зрачка глаза в пределах 2–8 мм под действием мускульных волокон, расположенных в радужной оболочке;

– изменение взаимной ориентации глаз и аккомодация при настройке стереоскопического зрения под действием глазных мышц (см. рис. 2.3.8) – ***конвергенция.***

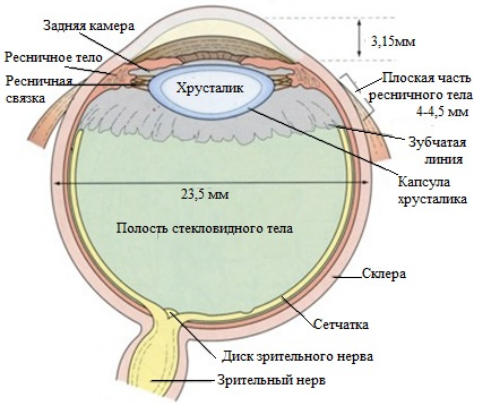


Рис. 2.3.5. Сагиттальный разрез глазного яблока человека (URL: http://www.retina.ru)

С точки зрения геометрической оптики глаз может быть представлен в виде оптической схемы, приведенной на рис. П.36, параметры схемы приведены в табл. П.1.

Расстояние между ближней и дальней точками ясного зрения называется ***длиной*** (областью) ***аккомодации***. Если длину аккомодации выразить в диоптриях, то этот параметр глаза называется ***объемом аккомодации*** и составляет для схематического глаза 11 дптр. Объем аккомодации сильно зависит от возраста человека. Так, в возрасте 50 лет обычно ближняя точка отодвигается до 400 мм, а объем аккомодации уменьшается до 2,5 дптр.

Для нормального глаза при нормальных условиях наиболее удобным для работы является ***расстояние наилучшего зрения*** для положения предмета на расстоянии 250 мм от передней поверхности роговицы. При длительном или чрезмерном напряжении, т.е. выполнении измерительных наблюдений сильно аккомодированным глазом, возникают усталость и невнимательность. Это сильно снижает возможности глаза, поэтому длина аккомодации должна меняться в пределах от расстояния наилучшего зрения до дальней точки.

Контрастная чувствительность глаза – способность глаза обнаруживать яркость предмета среди яркости фона. Она определяется по формуле

$$S_{\text{к}}^{\text{гл}} = \frac{1}{K} = \frac{B_{\text{ф}}}{\Delta B}, \tag{2.3.4}$$

где K – контраст яркости предмета среди яркости фона; $B_{\text{ф}}$ – яркость фона; ΔB – разность яркостей предмета и фона.

Пороговые значения контраста и контрастной чувствительности для глаза составляют:

$$\begin{aligned} K_{\text{пор}} &= 0{,}002, \\ S_{\text{пор к}}^{\text{гл}} &= 500. \end{aligned} \tag{2.3.5}$$

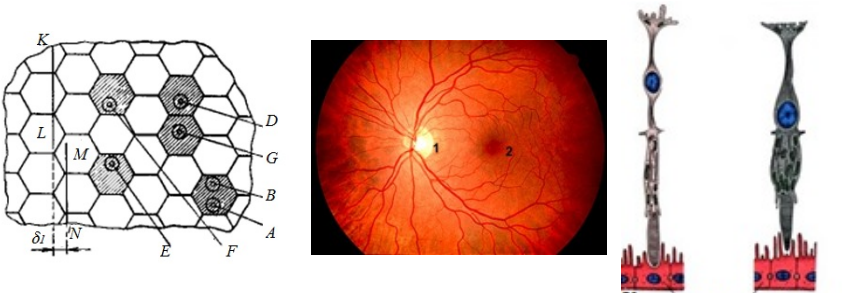
Эти значения достигаются при $B_{\text{ф}} = 130\text{–}640\ (\text{кд}/\text{м}^2)$.

Острота зрения – способность различать мелкие детали объектов. Острота зрения χ характеризуется величиной, обратной тому наименьшему углу ψ, под которым глаз может различить раз-

дельное расположение двух близко расположенных точек или линий:

$$\chi = \frac{1}{\psi}. \qquad (2.3.6)$$

Острота зрения зависит от структуры сетчатки (ретины), свойств объекта и фона, диаметра зрачка глаза, дефектов зрения, освещенности объекта, спектрального состава освещающего света и т.д.



а *б* *в*

Рис. 2.3.6. Строение сетчатки: *а* – схема сотового строения сетчатки в пределах центральной ямки [27]. *A* и *B* – два неразличимых изображения источников света попадают на одну светочувствительную площадку; *C* и *D* – два неразличимых изображения источников света на пределе разрешения попадают на соседние светочувствительные площадки; *E* и *F* – два уверенно различимых изображения источников света попадают на разные светочувствительные площадки; *KL* и *MN* – изображения двух параллельных штрихов на сетчатке, попадающие на два разных ряда колбочек, величина сдвига δ_1 существенно меньше диаметра колбочек; *б* – фотография глазного дна (URL: http://www.retina.ru): *1* – диск зрительного нерва – слепое пятно, *2* – желтое пятно, в центре которого расположена центральная ямка. В центральной ямке расположены только плотноупакованные колбочки; *в* – палочка (слева) и колбочка (справа) (URL: http://www.retina.ru)

Глаз является дифракционно-ограниченным оптическим прибором, при этом разрешающая способность оптики глаза при диаметре зрачка 1,5–2,5 мм соответствует размерам колбочек, расположенных в центральной ямке. ***Центральная ямка*** – участок сетчатки, в пределах которого имеет место наиболее ясное видение

(см. рис. 2.3.6, *б*). Разрешающая способность такой системы принимается равной 1 угл. мин (см. пример 2.1.1) и реализуется при нормальных условиях (освещенность объекта измерений и отсчетных шкал 50–250 лк, зеленый свет с длиной волны $\lambda = 0{,}55$ мкм, диаметр зрачка – 2 мм, тест-объект – точка). То есть острота зрения при нормальных условиях равна 1. В иных условиях (тест-объект – линии) острота зрения может быть значительно (до 6 раз) выше (табл. 2.1.5). Связано это с сотовым строением сетчатки (см. рис. 2.3.6, *а*), а также со специфическими физиологическими возможностями глаза. Эти возможности заключаются в том, что в процессе наводки глаз непрерывно движется (колеблется) с малой амплитудой, что приводит к смещениям части линии сформированного изображения на разные колбочки.

Эта особенность глаза описывается с помощью ***критерия Захаревского*** (2.1.22).

Следует заметить, что в разных местах сетчатки разрешающая способность глаза различна. Максимальна она в центральной ямке, поэтому зрительный аппарат человека автоматически учитывает это обстоятельство и отрабатывает таким образом, что сюжетно важный элемент изображения всегда формируется в пределах ***желтого пятна.***

Абсолютный порог яркости – наименьшая яркость, вызывающая зрительное ощущение, составляет $2 \cdot 10^{-7}$ (кд/м^2), при этом на сетчатке создается освещенность $2 \cdot 10^{-14}$ лк при диаметре зрачка 8 мм. Реальный диапазон яркостей, регистрируемых глазом, составляет 11 порядков ($2 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{5}$ (кд/м^2)). Ни одно средство фотометрических измерений, известных в настоящее время, не имеет такого широкого диапазона. Такая эффективность достигается механизмами зрительной адаптации. Это замечательная способность человеческого глаза, но в некоторых случаях не очень хорошо (для визуальных оптических измерений) то, что эта адаптация происходит неконтролируемо. Для того чтобы реализовать при визуальных оптических измерениях метрологические характеристики наилучшим и безопасным образом, необходимо помнить о следующих особенностях зрительных механизмов:

– при переходе из темного помещения в светлое процесс световой адаптации наступает через 20–30 мин;

– при переходе из светлого помещения в темное процесс полной темновой адаптации происходит через 60 мин;

– при малых яркостях ($2 \cdot 10^{-6} \div 10^{-2}$ кд/м^2) наблюдаемых объектов глаз имеет палочковое – ***темновое зрение*** (высокая чувствительность, отсутствие цветовой чувствительности, низкая острота);

– при средних яркостях ($10^{-2} \div 10$ кд/м^2) наблюдаемых объектов глаз имеет палочко-колбочковое – ***сумеречное зрение*** (средняя чувствительность, слабая световая чувствительность, средняя острота);

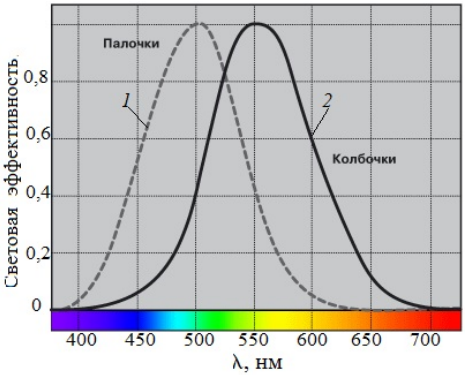


Рис. 2.3.7. Спектральная световая эффективность глаза:
1 – для сумеречного зрения; *2* – для дневного зрения [25]

– при высоких яркостях (свыше 10 кд/м^2) наблюдаемых объектов глаз имеет колбочковое зрение – ***дневное зрение*** (низкая чувствительность, цветовая чувствительность, высокая острота). При этом максимальная разрешающая способность глаза (диаметр зрачка не должен быть менее 2 мм) реализуется при нормальных условиях наблюдения;

– спектральное распределение чувствительности глаза зависит от вида адаптации. Смещение максимума спектральной чувствительности при световой адаптации (рис. 2.3.7) называется ***эффектом Пуркинье***;

– при резком переходе от дневного зрения к сумеречному имеет место эффект памяти: зрительные образы сохраняются в течение 0,2 с;

– при восприятии периодических световых раздражителей имеет место ***критическая частота***, при достижении которой глаз не различает пульсаций. При освещенности до 0,1 лк критическая частота равна 10 Гц; при 10 лк – 30 Гц; при 100 лк – 40 Гц;

– адаптационные возможности глаза не безграничны: яркость свыше $2 \cdot 10^5$ (кд/м^2) способна вызвать ослепление;

– ультрафиолетовое и инфракрасное излучение невидимо глазом, но оказывает на него вредное воздействие. Жесткий ультрафиолет с $\lambda < 313$ нм может привести к воспалению роговицы, излучение с $\lambda > 313$ нм вызывает флюоресценцию хрусталика. Излучение ИК-диапазона с $\lambda > 800$ нм активно поглощается сетчаткой, что приводит к ее перегреву и последующему отслоению.

Бинокулярное зрение – зрение двумя глазами, когда два изображения одного и того же объекта соединяются в единый зрительный образ (двоение изображения отсутствует). Восприятие объекта в виде единого образа обеспечивается за счет конвергенции (рис. 2.3.8) при выполнении условия, заключающегося в том, что изображения получаются на определенных участках сетчатки – ***соответственных точках***.

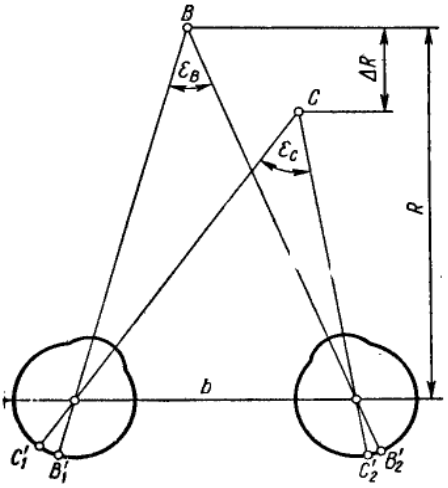


Рис. 2.3.8. Схема стереоскопического зрения [26]

Наблюдение предметов двумя глазами дает представление о глубине пространства, т.е. делает возможным трехмерное восприятие пространства – ***стереоскопическое зрение***, которое позволяет судить об относительной удаленности объектов наблюдения (см. рис. 2.3.8). Углы ε_b и ε_c, под которыми из точек B и C видны центры зрачков обоих глаз, называются параллактическими. Разность этих углов $\Delta\varepsilon$ называется бинокулярным ***параллаксом***. При большом значении R, а это справедливо практически всегда, по сравнению с величиной глазного базиса b имеем:

$$\varepsilon_b = \frac{b}{R}. \tag{2.3.7}$$

После дифференцирования имеем бинокулярный параллакс:

$$\Delta\varepsilon = \frac{b \cdot \Delta R}{R^2}. \tag{2.3.8}$$

Разрешающая способность стереоскопического зрения составляет:

– в угловой мере

$$\eta = \Delta\varepsilon_{\min} = 10 \text{ угл. сек.} = 4{,}9 \cdot 10^{-5} \text{ рад}; \tag{2.3.9}$$

– в линейной мере

$$\Delta R_{\min} = \frac{R^2}{b}\eta. \tag{2.3.10}$$

При $b = 65$ мм способность зрения человека фиксировать бинокулярный параллакс пропадает на расстоянии

$$R_{\max} = \frac{b}{\eta} = 1320 \text{ м}. \tag{2.3.11}$$

Фотометры – приборы для измерения фотометрических величин. При использовании фотометра [34] осуществляют определённое пространственное ограничение потока излучения и регистрацию его приёмником излучения с заданной спектральной чувствительностью. Отсюда особенности конструкции приборов в зависимости от назначения.

Освещённость измеряют ***люксметрами***, яркость – ***яркомерами***, световой поток и световую энергию – с помощью ***фотометра интегрирующего***. Приборы для измерения цвета объекта называ-

ют ***колориметрами***. Если в качестве приёмника используется глаз, фотометры называются ***визуальными***, или зрительными, если же применяется какой-либо физический приёмник, фотометры называются ***физическими***. Оптический блок фотометра называется ***фотометрической головкой*** (рис. 2.3.9) и содержит линзы, светорассеивающие пластинки, ослабители света, светофильтры, диафрагмы и приёмник излучения.



Рис. 2.3.9. Фотометрические головки, выпускаемые отечественной промышленностью для различных целей (URL: http://www.npplux.ru)

Оптические схемы фотометров (рис. 2.3.10) для измерения размерных фотометрических величин обеспечивают постоянство или изменение по определенному закону геометрического фактора. Зависимости фотометрических величин от направления определяют на ***гониофотометрах***. Измерение общего светового потока или потока излучения, распространяющегося от источника по всевозможным направлениям, осуществляется интегрирующим (шаровым) фотометром. Основная часть интегрирующего фотометра – ***фотометрический шар*** (шар Ульбрихта) – представляет собой сферическую оболочку диаметром до 5 м с диффузно отражающей белой внутренней поверхностью. Фотометрируемый пучок излучения от источника вводится внутрь шара и отделяется экраном от встроенного в поверхность шара приёмника излучения (см. рис. 3.4.9). Освещённость любого участка внутренней поверхности шара, затенённой экраном от исследуе-

мого источника, в результате многократных отражений пропорциональна общему световому потоку этого источника.

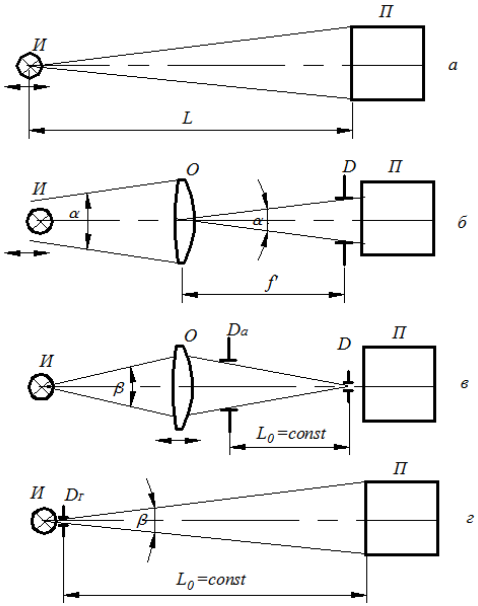


Рис. 2.3.10. Принципиальные оптические схемы фотометров [34] для измерения: *а* – освещённости и экспозиции, с привлечением закона квадратов расстояний, силы света и освечивания; *б* – силы света и освечивания телецентрическим методом; *в* – яркости и интеграла импульса яркости с применением фокусирующей оптической системы; *г* – яркости с применением габаритной диафрагмы. *И* – источник света; *П* – приёмник излучения с исправляющими его спектральную чувствительность светофильтрами и ослабителями; *О* – объектив, имеющий фокусное расстояние *f*; *D* – диафрагма, устанавливаемая в фокальной плоскости (*б*) или в плоскости изображения источника (*в*); $D_а$ – апертурная диафрагма; $D_г$ – габаритная диафрагма; α и β – угловые размеры фотометрируемых пучков лучей

Фотометры лазерного излучения строятся по схеме, приведенной на рис. 2.3.10, *г*, с учётом малой угловой расходимости и ограничения размеров поперечного сечения лазерного пучка, при этом диафрагма $D_г$ устанавливается на минимальном расстоянии от приёмника *П*. При измерении общей мощности или энергии

пучка лазерного излучения диаметр габаритной диафрагмы $D_г$ должен быть больше поперечного размера $d_п$ этого пучка, а при измерении распределения поверхностной плотности мощности или энергии излучения по сечению пучка $d<d_п$ в необходимое для пространственного разрешения число раз.

Создание и применение ***импульсных фотометров*** сопряжено с необходимостью использования приёмников излучения с высоким разрешением во времени и широким динамическим диапазоном. В фотометрах для сверхкоротких лазерных импульсов могут оказаться существенными следующие особенности:

– длительность переходной или импульсной характеристики оптической системы;

– возможные лучевые пробои оптических элементов в местах фокусировки пучка;

– изменения коэффициентов пропускания сред и т.п.

Для фотометров с абсолютной градуировкой характерны относительно большие систематические погрешности измерений (обычно 10–20%); фотометрирование с погрешностью менее 5% возможно только в специализированных лабораториях.

Фотометры для измерения отношения потоков излучения (коэффициентов пропускания и отражения образцов) имеют более высокую точность и строятся по одноканальной и двухканальной дифференциальной оптическим схемам. В однолучевом случае измеряется относительное уменьшение потока излучения при установке образца на пути луча. В двухлучевом случае ослабление образцом потока излучения в измерительном луче определяется по отношению к потоку излучения в опорном канале. Для уравнивания потоков излучения в каналах применяются регулируемые диафрагмы, фотометрические клинья и другие подобные устройства. Фотометры для измерения коэффициентов пропускания и отражения светорассеивающих образцов строятся на базе фотометрических шаров.

Пример 2.3.6. Ниже в качестве примера приведено описание переносного люксметра DT-1309.

Особенности люксметра DT-1309:

– автопределы (400, 4 000, 40 000, 400 000 лк);

– предупреждение о перегрузке прибора;
– длинный шнур датчика фотодиода;
– большой цифровой дисплей с аналоговой шкалой;
– 1,5 измерения в секунду;
– аналоговая шкала 40 сегментов в люксах / фут-канделах;
– пиковый детектор;
– удержание максимальных / текущих показаний;
– автовыключение;
– индикация разряда батарей;
– USB интерфейс.



Рис. 2.3.11. Люксметр DT-1309 (URL: http://www.dilis. com.ua)

Технические характеристики люксметра DT-1309:

– максимальное показание	400 000 лк
– погрешность	±5% ±10 е.м.р. (<10,000 лк) ±10% ±10 е.м.р. (>10,000 лк)
– максимальное разрешение	0,1 лк
– фотодатчик	селеновый фотоэлемент
– скорость измерений	1,5 измерения в секунду
– размер фотодатчика	115 × 60 × 20 мм
– размер прибора	170 × 80 × 40 мм
– масса	390 г

2.3.2. Оптические скамьи и столы

Оптические скамьи и столы предназначены для исследований оптических и оптико-электронных систем, а также отдельных оптических деталей по качеству изображения для измерения оптических и пространственно-энергетических характеристик. ***Оптическая скамья*** представляет собой комплект, состоящий из оптико-механических приборов и узлов и направляющей для их размещения и взаимного перемещения. Является универсальным прибором для оптических измерений и может быть использована для макетирования, сборки и юстировки различных оптических одномерных (линейных) систем, для демонстрационно-учебных и научно-исследовательских работ. Направляющая скамьи имеет только одно измерение – длину, поэтому измерительные оптические схемы, реализуемые на скамье, линейны.

Если речь идет о двумерных схемах (см. рис. 3.3.19), то следует использовать ***оптические столы***. В отличие от оптических скамей, столы имеют еще одну опцию – виброзащитное основание, обеспечивающее стабильность оптической схемы в процессе измерений. Оптические столы являются непременным атрибутом голографической лаборатории в силу этой особенности конструкции.

Пример 2.3.7. Скамья оптическая ОСК-2ЦЛ приведена на рис. 2.3.12. Основой скамьи является направляющая станочного типа длиной 2 м, обеспечивающая привязку устанавливаемых узлов и приборов к единой геометрической оси и плавное прямолинейное перемещение их вдоль этой оси. Направляющие можно соединять между собой болтовым соединением так, что фактическая длина моделируемой оптической схемы может быть 2–4–6 м и т.д. В качестве характеристик скамьи указываются следующие:

– диаметр объектива коллиматора, мм	148
– предел разрешения объектива коллиматора, угл. сек.	0,96
– фокусное расстояние объектива коллиматора, мм	1600
– диаметр объектива зрительной трубы, мм	50
– предел разрешения зрительной трубы	3
– увеличение микроскопа, крат	32, 80, 120

– наименьшая величина перемещения, регистрируемая по индикатору табло, мм 0,001
– диаметр объектива коллиматора, мм 148



Рис. 2.3.12. Скамья оптическая ОСК-2 ЦЛ (URL: http://promoptika.ru)

В комплекте оптической скамьи ОСК-2ЦЛ поставляются следующие узлы:

– длиннофокусный коллиматор с набором мир, сеток и окуляров;

– автоколлиматор АКТ-15;

– зрительная труба с автоколлимационным окуляром АКТ-60;

– микроскоп горизонтальный;

– объектив коллиматорный двухлинзовый в оправе диаметром 100 мм с номинальным фокусным расстоянием 250 мм;

– объектив коллиматорный двухлинзовый в оправе диаметром 100 мм с номинальным фокусным расстоянием 500 мм;

– диоптрийная трубка;

– динаметр Рамсдена (см. рис. 2.2.14);

– некогерентный осветитель;

– монохроматический источник света (лазер);

– столик с крестообразным кремальерным перемещением;

– столик с двумя взаимно перпендикулярными перемещениями при помощи микровинтов с фотоэлектрическими преобразователями (см. рис. 2.2.2, 2.2.7);

– индикатор перемещений двухпозиционный для индикации показаний фотоэлектрических преобразователей;

– столик с одним микрометрическим перемещением;

– столик поворотный;

– столик накладной диаметром 150 мм;

– столик накладной диаметром 200 мм;

– столик упрощенный;

– держатели для исследуемых коллиматоров и зрительных труб;

– суппорт с вращающейся оправой для исследования объективов;

– оправа универсальная;

– микрообъектив;

– уровень накладной.

Фотометрическая скамья – универсальное лабораторное устройство для измерения фотометрических величин. На фотометрическую скамью можно устанавливать и перемещать на точно измеряемое расстояние источники света, фотометрические головки (фотометры) и различные приспособления, применяемые в фотометрии. Основная часть фотометрической скамьи – прямолинейные направляющие со шкалой (обычно длина 3–5 м и ценой делений 1 мм). На направляющих легко перемещаются и закрепляются каретки с установленными на них приборами и приспособлениями. Рассеянный и посторонний свет устраняется поперечными светопоглощающими экранами, входящими в комплект фотометрической скамьи.

2.3.3. Телескопические приборы

Оптические свойства телескопических приборов рассмотрены в разделе П.2.7.4.

Коллиматор – один из основных контрольно-юстировочных приборов, который предназначен для имитации объекта, расположенного на бесконечно большом расстоянии.

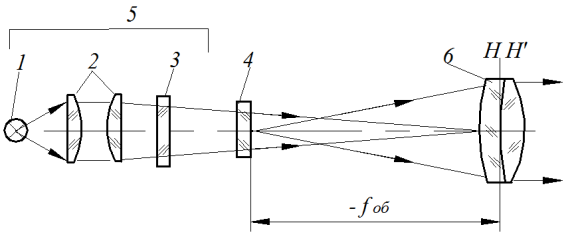


Рис. 2.3.13. Оптическая схема коллиматора: *1* – некогерентный источник света; *2* – конденсор; *3* – светофильтр; *4* – тест-объект; *5* – узел осветителя коллиматора; *6* – объектив коллиматора

Для этого (рис. 2.3.13) в фокусе длиннофокусного объектива размещается тест-объект согласно табл. 2.1.2. Использование светофильтра в осветителе коллиматора (см. рис. 2.3.13) имеет двойное назначение:

– для уменьшения хроматизма;

– уменьшения интенсивности ИК-нагрева тест-объекта.

При выборе коллиматора для оптических измерений исходят из следующих соображений:

– если это техника для оптических измерений, то объектив коллиматора должен быть дифракционно-ограниченной оптической системой;

– если этот объектив предполагается к работе с некогерентным светом, хроматизм положения должен быть мал и не выходить за пределы кружка Эри (П.72). Это условие выполняется, если характеристики коллиматора удовлетворяют условию [20]:

$$f'_{\text{к}} \geq 0{,}5 \cdot D_{\text{к}}^2, \qquad (2.3.12)$$

где $f'_{\text{к}}$ – фокусное расстояние коллиматора; $D_{\text{к}} = D'_p$ – световой диаметр коллиматора, совпадающий по величине с диаметром выходного зрачка для случая двухлинзового объектива;

– если коллиматор предназначен для измерения характеристик иных систем, то параметры коллиматора и контролируемой системы должны находиться в соотношении:

○ условие точности продольных наводок

$$f'_{\text{к}} \geq (3-5) f'_{\text{к.с}}; \qquad (2.3.13)$$

○ условие устранения влияния краевых эффектов

$$D_{\text{к.с}} \leq {}^{D_к}/_{1,2}. \tag{2.3.14}$$

Коллиматоры, как правило, являются длиннофокусными, поэтому для устранения разъюстировки продольной наводки при смене тест-объекта или изменении условий эксплуатации коллиматора (например, температуры, в результате чего меняются оптические интервалы в оптической схеме коллиматора) они имеют механизм юстировки положения тест-объекта (продольной наводки) относительно фокальной плоскости. Погрешность этой продольной наводки описывается соотношением (2.1.23):

$$\Delta z_{\text{з}} = {}^{0,2 \text{ мкм} \cdot}/_{A^2}.$$

Используя формулу отрезков Ньютона (П.12), получим для коллиматора в воздухе ***практическую бесконечность*** в мм:

$$L_{\infty} = \frac{f'^2}{\Delta z_{\text{з}}} = 1{,}25 \cdot 10^3 \cdot D_{\text{к}}. \tag{2.3.15}$$

Продольная наводка коллиматора – ***выверка***, так же как и измерение его фокусного расстояния, выполняется с помощью зрительной трубы, имеющей характеристики, удовлетворяющие соотношениям (2.3.13) и (2.3.14). На рис. 2.3.14 показаны технические ухищрения, к которым прибегают при контроле крупногабаритных оптических систем, если не удается выполнить эти требования.

На основании вышеизложенного можно заключить, что к метрологическим характеристикам коллиматора относятся:

– $f'_{\text{к}}$ – фокусное расстояние коллиматора;

– $\Delta f'_{\text{к}}$ – погрешность его (фокусного расстояния) исполнения, поскольку значение фокуса используется для косвенных измерений, следовательно, влияет на систематическую погрешность измерений (см. раздел 3.2.3);

– $\Delta W_{\text{к}}$ – остаточные аберрации или разрешающая способность объектива, если он не является дифракционно-ограниченным по умолчанию;

– $\Delta S'_{f'_{\text{к}}}$ – величина продольного хроматизма, если по умолчанию не выполняется соотношение (2.3.12);

– $D'_{p'}$ – диаметр выходного зрачка объектива.

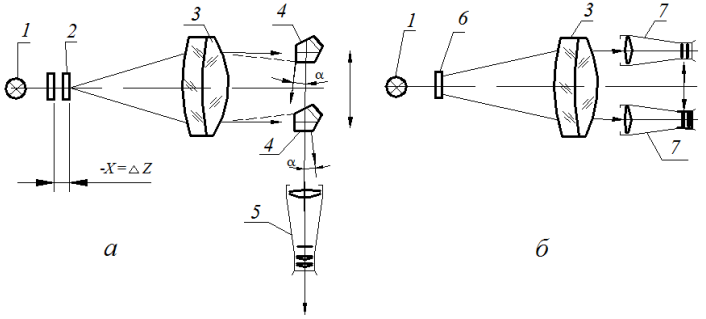


Рис. 2.3.14. Выверка коллиматоров большого диаметра с помощью зрительной трубы: *а* – с применением перемещающейся пентапризмы; *б* – посредством перемещения зрительной трубы с малым световым диаметром. *1* – источник света; *2* – реальное положение сетки, смещенное на расстояние *x* относительно номинального положения сетки испытуемой системы в фокусе объектива; *3* – объектив испытуемой системы; *4* – пентапризма; *5* – зрительная труба; *6* – сетка испытуемой системы; *7* – зрительная труба с малым световым диаметром

Угловая γ и линейная цена деления k тест-объекта связаны соотношением

$$\gamma(\text{угл. сек.}) = \frac{180 \cdot 3600 \cdot \operatorname{arctg}\left(k/f_{к}'\right)}{\pi} \cong 206369{,}4\left(k/f_{к}'\right). \qquad (2.3.16)$$

Угловая расходимость (угловой размер изображения точечного источника) в угл. сек. (см. табл. 2.1.4) описывается формулой

$$2\varphi_m = 276/D_p. \qquad (2.3.17)$$

В табл. 2.3.2 представлены различные конструкции коллиматоров.

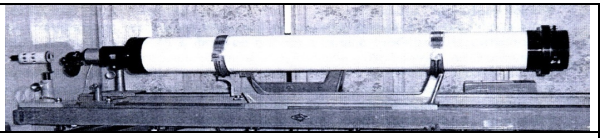
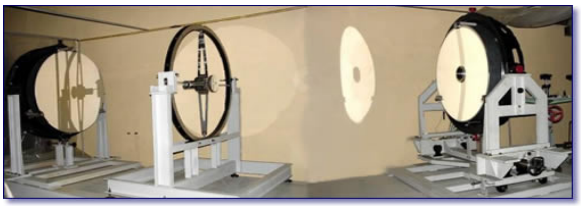
Шаровой коллиматор – коллиматор специальной конструкции для фотометрических измерений (раздел 3.4.2) приведен на рис. 2.3.15.

По своей сути это устройство является специальным источником света и представляет собой фотометрический шар *3*, в стенке которого установлен коллиматорный объектив *5* с фокусным расстоянием, равным диаметру шара. Внутренняя поверхность шара окрашена белой матовой краской и освещается с помощью ламп накаливания,

размещенных в специальных гнездах, утопленных в освещаемую сферу или прикрытых со стороны объектива специальными экранами. С противоположной объективу стороны в шаре на оптической оси объектива имеется отверстие *2*, с задней стороны которого располагается световая ловушка *1*, выполненная в виде пустотелого шара или колена, оклеенного изнутри черным бархатом. Световая ловушка является имитатором черного тела. Диаметр отверстия может изменяться с помощью набора торцевых пробок. Одна из пробок *6* является заглушкой отверстия, поверхность которой окрашена той же краской, что и внутренняя поверхность сферы. Эта заглушка является имитатором ламбертовского источника белого света.

Таблица 2.3.2

Примеры конструкций коллиматоров

Коллиматор оптической скамьи ОСК-2 ЦЛ	
Зеркальный коллиматор для технологического контроля оптики с фокусом 30 м: плоскость диаметром 1 250 мм, парабола диаметром 1 100 мм, гипербола диаметром 188 мм	 URL: http://www.lzos.ru
Коллиматор – имитатор когерентного точечного источника	

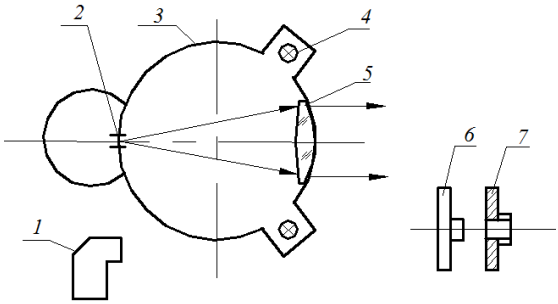


Рис. 2.3.15. Оптическая схема шарового коллиматора для исследований светорассеяния оптических систем [25]

В современной научно-технической литературе часто встречаются следующие термины, отражающие особенности конструкции и назначение этих коллимационных устройств: расширитель лазерного пучка и искусственная звезда.

Расширитель лазерного пучка, или ***экспандер***, – афокальная система оптических компонентов – телескопическая система Кеплера или Галилея (рис. П.42), преобразующая узкий лазерный пучок света в широкий. Тест-объектом в этом случае является каустика лазерного пучка лучей, сформированная с помощью отрицательного (для мощных лазеров) или положительного объектива. В первом случае каустика – мнимая, во втором – действительная. Часто в экспандерах с действительной каустикой используется пространственный фильтр – точечная диафрагма дифракционного размера с целью фильтрации лазерного пучка лучей. Устройство для пространственной фильтрации, включающее в себя микрообъектив, устройство продольной наводки микрообъектива, точечное отверстие, механизм поперечных наводок точечного отверстия и узел сопряжения с коллиматором, называется ***pin hole***.

Искусственная звезда – коллиматор, формирующий изображение точечного источника света в бесконечности, т.е. тест-объектом является точка. Это устройство применяется для тестирования качества изготовления или работоспособности астрономических инструментов.

Пример 2.3.8. Обычно резкость изображений наземных телескопов ограничивается эффектом атмосферной турбулентности. Данный недостаток может быть устранен посредством адаптивной оптики, позволяя получить снимки, не уступающие по качеству космическим. Однако чтобы работать, системе адаптивной оптики нужна опорная звезда, которая должна быть достаточно яркой. Некоторые области неба не имеют их и потому не могут наблюдаться таким способом. Чтобы обойти это ограничение, астрономы используют мощный лазер, который создает искусственную звезду – там, где нужно, и тогда, когда нужно (рис. 2.3.16). На высоте 90 км от поверхности Земли есть слой атмосферы, насыщенный атомами натрия, созданный микрометеоритами, сгоревшими при входе в верхние слои атмосферы. Как и любая квантовая система, атом натрия имеет несколько энергетических уровней. Переход с основного на более высокий уровень сопровождается поглощением излучения на длине волны 589 нм. Мощный сколлимированный пучок лазерного излучения, имеющий такую длину волны, достигает слоя паров натрия и взаимодействует с ним. Лазерный фотон поглощается, возбуждая атом натрия. За время около 10^{-8} с атом натрия возвращается в основное состояние, излучая на длине волны, соответствующей разности энергий возбужденного и основного уровней. Высота 90 км достаточно большая для того, чтобы считать ее практической бесконечностью, а светящийся объем натрия достаточно малым (и его можно считать точечным объектом для наземных телескопов).

Зрительная труба – оптический инструмент, предназначенный для наблюдения объектов, расположенных на бесконечно большом расстоянии. Зрительные трубы для оптических измерений конструируют по схеме Кеплера. Зрительная труба (рис. 2.3.17) по схеме Кеплера состоит из объектива *1* и положительного окуляра *2*. Основным преимуществом, которое дает использование схемы Кеплера в конструкции зрительной трубы, является наличие действительного изображения предмета. В плоскости этого изображения устанавливается измерительная сетка *3*.

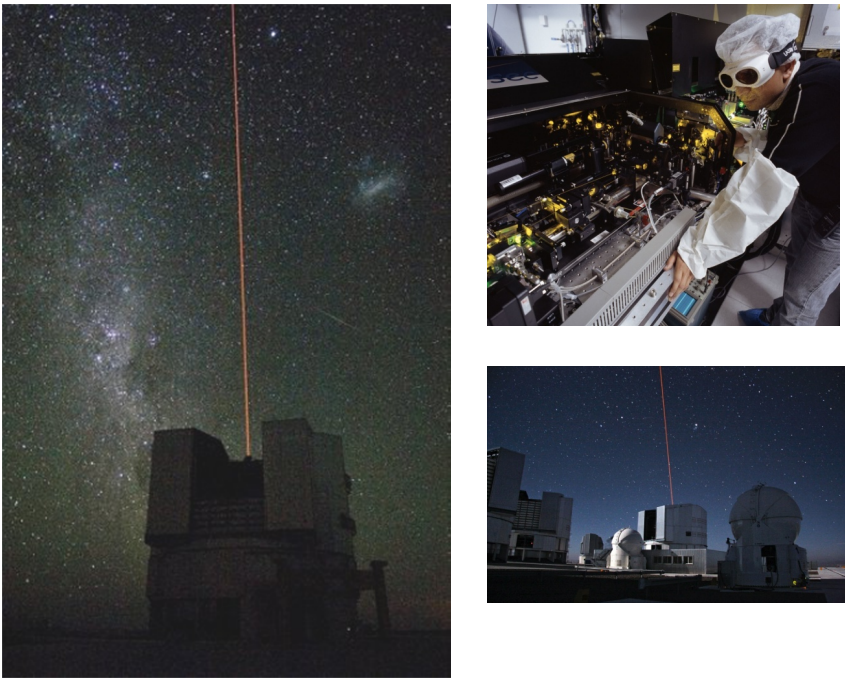


Рис. 2.3.16. Искусственная звезда на телескопе Yepun в Сьерро Паранал (Cerro Paranal), Чили, где располагается Сверхбольшой телескоп (Very Large Telescope, VLT) Европейского космического агентства. Представляет собой желтый лазерный луч диаметром 50 мм и мощностью в несколько ватт (URL: http://www.eso.org)

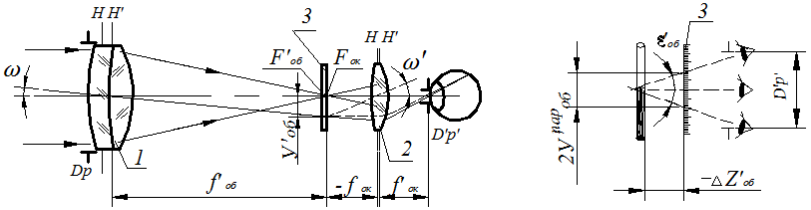


Рис. 2.3.17. Оптическая схема зрительной трубы: *1* – объектив зрительной трубы; *2* – окуляр зрительной трубы; *3* – измерительная сетка

Изображение, создаваемое такой системой, является перевернутым, т.е. увеличение в системе Кеплера имеет отрицательное значение. Для получения прямого изображения в окулярной части трубы могут быть использованы зеркальные или призменные оборачивающие системы.

Объективы, используемые в зрительных трубах для оптических измерений, имеют те же особенности, что и объективы коллиматоров, а именно:

– объектив зрительной трубы должен быть дифракционно-ограниченной оптической системой;

– объектив должен иметь малый хроматизм. По аналогии с коллиматором это выполняется, если его характеристики удовлетворяют условию (2.3.12);

– если зрительная труба предназначена для измерения характеристик иных систем, то параметры зрительной трубы и контролируемой системы должны удовлетворять соотношениям (2.3.13), (2.3.14).

Зрительная труба является ***афокальной*** оптической системой, т.е. ее фокусное расстояние равно бесконечности, а задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. Окуляр является необходимым компонентом зрительной трубы и служит для оптического увеличения при рассматривании изображения, построенного объективом, и мелких штрихов сетки. Совместное действие объектива и окуляра зрительной трубы описывается с помощью ***видимого увеличения зрительной трубы*** (П.107).

У измерительной сетки три основных функции:

– она определяет ось визирования (оптическую ось) зрительной трубы, которая проходит через центр перекрестья сетки и заднюю узловую точку объектива;

– содержит информацию о единице измерения, т.е. имеет оптическую шкалу, с которой сравнивается изображение объекта измерений. Цена деления шкалы устанавливается как в линейной, так и в угловой мере. Угловая γ и линейная цена деления k измерительной шкалы связаны соотношением (2.3.16);

– отмечает положение фокуса объектива, т.е. то место, где должно находиться изображение предмета, расположенного в бесконечности объективом трубы. Поэтому, рассматривая оптическое

измерительное изображение, состоящее из изображения предмета на фоне сетки через окуляр, наблюдатель имеет возможность установить степень несовпадения изображения и сетки, т.е. факт и величину погрешности продольной наводки.

Отсюда следует два типа задач, которые можно решать с использованием зрительной трубы.

– Измерение наклона световых пучков, идущих от точки предмета, находящегося в бесконечности, к линии визирования, т.е. поперечные наводки. Если точку в изображении наблюдаемого объекта совместить со знаком на сетке и снять отсчет *y'*, то угол наклона пучка лучей, идущего от соответствующей точки предмета, относительно оптической оси трубы определится соотношением (2.3.16).

Зрительная труба является дифракционно-ограниченным оптическим прибором, предназначенным для совместной работы с глазом. Порог чувствительности для поперечных наводок с сеткой в виде тонких штрихов согласно табл. 2.1.5 составляет:

- со стороны сетки – $\tau' = 10 - 15$ угл. сек.;
- со стороны предмета – $\tau = \tau'/\Gamma = 10/\Gamma$ угл. сек.

Поскольку у современных зрительных труб видимое увеличение составляет 20–100 крат, их пороговая чувствительность к наклону принимаемого пучка, т.е. погрешность измерения наклонов, непрямолинейности, непараллельности осей, составляет τ = 0,1–0,5 угл. сек.

– Определение положения предмета или его изображения, находящегося на большом расстоянии, в целях выверки коллиматоров или установления погрешности продольных наводок исследуемых оптических приборов. Если обозначить $\Delta z_к$ – дефокусировку исследуемого оптического прибора, например коллиматора, т.е. смещение предмета относительно передней фокальной плоскости этого прибора $\Delta z_к = x_к$, а $\Delta z'_{об}$=$x'_{об}$ – смещение изображения этого предмета, построенное объективом зрительной трубы относительно заднего фокуса объектива, то из (П.36), можно получить для положения предмета:

$$\Delta z_к = \Delta z'_{об} \cdot \left(\frac{f_к}{f'_{об}}\right)^2, \qquad (2.3.18)$$

или для его изображения, построенного объективом коллиматора:

$$L_{\text{к}} = \frac{{f'_{\text{об}}}^2}{\Delta z'_{\text{об}}}. \qquad (2.3.19)$$

Соотношение (2.3.18) позволяет определить дефокусировку измеряемого прибора, а (2.3.19) – измерить положение предмета, находящегося на большом расстоянии, по измеренному значению смещения изображения. Эти соотношения справедливы в предположениях:

– $\Delta z_{\text{к}} \ll f_{\text{об}}$, а $\Delta z'_{\text{об}} \ll f'_{\text{к}}$, что практически всегда верно, поскольку объективы и коллиматоров, и зрительных труб всегда длиннофокусные;

– $L_{\text{к}} \gg f_{\text{об}}$, что также справедливо, поскольку речь идет о наблюдении удаленных объектов с помощью зрительной трубы.

Для выполнения продольной наводки окулярная часть зрительных труб (и коллиматоров тоже) снабжена устройством, обеспечивающим перемещение сетки, – ***кремальерным механизмом***. Это устройство снабжено линейной шкалой для отсчета перемещения сетки $\Delta z'_{\text{об}}$. Кремальерный механизм используется в целях измерений, а также для выверки зрительной трубы.

При измерении продольной наводки используется явление параллакса (см. рис. 2.3.17). ***Параллаксом*** в оптических приборах называют сдвиг изображения предмета относительно шкалы или сетки, наблюдающийся при поперечных смещениях зрачка глаза в пределах выходного зрачка прибора в том случае, когда изображение предмета не совпадает с плоскостью шкалы или сетки.

Несомненно, явление параллакса является отрицательным при поперечных наводках, но в то же время это один из основных инструментов для обнаружения расфокусировки в оптических приборах. При этом имеет место следующая терминология:

– несовпадение двух одновременно наблюдаемых плоскостей называется ***продольным параллаксом***, который измеряется отрезком $\Delta z'_{\text{об}}$;

– при смещении глаза в пределах выходного зрачка окуляра имеет место поперечное смещение штрихов сетки *3* относительно изображения, сформированного объективом зрительной трубы, на

величину $2y'^{\text{пар}}_{\text{об}}$. Кажущееся смещение рассматриваемого объекта, связанное с изменением точки наблюдения, называется ***поперечным параллаксом***;

– угол, под которым наблюдается поперечное смещение сетки относительно изображения предмета, называется ***угловым параллаксом***. Угловой параллакс на рис. 2.3.17 обозначен $2\varepsilon'_{\text{об}}$;

– если плоскость изображения смещена от сетки прибора к объективу, то при движении глаза изображение смещается относительно сетки в направлении движения глаз – ***параллакс «за глазом»***;

– если изображение предмета смещено от сетки прибора в сторону окуляра, то имеет место ***параллакс «против глаза»***.

Для того чтобы уменьшить влияние параллакса при поперечных наводках зрительной трубы, т.е. сделать измерения малочувствительными к положению предмета, организуют ***телецентрический ход главного луча в пространстве изображений***. Для этого в заднем фокусе окуляра, совпадающем с положением выходного зрачка трубы, устанавливается апертурная диафрагма малого диаметра, т.е. выбирается зрительная труба с малым выходным зрачком $D'_{p'}$. И тогда все главные лучи пучков лучей от предмета идут в пространстве за объективом параллельно оптической оси независимо от положения предмета.

Если речь идет о продольных наводках, то стараются выбрать зрительную трубу с большим диаметром выходного зрачка, чтобы увеличить эффект параллакса с целью более уверенного выявления малых дефокусировок.

На основании изложенного выше можно заключить, что к метрологическим характеристикам зрительной трубы относятся:

– $f_{\text{об}}'$ – фокусное расстояние объектива, в документации указывается номинальное значение;

– $\Delta f_{\text{об}}'$ – погрешность его (фокусного расстояния) исполнения, поскольку значение фокуса используется для косвенных измерений, следовательно, влияет на систематическую погрешность измерений (см. раздел 3.2.3). Фактическое значение фокусного расстояния определяется посредством аттестации объектива;

– цена деления шкалы;

– погрешность измерений при поперечных наводках;

– $\Gamma = {\mathrm{tg}w'}/{\mathrm{tg}w}$ – видимое увеличение;

– $2w_{\max}$ – угол поля зрения. Если сетка проградуирована в угловой мере, то за $w_{\max}$ принимается крайний отсчет угла по сетке. Если сетка в линейной мере, то $2w_{\max} = 2\mathrm{arctg}\frac{D_{\text{пд}}}{2f'_{\text{об}}}$, где $D_{\text{пд}}$ – линейное поле зрения, равное видимому размеру сетки;

– диапазон фокусировки окулярной части;

– D_p – диаметр входного зрачка. Входным зрачком зрительной трубы является диаметр оправы объектива, а выходным – ее изображение. Для измерительных зрительных труб диаметр выходного зрачка 0,5 мм $\leq D'_p \leq$ 2 мм. При верхнем значении имеем дифракционно-ограниченную визуальную измерительную систему. Нижнее значение – для телецентрического хода лучей. Верхнее значение может быть больше, но без увеличения разрешающей способности.

Автоколлимационная зрительная труба (автоколлиматор) представляет собой зрительную трубу, совмещенную с коллиматором. Конструктивно такое совмещение достигается за счет использования автоколлимационных окуляров со встроенным осветителем и светоделителем (рис. 2.3.18). ***Автоколлимационной*** называют такую оптическую систему, которая проецирует изображение измерительного тест-объекта с помощью отражающей поверхности в плоскость расположения самого светящегося теста. Отражающей поверхностью может быть зеркало или полированная поверхность контролируемой детали.

На рис. 2.3.19 представлена схема автоколлиматора с окуляром Рамсдена, с помощью которого измеряется наклон плоского зеркала. Лучи света от центра перекрестья *A* тест-объекта, нанесенного методом фотолитографии на полупрозрачную грань светоделителя, проходят через объектив и падают на поверхность отражателя. Если автоколлиматор сфокусирован таким образом, что *A* находится в заднем фокусе объектива автоколлиматора, то из объектива выходят лучи, параллельные оптической оси. Если отражающая поверхность перпендикулярна падающим лучам, то после отраже-

ния от зеркала лучи света повторяют свой путь в обратном направлении и строят автоколлимационное изображение *A'*, точно совмещенное с перекрестием *A*.

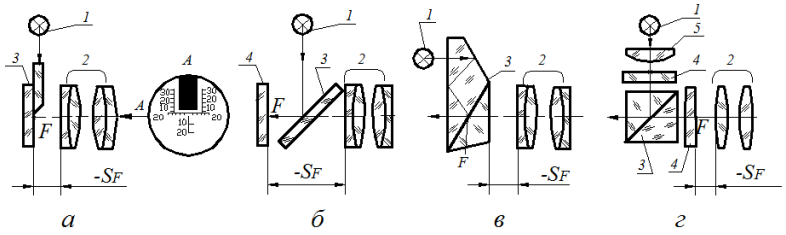


Рис. 2.3.18. Типы автоколлимационных окуляров: *а* – Аббе; *б* – Гаусса; *в* – Мончeнко; *г* – окуляр с куб-призмой; *д* – вид поля зрения в окуляре Аббе. *1* – источник света; *2* – окуляр; *3* – светоделитель; 4 – тест-объект и измерительная сетка; *F* – фокус окуляра

В глаз наблюдателя поступают лучи, идущие как от самого перекрестья *A*, так и от его автоколлимационного изображения *A'*. Если поверхность отражателя наклонена на угол α, то автоколлимационное изображение *A'* сместится на расстояние *y'* относительно *A*, причем

$$y' = 2\alpha \cdot f'_{об}. \qquad (2.3.20)$$

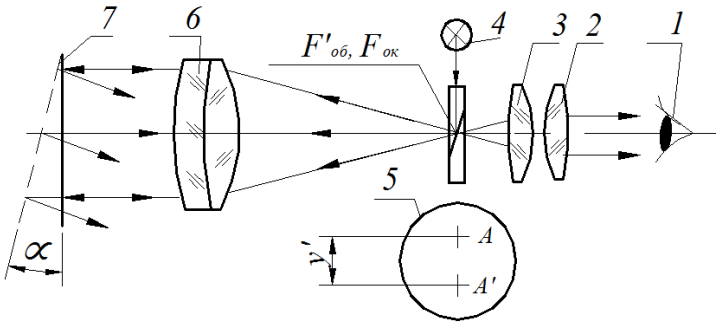


Рис. 2.3.19. Автоколлимационная зрительная труба

Измерив отрезок y' с помощью сетки того же тест-объекта, можно вычислить угол α наклона поверхности отражателя к нормали к оптической оси, используя соотношение (2.3.20).

Отражатель для автоколлимационных измерений представляет собой плоское зеркало, смонтированное на магнитном основании. Для удобства взаимной номинальной установки автоколлиматора и зеркала последнее, как правило, снабжено зрительной трубкой малого видимого увеличения. В табл. 2.3.3 приведены модели автоколлиматоров, выпускаемых отечественной промышленностью.

Автоколлиматоры очень часто используются как простая зрительная труба. Основная причина этого заключается в том, что автоколлиматор имеет встроенное средство проверки работоспособности. Выверка, т.е. настройка на бесконечность автоколлиматора, может быть проведена без привлечения других технических средств, кроме собственно автоколлиматора и автоколлимационного зеркала.

Гониометр – один из основных измерительных приборов, который предназначен для измерения углов между плоскими отражающими гранями. Гониометр применяется для измерения: углов призм и клиньев; пирамидальности призм; показателя преломления и дисперсии оптических материалов объективов; характеристик оптических систем.

Оптическая схема гониометра представлена на рис. 2.3.20, схема измерений – на рис. 2.3.21.

Основными частями гониометра являются коллиматор, автоколлимационная зрительная труба, вращающийся предметный столик и лимб с угломерной шкалой. Отсчеты углов снимают по лимбу с помощью отсчетного микроскопа с бесконечным тубусом (на рис. 2.3.21 их условно показано два). Для повышения точности в конструкции гониометра организован узел переброски изображения противоположного участка шкалы. Таким образом, в поле зрения микроскопа формируется два совмещенных изображения участков шкалы, расположенных на лимбе с угловым сдвигом на 180 град. Это позволяет одновременно снимать отсчеты по диаметрально противоположным участкам шкалы лимба и реализовать метод противопоставления для устранения систематической ошибки от эксцентриситета лимба.

Таблица 2.3.3

Промышленные модели автоколлиматоров для работ, требующих точных измерений малых угловых величин: непрямолинейности горизонтальных и вертикальных направляющих, отклонений от плоскостности, взаимного углового расположения осей и плоскостей изделий в пространстве

Наименование устройства	Изображение, источник	Характеристики	
Визуальный автоколлиматор АКТ-15	 URL: http://www.promoptika.ru	Цена деления шкалы Диапазон измерений Предел основной допускаемой погрешности: при однокоординатных измерениях при двухкоординатных измерениях Диаметр входного зрачка Диапазон фокусировки окулярной части Увеличение Габаритные размеры Масса	15 угл. сек. 25 угл. мин. 10 угл. сек. 15 угл. сек. 50 мм 50 мм 23 крат 450×70×130 мм 3,6 кг
Визуальный автоколлиматор АКТ-60	 URL: http://www/ npzoptiks.ru	Цена деления Диапазон измерений Предел основной допускаемой погрешности: при однокоординатных измерениях при двухкоординатных измерениях Увеличение Диаметр входного зрачка Габаритные размеры Масса	60 угл. сек. 60 угл. мин. 45 угл. сек. 60 угл. сек. 5,6 крат 20 мм 240×120×38 мм 0,58 кг

Наименование устройства	Изображение, источник	Характеристики	
Широкодиапазонный фотоэлектрический автоколлиматор одно-координатный для промышленного применения	 URL: http://www.npkgoi.ru	Диапазон измерения Погрешность измерения Расстояние от прибора до зеркала, не более Габаритные размеры	80 мин ±1 угл. сек. 6 м 350×250×150 мм
Визуальный автоколлиматор АКУ-0,2	 URL: http://www.npzoptiks.ru	Цена деления Диапазон измерений Предел основной допускаемой погрешности: при однокоординатных измерениях при двухкоординатных измерениях Увеличение Диаметр входного зрачка Габаритные размеры Масса	0,2 угл. сек. 10 угл. мин. 1,5 угл. сек. 3,0 угл. сек. 58 крат 50 мм 535×130×145 мм 4,6 кг

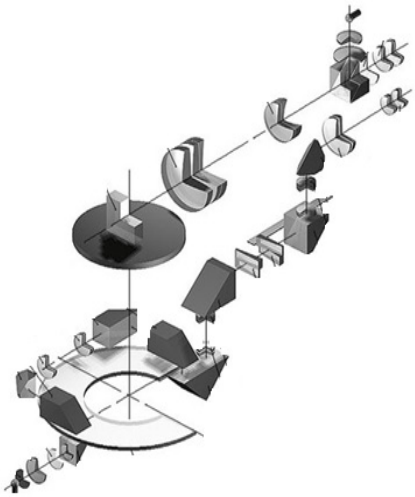


Рис. 2.3.20. Оптическая схема гониометра

Исследуемый объект (призму, клин и т.п.) устанавливают на предметном столике. Ось вращения столика должна совпадать с осью вращения лимба. Тест-объект в гониометре формируется двумя способам: с помощью коллиматора и с помощью автоколлимационного окуляра. В первом случае измеряется угол преломления (рис. 2.3.21, *а*), во втором – угол между отражающими поверхностями (рис. 2.3.21, *б*). Коллиматор гониометра неподвижен и зафиксирован относительно основания. Для организации освещения на разных длинах волн в состав коллиматора включается монохроматор, в этом случае тест-объектом является выходная щель монохроматора. Автоколлимационная зрительная труба подвижна. Для этого она закреплена на специальном консольном устройстве – ***алидаде***, имеющей ту же ось вращения, что и столик и лимб.

При включении и выключении специального механизма, размещенного в корпусе алидады, лимб может:

– вращаться вместе с алидадой и автоколлимационной зрительной трубой,

– вращаться самостоятельно,

– вращаться вместе со столом при неподвижной алидаде.

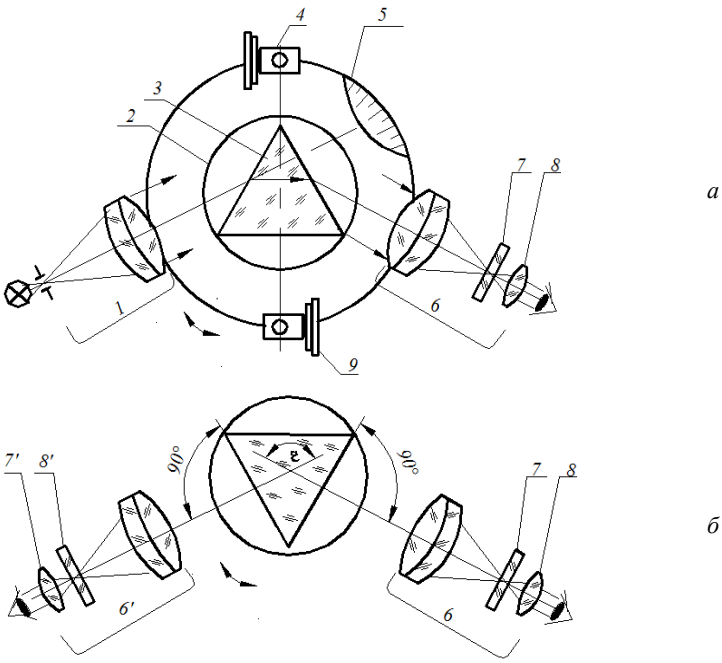


Рис. 2.3.21. Оптическая схема измерений с помощью гониометра:
а – с коллиматором и зрительной трубой (измерения угла преломления);
б – с автоколлимационной зрительной трубой (измерения в автоколлимации угла между отражающими гранями). *1* – коллиматор; *2* – вращающийся предметный столик; *3* – исследуемый объект; *4* – отсчетный микроскоп противоположной части шкалы; *5* – лимб с угломерной шкалой; *6*(*6*') – автоколлимационная зрительная труба; *7*(*7*') – сетка окуляра; *8*(*8*') – окуляр; *9* – отсчетный микроскоп

Благодаря таким возможностям собственно лимб и представляет собой измерительную сущность гониометра, остальные устройства служат для исполнения наводок регистрирующих правильную установку объекта измерений.

Метрологические характеристики распространенных моделей отечественных гониометров приведены в табл. 2.3.5.

Таблица 2.3.5

Модели гониометров

Наименование и назначение	Изображение, источник	Технические характеристики	
Гониометр – **Г5М** Оптический контрольно-измерительный прибор лабораторного типа без коллиматора и с фиксированной автоколлимационной зрительной трубой без алидады. Предназначен для измерения углов между плоскими полированными гранями твердых тел, а также углов пирамидальности призм в режиме автоколлимации	  URL: http://www.goniometer.ru	Увеличение автоколлиматора Фокусное расстояние объектива Световой диаметр объектива Поле зрения автоколлиматора Предел разрешения автоколлиматора Цена деления шкалы оптического микрометра Предельная погрешность при измерении угла одним приемом Предельная погрешность при измерении угла пирамидальности Масса объекта, помещаемого на столик, не более Габаритные размеры Масса	40× 400 мм 50 мм 50' 3" 1" 5" 10" 8 кг 610×260×370 мм 30 кг

Окончание табл. 2.3.5

Наименование и назначение	Изображение, источник	Технические характеристики
Гониометр спектрометр **ГС2** – лабораторный визуальный оптический контрольно-измерительный прибор высокой точности. Предназначен для измерения углов между нормалями к плоским полированным граням твердых прозрачных и непрозрачных тел, пирамидальности призм, определения показателя преломления оптических материалов в видимой области спектра	 URL: http://www.goniometer.ru	Погрешность измерения любого углового интервала одним приемом, не более 2" Предельная погрешность при измерении угла пирамидальности граней призмы одним приемом, не более 1 0" Фокусное расстояние объективов зрительной трубы и коллиматора 674 мм Световой диаметр объективов 70 мм Диапазон измерения плоских углов 0–360° Диапазон измерения пирамидальности 10‘ Масса гониометра, не более 190 кг
Углоизмерительная система **ГС1Л** предназначена для измерения в автоматическом режиме углов между плоскими полированными гранями твёрдых тел, пирамидальности граней призм, показателя преломления стекла. Оснащена цифровой обработкой информации, диалоговой вычислительной системой и печатающим устройством. Может быть использована в качестве образцового углоизмерительного средства	 URL: http://www.goniometer.ru	Предельная погрешность при измерении угла одним приемом, не более 0,5" Время измерения углов любого объекта, не более 1 мин Габаритные размеры 900×1200×1500 мм Масса 800 кг

2.3.4. Микроскопы

Микроскоп – один из основных оптических измерительных приборов, который предназначен для наблюдения и измерения микроструктуры всевозможных предметов и изображений, не различимых или трудноразличимых невооруженным глазом (раздел П.2.7.3) и расположенных на конечном расстоянии. Принципиально микроскоп (рис. 2.3.22, *а*) состоит из микрообъектива *1* и положительного окуляра *2*. Объектив строит действительное увеличенное изображение предмета, расположенного вблизи его передней фокальной плоскости. В плоскости этого изображения устанавливается измерительная сетка *3*. Оптическое измерительное изображение, состоящее из увеличенного изображения предмета и измерительной сетки, рассматривается с помощью окуляра. Объектив и окуляр микроскопа – сменные. Это дает возможность менять увеличение микроскопа и передний рабочий отрезок. Если сменный окуляр измерительного микроскопа заменить на автоколлимационный окуляр (см. рис. 2.3.18), то прибор превращается в ***автоколлимационный микроскоп***. Такая трансформация может иметь две цели:

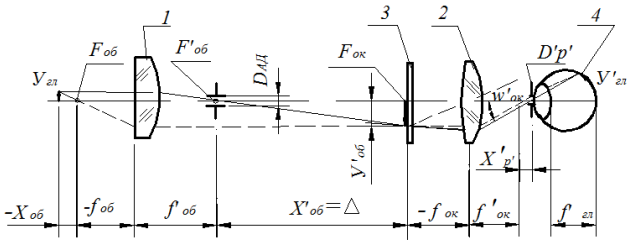
– организация встроенного освещения в отраженном свете;

– в целях измерительной задачи по аналогии с автоколлиматором.

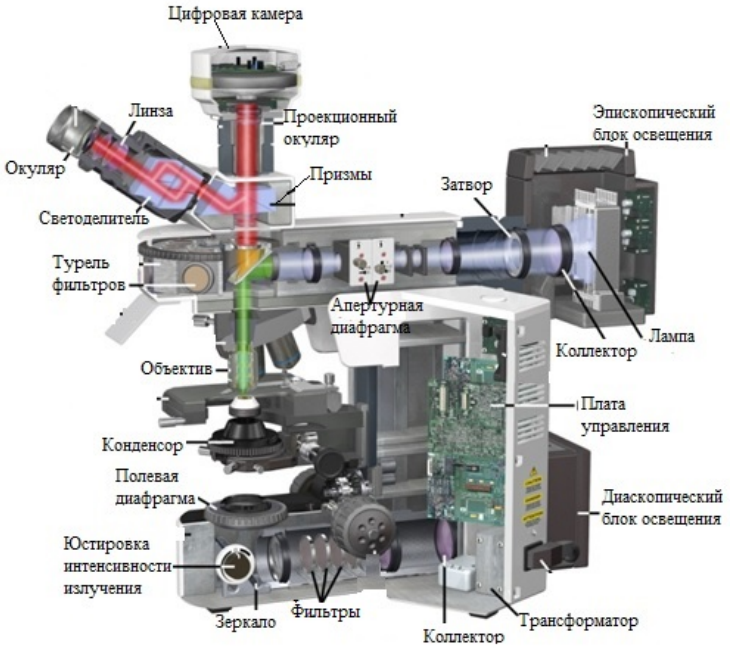
Если в автоколлимационном микроскопе применить устройство для изменения оптического интервала, то тем самым можно достигнуть переменного переднего отрезка. Такой прибор называется ***трубкой Забелина***. Того же эффекта, но при неизменных габаритах можно достичь применением объектива с переменным фокусным расстоянием.

Для определения цены деления шкалы измерительной сетки используется объект-микрометр (рис. 2.2.13). Конструктивно микроскоп оформляется в тубус, на котором устанавливаются основные компоненты. Тубус закрепляется на штативе, с которым связан предметный стол для размещения объекта. Конструкция штатива и предметного стола должна соответствовать специфике решаемой измерительной задачи. Для больших микроскопов штатив

с предметным столом превращается в станину с направляющими. Фокусировка на объект осуществляется перемещением предметного стола или штатива путем вращения ручек грубой и тонкой настройки.



а



б

URL: http://http://heyroynt.ru

Рис. 2.3.22. Микроскоп: *а* – оптическая схема микроскопа; *б* – конструкция современного микроскопа. *1* – микрообъектив; *2* – окуляр; *3* – измерительная сетка; *4* – глаз наблюдателя

Для положения промежуточного изображения существует стандартная оптическая длина тубуса, которая определяется ***оптическим интервалом*** – Δ. Стандартное значение оптического интервала составляет $\Delta = 160$ мм, для металлографических микроскопов используются тубусы с увеличенной длиной: $\Delta = 190$ мм и $\Delta = \infty$. При $\Delta = \infty$ для наблюдения изображения используются зрительные трубы. Смена увеличения в таких микроскопах может достигаться сменой зрительных труб. В моделях микроскопов с видеонаблюдением в плоскости сетки располагается фотоприемная матрица видеокамеры.

Современные микроскопы (рис. 2.3.22, *б*) имеют встроенное освещение предметного поля. Осветитель устанавливается на штатив и обеспечивает освещение «напросвет» или в отраженном свете. Для слабоконтрастных и фазовых объектов применяются специальные виды осветителей, обеспечивающих фазово-контрастные методы светлого и темного поля. Особенностью осветительной схемы измерительных микроскопов является то, что она проектируется таким образом (***освещение по Келеру***), что имеет место телецентрический ход главных лучей со стороны предмета. Достигается это тем, что изображение тела накала источника света строится в задней фокальной плоскости объектива, где и располагается апертурная диафрагма. Телецентрический ход главных лучей со стороны предмета позволяет получить следующие эффекты:

– равномерность освещенности предметного поля;

– повышение контраста изображения;

– устранение влияния параллакса при отсчетных измерениях для тубуса $\Delta = \infty$ и существенное его уменьшение для иных тубусов ввиду малости фокусного расстояния объектива и поля зрения.

Увеличивающие свойства микроскопа по сравнению с невооруженным глазом характеризуются коэффициентом видимого увеличения (П.92).

При использовании микроскопов для целей оптических измерений используются и продольные, и поперечные наводки. Согласно формулам Захарьевского (2.1.23), (2.1.24), для микроскопа с измерительной сеткой справедливы следующие соотношения:

– для порога чувствительности продольных наводок

$$\Delta z_з = {2\Delta W}/{\sin^2\sigma_A} = {= 0{,}2 \text{ мкм} \cdot n}/{A^2,}$$

– для порога чувствительности поперечных наводок в линейной мере

$$T_з = {\Delta W}/{\sin\sigma_A} = {0{,}1 \text{ мкм}}/{A.}$$

Угловой размер изображения $w'_{гл} \cong w_{гл} = w'_{ок}$ предмета $y_{об}$, сформированного микроскопом на сетчатке глаза, может быть найден с использованием формулы Ньютона с обозначениями согласно рис. 2.3.22 из соотношения

$$w'_{ок} = -{y'_{гл}}/{f'_{гл}} = -\frac{\Gamma_{ок}\cdot\beta_{об}\cdot y_{об}}{250} = -\frac{\Gamma_м\cdot y_{об}}{250}. \qquad (2.3.21)$$

Если принять $y_{об} = \varepsilon_{об}$, где $\varepsilon_{об}$ – разрешающая способность объектива микроскопа, то имеем для углового разрешения глаза $\varphi'_{гл}$, необходимого, чтобы наблюдать детали объекта линейным размером $\varepsilon_{об}$:

$$\varphi'_{гл} = -\frac{\Gamma_м\cdot\varepsilon_{об}}{250}. \qquad (2.3.22)$$

Микроскоп – дифракционно-ограниченная оптическая система, следовательно, пользуясь соотношениями из табл. 2.1.4, можно записать для визуального микроскопа при освещении зеленым светом:

$$\varepsilon_{об} \cong {0{,}3 \text{ мкм}}/{A.} \qquad (2.3.23)$$

Знак ≅ означает, что величина справа несколько больше, чем это можно ожидать для деталей типа линий, но меньше, чем для точек.

Наилучшая энергетика визуального микроскопа (максимальная субъективная яркость изображения на сетчатке), а также наблюдательные возможности глаза реализуются, когда диаметр выходного зрачка равен диаметру зрачка глаза, т.е. $D_{гл} = 2$ мм, а $\varphi'_{гл} = 1$ угл. мин., т.е. $0{,}3\cdot10^{-3}$ рад. В этом случае имеем ***нормальное***

увеличение микроскопа. Для нормального увеличения (П.95) справедливо

$$\Gamma_{\text{м}}^{\text{н}} = {-500A}/{D_{\text{гл}}}.$$

В противном случае диаметр выходного зрачка микроскопа принимается равным

$$D_{p}{}' = {-500A}/{\Gamma_{\text{м}}}. \qquad (2.3.24)$$

Расположен выходной зрачок от заднего фокуса окуляра на расстоянии

$$z'_{P,} = {f'^{2}_{\text{ок}}}/{\Delta}. \qquad (2.3.24\text{а})$$

Увеличение микроскопа считается ***полезным***, если находится в пределах

$$\Gamma_{\text{м}}^{\text{п}} \le \Gamma_{\text{м}} \le \Gamma_{\text{м}}^{\text{н}}.$$

При этом $\Gamma_{\text{м}}^{\text{п}} = 1\,000\,A$ называется ***предельно полезным увеличением*** микроскопа, в этом случае $D_{p}{}' = {D_{\text{гл}}}/{4} = 0{,}5$ мм, а разрешающая способность глаза составляет 4 угл. мин., т.е. налицо снижение остроты зрения. Такая ситуация возможна тогда, когда наблюдатель комбинирует объективы и окуляры микроскопа, пытаясь получить как можно большее увеличение, стремясь при этом рассмотреть как можно меньшие детали на объекте в ущерб порогу чувствительности наводок и разрешающей способности визуального прибора.

На основании вышеизложенного можно заключить, что метрологическими характеристиками микроскопа, предназначенного для оптических измерений, являются:

– числовая апертура объектива;
– $\beta_{\text{об}}$ – увеличение объектива, крат;
– $\Gamma_{\text{ок}}$ – увеличение окуляра, крат;
– Δ – оптический интервал;
– цена деления отсчетного устройства;

– W – поле зрения;

– диапазон перемещений предметного стола, мм.

Горизонтальный микроскоп – микроскоп, оптическая ось которого расположена горизонтально. Используется для наблюдения и оптических измерительных изображений на оптических столах и скамьях и выполнения соответствующих измерений. Конструкция штатива, наличие механизмов перемещения по всем трем координатным осям позволяют использовать микроскоп и для других работ, в частности для визуального наблюдения объектов, расположенных на вертикальных поверхностях, и для их линейных измерений.

Штативом горизонтального микроскопа (рис. 2.3.23) служит асимметричный рейтер *8*, устанавливаемый на скамье. Вертикальная колонка рейтера оканчивается двумя приливами, в которых размещены реечный механизм для вертикального перемещения микроскопа и зажимной механизм *7* для зажима микроскопа на установленной высоте. Вращением маховичков *1*, жестко закрепленных на оси трубки, перемещаются по высоте рейка и жестко связанная с нею вертикальная стойка *6* по цилиндрической направляющей. Шпонка внутри рейтера предохраняет микроскоп от поворота в горизонтальной плоскости. К перемещающейся стойке *6* крепится оправа с лимбом *9* для поворота микроскопа вокруг вертикальной оси. Винты *5* служат для закрепления микроскопа при развороте на заданный угол. К оправе с лимбом крепится корпус *2*, в котором помещается реечный механизм, служащий для поперечного перемещения микроскопа. Перемещение происходит по направляющим типа «ласточкин хвост».

Механизм фокусировки микроскопа представляет собой обычный реечный механизм, применяемый в биологических микроскопах. Вращением маховичков *3* на оси трубки, сцепленной с рейкой, жестко закрепленной на тубусе микроскопа, производят продольные наводки микроскопа. Вращением маховичка *4* производят поперечные наводки микроскопа.

Метрологические характеристики горизонтального микроскопа от оптической скамьи ОСК-2ЦЛ приведены в табл. 2.3.6.

Микроскопы измерительные предназначены для измерения линейных размеров деталей в прямоугольных и полярных коорди-

натах и измерения углов. В частности, на них проверяют детали с точной резьбой, резьбовые калибры, шаблоны сложных форм, пуансоны и матрицы точных вырубных штампов, формующие детали пресс-форм, электронные платы, фотошаблоны и т.п.

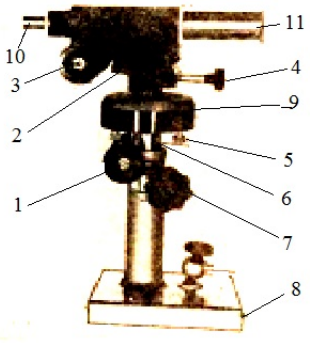


Рис. 2.3.23. Микроскоп горизонтальный из комплекта оптической скамьи ОСК-2ЦЛ: *1* – маховичок вертикального перемещения; *2* – корпус реечного механизма поперечного перемещения; *3* – маховичок продольной подвижки; *4* – маховичок поперечной подвижки; *5* – винты фиксации угла поворота; *6* – вертикальная стойка; *7* – зажим фиксации положения; *8* – рейтер; *9* – оправа с лимбом отсчета угла поворота; *10* – микрообъектив; *11* – окуляр

Таблица 2.3.6

Метрологические характеристики горизонтального микроскопа

Характеристика	Значение характеристики
Увеличение, крат	32, 80, 120
Увеличение объектива с числовой апертурой, крат	8×0,2
Увеличение окуляров, крат	4, 10, 15
Диапазон перемещений, мм, не менее: в продольном направлении в поперечном направлении в вертикальном направлении	 40 ±30 60
Поворот микроскопа вокруг вертикальной оси, град	360

Несмотря на конструктивные различия измерительных микроскопов и их разнообразие, принципиальная схема измерения во всех приборах общая – визирование различных точек контролиру-

емой детали, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям, и измерение этих перемещений посредством отсчетных устройств. Для обеспечения возможности установки крупногабаритных деталей, а также выполнения необходимых манипуляций, сопровождающих измерения, измерительные микроскопы имеют длинный передний рабочий отрезок, следовательно, длинный фокус. Оптический интервал в этом случае выбирается $\Delta = \infty$.

В зависимости от используемого устройства наблюдения измерительные микроскопы бывают:

– визуальные;

– видео;

– проекторы.

По конструкции и назначению измерительные микроскопы можно разделить на две группы:

– с отсчетными шкалами, устанавливаемыми в фокусе окуляра. Такие приборы применяют для измерений малых объектов, укладывающихся в пределах поля зрения микроскопа;

– с измеряемым перемещением либо предметного стола с объектом относительно оптической оси микроскопа или микроскопа относительно неподвижного предметного стола с закрепленным на нем объектом.

По числу измеряемых координат различают измерительные микроскопы:

– однокоординатные и двухкоординатные, называемые ***инструментальными***;

– трехкоординатные, называемые ***универсальными.***

Относительные перемещения стола с предметом и микроскопа имеют два режима – быстрый и прецизионный. Прецизионное перемещение осуществляется с помощью шагового двигателя или микровинта.

В силу своих конструктивных особенностей измерительный микроскоп достаточно просто автоматизируется. Наиболее простым решением является установка фотоимпульсного датчика линейных или угловых перемещений, благодаря чему значительно упрощается процесс измерений. В табл. 2.3.7 представлены некоторые модели современных измерительных микроскопов.

Таблица 2.3.7

Модели современных измерительных микроскопов

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Характеристики
Универсальный измерительный микроскоп **УИМ-23** предназначен для измерения линейных и угловых размеров изделий координатным методом с помощью оптической визирной системы. В частности, на приборе можно измерять резьбовые изделия, режущий инструмент, продольные шаблоны и лекала, кулачки, конусы, метчики, резьбонарезные гребенки, диаметры малых отверстий шаг, резьбы. По полученным координатам точек координатно-оптическим устройством определяются диаметры, радиусы, координаты центра окружностей, точки пересечения, расстояния, углы	 URL: http://www. promcontrol.ru	Пределы измерения длин: в продольном направлении 0–200 мм в поперечном направлении 0–100 мм Предельные измерения углов 0–360 град Цена деления: отсчетного устройства 0,001 мм шкалы угломерной головки 1 мин Увеличение объективов 10; 15; 30; 50 крат Увеличение окуляров 1; 2; 3; 10 крат Диаметр поля зрения 18; 12; 6; 3,6 мм Масса прибора 460 кг

Продолжение табл. 2.3.7

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Характеристики
Инструментальный микроскоп **ИМЦЛ 150х50** с цифровым отсчетом для измерений в проходящем и отраженном свете наружных линейных размеров и диаметров валов; углов изделий по угломерной головке и круглому столу; инструмента, а также шаблонов любой конфигурации, габариты которых позволяют установить их на измерительном столе микроскопа	 URL: http://www.optic-shop.ru	Диапазон измерения длины в продольном направлении 0–150 мм Диапазон измерения длины в поперечном направлении 0–50 мм Увеличение объективов микроскопа 1, 1.5, 3, 5, 10, 20, 40 крат Дискретность отсчета линейных перемещений 0,0002 мм Погрешность при измерении линейных размеров ± 0,003 мм Габаритные размеры, не более 450×570×590 мм Масса, не более 80 кг
Видеоизмерительная система **Merlin QC-300** обеспечивает быстрые и точные 2-координатные измерения прецизионных деталей и идеальна для массовых измерений, измерений отклонений формы деталей, в том числе вне поля наблюдения. Прибор отличают следующие особенности: мощный и интуитивно-понятный видеомикропроцессор обеспечивает быстрые и точные результаты; видеокамера высокого разрешения четко фиксирует кромки детали; несколько инструментов определения краев детали для простых, повторяющихся операций	 URL: http://www.arttool.ru	Увеличение 10, 20, 50 крат Верхняя подсветка поверхности 20 светодиодов Нижняя подсветка 1 светодиод Опции обработки данных QC-300 Диапазон измерений: X 150 мм Y 100 мм Разрешение датчиков по осям 0,001 мм Повторяемость измерений по осям 0,005 мм

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Характеристики
Проектор измерительный **ПИ-600ЦВ.** Предназначен для измерения и контроля линейных и угловых размеров в проходящем и отраженном свете. Используется в приборостроении, электронной и часовой промышленности, научных исследованиях. Изображение формируется на матовом экране	 URL: http://www.npzoptiks.ru	Диаметр экрана 600 мм Увеличение 10; 20; 50; 100; 200 крат Пределы перемещения измерительного стола: в продольном направлении 150 мм в поперечном направлении 75 мм в вертикальном направлении 90 мм Дискретность отсчета 0,001 мм

Отсчетный микроскоп – микроскоп, применяемый в целях получения оптического увеличения при считывании показаний с отсчетных шкал основного прибора. Пример конструкции представлен на рис. 2.3.24. Автоколлимация здесь организована с целью освещения рассматриваемой шкалы.

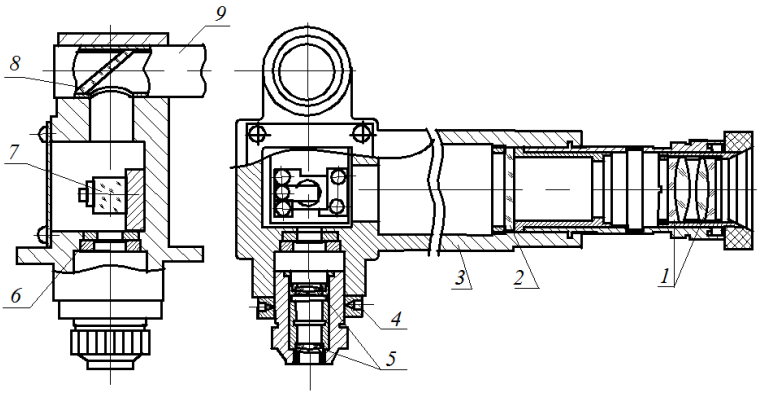


Рис. 2.3.24. Автоколлимационный отсчетный микроскоп со встроенным освещением: *1* – окуляр; *2* – измерительная сетка; *3* – корпус; *4* – фиксатор микрообъектива; *5* – микрообъектив; *6* – апертурная диафрагма для организации телецентрического хода лучей; *7* – светоделитель; *8* – поворотное зеркало; *9* – осветитель

Отсчетный микроскоп не обязательно выпускается промышленностью в качестве самостоятельного средства измерения и, как правило, конструктивно оформлен в корпусе того прибора, для которого он предназначен (см. рис. 1.1.3). Часто отсчетным называют микроскоп со шкалой в плоскости промежуточного изображения без предметного стола (см. рис. 1.1.5, *а*).

Двойной автоколлимационный микроскоп представляет собой оптико-механический прибор, состоящий из двух автоколлимационных микроскопов, скомпонованных в установочном устройстве навстречу один другому.

Пример 2.3.9. На рис. 2.3.25 показан оптический толщиномер, построенный по схеме двойного автоколлимационного микроско-

па. Измерение толщин с помощью такого прибора происходит следующим образом. Толщиномер состоит из двух контрнаправленных автоколлимационных микроскопов M_1 и M_2. M_1 может перемещаться в вертикальном направлении и снабжен отсчетным устройством, обеспечивающим измерение этого перемещения.

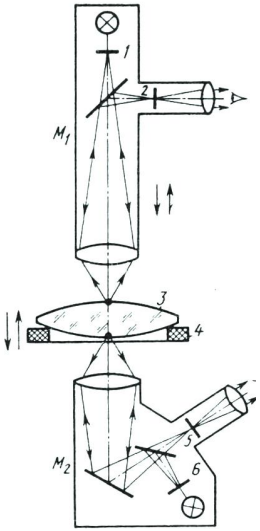


Рис. 2.3.25. Схема оптического толщиномера: M_1 – подвижный автоколлимационный микроскоп; M_2 – неподвижный автоколлимационный микроскоп. *1* – тест-объект микроскопа M_1; *2* – сетка микроскопа M_1; *3* – контролируемая деталь; *4* – предметный стол; *5* – тест-объект микроскопа M_2, *6* – сетка микроскопа M_2

В отсутствие детали на предметном столе предметные плоскости обоих микроскопов совмещены, поэтому изображения собственных сеток и встречных тест-объектов видны одинаково. В этом положении микроскопов снимается первый отсчет по отсчетному устройству. После установки на предметный стол измеряемой детали перемещают стол с деталью до резкого автоколлимационного изображения тест-объекта *6* в плоскости сетки *5* неподвижного микроскопа M_2. Это изображение должно быть сформировано в результате отражения от нижней поверхности детали. Перемещением микроскопа M_1 добиваются аналогичного резуль-

тата от верхней поверхности детали, а именно получения автоколлимационного изображения тест-объекта *1* в плоскости сетки *2*. В этом положении снимают второй отсчет. Разность двух отсчетов дает толщину детали.

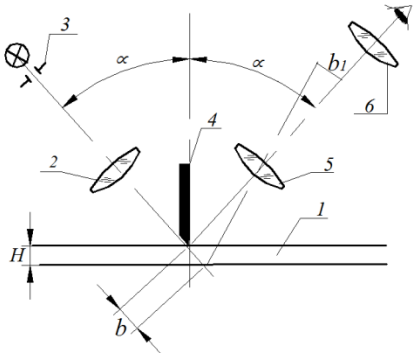
Двойной микроскоп Линника представляет собой оптико-механический прибор, состоящий из двух микроскопов, скомпонованных в установочном устройстве под одним углом относительно нормали к предметному столу. Один из микроскопов является осветительным и формирует изображение тест-объекта. Как правило, это светящаяся щель в плоскости исследуемой поверхности. Второй микроскоп является наблюдательным, и через него наблюдается изображение этой щели, построенное иссследуемой поверхностью. Поскольку эта поверхность не является ровной, то построенное изображение копирует неровности детали. Такая схема используется для измерений шероховатости поверхностей.

Пример 2.3.10. ***Метод светового сечения*** заключается в следующем: пучок световых лучей, поступающих от источника света через узкую щель *3* (рис. 2.3.26, *а*) шириной около 0,1 мм, направляется объективом *2* под углом α на контролируемую поверхность *1*. Отражаясь от этой поверхности, лучи через объектив *5* переносят изображение щели в плоскость фокуса окуляра *6*. Если контролируемая поверхность является идеально ровной, то в окуляре щель будет иметь вид светящейся прямой линии (обычно зеленого цвета). Если на поверхности имеется канавка, то в плоскости окуляра наблюдается искривленная светящаяся линия (рис. 2.3.26, *б*).

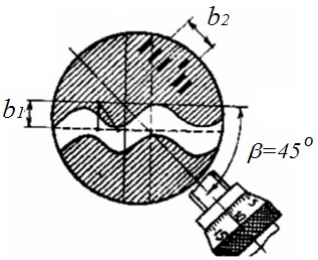
При глубине канавки, равной *H*, ее световое сечение $b = {}^{H}/_{\sin\alpha}$.

Размер светового сечения канавки в плоскости окулярной сетки с учетом увеличения объектива определяется соотношением $b_1 = b \cdot \beta_{об}$. Измерение в световом сечении осуществляется с помощью окулярного микрометра, ориентированного под углом β к направлению светового сечения. Поэтому в плоскости сетки измеряется размер b_2, связанный с искомым параметром шероховатости соотношением

$$b_2 = {}^{b_1}/_{\sin\beta} = {}^{H\beta_{об}}/_{\sin\alpha \cdot \sin\beta}. \qquad (2.3.25)$$



а



б



в

URL: http://www.vizumstar.com

Рис. 2.3.26. Двойной микроскоп Линника в приборе светового сечения для определения шероховатости поверхности: *а* – схема двойного микроскопа Линника; *б* – измерение искривления светового сечения окуляра микрометром; *в* – прибор светового сечения ПСС-2

Обычно углы выбираются равными $\alpha = \beta = 45°$, тогда получим соотношение для определения H

$$H = {}^{b_2}/_{2\beta_{об}}. \qquad (2.3.26)$$

Если на расстоянии 0,1 мм от контролируемой поверхности установить линейку *4* со скошенным ребром, то последнее срежет часть пучка света и на контролируемой поверхности будет видна тень, отбрасываемая линейкой. Верхний край тени, являющийся как бы лезвием ножа, отражает профиль изучаемой поверхности, который и рассматривают в микроскоп, – ***метод теневого сечения***.

По принципу светового сечения работает прибор ПСС-2 (рис. 2.3.26, *в*), по принципу теневого сечения – прибор ПТС-1. Эти приборы позволяют измерять неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм при погрешности показаний от 24 до 7,5% при наличии четырех пар сменных объективов ОС-39, ОС-40, ОС-41, ОС-42. Поле зрения у прибора ПСС-2 при работе со всеми объективами соответствует базовым длинам участков измерений по ГОСТ 2789–73. Оба прибора позволяют также фотографировать микронеровности. Прибор ПТС-1 накладной, что позволяет контролировать детали без снятия их со станка.

2.3.5. Спектральные приборы

Монохроматор – оптико-механический прибор, предназначенный для формирования источника монохроматического излучения. Сам по себе измерительным прибором может не являться, поскольку является по существу прецизионным источником света. Но степень прецизионности монохроматора определяет метрологические характеристики спектральных приборов, в которых монохроматор используется в качестве преобразователя.

В монохроматор входят (рис. 2.3.27) следующие составные части:

– входная щель;
– коллиматорный объектив;
– диспергирующий элемент;
– фокусирующий объектив;
– выходная щель.

Эти элементы расположены таким образом, что изображение входной щели проецируется объективами в выходную щель, а диспергирующий элемент устанавливается в коллимированном пучке лучей.

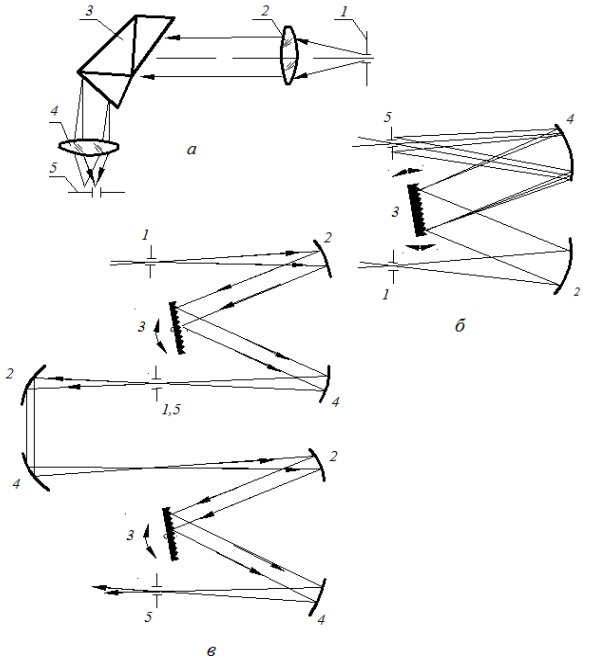


Рис. 2.3.27. Принципиальные оптические схемы монохроматоров:
а – призменный монохроматор; *б* – монохроматор на дифракционной решетке;
в – двойной монохроматор на дифракционной решетке. *1* – входная щель;
2 – коллиматорный объектив; *3* – диспергирующий элемент;
4 – фокусирующий объектив; *5* – выходная щель

В качестве диспергирующего элемента может быть использована призма (рис. 2.3.27, *а*) или дифракционная решетка (рис. 2.3.27, *б, в*).

Монохроматоры служат важнейшими составными частями источников монохроматического освещения и ***спектрофотометров***, с помощью которых измеряют энергию, излучаемую исследуемыми объектами в различных областях спектра. В спектрофотометрии особенно важно избежать попадания в выходную щель рассеянного света с длинами волн, отличными от выделяемого участка спектра. С этой целью часто применяют два монохромато-

ра (рис. 2.3.27, *в*), конструктивно объединённых так, что выходная щель первого из них служит входной щелью второго. К преимуществам ***двойных монохроматоров*** относится также возможность существенно повысить их дисперсию.

Возможность сканирования спектра (выбора нужного спектрального диапазона) обеспечивается путем поворота диспергирующего элемента таким образом, что нужный участок спектра совмещают с выходной щелью. При этом, изменяя ширину выходной щели, меняют спектральную ширину $\Delta\lambda$ (интервал длин волн) выделенного участка спектра. Для обеспечения точности поворот осуществляется с помощью специального установочного механизма, управление которым в различных моделях может осуществляться вручную (последовательно перебирая необходимые длины волн) или автоматически (с помощью готового или собственного программного обеспечения). Установочный механизм оборудован отсчетным устройством, позволяющим измерять угол ориентации диспергирующего элемента по отношению к выходной щели. Собственно, в этом узле монохроматора и сосредоточена метрологическая сущность этого прибора, дающая основание причислять его к средствам измерения. Функция преобразования между отсчетом угла и установленной длиной волны устанавливается при поверках посредством калибровки. Калибровка монохроматора является встроенной опцией в современных приборах.

Рабочий диапазон монохроматора – интервал длин волн электромагнитного спектра, в котором монохроматор выполняет свою функцию. Границы диапазона в разных типах монохроматоров могут определяться разными причинами:

– спектральным пропусканием оптических материалов;

– коэффициентами отражения, пропусканием воздуха;

– областью ахроматизации;

– областью аберрационной коррекции оптических элементов.

Объективы, используемые в монохроматорах, должны иметь хорошую ахроматизацию и аберрационную коррекцию на рабочий спектральный диапазон. Объективы – коллиматорный и фокусирующий – могут быть линзовыми или зеркальными. Зеркальные объективы пригодны в гораздо более широком спектральном диа-

пазоне, чем линзовые. К тому же в отличие от последних не требуют перефокусировки при переходе от одного выделяемого участка спектра к другому. Это особенно удобно в невидимых для глаза областях спектра (ультрафиолетовой и инфракрасной), в связи с чем в монохроматорах для этих областей применяется преимущественно оптика в виде зеркал: сферических или асферических, цилиндрических или анаморфотных.

Современные монохроматоры имеют достаточно большую полосу спектральной области от 0,18 до 60 мкм. Коротковолновый диапазон ограничен тем, что воздух становится непрозрачным для длин волн короче 180 нм. В связи с этим измерения в более коротковолновой области требуют применения специальных вакуумных спектральных приборов.

В приборах с зеркальной оптикой рабочий диапазон определяется параметрами дифракционной решетки и типом покрытий (рис. 2.3.28), наносимых на отражающие поверхности оптических элементов (зеркал и решеток). В зеркально-линзовых спектральных приборах рабочий спектральный диапазон определяется в основном материалом, из которого изготовлена линзовая оптика.

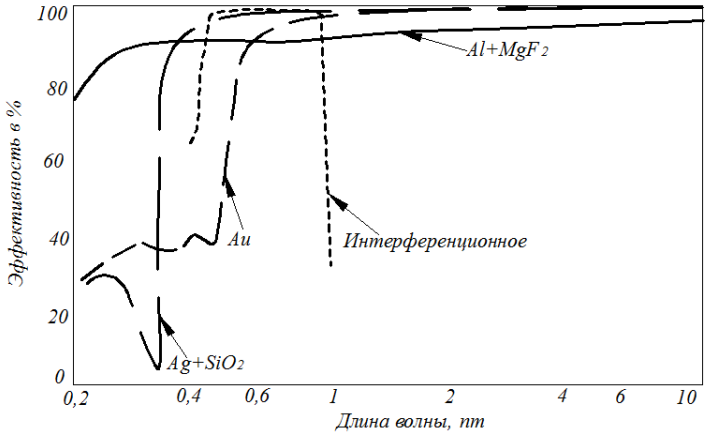


Рис. 2.3.28. Зависимость коэффициента отражения дифракционных решеток монохроматоров MS3501 компании SOLAR TII для различных типов покрытий (URL: http://www.solartii.ru)

Выбор параметров дифракционной решетки также влияет на рабочий спектральный диапазон. Правильный выбор дифракционной решетки позволяет получить наилучшее сочетание высокой энергетической эффективности и минимального рассеянного света для различных областей спектра. Каждая дифракционная решетка имеет свой рабочий спектральный диапазон длин волн, который определяется одной из характеристик решетки – длиной волны в угле блеска (***углом блеска***). Эффективность решетки в угле блеска максимальна и уменьшается как для длинных, так и для коротких волн. Диапазон длин волн, для которых эффективность решетки составляет не менее 40% относительно эффективности на длине волны в угле блеска, и есть рабочий диапазон длин волн данной решетки.

При выборе дифракционных решеток следует также учитывать такой важный параметр, как ***угол разворота решетки*** в приборе, определяемый конструкцией прибора.

Светосила спектрального прибора характеризует освещенность, создаваемую в фокальной плоскости фокусирующего объектива, или поток излучения, падающий на приемник излучения. Энергия излучения, проходящего через спектральный прибор и попадающего на приемник излучения, определяется относительным отверстием коллиматорного и фокусирующего объективов. Объектив с круглым входным зрачком диаметра d с фокусным расстоянием f' характеризуется относительным отверстием

$$\varepsilon = \frac{d}{f'}. \qquad (2.3.27)$$

Для объектива с прямоугольным входным зрачком со сторонами a и h этот параметр определяется как

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{ah}}{f'\sqrt{\pi}}.$$

Пример 2.3.11. Фокусное расстояние коллимационного зеркала составляет 380 мм, а размеры его зрачка – 70×70 мм. Следовательно, относительное отверстие монохроматора $\varepsilon = 1/4{,}8$, а его фокальное число равно $\frac{1}{\varepsilon} = 4{,}8$.

Чем меньше фокальное число, тем большая часть излучения от источника, проходя через спектральный прибор, попадает на приемник. Поэтому если источник излучения очень слабый, необходимо выбирать спектральный прибор с меньшим фокальным числом, т.е. с бо́льшим относительным отверстием. Однако следует учитывать, что с уменьшением фокального числа, характеризующего бо́льшую светосилу прибора, ухудшается разрешающая способность прибора из-за увеличения аберраций – сферической и комы.

Угловая дисперсия есть характеристика диспергирующего устройства (дифракционной решетки). Эта величина определяет его способность отклонять излучение различных длин волн на разные углы. Если лучи двух близких длин волн λ и $\lambda + \Delta\lambda$ отклоняются соответственно на углы θ и $\theta + \Delta\theta$, то угловая дисперсия определяется как производная

$$D_\theta = \frac{d\theta}{d\lambda}. \tag{2.3.28}$$

Для дифракционной решетки угловая дисперсия

$$D_\theta = \frac{kN}{\cos\varphi}, \tag{2.3.29}$$

где k – порядок дифракционного спектра; N – число штрихов/мм решетки; θ – угол дифракции.

Очевидно, что угловая дисперсия тем больше, чем больше N у решетки и чем больше угол дифракции, а также в случае работы в высоких порядках спектра.

Для призмы в положении минимума отклонения

$$D_\theta = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1-\left(n\cdot\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}, \tag{2.3.30}$$

где α – преломляющий угол призмы; $\frac{dn}{d\lambda}$ – дисперсия стекла, из которого изготовлена призма; n – показатель преломления стекла.

Линейная дисперсия является характеристикой прибора в целом. Если dl есть расстояние на поверхности изображения между

двумя близкими спектральными линиями, разность длин волн которых равна $d\lambda$, то линейная дисперсия находится как производная

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda}. \tag{2.3.31}$$

Линейная дисперсия показывает, как быстро изменяется расстояние между спектральными линиями в фокальной плоскости фокусирующего объектива в зависимости от длины волны. Для двух близких линий расстояние между ними Δl в фокальной плоскости равно

$$\Delta l = f_2 \cdot \Delta\theta, \tag{2.3.32}$$

где f_2 – фокусное расстояние фокусирующего объектива.
Тогда имеем:

$$D_l = \frac{d\theta}{d\lambda} f_2 = D_\theta f_2. \tag{2.3.33}$$

Часто спектральные приборы характеризуются величиной, называемой ***обратной линейной дисперсией*** и выражаемой в нм/мм:

$$\frac{1}{D_l} = \frac{d\lambda}{dl}. \tag{2.3.34}$$

Зная обратную дисперсию, легко определить разность длин волн двух близко расположенных линий:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{D_l} \cdot \Delta l. \tag{2.3.35}$$

Предел разрешения спектрального прибора определяется как наименьшая разность длин волн $\Delta\lambda_{\min}$ двух монохроматических спектральных линий равной интенсивности, которые разрешаются, т.е. наблюдаются раздельно в смысле разрешения по Рэлею (П.74). Предел разрешения определяется функцией рассеяния оптического тракта прибора, называемой в случае спектральных приборов ***аппаратной функцией***.

Для количественной оценки способности прибора различать раздельно две близко расположенные спектральные линии приме-

няется понятие ***разрешающей способности*** как отношения длины волны к пределу разрешения:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\min}}. \qquad (2.3.36)$$

Разрешающая способность связана с дисперсией соотношением

$$R = \frac{\lambda}{l_{\min}} \cdot D_l, \qquad (2.3.36а)$$

где $l_{\min}$ – наименьшее расстояние между двумя разрешаемыми монохроматическими линиями.

Во всех монохроматорах на выходную щель всегда попадает, помимо разложенного в спектр излучения, еще и некоторое количество ***рассеянного излучения*** других длин волн. Рассеянный свет образуется в результате многократных паразитных рефлексов оптических деталей, бликов на оправах и внутренних стенках прибора, рассеяния света на поверхностях оптических деталей. Это снижает точность спектрофотометрических измерений особенно тогда, когда яркость источников или чувствительность приемников излучения в исследуемой области спектра невелика. Чтобы уменьшить уровень рассеянного света, прибегают к таким техническим ухищрениям, как:

– чернение оправ и внутренних стенок с помощью специальных покрытий;

– установка внутри приборов бленд и перегородок;

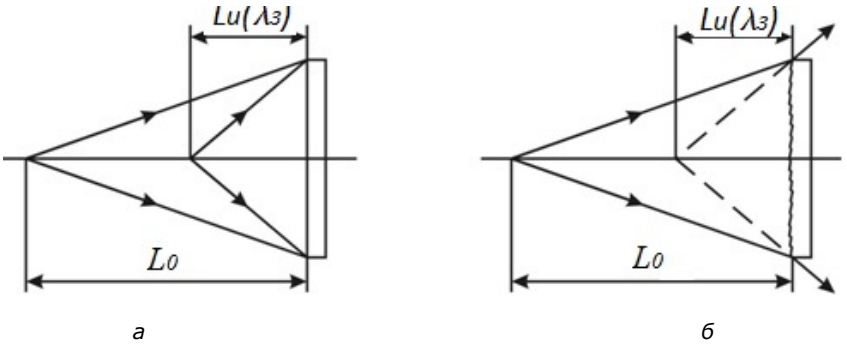
– применение дополнительных светофильтров.

Наиболее надежным способом устранения рассеянного света является построение двойных мохроматоров (рис. 2.3.27, *в*). Наличие в двойном монохроматоре промежуточной щели позволяет на три порядка снизить уровень рассеянного света, что делает эти приборы незаменимыми в лазерной рамановской спектроскопии, где измеряемые сигналы на десять порядков меньше сигналов от лазера.

В табл. 2.3.8 приведены характеристики конкретной модели монохроматора.

Фокальный монохроматор – оптический прибор, в котором для цели монохроматизации излучения используется зависимость фокусного расстояния фокусирующего объектива от длины волны, т.е. диспергирующий элемент и фокусирующий объектив совмещены в один компонент. В этом случае стремятся выбрать такой оптический элемент, который обладает высокой степенью хроматизма. Подобные конструкции очень просты, но недостаточно эффективны, поскольку имеют малую дисперсию и низкое соотношение сигнал / шум. В силу этой особенности фокальные монохроматоры имеют ограниченное применение для решения измерительных задач.

Пример 2.3.12. Если на фотопластинку записать результат интерференции двух сферических волн с длиной волны $\lambda_з$ и с центрами кривизны волновых фронтов, находящимися на расстояниях L_0 и $L_и$ ($\lambda_з$) (рис. 2.3.29, *а*), то после химико-фотографической обработки получится плоская голограмма, которая обладает свойствами линзы. То есть при освещении такой голограммы (рис. 2.3.29, *б*) сферическим пучком лучей восстановленный волновой фронт также будет сферическим.



а *б*

Рис. 2.3.29. Запись (*а*) и восстановление (*б*) голограммной линзы

Фокусное расстояние такой линзы описывается формулой

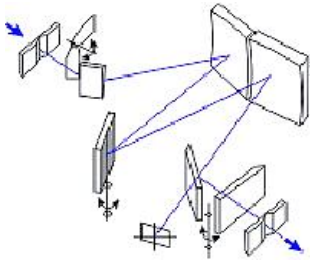
$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_и(\lambda_з)}. \qquad (2.3.37)$$

Таблица 2.3.8

Характеристики спектрального прибора компании «SOLAR-TII»

Назначение, особенности конструкции	**Изображение**	**Метрологические характеристики**
Монохроматор / спектрограф модели **MS3501**: – Спектральные измерения в диапазоне от УФ до ИК. – Эмиссионная, флуоресцентная, рамановская спектроскопия. – Измерение поглощения и пропускания. – Многоканальная спектроскопия (с помощью фотодиодных и ПЗС-матриц). Прибор отличает: ○ Высокая светосила. ○ Полностью автоматизированное управление от ПК, встроенная калибровка. 4-позиционная турель обеспечивает легкую смену дифракционных решеток	 URL: http://www.solartii.ru	– Порты: 1 входной, 2 выходных – Диапазон длин волн 80 нм 60 мкм – Относительное отверстие 1/3,8 – Фокусное расстояние 350 мм – Размер дифракционных решеток 70×70×10 мм – Основные зеркала сферические – Уровень рассеянного света на расстоянии 20 нм от линии 632,8 нм $2,5\times10^{-5}$ – Единичный шаг сканирования 1,29 угл. сек. – Точность установки ±1 шагов – Максимальная скорость 10 000 шаг/с – Параллельность ножей щели ±1 мкм

Окончание табл. 2.3.8

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
○ Низкий уровень рассеянного света, отсутствие переотражений. ○ Входные и выходные щели с автоматической или ручной регулировкой ширины. ○ Два выходных порта с автоматизированным переключением. ○ Возможность одновременной установки на выходные порты различных детекторов. ○ Оригинальное программное обеспечение для Win 98/2000/XP/Vista/7	 URL: http://www.solartii.ru	– Цена деления микрометрического винта щелей 2 мкм – Интерфейс связи RS-232 – Для решетки: 1 200 $мм^{-1}$ ○ диапазон сканирования 0–1290 нм ○ обратная линейная дисперсия 2,37 нм/мм ○ воспроизводимость ±0,03 нм ○ спектральное разрешение 0,06 нм ○ точность установки длины волны ±0,125 нм ○ средний шаг сканирования 0,01 нм

При освещении голограммной линзы опорным излучением с длиной волны λ с расстояния L_0 изображение источника наблюдается [19] на расстоянии $L_и(\lambda)$, связанном с параметрами записи соотношением

$$L_и(\lambda) = \lambda_з \frac{L_и(\lambda_з)\cdot L_0}{L_и(\lambda)\cdot(\lambda-\lambda_з)-\lambda\cdot L_0} \approx \frac{\lambda_з}{\lambda}\cdot L_и(\lambda_з). \qquad (2.3.38)$$

Здесь предполагается, что $(\lambda-\lambda_з)<\lambda$ и $L_и<L_0$.

Отсюда видно, что голограммная линза обладает ярко выраженным хроматизмом, что можно использовать для построения спектральных приборов. Поскольку зеркальные системы являются более эффективными в конструкциях спектральных приборов, голограммную линзу можно превратить в голограммное диспергирующее зеркало. Для этого обработка фотопластинки производится так, чтобы получить рельефно-фазовую голограмму, а затем на образовавшийся рельеф методом вакуумного напыления нанести зеркальное покрытие. Получится отражающий диспергирующий элемент фокального монохроматора.

На рис. 2.3.30 приведена схема фокального монохроматора на внеосевом фрагменте голограммной линзы. Голограммная линза с зеркальным напылением освещается источником света с длиной волны λ с расстояния L_0. Восстановленное изображение наблюдается на расстоянии $L_и(\lambda)$, описываемом соотношением (2.3.38). Использование в схеме внеосевого фрагмента позволяет раздельно формировать в пространстве (вдоль оси) изображения источника, сформированные различными длинами волн. Обозначим: y_0 – размер источника света, h_0 – координата точки диспергирующего элемента, с которой начинается линза. Голограммная линза формирует изображение, размер которого равен $y = \beta\cdot y_0$, где β – коэффициент линейного увеличения голограммной линзы, который связан с параметрами записи-воспроизведения соотношением

$$\beta = \frac{L_и(\lambda)}{L_0}. \qquad (2.3.39)$$

Поскольку на матовом стекле наблюдается проекция изображения размером y на оптическую ось, то для его размера $\delta\lambda_L$ имеем очевидное соотношение

$$\delta\lambda_L = \frac{y \cdot L_u(\lambda)}{h_0 - y} = \frac{L_u^2(\lambda) \cdot y_0}{L_0 \cdot (h_0 - \beta \cdot y_0)} \approx \frac{L_u^2(\lambda)}{L_0} \cdot \frac{y_0}{h_0}. \qquad (2.3.40)$$

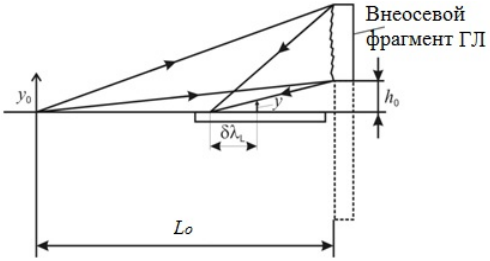


Рис. 2.3.30. Оптическая схема фокального монохроматора на внеосевом фрагменте зеркальной голограммной линзы

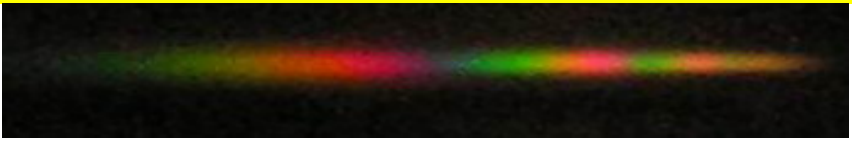
Тогда за спектральное разрешение фокального монохроматора на внеосевом фрагменте голограммной линзы можно принять величину

$$\delta\lambda = \delta\lambda_L \cdot \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_L}, \qquad (2.3.41)$$

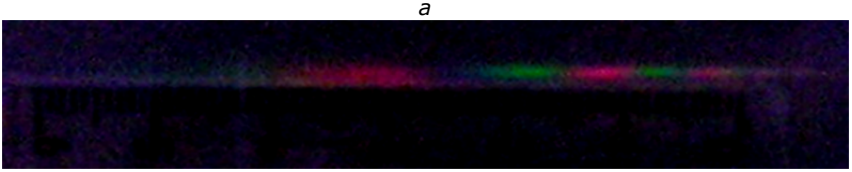
где $\Delta\lambda_L = L_{\text{и}}(\lambda_{\text{к}}) - L_{\text{и}}(\lambda_{\text{д}})$ – область, занимаемая на матовом экране спектральным диапазоном $\Delta\lambda$ с коротковолновой границей – $\lambda_{\text{к}}$ и длинноволновой – $\lambda_{\text{д}}$.

В качестве источника света может быть использован отрезок оптического волокна, тогда за y_0 следует принять диаметр сердцевины волокна. При $y_0 = 0{,}25$ мм спектральное разрешение, оцениваемое по формуле (2.3.41), составляет $\delta\lambda \sim 50$ нм. Улучшить этот показатель можно с помощью экрана, закрывающего часть голограммной линзы.

Любая рельефно-фазовая решетка, каковой является зеркальная голограммная линза, в принципе нелинейна [19]. В силу этого обстоятельства при дифракции света на такой структуре одновременно наблюдается несколько порядков дифракции. Это следует иметь в виду при интерпретации спектров, полученных с помощью ФМГЛ, и стараться проводить измерения в одном и том же порядке. Чем выше порядок дифракции, тем на больший угол отклоняется луч при взаимодействии с решеткой. Отсюда чем больше номер порядка, тем ближе он расположен к ГЛ (рис. 2.3.31).



а



б

Рис. 2.3.31. Спектры разных источников белого цвета: *а* – металлогалогенной лампы; *б* – белого светодиода. Светодиод белого света состоит из трех кристаллов, генерирующих излучение трех длин волн (спектр линейчатый). Поэтому их изображения видны в спектре раздельно – *б*, в отличие от спектра теплового источника (металлогалогенной лампы) – *а*, который является принципиально сплошным

Спектрограф – спектральный оптический измерительный прибор на основе монохроматора с фотоприемником, позволяющий регистрировать спектр определенной протяженности. При этом спектрографы могут быть:

– сканирующими, когда одиночный фотоприемник установлен сразу за выходной щелью монохроматора, а развертка спектра осуществляется поворотом диспергирующего элемента;

– непосредственной регистрации, когда фотоприемник линейный или матричный устанавливается на место выходной щели монохроматора и регистрация спектра производится в пределах физической длины фотоприемника.

Спектрометр – спектральный оптический измерительный прибор на основе монохроматора, используемый в спектроскопических исследованиях для регистрации спектра, его количественной обработки и последующего анализа с помощью различных аналитических методов. Анализируемый спектр получается путем регистрации флуоресценции после воздействия на исследуемое вещество каким-либо излучением (рентгеновским или лазерным излучением, искровым воздействием и др.).

Обычно измеряемыми величинами являются интенсивность и энергия (длина волны, частота) излучения, но могут регистрироваться и другие характеристики, например поляризационное состояние.

Специализированные спектрометры, предназначенные для спектрального количественного анализа сталей и иных сплавов, называются ***стилометрами***.

Дискретный монохроматор на интерференционных фильтрах – спектральный прибор, в котором выделение спектральной компоненты производится с помощью узкополосного интерференционного фильтра. А поскольку интерференционный фильтр проектируется и изготавливается на определенную длину волны, то сканирование спектрального диапазона в этом случае можно организовать только дискретным образом посредством смены фильтров.

Интерференционные спектральные фильтры являются, по сути дела, интерферометрами Фабри–Перро (раздел 2.3.8) с очень малым зазором между параллельными зеркалами.

Если на стеклянную подложку нанести последовательно (обычно методом вакуумного напыления):

– зеркало R с большим коэффициентом отражения;

– слой диэлектрика с показателем преломления n малой толщины L (одно – несколько длин волн излучения, для которого проектируется данный фильтр);

– еще одно зеркало R, аналогичное первому,

в результате получится эталон Фабри–Перро с малой толщиной диэлектрического зазора. Схематическое изображение конструкции интерференционного фильтра представлено на рис. 2.3.32.

Спектральные свойства этих фильтров основаны на многолучевой интерференции.

Рассмотрим интерференцию многих световых пучков, возникающих при прохождении световой волны через плоскопараллельную диэлектрическую пластинку с толщиной d и показателем преломления n (рис. 2.3.32).

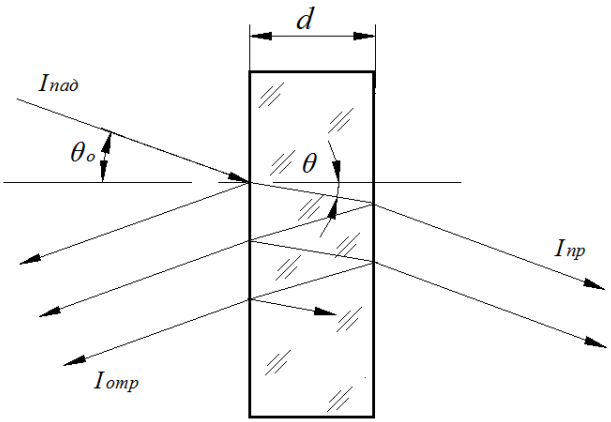


Рис. 2.3.32. Интерференция многих световых пучков при прохождении световой волны через плоскопараллельную диэлектрическую пластинку (URL: http://optics.sinp.msu.ru/prak/zad16.html)

Для простоты будем считать, что угол падения θ_0 мал и компоненты света с поляризацией, параллельной и перпендикулярной плоскости падения, имеют один и тот же коэффициент отражения R от граней пластинки. Будем полагать также, что поглощение в пластинке мало, а отражение от граней достаточно велико, и, следовательно, для анализа интерференции необходимо учитывать лучи, многократно отразившиеся внутри пластинки. Для того чтобы найти интенсивность света, прошедшего через пластинку, необходимо рассмотреть бесконечную последовательность убывающих по амплитуде лучей. Применяя к этой последовательности формулу для суммы геометрической прогрессии, можно получить ***формулу Эйри*** (URL: http://optics.sinp.msu.ru/prak/zad16.html) для пропускания пластинки

$$T = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2+4R\sin^2\left(\Delta\varphi/2\right)}, \qquad (2.3.42)$$

где $I_{\text{пр}}$ – интенсивность света, прошедшего через фильтр; $I_{\text{пад}}$ – интенсивность света, падающего на фильтр; $\Delta\varphi$ – разность фаз

между соседними пучками, интерферирующими после двукратного отражения одного из них.

Согласно (П.168) можно записать:

$$\Delta\varphi = \left(4\pi/\lambda_0\right) nd \cdot \cos\theta, \qquad (2.3.43)$$

где λ_0 – длина волны света, прошедшего через фильтр.

Соответствующий график пропускания $T(\varphi)$ представлен на рис. 2.3.33 для различных коэффициентов отражения. Зависимость пропускания T от величины d имеет вид системы максимумов, причем чем выше коэффициент отражения R, тем острее становятся максимумы.

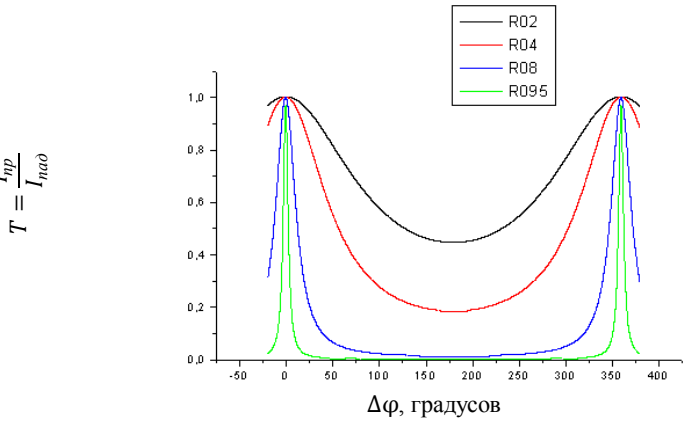


Рис. 2.3.33. Зависимость коэффициента пропускания от набега фазы (2.3.43) для различных значений коэффициента пропускания зеркал интерферометра R = 0,2; 0,4; 0,8 и 0,95

Следовательно, пропускание интерференционного фильтра имеет ярко выраженный резонансный характер. В силу этого фильтр обладает селективными свойствами по отношению к длине волны λ немонохрометического света. При $\theta \cong 0$ (падение, близкое к нормальному) из всего спектра, падающего на фильтр излучения, вырезается длина волны λ_0, определяемая из формулы (2.3.43) в виде

$$\lambda_0 = 2\,nd. \qquad (2.3.44)$$

Здесь принято, что $\Delta\varphi = 2\pi$, а значение пропускания фильтра максимально и равно

$$T_{\lambda_0} = 1. \tag{2.3.45}$$

А спектральное разрешение этого фильтра можно определить по полуширине контура линии при $T_{\lambda_{0\pm\Delta\lambda_{\min}}} = \pm {}^{1}/_{2}$. Из (2.3.42) получим, что значению $T = {}^{1}/_{2}$ соответствует $\Delta\varphi_{1/2} \cong \pm\frac{1-R}{\sqrt{R}}$. Тогда, с учетом (2.3.43) и (2.3.44), получим для предела спектрального разрешения интерференционного фильтра, а следовательно, и дискретного монохроматора

$$\Delta\lambda_{\min} = \Delta\lambda_{1/2} = \frac{nd\cdot 2\Delta\varphi_{1/2}}{2\pi} = \frac{nd\cdot\frac{1-R}{\sqrt{R}}}{2\pi}. \tag{2.3.46}$$

Фурье-спектрометр – особый вид спектрального прибора без диспергирующего элемента, представляет собой скорее некогерентный широкополосный интерферометр по конструкции, но по назначению относится к спектральным приборам, хотя не имеет в своей конструкции никакого монохроматора. Принципиальная схема фурье-спектрометра представлена на рис. 2.3.34, *а*. Основной элемент фурье-спектрометра – интерферометр Майкельсона, который настраивается на получение бесконечно широкой полосы. Одно из зеркал (M_2 на рис. 2.3.34, *а*) двигается поступательно, в процессе чего в плоскости выходной диафрагмы, где установлен фотоприемник, «бегут» полосы интерференционной картины. Это означает, что исследуемое излучение модулируется, причём частота модуляции зависит от скорости движения зеркала v и длины волны излучения – λ. Как только разность хода в плечах интерферометра для излучения с длиной волны λ достигнет величины $\Delta = v\cdot t = k\cdot\lambda$, где k – порядок интерференции для данной длины волны, фотоприемник зарегистрирует максимальный сигнал, свидетельствующий о синфазности колебаний в плечах интерферометра для излучения именно этой длины волны. Если $\Delta = v\cdot t = k\cdot\lambda + \frac{\lambda}{2}$, колебания гасятся, сигнал минимальный.

Следовательно, частота модуляции f, т.е. временная частота следования импульсов, может быть записана в виде

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{\mu \cdot v}, \qquad (2.3.47)$$

где $\mu = \frac{1}{\lambda}$ волновое число излучения длиной волны λ, соответствующей интерференционной картине для длины волны λ.

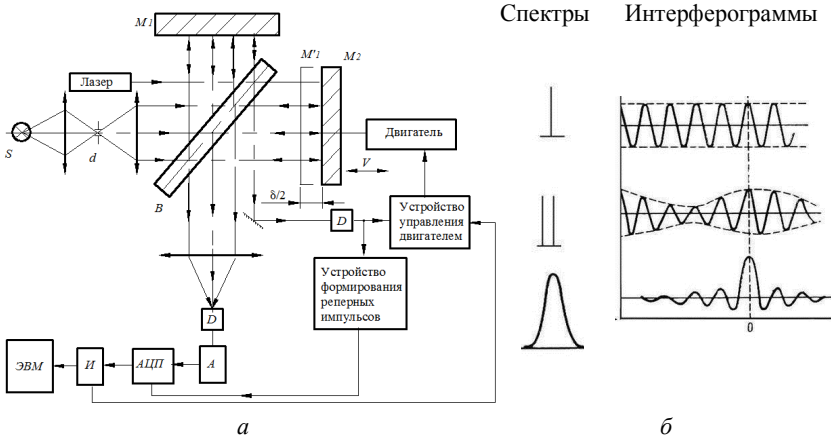


Рис. 2.3.34. Устройство [33] фурье-спектрометра: *а* – принципиальная схема; *б* – спектры и соответствующие им сигналы на фотоприемном устройстве фурье-спектрометра. *S* – источник сплошного спектра; M_1 – фиксированное зеркало интерферометра; M_2 – подвижное зеркало интерферометра; M_1 – изображение фиксированного зеркала в плече зеркала M_2; *d* – входное отверстие фурье-спектрометра; *B* – светоделитель; *D* – фотоприёмник; *A* – усилитель; *И* – интерфейс связи ЭВМ с регистрирующей и управляющей электроникой спектрометра

Если скорость движения известна, то получается, что информация о длине волны исследуемого спектра кодируется частотой сигнала, зарегистрированного фотоприемником при движении зеркала. Следовательно, если временной фотометрический сигнал подвергнуть гармоническому анализу, то при известной скорости движения зеркала может быть определена амплитуда гармоники, т.е. вклад спектральной компоненты в излучение источника спектра, а также соответствующая длина волны.

Формально эта задача решается с использованием свойств преобразования Фурье (отсюда название прибора). В теории фурье-

спектрометра [33] показывается, что сигнал, зарегистрированный фотоприемником, пропорционален фурье-образу спектральной плотности излучения, падающего на интерферометр. Следовательно, искомая спектральная плотность излучения может быть вычислена посредством обратного преобразования Фурье. Восстановленная таким образом спектральная плотность содержит в себе некую аппаратную функцию, которая зависит от:

– степени когерентности излучения, которая накладывает ограничение на величину перемещения зеркала, следовательно, на пределы интегрирования при вычислении фурье-преобразования, которые в идеале должны равняться бесконечности;

– свойств оптической системы;

– возможностей цифровой регистрации и обработки сигнала фотоприемника;

– механического тракта, обеспечивающего перемещение зеркала;

– погрешности определения скорости перемещения зеркала, которая измеряется встроенным лазерным интерферометром.

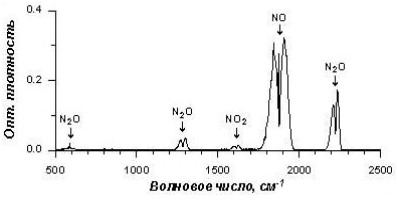
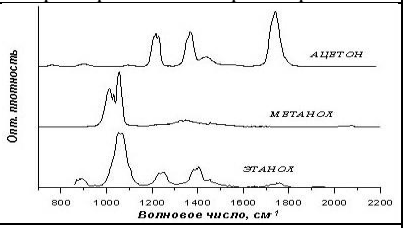
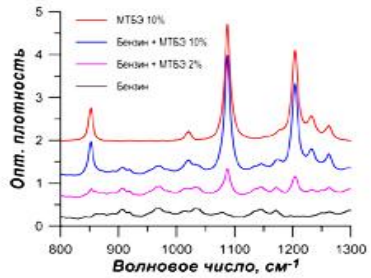
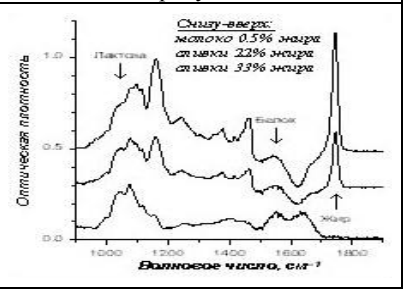
Эта аппаратная функция и ограничивает достижимое спектральное разрешение фурье-спектрометра.

Сложность получения спектров на фурье-спектрометре перекрывается его преимуществами над другими спектральными приборами. Так, с помощью фурье-спектрометров можно регистрировать одновременно весь спектр. Благодаря тому, что в интерферометре допустимо входное отверстие больших размеров, чем щель спектральных приборов с диспергирующим элементом такого же разрешения, фурье-спектрометры по сравнению с ними имеют выигрыш в светосиле. Это позволяет уменьшить время регистрации спектров, уменьшить отношение сигнал / шум и повысить разрешение, уменьшить габариты прибора. Наличие ЭВМ в приборе позволяет, кроме вычисления спектра, производить другие операции по обработке полученного экспериментального материала, осуществлять управление и контроль за работой самого прибора.

Пример 2.3.13. В качестве примера в табл. 2.3.9 приведены результаты спектральных измерений, выполненных с помощью спектрометра ФСМ (URL: http://www.fizlabpribor.ru).

Таблица 2.3.9

Примеры спектров ИК-поглощения, полученных с помощью фурье-спектрометров ФСМ

Спектр ИК-поглощения смеси окислов азота	Примеры спектров ИК-поглощения паров органических растворителей
	
Экспрессное определение МТБЭ в бензинах	Спектры образцов молочных продуктов
	

2.3.6. Длиномеры

Длиномеры – оптико-механические измерительные приборы, предназначенные для линейных контактных измерений линейных размеров деталей путем определения перемещения образцовой линейной шкалы, установленной на одной оси с измерительным стержнем. С помощью длиномеров производятся измерения абсолютным и относительными методами цилиндрических и резьбовых калибров, изделий призматической и цилиндрической формы, внутренних диаметров гладких и резьбовых колец, диаметров шариков и проволоки, толщины листов и т.д. Длиномеры по ГОСТ 14028–68 выпускаются следующих типов: вертикальные с окуля-

ром, вертикальные с проекционным экраном, горизонтальные с экраном.

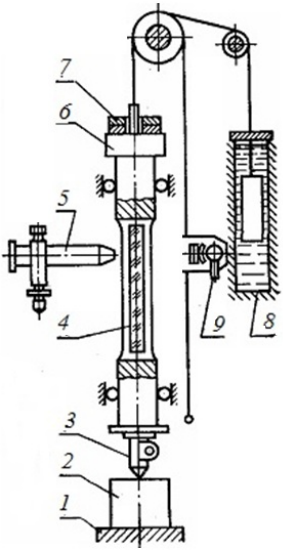


Рис. 2.3.35. Вертикальный оптический длиномер: *1* – стол длиномера; *2* – измеряемый предмет; *3* – измерительный наконечник; *4* – стеклянная миллиметровая шкала; *5* – отсчетный микроскоп с окуляр-микрометром; *6* – измерительный шпиндель; *7* – грузовые шайбы; *8* – демпферный цилиндр противовеса; *9* – осветитель шкалы

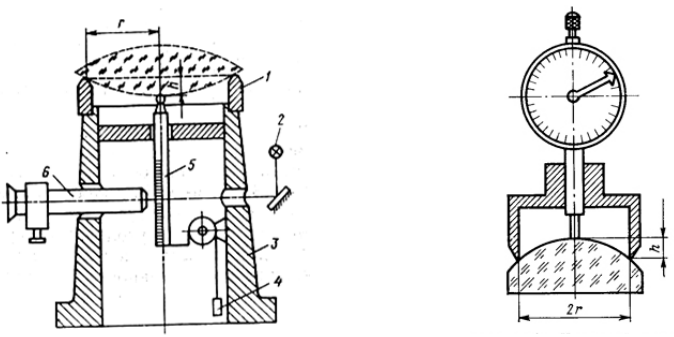
Схема длиномера показана на рис. 2.3.35. Конструкция длиномера соответствует ***принципу Аббе***, т.е. основная шкала является продолжением измеряемой детали. В пиноли закреплен измерительный наконечник, входящий в соприкосновение с измеряемой деталью. Сила тяжести пиноли уравновешена противовесом, который перемещается внутри масляного демпфера. Пиноль соединена с противовесом стальной лентой, перекинутой через блоки, причем сила воздействия длиномера на объект определяется разностью масс пиноли и противовеса *1*. Ее величина регулируется с помощью грузовых шайб. Отсчеты по стеклянной шкале, освещаемой источником света, производят с помощью отсчетного микроскопа со спиральным нониусом.

Диапазон показаний длиномеров составляет 100–250 мм. Погрешность измерения длиномером зависит от измеряемого размера и температурных условий. При рекомендуемых условиях измерений погрешность измерения составляет от 1,5 до 3 мкм.

В настоящее время выпускаются длиномеры с цифровым отсчетом с ценой деления 0,1 мкм.

Оптиметр (ГОСТ 5405–75) – разновидность оптических длиномеров, сочетающая в своем измерительном механизме оптический и механический рычаги. Предназначены для высокоточных контактных измерений линейных размеров и отклонений геометрической формы деталей относительным методом с настройкой по концевым мерам, калибрам или деталям-образцам. В зависимости от положения оси измерения оптиметры могут быть вертикальными или горизонтальными. В зависимости от отсчета показаний – экранными или окулярными. Особенность конструкции накладывает ограничения на метрологические характеристики, а именно: оптиметры имеют малый расход (пределы показаний 0,025–0,1 мм) при очень малой погрешности 0,07–0,3 мкм.

Сферометр – разновидность оптического длиномера, предназначенная для косвенного измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых сферических поверхностей посредством измерения их стрелки прогиба (рис. П.169).



а *б*

Рис. 2.3.36. Принципиальная схема сферометра: *а* – настольный сферометр с кольцами с шариковыми опорами, с оптическим отсчетом; *б* – накладной сферометр с кольцом с ножевой кромкой с индикаторным отсчетом

Принципиальная схема ***кольцевого настольного сферометра*** приведена на рис. 2.3.36, *а*. Внутри массивного корпуса *3* по точным направляющим перемещается измерительный стержень *5* с встроенной миллиметровой шкалой и контактным шариком на конце. Положение шкалы отсчитывается при помощи микроскопа *6* со спиральным окулярным микрометром. Шкала подсвечивается осветителем *2*. Противовес *4* стремится поднять измерительный стержень вверх до касания шарика с измеряемой поверхностью линзы. На верхнюю часть корпуса насаживаются сменные опорные стальные кольца *1*. Контактным сферометром непосредственно измеряется высота шарового сегмента h, а по ней и радиусу r опорного кольца рассчитывается радиус кривизны поверхности R. Значение радиуса кольца r приводится в аттестате на прибор. Имеется ряд конструктивных вариантов колец: со сплошной ленточной ножевой кромкой, с фаской, с шариковыми опорами. Кольца с шариками, установленными под углом 120°, долговечнее обычных колец. При измерении радиуса кривизны отдельной сферической поверхности на прибор устанавливают сначала плоскую пластину, а затем контролируемую деталь. Разность полученных отсчетов по шкале дает значение стрелки прогиба поверхности h. Величина R вычисляется по формуле

$$R = {r^2}/{2h} + {h}/{2} \pm \rho, \qquad (2.3.48)$$

где r – радиус кольца и ρ – радиус шарика указаны в аттестате. Знак «плюс» берут для вогнутой поверхности, знак «минус» – для выпуклой.

Кольцевые контактные сферометры имеют различное конструктивное оформление и могут быть оснащены различными устройствами измерения стрелки прогиба. В частности, на рис. 2.3.36, *б* показан ***накладной сферометр***, предназначенный для измерения радиусов кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей крупногабаритных оптических деталей с индикаторной головкой и с кольцом со сплошной ленточной ножевой кромкой.

2.3.7. Оптические измерительные приборы для диагностики, основанные на измерении светового потока

При взаимодействии света с веществом меняются свойства светового излучения:

– скорость света (длина волны);
– амплитуда (интенсивность) излучения;
– состояние поляризации;
– направление распространения.

За эти изменения отвечают такие характеристики вещества, как:

– показатель преломления;
– коэффициент поглощения;
– анизотропия;
– коэффициент отражения;
– коэффициент светорассеяния;
– форма и геометрические размеры.

В свою очередь, эти характеристики вещества зависят от:

– химического состава;
– величины примесей;
– физической и химической однородности;
– технологии получения и обработки вещества.

Следовательно, получать измерительную информацию об исследуемом веществе можно на основании измерения характеристик оптического излучения после его взаимодействия с этим веществом. В зависимости от способа получения такой измерительной информации различают приборы: рефрактометры, колориметры, поляриметры, рефлектометры, мутномеры (нефелометры) и дифрактометры.

Рефрактометром называется оптический измерительный прибор, позволяющий получать измерительную информацию об исследуемых средах (твердых, жидких, газообразных) из результатов измерения показателя преломления. Устройство рефрактометра основано на измерении угла полного внутреннего отражения на плоской границе раздела прозрачных сред (исследуемой и извест-

ной) при распространении света из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем. Наблюдение полного внутреннего отражения производится визуально в силу низкого порога чувствительности человеческого зрения к сверхмалым освещенностям, а отсчет угла может быть произведен любым устройством углового отсчета. Также любой может быть градуировка прибора, в зависимости от его назначения:

– показатель преломления;

– показатель чистоты дистиллированной воды;

– содержание сахарозы в водных растворах;

– концентрация общего белка сыворотки крови и т.д.

Пример 2.3.14. На рис. 2.3.37 представлена принципиальная оптическая схема жидкостных рефрактометров типа Аббе. Основной узел этих рефрактометров состоит из измерительной и осветительной призм. Тонкий слой исследуемой жидкости находится между гранями обеих призм. Поверхность осветительной призмы, соприкасающаяся с исследуемой жидкостью, матовая, шероховатая, рассеивает свет, входящий через нее в слой жидкости, вследствие чего лучи света пронизывают жидкость в разных направлениях. Лучом, угол падения которого наиболее близок к касательному к границе раздела (предельный луч), видимое в зрительную трубу поле делится на темную (лучи испытывают полное внутреннее отражение) и светлую половины (лучи не испытывают полного внутреннего отражения). С помощью специального маховичка можно блок призм установить в такое положение, при котором предельный луч будет совмещен с оптической осью зрительной трубы, а граница светлого и темного полей – с видимым в трубу пересечением двух прямых линий, через которое проходит эта воображаемая ось, – поперечная наводка. По отсчетному угломерному устройству, связанному с маховичком блока призм, определяют угол, при котором имеет место это совмещение.

Коэффициент преломления жидкостей значительно изменяется под влиянием температуры. Поэтому в рефрактометрах для повышения точности применяется термостатирование. В таких рефрактометрах отсутствует осветительная призма, и срез измерительной призмы контактирует непосредственно с исследуемой жидкостью.

Некоторые модели современных рефрактометров с характеристиками представлены в табл. 2.3.10.

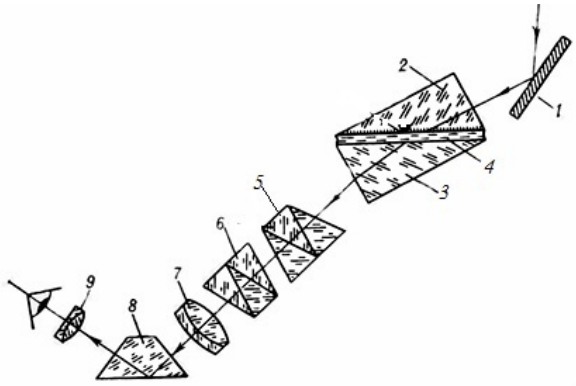


Рис. 2.3.37. Оптическая схема рефрактометра для измерения показателя преломления жидкостей: *1* – осветительное зеркало; *2* – вспомогательная призма; *3* – измерительная призма; *4* – слой измеряемой жидкости; *5*, *6* – компенсатор, состоящий из двух дисперсионных призм Амичи; *7* и *9* – объектив и окуляр визирной трубы; *8* – призма поворотная

Колориметром называется оптический измерительный прибор, позволяющий получать измерительную информацию об исследуемых средах из результатов измерения спектрального пропускания. Закон Бугера–Ламберта–Бера – определяет ослабление параллельного монохроматического пучка света при проходе его через поглощающую среду (П.53). Степень поглощения зависит от длины волны, толщины образца и спектрального показателя поглощения, характеризующего свойства среды.

Помимо этого, известен закон Бера, который гласит, что поглощающая способность молекул вещества не зависит от концентрации вещества, поэтому показатель поглощения может быть записан в виде

$$k_\lambda = C \cdot \chi_\lambda, \qquad (2.3.49)$$

где C – концентрация вещества; χ_λ – коэффициент, не зависящий от C и характеризующий взаимодействие молекулы поглощающего вещества со светом с длиной волны λ.

Таблица 2.3.10

Некоторые коммерческие модели промышленных рефрактометров

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
Лабораторный стационарный рефрактометр ИРФ-454 Б2. Предназначен для определения показателя преломления, величины дисперсии жидкостей, твердых тел, а также для определения содержания сахара в водных растворах. Рефрактометр оснащен проточной измерительной ячейкой; возможно проведение измерений в широком температурном интервале от 10 до 60°С; встроенный термометр позволяет контролировать температуру с точностью до 1,0°С. Приспособлен для работы как в прямом, так и в отраженном свете. Применяется в стекольной, пищевой, химической, фармацевтической промышленности, а также в научно-исследовательских институтах	 URL: http://www.tehnogarant.ru	Рабочая длина волны 584 нм Диапазон измерения: показателя преломления 1,2–1,7 содержания сахара в растворах до 85% Предел допустимой основной погрешности: по показателю преломления $\pm 10^{-4}$ по средней дисперсии $\pm 1{,}5 \times 10^{-4}$ Точность измерения содержания сахара в растворах 0,2% Температура измеряемой жидкости 10–60°С Цена деления шкалы показателя преломления 5×10^{-4}

Окончание табл. 2.3.10

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
Лабораторный стационарный рефрактометр DR-M2. Предназначен для определения показателя преломления, величины дисперсии жидкостей, твердых тел, а также для определения содержания сахара в водных растворах. Монохроматор – дискретный с интерференционными фильтрами. На цифровом дисплее отображаются значение показателя преломления, число Аббе, длина волны. Для ближней ИК-области поставляется дополнительный ИК-окуляр. Предусмотрено устройство термостабилизации	  URL: http://www.atagorus.ru	Диапазон длин волн 450–1100 нм Диапазон измерения коэффициента преломления: для λ = 450 нм 1.3278–1.7379 для λ = 589 нм 1.3000–1.7100 для λ = 680 нм 1.2912–1.7011 для λ = 1100 нм 1.2743–1.6840 Точность измерения показателя преломления ±0,0002 500–650 нм Температура измерения 5–50°C
Ручной рефрактометр PRHW-25b ATC. Переносной рефрактометр для виноделия для определения содержания сахара и спирта в жидкостях с автоматической компенсацией температуры	 URL: http://www.kiev.olx.com.ua	Диапазон шкалы: алкоголь 0–25% сахар (Brix) 0–40% Точность измерения: алкоголь ±0,2% сахар (Brix) ±0,2% Цена деления: алкоголь 0,2% сахар (Brix) 0,2%

Смысл закона Бера состоит в том, что поглощающая способность молекулы не зависит от влияния окружающих молекул. Закон этот надо рассматривать скорее как правило, так как наблюдаются многочисленные отступления от него, особенно при значительном увеличении концентрации поглощающих молекул. Тем не менее он применяется в устройстве колориметрических приборов для измерения концентраций различных веществ.

Точность таких измерений чрезвычайно высока: погрешность не превосходит 0,01–0,001 моль/л. Эти приборы широко применяются в аналитической химии, в том числе для гидрохимического анализа, в частности – для количественного анализа содержания биогенных веществ в природных водах, для измерения pH в медицине, а также в промышленности при контроле качества продукции.

На рис. 2.3.38 представлена типовая схема концентрационного фотоэлектрического колориметра, предназначенного для измерения светопропускания, оптической плотности и концентрации окрашенных растворов и рассеивающих смесей в области спектра 315–980 нм.

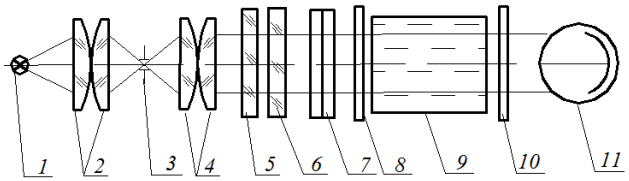


Рис. 2.3.38. Схема оптическая принципиальная колориметра для измерений концентраций жидкостей: *1* – широкополосный источник света; *2* – конденсор; *3* – диафрагма; *4* – коллимирующий объектив; *5* – теплофильтр; *6* – нейтральный светофильтр; *7* – цветной вырезающий светофильтр; *8, 10* – окна кюветного отделения; *9* – кювета с исследуемой жидкостью; *11* – фотоприемник

Из схемы ясно, что по своей конструкции колориметры представляют собой спектрофотометры, основанные на использовании дискретного монохроматора с вырезающими светофильтрами. Колориметры основаны на дифференциальной схеме сравнения ин-

тенсивности окраски исследуемого образца, изучаемого в пропущенном свете, с окраской эталонного образца, содержащего строго определенное количество этого же окрашенного вещества. Смена кювет с эталонным и исследуемым растворами в этом колориметре производится лаборантом вручную, а измерение светопропускания производится косвенно – по показаниям миллиамперметра.

Помимо фотоэлектрического колориметра с непосредственным отсчетом силы тока, распространены двухканальные компенсационные колориметры с дифференциальным отсчетом. В них разность сигналов, соответствующих стандартному и измеряемому растворам, сводится к нулю (компенсируется) электрическим или оптическим компенсатором (например, клином фотометрическим). Отсчет в этом случае снимается со шкалы компенсатора (рис. 2.3.39).

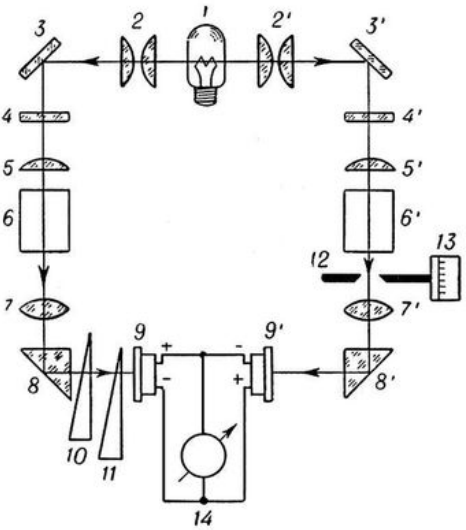


Рис. 2.3.39. Схема оптическая принципиальная двухканального компенсационного колориметра для измерений концентраций жидкостей

Показания колориметра не дают сразу значений концентрации [57] исследуемого вещества в растворе – для перехода к ним ис-

пользуют калибровку с помощью градуировочных графиков, полученных при измерении растворов с известными концентрациями. Современные приборы (табл. 2.3.11) имеют встроенную заводскую калибровку. Измерения концентраций с помощью колориметров отличаются простотой и быстротой проведения. Точность их во многих случаях не уступает точности других, более сложных методов химического анализа.

Поляриметром называется визуальный (оптический) измерительный прибор, позволяющий получать измерительную информацию об исследуемых средах (твердых, жидких, газообразных) из результатов измерения состояния поляризации излучения, прошедшего через исследуемый материал.

Принципиально различают поляриметры двух типов:

– поляриметры, предназначенные для:

  ○ наблюдения двулучепреломления в прозрачных материалах – ***полярископ***,

  ○ наблюдения и измерения двулучепреломления в прозрачных материалах – ***полярископ-поляриметр,***

– ***сахариметры*** – приборы, измеряющие концентрацию оптически-активных веществ по углу вращения плоскости поляризации.

Принципиальная оптическая схема простейшего полярископ-поляриметра представлена на рис. 2.3.40. Он состоит из источника света *1* (лампа накаливания), матового стекла *2*, поляризатора с отсчетным лимбом *3* (поляроид, вклеенный между стеклами), четвертьволновой пластинки *5*, анализатора с отсчетным лимбом *6* и светофильтра *7*, как правило, на длину волны $\lambda = 0{,}55$ мкм. Поляризатор и анализатор могут быть выполнены в виде поляризационных призм для малых полей зрения или в виде поляроидов. Поляроиды представляют собой прозрачные пленки герапатита (микрокристаллы, представляющие собой соединение хинина и йода, обладающие поляризующими свойствами), зажатые между двумя стеклами.

Порядок измерения на приборе следующий: скрещивают поляризатор и анализатор (отсчет по лимбу анализатора 0°, поле зрения темное), устанавливают образец *4*.

Таблица 2.3.11

Фотоэлектрические промышленные колориметры

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики	
Фотометр фотоэлектрический КФК-3-01. Области применения: – в медицинских стационарных лабораториях для определения содержания в крови и моче сахара, билирубина, глюкозы, холестерина, креатина; – в химических лабораториях для определения содержания в химических растворах мочевины, общего белка, щелочей, фосфатов, для лабораторно-производственного контроля качества воды перед поступлением в сеть по химическим показателям в соответствии с ГОСТ Р-51232–98. Имеет внешний выход RS-232, индикацию результатов измерения на цифробуквенном ЖКИ	 URL: http://www.granat-e.ru	Спектральный диапазон Спектральный интервал, выделяемый дискретным монохроматором фотометра, не более Пределы измерения: коэффициента пропускания оптической плотности концентрации С Предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности фотометра при измерении коэффициента пропускания Предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности установки длины волны	от 315 до 990 нм 7 нм 0,1–100% 3–0 дБ 0,0001–99,99 усл. ед. 0,5% (абс.) 3 нм

Продолжение табл. 2.3.11

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
Фотоэлектрический колориметр КНС-1. Предназначен для определения цвета светлых нефтепродуктов по ГОСТ 2667. Колориметр аттестуется при выпуске из производства и в дальнейшем периодической поверке не подлежит. Имеет цветовую шкалу, внесенную в Государственный реестр	 URL: http://www.ipkins.ru	Пределы измерений от 0 до 21 условных цветовых единиц через 1 единицу Воспроизводимость измерений – 2 деления цветовой шкалы Потребляемая мощность 100 Вт Габаритные размеры 440×270×325 мм
Фотоэлектрический калориметр АР-700. Области применения: клиническая биохимия (липиды, электролиты, ферменты), научные исследования, исследования качества продуктов питания и воды, для учебных целей. Минимальный объем пробы – 0,5 мл. Открытая система для любых реактивов и методик. Отсутствие необходимости расчета с помощью графиков благодаря встроенной базе данных	 URL: http://www.smc1.ru	Диапазон измерения 400–800 нм Комплект фильтров дискретного монохроматора 405, 420, 460, 510, 540, 600, 660 нм Ширина полосы светопропускания на половине высоты 20 нм Диапазоны фотометрических режимов: – абсорбция (А) 0 ~ 1,999 – коэффициент светопропускания (Т) 0 ~ 110,0% – концентрация (С) 0 ~ 1,999 Погрешность измерений 2%

Окончание табл. 2.3.11

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики	
Настольный мультипараметровый фотоэлектрический колориметр С-200: – Позволяет измерять до 36 параметров. – Большой удобный ЖК-дисплей выдает результаты анализа непосредственно в единицах концентрации, а также служит для самодиагностики, руководящих инструкций и подсказок пользователю. – Колориметры имеют гнездо для сетевого питания от адаптера, но могут также работать от батареи на 9 В, что позволяет проводить анализы и в полевых условиях. – Приборы снабжены RS-232-портом. Измерительная кювета специальной конструкции обеспечивает точность измерений. – Прибор «зануляется» по анализируемому образцу, благодаря чему повышается точность измерений	 URL: http://www.vita-ros.ru	Аммоний, HR Аммоний, MR Аммоний, LR Бром Диоксид хлора Железо, HR Железо, LR Жесткость, Ca Жесткость, Mg Жесткость общая Йод Калий Кремния диокс. Марганец, HR Марганец, LR Медь, HR Медь, LR Молибден Никель, HR Никель, LR Нитрат Нитрит, HR Нитрит, LR Серебро Сульфат Фосфат, HR Фосфат, LR и др.	0,0–50,0 мг/л 0,00–9,99 мг/л 0,00–3,00 мг/л 0,00–8,00 мг/л 0,00–2,00 мг/л 0,00–5,00 мг/л 0–400 мкг/л 0,00–2,70 мг/л 0,00–2,00 мг/л 0–750 мг/л 0,0–12,5 мг/л 0,00–50,0 мг/л 0,00–2,00 мг/л 0,0–20,0 мг/л 0–300 мкг/л 0,00–5,00 мг/л 0–990 мкг/л 0,0–40,0 мг/л 0,00–7,00 г/л 0,000–1,000 мг/л 0,0–30,0 мг/л 0–150 мг/л 0,00–0,35 мг/л 0,000–0,600 мг/л 0–150 мг/л 0,0–30,0 мг/л 0,00–2,50 мг/л

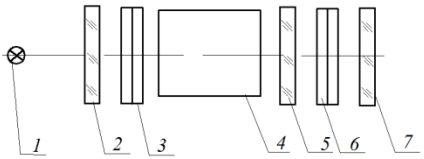


Рис. 2.3.40. Схема полярископа-поляриметра с визуальным контролем

Если он обладает двойным лучепреломлением, то в поле зрения глазом наблюдается просветление, связанное с возникновением необыкновенного луча и эллиптической поляризацией света, прошедшего образец. Поворачивая анализатор до максимального потемнения в середине образца, по лимбу отсчитывают угол поворота $\Delta\beta$ анализатора.

Зная $\Delta\beta$, можно определить величину двулучепреломления $\Delta n = n_o - n_e$ из соотношения

$$n_o - n_e = \frac{\Delta\beta \cdot \lambda}{\pi l} \ (^{\text{мкм}}/_{\text{мм}}), \qquad (2.3.50)$$

где l – толщина образца в направлении просмотра.

Это же устройство может быть использовано для измерения поворота плоскости поляризации света оптически активным веществом. В этом случае четвертьволновая пластина выводится из оптической схемы. Если при скрещенных поляризаторе и анализаторе ввести между ними оптически активное вещество, то поле зрения просветляется. Для восстановления исходной освещенности (компенсации угла вращения плоскости поляризации) поля зрения надо повернуть анализатор на некоторый угол $\Delta\beta$, который, очевидно, будет равен углу поворота плоскости поляризации.

В табл. 2.3.12 в качестве примеров приведены некоторые образцы современных промышленных поляризационных средств измерения.

В современных поляризационных приборах реализуются различные варианты исполнения с различным уровнем автоматизации измерений, контроля освещенности поля зрения, калибровки данных измерения. Особенно эта тенденция имеет место в конструкциях ***эллипсометров*** – оптических приборов, основанных на по-

ляризационных измерениях свойств света после отражения от оптической поверхности образцов. Эти приборы нашли широкое применение в задачах измерения оптических характеристик тонких пленок и твердых тел.

Мутномер – оптический измерительный прибор, предназначенный для измерения степени мутности жидкостей и газов по интенсивности рассеяния ими света. Принцип работы мутномера, как и колориметра, основан на законе Бугера–Ламберта–Бера (П.53), который в применении к мутным средам записывается в виде

$$I/I_0 = e^{-æl}, \qquad (2.3.51)$$

где æ – коэффициент суммарной экстинкции, который включает в себя коэффициент рассеяния и коэффициент поглощения.

Измерения мутности заключаются в сопоставлении интенсивности двух световых потоков: одного от рассеивающей взвеси, другого от эталонной среды. Переход от соотношения интенсивностей к концентрации взвеси производится посредством калибровки. В качестве эталонов часто используют специальные оптические стекла серии МС различной степени заглушенности.

Коэффициент рассеяния – характеристика рассеивающих свойств дисперсной среды, поэтому в конструкции мутномеров стремятся регистрировать не коэффициент суммарной экстинкции, а коэффициент рассеяния. Поэтому для определения степени мутности используются две принципиально различные схемы измерения интенсивности рассеянного света:

– с осевым расположением фотоприемника, когда измеряется свет, прошедший среду на просвет, – ***турбидиметры***;

– с внеосевым расположением фотоприемника, когда измеряется боковой свет, рассеянный средой, – ***нефелометры***.

Нефелометры имеют большую чувствительность к рассеянию на частицах, что очень важно при измерениях малых концентраций дисперсных систем, и менее чувствительны к поглощению, нежели турбидиметры.

Мутномеры делятся на визуальные и фотоэлектрические.

Оптическая схема визуального нефелометра изображена на рис. 2.3.41.

Таблица 2.3.12

Некоторые модели промышленных поляриметров

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
Полярископ-поляриметр ПКС-250 М. Предназначен для определения двойного лучепреломления в плоских заготовках и изделиях из прозрачных и слабоокрашенных материалов	 URL: http://www.eurolab.ru	Предел измерения разности хода при двойном лучепреломлении с четвертьволновой фазовой пластинкой 540 нм Цена деления нониуса 10 Величина отсчета по нониусу 0,10 Световой диаметр матового экрана 300 мм Световой диаметр анализатора 250 мм Предел допускаемой основной погрешности прибора при измерении разности хода компенсатором Сенармона ±10 нм
Поляриметр круговой СМ-3. Применяется в различных отраслях промышленности: пищевой, химической, полиграфической. Предназначен для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными и однородными растворами и жидкостями с целью определения их концентрации	 URL: http://www.eurolab.ru	Диапазон показаний угла вращения плоскости поляризации 0–360 град Основная погрешность поляриметра в диапазоне измерений –35°...0...+35°, не более 0,04° Чувствительность поляриметра 0,04 град Объем кювет, не более 5; 8; 10; 20 мл Источник света лампа натриевая ДНАС-18

Окончание табл. 2.3.12

Назначение, особенности конструкции	Изображение	Метрологические характеристики
Поляриметрический сахариметр проточный АП-15. Предназначен для измерения концентрации сахаров в прозрачных растворах: – в водке, в некоторых сортах вин в процессе их розлива на ликероводочных заводах; – в обратной воде, дигерате при производстве сахара на сахарных заводах, в соках и других напитках на предприятиях пищевой промышленности	 URL: http://www.metrokip.com	Диапазоны измерения от 0 до 1,990% Пределы допустимой основной погрешности измерения ±0,006%

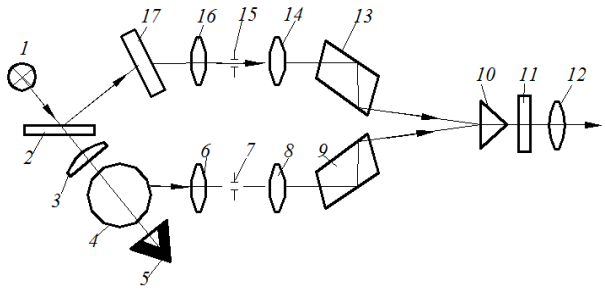


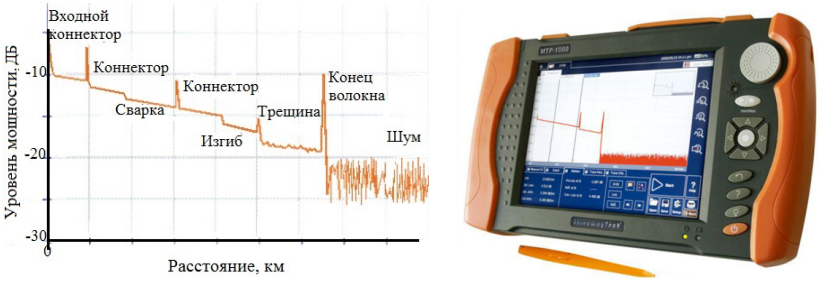
Рис. 2.3.41. Оптическая схема визуального нефелометра

Свет от лампы накаливания *1* проходит через стеклянную пластинку *2*, конденсор *3* и попадает в кювету *4*, помещенную в камеру с дистиллированной водой. Камеру с водой применяют для того, чтобы уменьшить рассеивание света стенками кюветы. Световой поток, прошедший через кювету, гасится в светоловушке *5*, а части светового потока, рассеянного частицами взвеси в кювете *4* и стеклянным рассеивателем *17*, собираются насадочными линзами *6* и *16*. Образовавшиеся два пучка проходят через диафрагмы *7* и *15*, связанные с отсчетными барабанами и объективами *8* и *14*, направляются в ромбические призмы *9* и *13*. Бипризма *10* дает возможность наблюдать в поле зрения окуляра *12* интенсивность двух пучков света.

Рефлектометр – оптический прибор для измерения параметров оптических сред по обратнорассеянному свету. Принцип работы прибора основан на анализе отражённых оптических импульсов, излучаемых рефлектометром в оптическую среду. Импульсы света испытывают отражения и затухания на неоднородностях показателя преломления и вследствие поглощения в среде и анализируются фотоприемным устройством рефлектометра.

Пример 2.3.15. Во время монтажа волоконно-оптических линий связи необходимо быть уверенным в том, что каждая секция удовлетворяет требованиям спецификации. Это возможно проверить с помощью оптического рефлектометра (рис. 2.3.42). Рефлектометр посылает мощный импульс света от светодиода в волокно

и измеряет отражённый сигнал. Каждое событие в линии (будь то оптический компонент или неисправность) вызывает либо отражение, либо затухание, либо то и другое. Рефлектометр снимает характеристику через определённые промежутки времени, определяя расстояние до каждого события.



а *б*

Рис. 2.3.42. Типичная рефлектограмма – *а* (URL: http://www.elektro-stroi.ru) и рефлектомер для исследования волоконно-оптических линий связи Shinewaytech MTP-1000 (URL: http://www.fibertool.ru)

Оптический рефлектометр MTP-1000 (URL: http://www.fibertool.ru) является компактной модульной платформой с возможностью подключения до 3 функциональных модулей, которые предназначены специально для тестирования FTTx / PON приложений, и соответствует всем требованиям к установщикам, подрядчикам и операторам услуг сети при инсталляции, подключении, техническом обслуживании и устранении неполадок. Подключаемые модули включают: рефлектометр с визуализатором дефектов, микроскоп, источник лазерного излучения и измеритель оптической мощности.

Особенности MTP-1000:

– разработан для применения в сетях метро, сетях доступа и FTTx сетях;

– гибкая конфигурация для всевозможных применений;

– тестирование активных FTTx сетей;

– идентификация в PON сетях сплиттеров;

– визуализатор для обнаружения дефектных коннекторов, потерь на макроизгибах и нахождение нужных патч-кордов и патч-панелей;

– микроскоп для просмотра торцов коннекторов на качество полировки и отсутствие загрязнений.

Характеристики платформы MTP1000

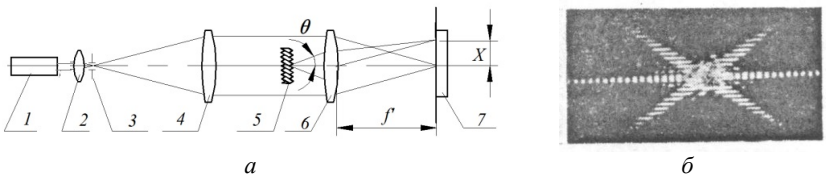
Дисплей	8.4" ЖК сенсорный дисплей (800×600)
Интерфейсы	USB 2 шт.; RJ-45 10/100 Мбит/с, 1 шт.
Память	2 Гбит
Прямое подключение к принтеру	Да
Питание	Li-Ion аккумулятор (6 часов работы) / сетевой адаптер (100–240 В, 50–60 Гц), индикаторы заряда аккумулятора
Рабочая температура, °C	От 0 до +50
Температура хранения, °C	От –20 до +70
Относительная влажность воздуха	От 0 до 95% (до точки росы)
Масса, кг	2,1 (только платформа)
Габариты (В × Ш × Д), мм	320×190×70 (только платформа)

Модули рефлектометров (OTDR)

Модуль	Длины волн (±20 нм)	Динамический диапазон, дБ	Мертвая зона по событию (EDZ), м	Мертвая зона по затуханию (ADZ), м
MOT200-20VD	1310/1550	45/43	1	12
MOT200-30VC	1310/1490/1550	38/37/37	1,5	12
MOT200-31VC	1310/1550/1625	38/37/37	1,5	12
MOT200-32VC	1310/1383/1550	38/37/37	1,5	12
MOT200-40VC	850/1300/1310/1550	18/22/38/37	7 / 1,5	20 / 12
MOT200-41VC	1310/1490/1550/1625	38/37/37/37	1,5	12
Тип излучателя	LD			

Тип адаптера	FC/PC (сменные SC,ST)
Максимальная дистанция	240 км
Погрешность измерения расстояний	±(1 м + дистанция $\times 10^{-5}$ + шаг дискретизации)
Погрешность измерения затухания	±0,05 дБ/дБ
Погрешность измерения отражения	±4 дБ
Визуализатор дефектов	Выходная мощность ≥ –3 дБм; частота модуляции 1 Гц; дальность действия 5 км

Дифрактометр (*дифракционный измеритель размеров, лазерный дифракционный измеритель*) – оптический измерительный прибор, предназначенный для измерения размеров по результатам анализа дифракционной картины, сформированной измеряемым объектом. Схематический вид такой измерительной установки приведен на рис. 2.3.43.



а *б*

Рис. 2.3.43. Оптическая принципиальная схема дифрактометра (*а*): *1* – лазер; экспандер, состоящий из: *2* – микрообъектива, *3* – точечного отверстия, *4* – коллимирующего объектива; *5* – измеряемый объект – винт с резьбой; *6* – фурье-объектив; *7* – матричный фотоприемник; *б* – изображение резьбы, зарегистрированное матричным приемником в фокальной плоскости [64]

Принцип действия дифрактометра основан на использовании для измерения размера объекта его дифракционной картины Фраунгофера, формируемой в задней фокальной плоскости линзы, установленной за объектом. Это означает, что если у объекта имеется некий характерный размер a, периодически повторяющийся

на объекте, то в результате дифракции на такой квазипериодической структуре в диаграмме рассеяния формируется ярко выраженный лепесток под углом

$$\theta = \lambda/a, \tag{2.3.52}$$

где λ – длина волны освещающего лазера.

Лучи, отклоненные предметом на угол θ, формируют в задней фокальной плоскости объектива *б* четко локализованное пятно. Координата центра этого пятна x связана с размером a очевидным соотношением

$$x = \theta \cdot f' = \frac{\lambda \cdot f'}{a}, \tag{2.3.53}$$

где f' – заднее фокусное расстояние объектива *б*. Измеряя характерные размеры картины x, можно вычислить по формуле (2.3.53) соответствующие геометрические размеры объекта a. При этом в качестве параметров используются λ и f'.

Таким образом, данная схема иллюстрирует тот известный факт [19], что в задней фокальной плоскости объектива *б* формируется пространственно-частотный спектр пропускания объекта, размещенного в передней фокальной плоскости, т.е. объектив *б* осуществляет преобразование фурье-функции пропускания объекта. В этом смысле объектив *б* называется ***фурье-объективом***. Таким образом, при регистрации картины в задней фокальной плоскости с помощью матричного приемника регистрируется спектр мощности пропускания объекта – ***дифракционная картина Фраунгофера***. Поэтому в точке с координатой x регистрируется интенсивность гармоники с пространственной частотой $\left(\frac{\lambda \cdot f'}{a}\right)^{-1}$, соответствующей характерному размеру a (усредненному по протяженности объекта среднему периоду) функции пропускания.

В реальных устройствах не все так просто, поскольку эта методика имеет ряд ограничений:

– фурье-объектив должен иметь разрешение, достаточное для того, чтобы пятна, соответствующие гармоникам разного порядка для одного размера a, были четко разделены в изображении спектра мощности объекта;

– фурье-объектив должен иметь плоское поле изображения в пределах протяженности регистрируемого матричным приемником фурье-образа;

– регистрируемые гармоники объекта, соответствующие разным размерам a, должны быть достаточно разделены друг от друга в фокальной плоскости в целях их уверенной регистрации.

Отсюда следует, что параметры устройства и параметры объекта должны быть увязаны между собой. Поэтому до сих пор не существует универсальных дифрактометров для контроля геометрических размеров, а наибольшее распространение эти приборы получили для измерения малых квазипериодических объектов.

Пример 2.3.16. Лазерный дифракционный анализатор размеров частиц ВТ-2001 (рис. 2.3.44) предназначен для анализа порошков сухим и мокрым методом следующих материалов (URL: http://www. analizator.su):

– применение сухого метода анализа:

• анализ различных магнитных порошков, таких как кобальт, железо, и других мягких магнитных материалов, сильных магнитных материалов, ферромагнитных материалов и т.д.,

• анализ порошков, которые не подходят для мокрого теста, таких как цемент, лекарства, медицинские материалы и т.д.,

• анализ порошков, обладающих гидрофобными свойствами, таких как минералы и органические соединения;

– применение мокрого метода анализа (потоковая ячейка):

• анализ неметаллических порошков талька, каолина, графита, волластонита, брусита, барита, слюды, бентонита, карбоната кальция,

• анализ металлических порошков, таких как алюминий, цинк, молибден, вольфрам, магний, медь, редкоземельные сплавы и т.д.,

• анализ других порошков, таких как катализаторы, абразивы, пестициды, порошков для нанесения покрытий, красителей, фосфор, речной ил, керамических материалов, эмульсии и т.п.;

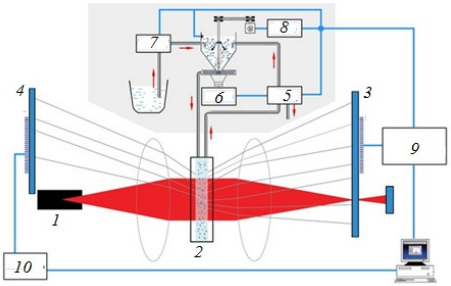
– применение мокрого метода анализа (стандартная ячейка):

• анализ драгоценных образцов, таких как алмазы, металлические порошки и т.д.,

• образцы небольшого количества: различные образцы металлических, неметаллических порошков и т.д.



а



б

Рис. 2.3.44. Дифракционный анализатор частиц BT-2001: *а* – внешний вид; *б* – схема работы мокрого метода анализа размеров частиц: *1* – полупроводниковый лазер; *2* – камера с образцом; *3*, *4* – массив фотодетекторов; *5*, *8* – контроллер; *6* – ультразвуковой рассеиватель; *7* – насос; *9* и *10* – система управления передачи и преобразования данных (URL: http://www. analizator.su)

В инструменте реализован ряд передовых технологий, в том числе:

– полупроводниковый лазер с длительным сроком службы (25 000 ч) и высоким уровнем монохроматичности;

– фотоэлектрические матричные приемники по специально разработанным ASIC-технологиям;

– два режима подачи образца перистальтическим циркуляционным насосом и стандартная маленькая камера образца;

– алгоритм анализа по полной теории рассеяния Ми.

Прибор имеет следующие технические возможности:

– «сухой» метод анализа размеров частиц:

○ диапазон размеров частиц	0,1–1000 мкм
○ воспроизводимость	менее 3%
○ погрешность измерений	менее 3%
○ мощность ультразвука	50 Вт
○ дисперсная среда	сжатый воздух или инертный газ
○ скорость потока воздуха	400–6000 л/мин
○ давление настраиваемое	0,1–0,8 МПа
○ требуемый объем образца	5–20 г

– «мокрый» метод анализа размеров частиц:

○ диапазон размеров частиц	0,1–1000 мкм
○ воспроизводимость	менее 1%
○ погрешность измерений	менее 1%
○ мощность ультразвука	50 Вт
○ объем сосуда	500 мл
○ скорость циркулирующего потока	500–2500 мл/мин
○ скорость мешалки	500–2500 об/мин

В обоих случаях используется операционная система: Windows XP / Windows 7, протокол связи USB, фотодетекторы: всего 80 шт., передних – 72, задних – 8.

2.3.8. Интерферометры

Интерферометром называется измерительный прибор, позволяющий получать измерительную информацию из интерференционной картины, образованной в результате интерференционного сложения двух и более волн в некоторой области физического пространства, общего для всех взаимодействующих волн. Интерференционная картина регистрируется с помощью квадратичного детектора, представляющего собой, например, фотоприемное устройство (см. раздел 2.3.1).

Интерферометры различаются по:

– длине волны взамодействующего излучения и бывают оптическими, инфракрасными, акустическими, радио-, рентгеновскими, СВЧ и т.д.;

– виду и конструкции фотоприемного устройства: визуальные, фотоэлектрические, фотоэлектрические сканирующие и т.д.;

– источнику света и соотношению рабочего и эталонного плечей: лазерный, двухдлинноволновой, широкополосный, неравноплечий и т.д.;

– количеству интерферирующих волн: двухлучевые, многолучевые;

– конструкции светоделительного элемента, определяющего взаимное расположение плечей. Плечи могут быть разнесены в пространстве под каким-либо углом, например 90°, или совмещены.

Эти принципиальные технические особенности конструкции определяются решаемой измерительной задачей и находят свое отражение в наименовании интерферометра. Иногда эти особенности заменяются фамилией человека, впервые предложившего ту или иную схему интерферометра.

В рамках настоящей книги уже рассматривались интерферометры Майкельсона для различных применений в разделах 1.3 и 2.3.5, здесь же ограничимся несколькими конструкциями, нашедшими применение в задачах оптического производственного контроля. При этом, не вдаваясь в детали, касающиеся физических понятий, таких как интерференция, длина когерентности, аберрации, волновой фронт и т.д., будем предполагать, что читатель имеет базовое образование, т.е. знаком с курсом физической и геометрической оптики.

Ключом для понимания процессов в интерферометре является уравнение интерферограммы, описывающее распределение интенсивности света $I(x,y)$ в плоскости формирования интерференционной картины, называемой областью локализации или плоскостью ее (картины) регистрации:

$$I(x,y) = a_{\text{э}}(x,y)\cdot a_{\text{э}}^{*}(x,y) + a_{\text{р}}(x,y)\cdot a_{\text{р}}^{*}(x,y) - \\ -2\cdot\sqrt{a_{\text{э}}(x,y)\cdot a_{\text{э}}^{*}(x,y)\cdot a_{\text{р}}(x,y)\cdot a_{\text{р}}^{*}(x,y)}\times \\ \times\cos\left(\varphi_{\text{э}}(x,y)-\varphi_{\text{р}}(x,y)\right), \tag{2.3.54}$$

где $a_э(x,y)$, $a_р(x,y)$ – комплексные амплитуды волновых фронтов, пришедших в плоскость регистрации интерференционной картины соответственно из эталонной и рабочей ветвей интерферометра; * – знак комплексного сопряжения; $\varphi_э(x,y)$, $\varphi_р(x,y)$ – фазы волновых фронтов, пришедших в плоскость регистрации интерференционной картины соответственно из эталонной и рабочей ветвей интерферометра.

В интерференционном эксперименте регистрируется структура интерференционных полос, конфигурация и форма которых зависят от разности фаз:

$$\Delta\varphi(x,y) = \varphi_э(x,y) - \varphi_р(x,y). \tag{2.3.55}$$

Таким образом, обрабатывая интерференционную картину визуально либо аппаратурно, мы получаем информацию именно об этой разности фаз. Однако целью любого интерференционного эксперимента является информация о фазовом набеге $\Delta\varphi_р(x,y)$, возникшем в предметном плече, по сравнению с эталонным, при условии того, что вся оптика интерферометра изготовлена идеально, включая поверхность эталона. Из общих соображений ясно, что

$$\frac{\lambda}{2\pi}\Delta\varphi(x,y) = \frac{\lambda}{2\pi}\Delta\varphi_р(x,y) + \Delta W(x,y), \tag{2.3.56}$$

где

$$\Delta W(x,y) = \\ = W\left(R_э, R_{кд}, D_э, D_{кд}, W_э(x,y), W_{оа}^{осв}(x',y'), W\left(R_{кд}\right)_{оа}^{p} - \right. \\ \left. - W(R_э)_{оа}^{э}\right), \tag{2.3.57}$$

есть погрешность интерференционных измерений;

$R_э, R_{кд}, D_э, D_{кд}$ – геометрические параметры интерферометра; $W_э(x,y)$ – остаточная аберрация, связанная с погрешностью изготовления эталона; $W_{оа}^{осв}(x',y')$ – остаточная (остаток от расчета и погрешность изготовления) волновая аберрация, связанная с осветительной частью интерферометра, включающей в себя общие оптические поверхности; $W(R_э)_{оа}^{э}$ – остаточная (остаток от расчета и погрешность изготовления) волновая аберрация, связанная с эта-

лонной частью интерферометра, включающей в себя только оптические поверхности, расположенные в эталонной части; $W\left(R_{\text{кд}}\right)_{\text{оа}}^{p}$ – остаточная (остаток от расчета и погрешность изготовления) волновая аберрация, связанная с рабочей частью интерферометра, включающей в себя только оптические поверхности, расположенные в рабочей части.

$\Delta W(x,y)$ можно считать важнейшей метрологической характеристикой интерферометра для оптического производственного контроля. Обычно предполагается, что $\Delta W(x,y)=0$, однако в случае высокоточных измерений, когда погрешность обработки измерительной информации становится очень малой, пренебрегать вышеописанными составляющими погрешности нельзя. Если зависимость (2.3.57) известна, т.е. существует модель интерферометра, по заданной величине $\Delta W(x,y)$ определяются требования к конструктивным особенностям прибора. Эта модель может быть теоретической (пример 2.3.19) или цифровой, основанной на алгоритме расчета хода луча через оптическую систему интерферометра (пример 3.3.3).

Иинтерферометр Физо. Пример оптической схемы интерферометра Физо приведен на рис. 2.3.45.

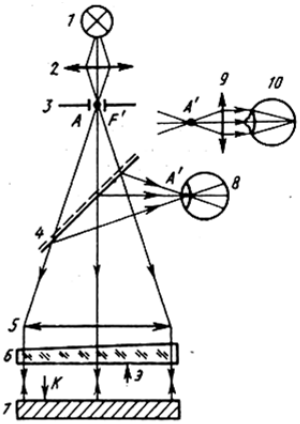


Рис. 2.3.45. Принципиальная схема классического интерферометра Физо для визуального контроля плоских поверхностей

Он состоит из монохроматического источника света *1* (ртутная или натриевая лампа, в современных приборах лазерный осветитель), конденсора *2* и диафрагмы *3*, установленной в заднем фокусе F' коллиматорного объектива *5*. За объективом расположена клиновидная пластина *6*, нижняя поверхность которой *Э* выполнена эталонной. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива *5*, поступает на эталонную поверхность пластины *6* и, частично отражаясь от нее, проходит к контролируемой плоской поверхности *К* детали *7*. После отражения от контролируемой поверхности лучи света идут в обратном направлении (волновой фронт от контролируемой поверхности или предметный или референтный волновой фронт накладываются на лучи, отраженные от эталонной поверхности пластины (эталонный волновой фронт), и интерферируют с ними. Полупрозрачная пластина *4* служит для направления лучей в зрачок глаза *8* наблюдателя, с центром которого совмещена точка *A′,* являющаяся изображением центра *A* диафрагмы *3*. В этом положении глаза наблюдатель рассматривает интерференционную картину, локализованную в воздушном зазоре между поверхностями *Э* и *К*. Величина воздушного зазора определяется длиной когерентности источника света. Для получения интерференционной картины контролируемая поверхность должна располагаться параллельно эталонной поверхности, что проверяется по совмещению автоколлимационных изображений диафрагмы *3*, наблюдаемых глазом *10* с помощью сменного окуляра *9*. В этом случае реализуется ***настройка на бесконечную полосу***. Для получения более детальной информации о поверхности осуществляется ***настройка интерферометра на полосы*** (вводится клин) посредством небольшого наклона контролируемой детали.

Пример 2.3.17. На рис. 2.3.46 показаны примеры картин, наблюдаемых в интерферометре Физо.

При этом цена полосы или кольца принимается:

– при контроле деталей на отражение

$$\Delta N = \frac{\lambda}{2}, \tag{2.3.58}$$

– при контроле деталей на просвет

$$\Delta N = \frac{\lambda}{2} \cdot (n-1), \tag{2.3.59}$$

где λ – длина волны источника света в инерферометре; *n* – показатель преломления стекла, из которого изготовлена контролируемая деталь.

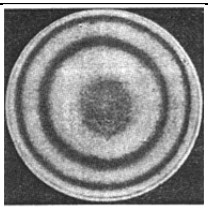
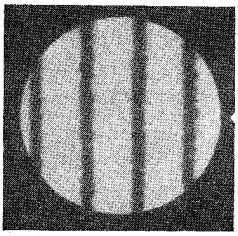
	Поверхности параллельны друг другу, автоколлимационные рефлексы совмещены, контролируемая отражающая поверхность имеет стрелку прогиба относительно эталона (общую ошибку). Разность стрелок составляет 3,5 кольца или 1,75 λ
	Поверхности не параллельны друг другу, в промежутке имеется воздушный клин, автоколлимационные рефлексы немного не совмещены, контролируемая отражающая поверхность имеет наклон α относительно эталона. При этом $\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{4\left(\lambda/2\right)}{D}$, где *D* – диаметр контролируемой поверхности. Погрешность выполнения формы поверхности визуально не наблюдается, т.е. не хуже 0,1 полосы или $\lambda/20$ по амплитуде ошибки
	Поверхности не параллельны друг другу, в промежутке имеется воздушный клин, автоколлимационные рефлексы немного не совмещены, контролируемая отражающая поверхность имеет наклон α относительно эталона. При этом $\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{5\left(\lambda/2\right)}{D}$, где *D* – диаметр контролируемой поверхности. Контролируемая поверхность имеет ярко выраженную местную ошибку амплитудой 0,5 полосы или $\lambda/4$ в центре детали, проявляющуюся в центральной области размером $0{,}25D$

Рис. 2.3.46. Интерференционные картины, полученные в интерферометре

Качество поверхности оценивают по виду интерференционной картины, локализованной в воздушном зазоре между контролиру-

емой и эталонной поверхностями. Интерференционную картину можно получить в виде замкнутых колец или полос.

Погрешность измерений отклонений формы поверхности на интерферометрах типа Физо зависит от ряда факторов:

– отклонение эталонной поверхности от идеальной формы;

– погрешность визуальной оценки значения искривления интерференционных полос.

Достигаемая на практике погрешность составляет приблизительно 0,05–0,1 ширины полосы.

Среди этих факторов нет остаточной аберрации освещающей ветви интерферометра, поскольку последняя является общей для предметного и эталонного волновых фронтов. В этом основное достоинство и отличие подобных интерферометрических схем. Это отличие называется ***устойчивостью к остаточным аберрациям*** освещающей ветви, а схемы интерферометров – ***схемами с совмещенными ветвями.***

Интерферометр Ньютона – разновидность интерферометра Физо, содержащая две оптические полированные поверхности, находящиеся в контакте. Простейший вариант такого устройства для контроля оптических поверхностей по методу пробных стекол с использованием частично-когерентного освещения представлен на рис. 2.3.47.

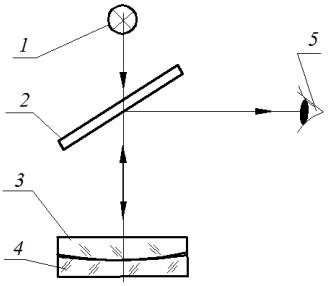


Рис. 2.3.47. Схема интерферометра Ньютона [30] для визуального контроля оптических деталей с помощью накладных пробных стекол: *1* – монохроматический источник света (тепловой источник, снабженный светофильтром); *2* – светоделитель; *3* – пробное стекло; *4* – контролируемая деталь; *5* – глаз наблюдателя

В силу того, что в интерферометре Ньютона расстояние между эталонной поверхностью и контролируемой равно фактически нулю, интерференционная картина наблюдается при некогерентном освещении. Монохроматический источник света в этом случае необходим лишь для того, чтобы было ясно, о какой длине волны λ идет речь в формулах (2.3.58) и (2.3.59), т.е. для определения эталона измеряемой ошибки. Помимо этого, равенство нулю расстояния между контролируемой поверхностью и эталоном делает результат измерений независимым от величины остаточной аберрации $W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')$, а следовательно, согласно (П.154), и фокусности освещающего пучка лучей.

При этом есть две неприятные особенности:

– необходимость накладывать эталон на измеряемую поверхность, что влечет за собой риск повреждения поверхности;

– необходимость для каждого радиуса кривизны иметь свою контролируемую поверхность с тем же радиусом кривизны, но противоположным по знаку, – ***пробное стекло*** (раздел 3.3.2).

Неравноплечий лазерный интерферометр для контроля вогнутых сферических поверхностей представлен на рис. 2.3.48. Эту схему в оптической литературе часто называют ***интерферометром Тваймана–Грина***, хотя это не совсем так, поскольку классический интерферометр Тваймана–Грина предполагает плоские волновые фронты в предметном и рабочем плечах. Несмотря на это уточнение, для краткости будем придерживаться общепринятого наименования. В отличие от вышеописанных приборов здесь в качестве источника используется лазер. Это позволяет увеличить разность плеч интерферометра до длины временной когерентности этого лазера (если это позволяют вибрационная обстановка и средства вибрационной защиты) и соответственно расширить диапазон радиусов вогнутых измеряемых деталей.

Здесь изображено: лазер *1*, микрообъектив *2*, превращающий параллельный пучок в сферический сходящийся, а после т. F' – в расходящийся. С помощью светоделительного кубика *7* пучок делится на два. Один из них направляется в ветвь сравнения с эталонной сферой *5*, другой – в рабочую ветвь с проверяемой поверхностью *9*. Центры кривизны обеих сфер совмещены с фокусом F' микрообъектива *2*.

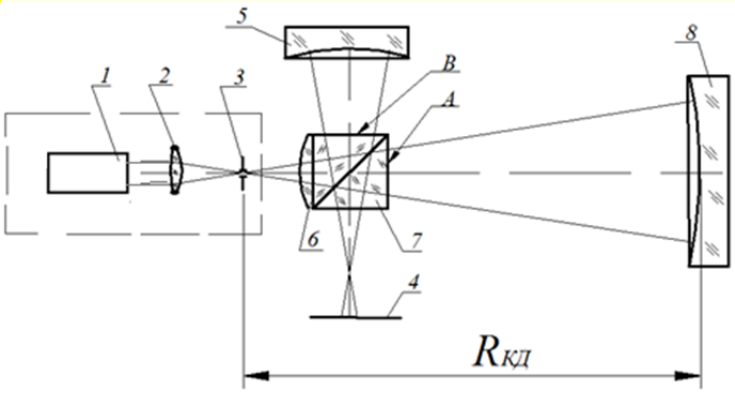


Рис. 2.3.48. Оптическая схема неравноплечего визуального лазерного интерферометра Тваймана–Грина с корректором остаточной аберрации

После отражения от сферических поверхностей пучки совмещаются и образуют интерференционную картину, которая наблюдается глазом на матовом экране *4* или с помощью телевизионной камеры. Настраивая положение контролируемой детали, добиваются минимальной кривизны интерференционных полос. При правильной настройке интерферометра искривления полос относят за счет искажения формы контролируемой детали.

Особенностью рассматриваемой здесь схемы является наличие корректора сферической аберрации светоделительного кубика, выполненного в виде плосковыпуклой линзы с целью уменьшения $W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')$.

Пример 2.3.18. В работе [52] рассмотрен неравноплечий лазерный интерферометр со следующими конструктивными характеристиками:

– длина волны освещающего лазера 632 нм;

– диаметр эталонного зеркала – $D_{\text{э}} = 80$ мм; $R_{\text{э}} = 80$ мм;

– относительное отверстие контролируемых деталей от 1:5 до 1:1;

– радиусы кривизны контролируемых деталей $R_{\text{кд}} = -60$ мм÷ −10 000 мм;

– размер грани светоделительного кубика, изготовленного из стекла К8, – 30 мм;

– расстояние от точечной диафрагмы 3 до передней грани кубика – 35,2 мм.

Остаточная сферическая аберрация откорректирована с помощью положительной линзы, приклеенной к передней грани кубика. Параметры корректора: стекло – К8, $R_1 = 295{,}8$ мм, $R_2 = \infty / d = 7$ мм. В табл. 2.3.13 представлены результаты расчета, подтверждающие:

– коррекционные возможности такого светоделителя, проявляющиеся в том, что максимальное значение остаточной аберрации осветительной ветви $|W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')|$ уменьшилось с величины 7,508 мкм до 2,872 мкм;

– уменьшение максимального значения погрешности интерференционных измерений на полной апертуре и на полной длине рабочей ветви от значения $\Delta W_{\max}$ = 0,149 мкм = $\lambda/4$ до $\Delta W_{\max}$ =0,007 мкм = $\lambda/90$.

Таблица 2.3.13

Коррекционные возможности светоделителя неравноплечего лазерного интерферометра

$R_{\text{кд}}$,мм		–60	–80	–1500	–3000	–10000
Светоделитель без корректирующей линзы	$W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')$, мкм	–7,459	–7,508	–7,65	–7,654	–7,657
	ΔW_{max}, мкм	0,079	0	0,142	0,146	0,149
Светоделитель с корректирлинзой	$W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')$, мкм	–2,87	–2,872	–2,874	–2,875	–2,879
	ΔW_{max}, мкм	0,002	0	0,002	0,003	0,007

В отличие от интерферометров с совмещенными ветвями в интерферометре Тваймана–Грина предметная и эталонная ветви пространственно разделены, следовательно, соответствующие волновые фронты проходят по разным траекториям и через разные оптические поверхности, поэтому их остаточные аберрации могут существенно различаться. В частности (рис. 2.3.48), в предметном пучке расположена поверхность В светоделительного кубика, а в

референтном – поверхность А. Поскольку они разные, то и качество их изготовления будет по-разному сказываться на результатах измерений. А это означает, что требования к качеству изготовления этих поверхностей такие же, как и для эталонной. Следовательно, в случае интерферометра Тваймана–Грина имеет место ***неустойчивость к остаточным аберрациям***.

На рис. 2.3.49 приведена оптическая схема ***лазерного интерферометра с совмещенными ветвями для контроля сферических поверхностей***.

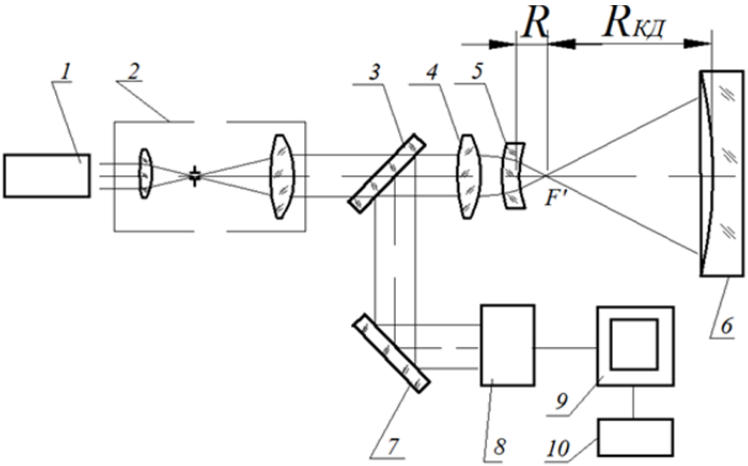


Рис. 2.3.49. Принципиальная схема лазерного интерферометра с совмещенными ветвями с фотоэлектрической регистрацией интерферограммы и их последующей цифровой обработкой для контроля сферических поверхностей

Пучок света от лазерного источника *1* проходит через коллиматор *2*, светоделительную пластину *3* и фокусируется объективом *4* в точке *F′*. За объективом расположен ***апланатический мениск*** (см. рис. П.9) таким образом, что его последняя поверхность имеет центр кривизны в точке *F′*. Эта же поверхность является эталонной. При таком расположении апланатический мениск не вносит искажений в освещающую волну и формирует эталонный волновой фронт. Контролируемая поверхность *6* располагается на рас-

стоянии R_0 от точки F', где R_0 – радиус контролируемой детали. Поэтому освещающая волна падает на контролируемую поверхность также нормально и, отражаясь от нее, повторяет свой путь, образуя после преломления на эталонной поверхности предметный волновой фронт. Предметный и эталонный фронты взаимодействуют, образуя интерференционную картину. Последняя регистрируется с помощью устройства наблюдения, в качестве которого используется телевизионная камера *8* с монитором *9*. Для получения объективной информации видеосигнал обрабатывается компьютером *10*.

В отличие от интерферометра Ньютона подобный прибор применим для контроля большой номенклатуры оптических поверхностей при одной эталонной. Их диапазон ограничен передним рабочим отрезком $R_{эг}$ для выпуклых и длиной временной когерентности лазера для вогнутых поверхностей. Предметная и эталонная ветви пространственно совмещены, следовательно, соответствующие волновые фронты проходят по одним траекториям и через одни и те же оптические поверхности, поэтому их остаточные аберрации практически одинаковы. Поэтому схема интерферометра с совмещенными ветвями устойчива к остаточным аберрациям.

Пример 2.3.19. В работе [53] показано, что волновая аберрация $W_{оа}^{осв}(x',y')$ волнового фронта радиуса R и диаметром D с относительным отверстием $\frac{D}{R}$ на расстоянии ΔR получает приращение (трансформируется) ΔW_{max}, которое может быть оценено с помощью соотношений:

– для сферического волнового фронта

$$\Delta W_{max} \approx 310 \frac{|R \cdot \Delta R|}{|R - \Delta R|} \cdot \left(\frac{W_{оа}^{осв}(x',y')_{max}}{D} \right)^2; \qquad (2.3.60)$$

– для плоского волнового фронта

$$\Delta W_{max} \approx 94 \frac{|\Delta R|}{2} \cdot \left(\frac{W_{оа}^{осв}(x',y')_{max}}{D} \right)^2. \qquad (2.3.61)$$

Эти формулы получены для волновой аберрации, монотонно изменяющейся по входному зрачку, т.е. волновой аберрации типа «общая ошибка» (рис. 3.3.1) и могут быть применены для исследо-

вания влияния остаточной аберрации интерферометра на качество интерференционных измерений. Для этого достаточно принять:

– радиус кривизны эталонной поверхности $R_э = R$;

– световой диаметр эталонной поверхности $D_э = D$;

– разность плеч интерферометра $|R_{к.д} - R_э| = \Delta R$.

Для визуального интерферометра с погрешностью измерений $\Delta W_{доп} = 2\Delta W_{max} = \lambda/20$ и с эталонной поверхностью $D_э = 30$ мм, $R_э = 30$ мм, получим для ΔR = 200 мм допуск на величину остаточной аберрации осветительной ветви интерферометра:

$$W_{оа}^{осв}(x', y')_{max} = 30\sqrt{\frac{\lambda/40\,|30-200|}{310\cdot 30\cdot 200}} = 7{,}1 \text{ мкм}, \qquad (2.3.62)$$

при этом принято λ = 0,63 мкм.

При одинаковых параметрах этот допуск на остаточную аберрацию осветительной ветви для разных интерферометров распределяется следующим образом:

– для неравноплечего интерферометра (рис. 2.3.48) делится между 5 общими поверхностями осветительной ветви;

– для интерферометра с совмещенными ветвями (рис. 2.3.49) – между 9 общими поверхностями осветительной ветви.

Однако, помимо этого, следует учесть:

– в неравноплечем интерферометре допуск на остаточную аберрацию, связанную с изготовлением эталонной поверхности $W_э(x,y) = \lambda/40$, допуск на остаточную аберрацию $W(R_э)_{оа}^{э} = \lambda/40$, связанную с погрешностью изготовления поверхности *B* эталонной ветви, допуск на остаточную аберрацию $W(R_{кд})_{оа}^{р} = \lambda/40$, связанную с погрешностью изготовления поверхности *A* рабочей ветви;

– в интерферометре с совмещенными ветвями допуск на остаточную аберрацию, связанную с изготовлением эталонной поверхности $W_э(x,y) = \lambda/40$.

Поскольку все эти составляющие погрешностей являются независимыми и случайными (с точки зрения их возникновения), суммируем их по формуле (1.2.5) и получим:

– для неравноплечего интерферометра

$$W = \sqrt{(\Delta W_{max})^2 + \left(W_э(x,y)\right)^2 + (W(R_э)_{оа}^{э})^2 + \left(W(R_{к.д})_{оа}^{р}\right)^2} = \qquad (2.3.62а)$$

$$= \sqrt{\left(\lambda/40\right)^2 + \left(\lambda/40\right)^2 + \left(\lambda/40\right)^2 + \left(\lambda/40\right)^2} = \lambda/20;$$

– для интерферометра с совмещенными ветвями

$$W = \sqrt{(\Delta W_{max})^2 + \left(W_э(x,y)\right)^2} = \sqrt{\left(\lambda/40\right)^2 + \left(\lambda/40\right)^2} = \lambda/28{,}5. \qquad (2.3.62б)$$

Таким образом, в конечном счете для интерферометра с совмещенными ветвями допуски на качество изготовления поверхностей получаются менее жесткими, чем в случае неравноплечего интерферометра, несмотря на более сложную оптическую схему, что и указывает на его большую устойчивость к остаточным аберрациям.

К характеристикам интерферометров, влияющим на метрологические характеристики, следует отнести:

– диапазон контролируемых радиусов кривизны $R_{к.д}$;

– радиус кривизны эталонной поверхности $R_э$;

– длину волны источника света и характеристики ее стабильности;

– относительное отверстие эталонной поверхности $\frac{D_э}{R_э}$;

– величину остаточной аберрации интерферометра W_{max};

– погрешность исполнения эталонной поверхности и оптических поверхностей ΔW_{max}, различных для разных плеч интерферометра и совпадающих с погрешностью измерений прибора в целом;

– виброустойчивость.

Однако последние три момента нуждаются в дополнительных разъяснениях в связи с цифровыми интерферометрами. Высокоточный цифровой интерферометр может быть создан двумя путями:

– посредством ужесточения допусков на компоненты оптической схемы и соответственно технологического уменьшения остаточной аберрации,

– посредством учета и последующей цифровой коррекции погрешностей изготовления, остатков от расчета, словом, всего того, что называется остаточной аберрацией.

Первый путь рассмотрен выше, в примере 2.3.19. Здесь остановимся на некоторых моментах, связанных с учетом остаточной аберрации. Рассмотрим рис. 2.3.50, где представлена схема, пояс-

няющая механизм образования интерференционной картины в интерферометре с остаточной волновой аберрацией. В плоскости формирования изображения *И* встречаются лучи, отраженные от эталона (помечен одной стрелкой) и от контролируемой детали (помечен двумя стрелками). То, какой луч (с двумя стрелками) из освещающего пучка встретится с лучом с одной стрелкой, зависит от длины рабочей ветви, т.е. радиуса $R_{к.д}$. Ситуация выглядит так, что волновая аберрация освещающего волнового фронта как бы перемещается по эталонной поверхности после прохождения рабочей ветви – ***трансформируется***.

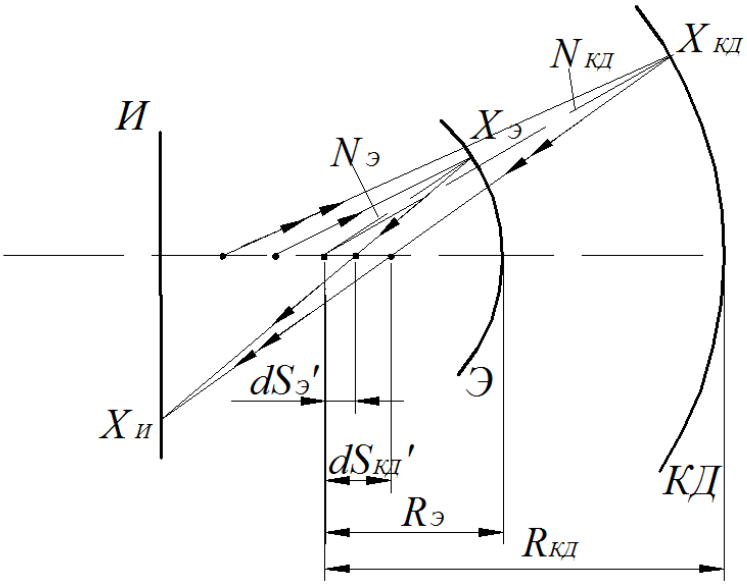


Рис. 2.3.50. К вопросу о трансформации остаточной аберрации на длине рабочей ветви интерферометра. *И* – плоскость локализации интерференционной картины; $X_и$ – точка изображения, в которой сходятся луч с одной стрелкой от точки $X_э$ эталонной поверхности и луч с двумя стрелками от точки $X_{кд}$. dS', $dS'_{кд}$ – продольные аберрации соответствующих лучей после отражения; $R_э$ и $R_{кд}$ – радиусы соответствующих поверхностей. Штриховая линия – нормали к поверхностям в точке падения освещающих лучей

Пример 2.3.20. В работе [54] рассмотрено влияние остаточной аберрации интерферометра на погрешность интерференционных измерений. На рис. 2.3.51 представлен графический материал, показывающий, что:

– такая зависимость существует;

– она существенна для высокоточных цифровых измерений;

– не следует выполнять интерференционные измерения в диапазоне

$$R_{\text{к.д}} < \frac{R_{\text{э}},}{5}. \qquad (2.3.63)$$

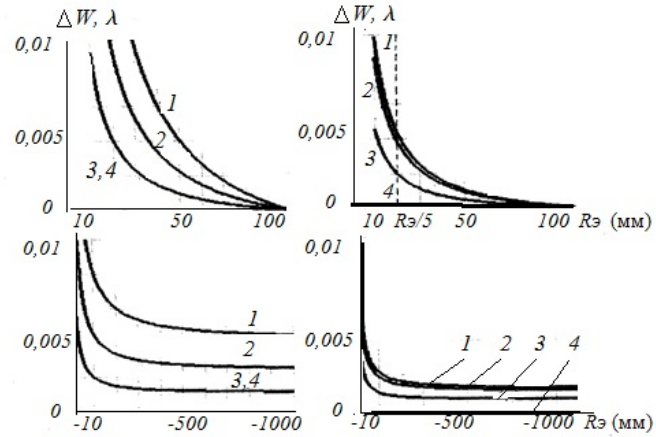


Рис. 2.3.51. Зависимость разности волновых аберраций предметного и опорного волновых фронтов для интерферометра с совмещенными ветвями при диаметре эталона 100 мм, радиусе эталона 100 мм, остаточной аберрации 2λ: *1* – для сферической аберрации; *2* – для комы; *3* – для астигматизма; *4* – для кривизны; *а*, *в* – в плоскости Гаусса; *б*, *г* – в плоскости наилучшей установки; *а*, *б* – для выпуклых; *в*, *г* – для вогнутых

По большому счету это зависит и от положения плоскости формирования изображения – ***плоскости локализации***, но в работе [55] показано, что эта зависимость настолько слабая, что можно считать ее ничтожной (менее $\lambda/_{1000}$).

Отсюда следуют два вывода:

– в высокоточном цифровом интерферометре с цифровой коррекцией составляющих остаточной аберрации (в этом случае она имеет характер систематической погрешности) алгоритм обработки должен учитывать механизм трансформации остаточной аберрации. С этой целью необходимо:

- достоверно знать (измерить) значения всех составляющих $W_{\text{оа}}^{\text{осв}}(x', y')$, $W_{\text{э}}(x, y)$, $W(R_{\text{э}})_{\text{оа}}^{\text{э}}$, $W\left(R_{\text{кд}}\right)_{\text{оа}}^{\text{р}}$, характеристики интерферометра, влияющие на его метрологические характеристики,
- пересчитывать ошибку волнового фронта, зарегистрированного интерферометром, в отклонения формы поверхности с учетом ее расположения, пользуясь моделью интерферометра;

– показания такого ***идеального интерферометра*** не зависят от положения плоскости наблюдения, поэтому с целью обеспечения стабильности метрологических характеристик целесообразно фиксировать ее на выходном зрачке эталонной поверхности.

Виброустойчивость – способность интерферометра формировать устойчивую контрастную картину независимо от вибрационной обстановки. На первый взгляд, эта способность больше относится к эксплуатационным параметрам, нежели к метрологическим. Однако это не совсем так, поскольку погрешность интерференционных измерений, как визуальных, так и цифровых, сильно зависит от контраста картины. А при вибрациях в результате расплывания полос контраст снижается.

Достигается виброустойчивость интерференционных измерений с помощью определенных технических приемов, а именно:

– размещение интерферометра непосредственно на контролируемой поверхности – ***накладной интерферометр***;

– вертикальная компоновка интерферометра;

– размещение интерферометра на специальном основании, имеющем средства вибрационной защиты;

– активная виброзащита, предполагающая адаптивное изменение какого-либо параметра интерферометра по какому-либо параметру обратной связи. Например, изменение длины волны полупроводникового лазера таким образом, чтобы центральная полоса интерференционной картины была неподвижна;

– уменьшение времени регистрации интерферограмм до величины, много меньшей периода колебаний.

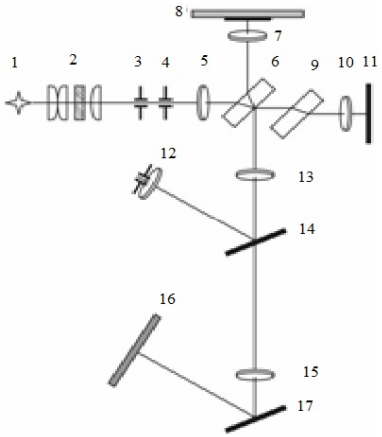
Микроинтерферометр – интерферометр, предназначенный для наблюдения и регистрации интерференционных картин от шероховатой поверхности малой (микромасштаб размера исследуемой области) протяженности. Классическим примером такого прибора является ***микроинтерферометр Линника***, приведенный на рис. 2.3.52. Это интерферометр по схеме Майкельсона с некогерентным, монохроматическим (частично-когерентным) освещением, со светоделительной пластиной и с идентичными микрообъективами в рабочей и референтной ветвях с возможностью визуальной и фотографической регистрации интерференционных картин.

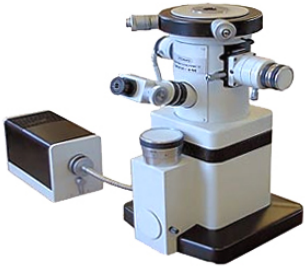
Микрообъектив, введенный в схему интерферометра Майкельсона, дает возможность перейти к макромасштабу поверхности, т.е. придать прибору функции микроскопа с тубусом, равным ∞. Для осуществления наводки этого микроскопа прибор имеет микровинт перемещения микрообъектива *7*. Вопрос о локализации полос интерференционной картины в таком микроскопе-интерферометре является очень важным ввиду частичной когерентности источника света. Область локализации является очень малой и равна длине когерентности этого источника, сформированного в области диафрагмы *3*, и должна совпадать с плоскостью продольной наводки микрообъектива *7*. Для продольной наводки области локализации прибор имеет микровинт регулировки наклона компенсационной пластины *9*, наклоном которой и осуществляется настройка совмещения области локализации полос с плоскостью продольной наводки.

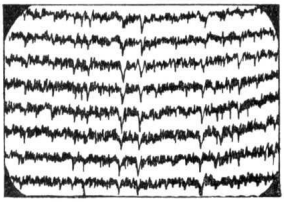
Отраженные от проверяемой поверхности *6* и от зеркала *11* пучки лучей, пройдя микрообъективы *7* и *10*, соединяются полупрозрачным слоем пластины *8* и с помощью объектива *13* и зеркала *14* направляются в окуляр *12*. В фокальной плоскости окуляра наблюдают изображение проверяемой поверхности и систему интерференционных полос на ней.

Форма полосы в крупном масштабе воспроизводит профиль контролируемого участка поверхности. Величину искривления полос оценивают на глаз или измеряют винтовым окулярным микрометром. Ширину и направление полос можно менять, смещая объектив *10*

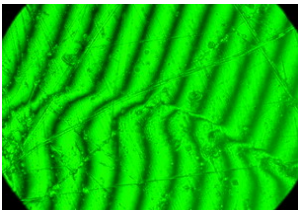
перпендикулярно его оптической оси. Регистрацию интерференционной картины в кадровом окне *16* осуществляют объективом *15* с помощью зеркала *17*. Зеркало *14* при этом из хода лучей выводят.







18



19

Рис. 2.3.52. Микроинтерферометр Линника МИИ-4М (URL: http://www.eurolab.ru): *1* – тело накала некогерентного источника света; *2* – конденсор с вырезающим светофильтром; *3* – апертурная диафрагма; *4* – диафрагма поля зрения; *5* – коллимирующий объектив; *6* – измеряемый образец; *7* – микрообъектив предметной ветви; *8* – светоделительная пластина; *9* – компенсационная пластина для выравнивания длины плеч; *10* – микрообъектив референтной ветви; *11* – эталонная поверхность; *12* – окуляр; *13* – объектив микроскопа; *14* – зеркало переключения визуального и видеоканалов; *15* – объектив видеокамеры; *16* – плоскость фотоприемной матрицы; *17* – поворотное зеркало видеоканала; *18* – поле зрения микроинтерферометра при настройке многолучевой интерференции; *19* – поле зрения микроинтерферометра в режиме цветной видеорегистрации двухлучевой интерференции

Микроинтерферометр обладает высокой устойчивостью к остаточной аберрации, связанной с остатком от расчета, поскольку ветви имеют принципиально равную длину (так как источник света некогерентный). Остаточная аберрация, связанная с погрешностями изготовления, является очень малой ввиду того, что световые диаметры оптических поверхностей малы (микро). По этим причинам высокие метрологические характеристики обеспечиваются достаточно простыми средствами. Основные недостатки интерферометра Линника – малый размер исследуемой области за одну установку. Это касается как направления в глубину, т.е. вдоль оптической оси, так и направления вдоль образца – по его поверхности.

Эта задача решается в современных цифровых приборах с организацией цифровой обработки интерферограмм, автоматического сканирования поверхности как по глубине – перемещением области локализации, так и вдоль поверхности и последующего цифрового сшивания результатов отдельных измерений. Пример реализации такой информационно-измерительной системы – ***интерференционный микроскоп-профилометр*** МНП – приведен на рис. 2.3.53, возможности прибора – на рис. 2.3.54.

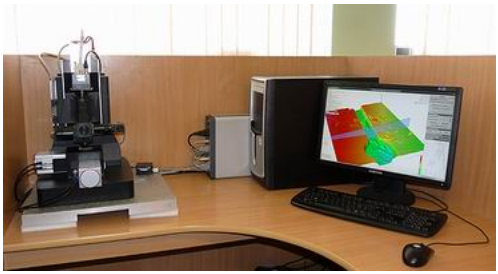
Принцип действия прибора [56] основан на использовании интерференции частично-когерентного света. Измерение в одной позиции производится посредством сканирования рельефа измеряемой поверхности по высоте продольных наводок. При измерении используется как амплитудная, так и фазовая информация автокорреляционной функции интерферирующего света. Такой принцип позволяет производить измерения в широком диапазоне и решать большинство измерительных задач как в производстве, так и в научных исследованиях. Способ измерения профиля поверхности включает получение набора интерферограмм контролируемой поверхности при сканировании ее низкокогерентным источником излучения и восстановление по ним исходного профиля контролируемой поверхности.

При этом с получением каждой основной интерферограммы снимают дополнительную интерферограмму при сдвиге опорной поверхности на дробную часть длины волны, после чего из сигна-

ла основной интерферограммы вычитают сигнал дополнительной интерферограммы с получением дифференциальной интерферограммы. А по полученным дифференциальным интерферограммам восстанавливают исходный профиль контролируемой поверхности. Для измерения больших площадей производится продольное сканирование поверхности посредством двухкоординатного автоматизированного предметного стола поперечных наводок.



Технические характеристики	
Измерение нанорельефа	
диапазон измерений по высоте, мкм	от 0 до 50
разрешение по высоте, нм	0,1
поперечное разрешение, мкм	0,3
зона измерения, мм^2	2,4×1,8 / 1,1×0,8 / 0,5×0,34



Измерение микрорельефа	
диапазон измерений по высоте, мм	от 0 до 10
разрешение по высоте, мкм	0,1
поперечное разрешение, мкм	1,7 / 0,8 / 0,3
зона измерения, мм^2	2,4×1,8 / 1,1×0,8 / 0,5×0,34

Рис. 2.3.53. Интерференционный микроскоп-нанопрофилометр МНП (URL: http://www.tdiscie.nsc.ru)

Микроскоп МНП работает в двух режимах:

– режим наноизмерения предназначен для измерения высоты рельефа поверхностей высокого класса чистоты с разрешением менее 0,1 нм в диапазоне от 0 до 50 мкм;

– режим микроизмерения предназначен для измерения высоты рельефа «грубых» поверхностей в диапазоне от 0 до 10 мм с разрешением менее 0,1 мкм.

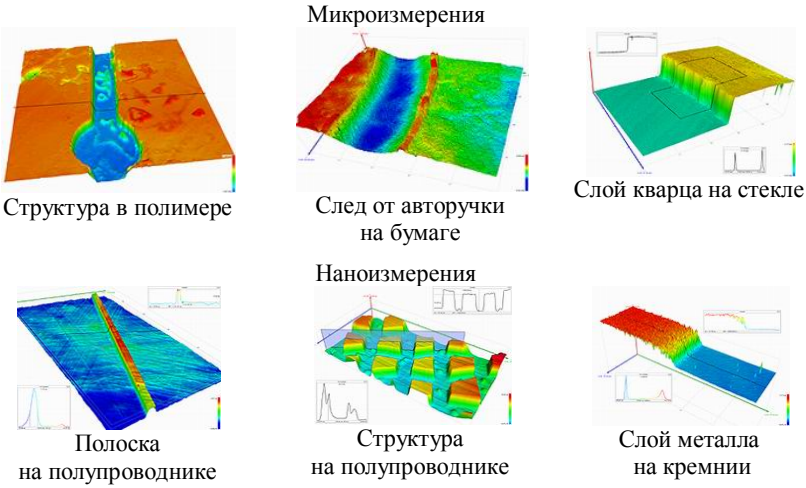


Рис. 2.3.54. Возможности МНП (URL: http://www.tdiscie.nsc.ru)

Отличительные особенности прибора:

– компактность;

– высокое быстродействие;

– устойчивость к внешним вибрациям;

– высокая степень автоматизации процесса измерения;

– развитый программный интерфейс пользователя;

– высококачественный графический интерфейс для работы с многоплановыми 3D-представлениями результатов измерения;

– широкие возможности настройки микроскопа на разные типы морфологии измеряемых поверхностей;

– возможность работы в двухволновом режиме;

– автоматизированное позиционирование объекта измерения по трём координатам;

– возможность измерения больших площадей путём сшивки результатов отдельных измерений;

– уникальная система хранения и систематизации результатов измерения.

Для контроля формы оптических поверхностей может быть использован метод голографической интерферометрии. Пример схемы такого ***голографического интерферометра*** приведен на рис. 2.3.55.

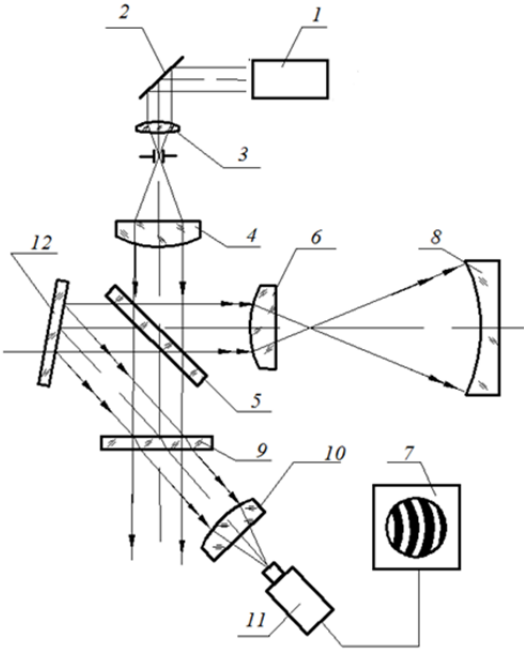


Рис. 2.3.55. Принципиальная схема голографического интерферометра

Монохроматическое излучение лазера *1* с помощью линз *3*, *4* и диафрагмы *3* преобразуется в параллельный пучок и поступает на светоделитель *5*, где делится на два пучка – опорный и рабочий. Последний (с двумя стрелками на рис. 2.3.55) формируется с помощью объектива *6* и идет к образцовой детали *8*. Отражается от нее в автоколлимации, проходит светоделитель *5* и падает на фотопластинку *9*. На нее же приходит опорный пучок, помеченный на рис. 2.3.55 одной стрелкой. Зарегистрированная на фотопластинке картина представляет собой голографическую запись волновых фронтов, участвующих в интерференции.

После фотохимической обработки фотопластинки получают голограмму и устанавливают ее в схему интерферометра в позицию *9*, а образцовую деталь *8* заменяют проверяемой. При включении лазерного освещения опорный пучок восстанавливает с голограммы предметный, зарегистрированный при экспозиции голограммы и выполняющий функцию референтного, а пучок, отраженный от контролируемой детали, создает предметный пучок. В результате на экране видеоконтрольного устройства наблюдают интерференционную картину, по виду которой определяют отклонение проверяемой поверхности от образцовой. В такой схеме коррекция остаточных аберраций производится абсолютно (с точностью до погрешностей, связанных с обработкой голограммы), если радиус контролируемой детали совпадает с радиусом эталонной. Но при изменении радиуса контролируемой детали влияние остаточной аберрации будет расти так же, как в любом интерферометре с совмещенными ветвями. Поэтому возможность контроля большой номенклатуры оптических деталей в голографическом интерферометре с большими остаточными аберрациями может быть обеспечена с помощью достаточного количества эталонов. Выбор диапазона действия эталонов – длины рабочей ветви – может быть произведен на основании соотношений (2.3.60), (2.3.61).

Понятно, что форма волнового фронта, идущего от образцовой поверхности, может быть определена теоретически точно. Поэтому интерференционная картина, возникающая в плоскости фотопластинки, может быть рассчитана, а голограмма изготовлена с помощью технологий фотолитографии. Такие голограммы называют ***синтезированными***. Возможность применения синтезированных голограмм вместо образцовых оптических элементов является важным преимуществом голографических интерферометров и обеспечивает большое разнообразие схемных решений. Это целая отрасль научного приборостроения, относящаяся к нанотехнологиям и включающая в себя вопросы технологий, материаловедения, средств измерений, высокоточного (прецизионного) оборудования и средств автоматизации (URL: http://www.tdiscie.nsc.ru).

Интерферометр Фабри–Перо – многолучевой интерференционный спектральный прибор с двумерной дисперсией, обла-

дающий высокой разрешающей способностью. Интерферометр Фабри–Перо представляет собой плоскопараллельную пластину из оптически однородного прозрачного материала (чаще всего воздуха), ограниченного отражающими плоскостями (рис. 2.3.56).

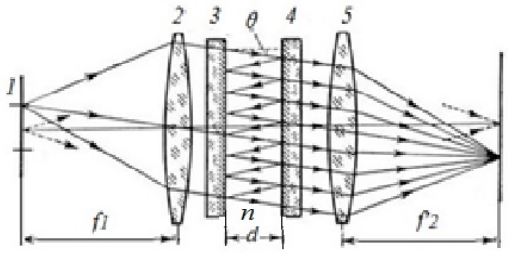


Рис. 2.3.56. Схема интерферометра Фабри–Перо: *1* – диафрагма; *2*, *5* – коллиматорный объектив; *3*, *4* – эталонные плоскости

На обращённые друг к другу эталонные плоскости *3*, *4* (изготовленные с погрешностью до 0,01 длины волны) нанесены высокоотражающие покрытия. Интерферометр располагается между коллиматорными объективами *2* и *5*. В фокальной плоскости входного объектива устанавливается освещённая диафрагма *1*, служащая источником света для интерферометра. Плоская волна, падающая на интерферометр Фабри–Перо, в результате многократных отражений от зеркал и частичного выхода после каждого отражения разбивается на большое число плоских когерентных волн, отличающихся по амплитуде и по фазе. Амплитуда когерентных волн убывает по закону геометрической прогрессии, а разность фаз между каждой соседней парой когерентных волн, идущих в данном направлении, постоянна и равна согласно (2.3.43)

$$\Delta\varphi = \left({}^{4\pi}/_{\lambda}\right) nd \cdot \cos\theta,$$

где n – показатель преломления среды, расположенной между зеркальными поверхностями пластин интерферометра; d – расстояние между этими поверхностями; λ – длина волны излучения, вышедшего из интерферометра; θ – угол преломления лучей пучка внутри интерферометра.

Пройдя через выходной объектив *5*, когерентные волны интерферируют в его фокальной плоскости F и образуют пространственную интерференционную картину в виде колец равного наклона (рис. 2.3.57). Распределение освещённости в интерференционной картине при $n = 1$ описывается с учетом (2.3.42) и (2.3.43) выражением

$$E(\theta,\lambda) = E_0 \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2\left(2\pi \cdot d \cdot \cos\theta / \lambda\right)}, \qquad (2.3.64)$$

где E_0 – освещенность фокальной плоскости второго коллиматорного объектива в отсутствие интерферометра; $\tau_{\text{опт}} = \tau_{\text{пл1}} \cdot \tau_{\text{пл2}} \cdot \tau_n$ – пропускание оптических сред компонентов, составляющих интерферометр; $\tau_{\text{пл1}}$ – пропускание оптической среды первой пластины; $\tau_{\text{пл2}}$ – пропускание оптической среды второй пластины; τ_{n} – пропускание оптической среды между пластинами; R – коэффициент отражения пластин.

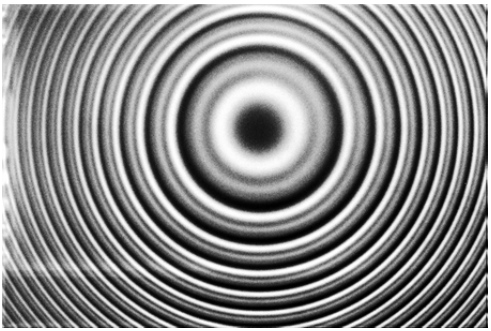


Рис. 2.3.57. Структура интерференционных полос в фокальной плоскости выходного коллиматора. Интерференционные кольца отображают тонкую структуру излучения переохлажденного дейтерия (URL: http://www.wikipedia.org)

Распределение освещенности имеет осциллирующий характер с резкими максимумами интенсивности (см. рис. 2.3.57) в виде концентрических колец, радиус хребта которых определяется из условия

$$r_m = f'_2 \cdot \text{tg}\theta_{\max} = f'_2 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{2d}\right)^2}}{\frac{m\lambda}{2d}}, \qquad (2.3.65)$$

где θ_{max} – угол наклона, при котором наблюдается максимум освещенности, определяемый согласно рис. 2.3.33 из условия $\cos\theta_{max} = \frac{m\lambda}{2d}$; m – номер кольца – ***порядок спектра***. Для освещенности в экстремальных точках из (2.3.64) получим:

– в максимумах

$$E(\theta_{max}, \lambda) = E_0 \cdot \tau_{опт}, \tag{2.3.66}$$

– в минимумах

$$E(\theta_{min}, \lambda) = E_0 \cdot \tau_{опт} \cdot \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R}, \tag{2.3.67}$$

и тогда имеем выражение для контраста интерференционных колец:

$$K = \frac{1 - \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R}}{1 + \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R}} = \frac{2R}{(1-R)^2 + 2R}. \tag{2.3.68}$$

Соотношение (2.3.65) может быть использовано для измерения длины волны излучения, образовавшего интерференционную картину. Если в фокальной плоскости второго коллиматорного объектива разместить матричный фотоэлектрический приемник, то такой фотоэлектрический интерферометр Фабри–Перо может быть легко автоматизирован для решения спектроскопических измерительных задач посредством косвенных измерений. Искомой величиной при этом является длина волны λ, измеряемой величиной диаметр кольца интерференционной картины $2r_m$. В качестве параметров используются: номер кольца m, фокусное расстояние коллиматорного объектива f'_2 и расстояние между пластинами d.

Из (2.3.64) по аналогии с (2.3.46) имеем предел спектрального разрешения интерферометра Фабри–Перо:

$$\Delta\lambda_{min} = \frac{\lambda^2 \cdot \frac{1-R}{\sqrt{R}}}{2\pi \cdot d \cdot \cos\theta}. \tag{2.3.69}$$

Соотношение (2.3.69) – метрологическая характеристика интерферометра Фабри–Перо как спектрального прибора.

ГЛАВА 3. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ

Жизненный цикл оптических приборов, в том числе оптико-механических, оптико-электронных и для оптических измерений, состоит из трех основных этапов: проектирование, изготовление и эксплуатация. Получение данных об оптическом приборе, подтверждающих его работоспособность на всех стадиях его жизненного цикла в рамках, предписанных проектом, осуществляется в результате технологических операций, которые в совокупности называются ***оптическим производственным контролем***.

Методы и средства измерений, связанные с обеспечением этих технологических операций, рассматриваются в этом разделе.

3.1. Измерение оптических характеристик оптических материалов

Согласно ГОСТ 3514–94 «Стекло оптическое бесцветное. Технические условия» к характеристикам оптических материалов, влияющих на качество оптических приборов, относятся:

– показатель преломления – n_e для спектральной e линии ртути с длиной волны λ_e = 546,07 нм, представляющей собой середину видимого диапазона длин волн и соответствующей максимальной чувствительности глаза человека;

– коэффициент дисперсии (П.129), определяемый соотношением

$$\nu = \frac{n_1 - 1}{n_2 - n_3},$$

по результатам измерения показателей преломления:

- n_2, n_3 – для длин волн, ограничивающих диапазон спектра,
- n_1 – для длины волны, расположенной в середине диапазона;

– показатель ослабления;

– оптическая однородность;

– двулучепреломление;

– бессвильность;

– пузырность.

Следовательно, все эти характеристики должны быть измерены в процессе производства оптических материалов и при входном контроле в процессе изготовления оптического элемента. Методы и методики измерения этих характеристик описаны в соответствующих документах:

– ГОСТ 28869–90 «Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления»;

– ГОСТ 3520–92 «Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления»;

– ГОСТ 3518–80 «Материалы оптические. Метод определения оптической однородности на коллиматорной установке»;

– ГОСТ 3519–91 «Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления»;

– ГОСТ 3521–81 «Материалы оптические. Методы определения бессвильности»;

ГОСТ 3522–81 «Материалы оптические. Методы определения пузырности».

Здесь ограничимся их кратким описанием.

Гониометрические методы измерения показателя преломления основаны на том, что из исследуемого материала изготавливается призма и с помощью оптического гониометра (см. раздел 2.3.3) измеряются преломляющие свойства этой призмы. Выделение той или иной длины волны света, распространяющегося в призме, производится с помощью монохроматора, используемого в качестве источника света гониометра, – ***гониометра-спектрометра.***

Гониометрический метод наименьшего отклонения основан на измерении угла минимального отклонения луча призмой с по-

мощью стандартного гониометра. Несложно показать, что при нормальном падении луча на биссектрису преломляющего угла призмы – θ угол ε отклонения лучей призмой имеет минимальное значение из всех возможных.

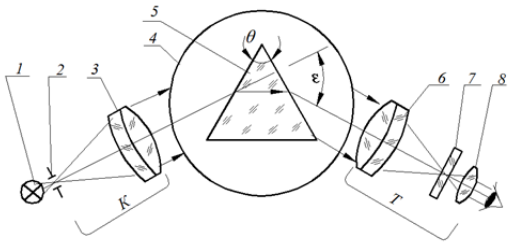


Рис. 3.1.1. Измерение угла наименьшего отклонения призмой освещающего пучка лучей на просвет

В этом случае показатель преломления призмы n связан с углами θ и ε зависимостью, описываемой соотношением

$$n = \sin\left(\frac{\theta+\varepsilon}{2}\right)/\sin\frac{\theta}{2}. \qquad (3.1.1)$$

Применяя к этой формуле логарифмическое дифференцирование, получим соотношение для оценки погрешности измерения показателя преломления этим методом:

$$\sigma_n = \frac{n}{2}\sigma_\theta\sqrt{2\mathrm{tg}^2\frac{\theta+\varepsilon}{2} + \mathrm{ctg}^2\frac{\theta}{2}}, \qquad (3.1.2)$$

где σ_n, σ_θ, σ_ε – среднеквадратичные погрешности измерения соответственно показателя преломления n и углов θ и ε. При этом предполагается, что углы θ и ε измерены с помощью одного и того же измерительного прибора, и тогда $\sigma_\theta = \sigma_\varepsilon$.

На практике часто используют соотношение, называемое ***формулой Погарева***, для определения погрешности измерения:

$$\sigma_n = \Delta n = {}^{0{,}0002}/_{l}, \qquad (3.1.3)$$

где l – длина основания призмы, выраженная в миллиметрах.

Призма имеет два положения, при которых имеет место угол наименьшего отклонения: основанием вниз, как на рис. 3.1.1, и основанием вверх. Эта особенность схемы может быть использована для уменьшения погрешности посредством измерения удвоенного угла наименьшего отклонения.

Гониометрический автоколлимационный метод также основан на принципе измерения преломляющего угла θ призмы и установке призмы в положение наименьшего отклонения. Разница заключается в том, что преломляющий угол призмы и ее основание здесь вдвое меньше, и установка призмы в положение наименьшего отклонения достигается автоматически совмещением автоколлимационного изображения щели зрительной трубы от второй грани (рис. 3.1.2) со штрихом сетки без использования коллиматора.

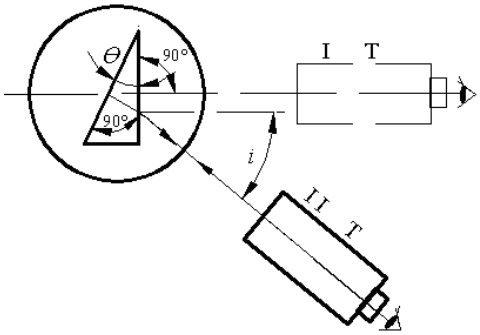


Рис. 3.1.2. Измерение угла наименьшего отклонения призмой освещающего пучка лучей на отражение или, что то же самое, в автоколлимации

Для уверенного наблюдения автоколлимационного изображения на соответствующую грань призм наносят отражающее покрытие.

Если преломляющий угол – θ, а угол, под которым наблюдается автоколлимационное изображение, – i, то показатель преломления рассчитывается по формуле

$$n = \sin i / \sin \theta. \qquad (3.1.4)$$

Применяя к этой формуле логарифмическое дифференцирование, получим соотношение для оценки погрешности измерения показателя преломления этим методом:

$$\sigma_n = n\sigma_\theta\sqrt{\mathrm{ctg}^2 i + \mathrm{ctg}^2\theta}, \qquad (3.1.5)$$

где σ_n, σ_θ, σ_i – среднеквадратичные погрешности измерения соответственно показателя преломления n и углов θ и i. При этом предполагается, что углы θ и i измерены с помощью одного и того же измерительного прибора, и тогда $\sigma_\theta = \sigma_i$.

Метод наименьшего отклонения и метод автоколлимации осуществляются на гониометре-спектрометре с погрешностью, не превосходящей величины $\sigma_n = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$. При этом предполагается, что погрешность измерения углов на гониометре не превосходит величины $\sigma_\theta = 2'' = 10^{-5}$ рад.

Рефрактометрические методы основаны на том, что из исследуемого материала изготавливается образец в виде плоскопараллельной пластины, и показатель преломления этого образца измеряется с помощью рефрактометров (см. раздел 2.3.7), с использованием явления полного внутреннего отражения на границе раздела двух сред: измеряемого образца и образцовой призмы рефрактометра. Рабочий образец размещается на образцовой призме. В зависимости от рабочего преломляющего угла θ образцовой призмы рефрактометра (рис. 3.1.3) различают рефрактометрический метод Аббе и рефрактометрический метод Пульфриха.

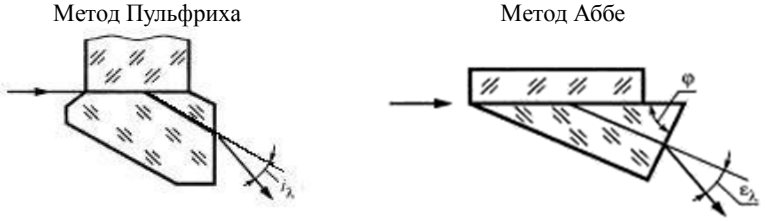


Рис. 3.1.3. Рефрактометрические методы измерения показателя преломления стеклянных образцов, выполненных в виде плоскопараллельных пластин. ИРФ 45, ИРФ 22 – отечественные рефрактометры, на которых реализованы соответствующие методы

При θ = 90° – рефрактометр Пульфриха, а при θ = 60° – рефрактометр Аббе, помимо этого, между измеряемым показателем преломления n и показателем преломления n_0 образцовой призмы должно выполняться соотношение $n_0 > n$.

В рефрактометре измерению подлежит угол преломления ε, под которым выходит из образцовой призмы луч, испытавший полное внутреннее отражение от границы раздела измеряемого образца и образцовой призмы рефрактометра.

Связь между измеряемой величиной n и измеряемым параметром ε задается с помощью соотношений:

– для рефрактометра Пульфриха

$$n = \sqrt{n_0^2 - \sin^2\varepsilon}; \tag{3.1.6}$$

– для рефрактометра Аббе

$$n = 0{,}5\sqrt{3(n_0^2 - \sin^2\varepsilon)} - \sin\varepsilon. \tag{3.1.7}$$

Поскольку $n_0^2 > 1 > \sin^2\varepsilon$, а погрешность σ_{n_0}, с которой известен показатель преломления n_0 образцовой призмы, либо заведомо очень мала, либо известна и может быть учтена как систематическая погрешность, можно записать для погрешности рефрактометрического измерения показателя преломления:

$$\sigma_n \cong \frac{\sin 2\varepsilon}{2n}\sigma_\varepsilon. \tag{3.1.8}$$

Соотношение (3.1.8) применимо для всех рефрактометрических схем и показывает, что при одинаковых погрешностях угломерного устройства погрешность измерения показателя преломления рефрактометрическим методом существенно меньше, нежели при измерениях гониометрическим методом.

Для удобства размещения образца, снижения опасности повреждения образцовой призмы в промежуток между образцом и призмой вводится иммерсионная жидкость с показателем преломления $n_0 < n_ж < n$. Наличие иммерсионной жидкости не сказывается на результатах измерений показателя преломления образца в том случае, если иммерсионная жидкость имеет форму плоскопараллельной пластины, а не клина. Для этого в месте контакта

наблюдают интерференционную картину и ориентируют ее полосы перпендикулярно оси вращения трубы угломерного устройства.

Интерференционный метод Обреимова основан на исчезновении видимости границ образца стекла, погруженного в иммерсионную жидкость с известным показателем преломления, при условии равенства их показателей преломления при данной длине волны освещающего света. Этот метод удобен для измерения показателей преломления стекол, имеющих форму небольших осколков или линз неправильной формы, что особенно важно для стекловаренных заводов, ведущих непрерывный контроль каждой плавки, когда нет времени для изготовления специальных образцов стекла.

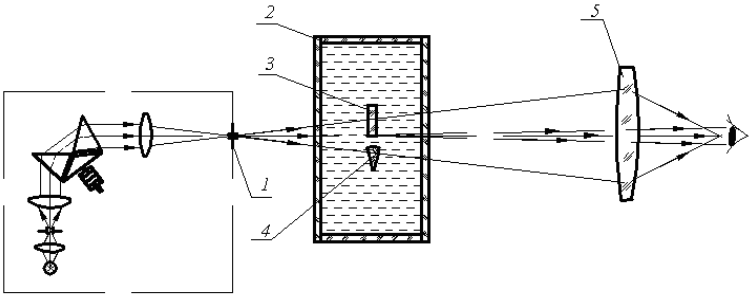


Рис. 3.1.4. Метод Обреимова измерения показателя преломления образца *4* оптического материала произвольной формы

Сущность метода Обреимова поясняется рис. 3.1.4. В кювету *2* со специально приготовленной жидкостью погружаются образец сравнения *3* и исследуемый образец пробы стекла *4*, подлежащий измерению показателя преломления.

Образцы в кювете освещаются с помощью монохроматора с выходной щелью *1*. Дисперсионные кривые жидкости, образца сравнения и пробы должны быть расположены относительно друг друга подобно приведенным на рис. 3.1.5. То есть кривая дисперсии иммерсионной жидкости должна пересекать кривые дисперсии обоих образцов, которые, в свою очередь, должны быть близки друг к другу.

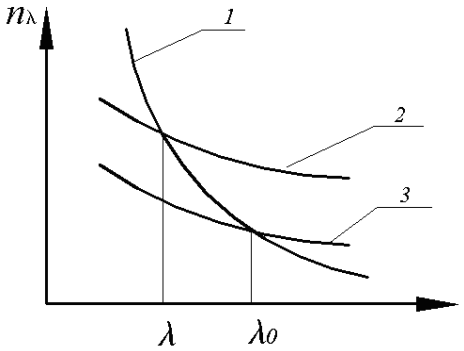


Рис. 3.1.5. Взаимное расположение кривых дисперсии $n_\lambda(\lambda)$ при реализации метода Обреимова: иммерсионной жидкости – *1*, измеряемого образца (пробы) – *2*, образца сравнения – *3*. λ_0 – длина волны освещающего света, при которой имеет место равенство показателей преломления иммерсионной жидкости и образца сравнения, т.е. образец *3* не виден. λ – длина волны освещающего света, при которой имеет место равенство показателей преломления иммерсионной жидкости и пробы, т.е. измеряемый образец не виден

В зависимости от измеряемого показателя преломления стекла иммерсионные жидкости приготавливают из составляющих, приведенных в табл. 3.1.1.

Таблица 3.1.1

Иммерсионные жидкости для метода Обреимова

Состав иммерсионной жидкости	Показатель преломления стекла
Смесь глицерина с водой	1,33...1,47
Смесь бензина с керосином	1,35...1,45
Смесь альфа-бромнафталина с керосином	1,45...1,65
Смесь альфа-бромнафталина с йодистым метиленом	1,65...1,74
Раствор серы в йодистом метилене	1,74...1,78

Этот набор жидкостей перекрывает весь диапазон оптических стекол для видимой области спектра, и выбор той или иной жидкости зависит от марки стекла, подлежащего измерению. Если показатели преломления иммерсионной жидкости и одного из образцов равны, то границы этого образца не будут видны в поле зрения

объектива *5* (см. рис. 3.1.4). Он как бы растворится в этой жидкости при освещении светом соответствующей длины волны, поскольку френелевского отражения на этой границе практически нет (П.68).

Если показатели преломления образца и иммерсионной жидкости не равны, то будут иметь место рассеяние света на границе образца и интерференция лучей, прошедших образец и прошедших только иммерсионную жидкость. В результате такой интерференции при изменении длины волны освещающего света через край этого образца будет пробегать интерференционная полоса. Светлая – если колебания синфазны, темная – в противном случае. Тогда для показателя преломления пробы $n_{\text{пр}}$ можно записать:

$$n_{\text{пр}} = n_{\text{об}} + \frac{m\lambda}{l}, \tag{3.1.9}$$

где $n_{\text{об}}$ – показатель преломления образца сравнения; m – количество интерференционных полос, прошедших через рабочее ребро образца сравнения, при изменении длины волны от λ_0 к λ; λ_0 – длина волны освещающего света, при которой имеет место равенство показателей преломления иммерсионной жидкости и образца сравнения, т.е. образец не виден; λ – длина волны освещающего света, при которой имеет место равенство показателей преломления иммерсионной жидкости и пробы, т.е. измеряемый образец не виден; l – толщина образца.

Погрешность измерений показателя преломления по методу Обреимова определяется погрешностью δm определения дробной части интерференционной полосы. Принято считать, что $\delta m = {}^{1}/_{30}$ полосы для визуальных измерений, и тогда имеем для погрешности измерения показателя преломления:

$$\Delta n_{\text{пр}} = \frac{\lambda}{30l}. \tag{3.1.10}$$

Спектрофотометрический метод измерения показателя спектрального ослабления заключается в измерении на спектрофотометре (раздел 2.3.5) спектрального коэффициента пропускания τ_λ образца оптического материала и последующем расчете показателя ослабления μ_λ по формуле

$$\mu(\lambda) = -\frac{1}{s}\lg\tau_s(\lambda), \qquad (3.1.11)$$

где s – геометрическая длина образца, на которой производится измерение пропускания; $\tau_s(\lambda)$ – спектральный коэффициент внутреннего пропускания образца с учетом потерь на отражение от его торцов.

На спектрофотометре измеряется не коэффициент внутреннего пропускания $\tau_s(\lambda)$, а спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$, в который входят потери на отражение от торцов образца. Поэтому методика ГОСТ 3520–92 предусматривает две возможности перехода от $\tau(\lambda)$ к $\tau_s(\lambda)$:

– учет коэффициента отражения с использованием формул Френеля;

– учет коэффициента отражения путем дифференциальных измерений на двух образцах разной длины.

Для увеличения динамического диапазона фотометрических измерений (масштаба фотометрической шкалы) для малопрозрачных материалов (в области высоких поглощений) при $\tau(\lambda) < 0{,}1$ и высокопрозрачных (в области очень малых поглощений) $\tau(\lambda) > 0{,}9$ методика предусматривает использование образцовых мер прозрачности.

Погрешность измерений с учетом этих замечаний составляет:

$$\Delta\mu(\lambda) = \frac{1}{s}\left(\frac{\Delta\tau(\lambda)}{\tau(\lambda)} + \frac{\Delta\tau_c(\lambda)}{\tau_c(\lambda)}\right)\cdot 0{,}434, \qquad (3.1.12)$$

где $\tau_c(\lambda)$ – величина пропускания образцовой меры, а $\Delta\tau_c(\lambda)$ – погрешность ее аттестации.

Метод определения оптической однородности на коллиматорной установке основан на измерении предельных углов разрешения коллиматорной установки (рис. 3.1.6). Для этого определяется угол разрешения φ_0 собственно коллиматорной установки без образца стекла при длине волны $\lambda = 0,55$ мкм, а затем угол разрешения φ с введенным в параллельный пучок лучей специально обработанным образцом стекла. Для определения разрешения используется методика со штриховой мирой Фуко (раздел 3.4.3). Категория оптической однородности по ГОСТ 23136–93

«Материалы оптические. Параметры» вычисляется с помощью соотношения

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \qquad (3.1.13)$$

Для измерений оптической однородности могут быть использованы коллиматоры и прочее оборудование оптической скамьи.

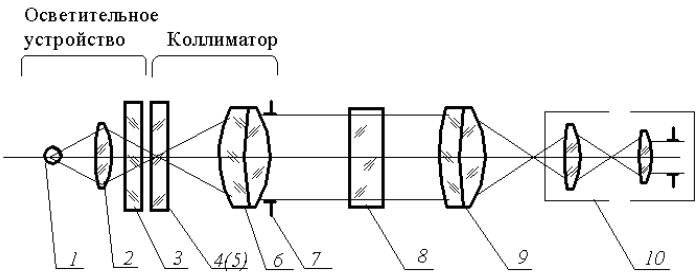


Рис. 3.1.6. Оптическая схема коллиматорной установки для определения категории оптической однородности: *1* – источник света; *2* – конденсор; *3* – светофильтр или матовое стекло; *4* – набор штриховых мир; *5* – набор точечных диафрагм; *6* – объектив коллиматора; *7* – апертурная диафрагма коллиматора; *8* – исследуемый образец стекла; *9* – объектив зрительной трубы; *10* – микроскоп

При этом для дифракционно-ограниченного объектива коллиматорной установки в соответствии с (П.112) принимается:

$$\varphi_0 = {}^{120"}/_{D},$$

где D – диаметр диафрагмы коллиматора, которая выбирается равной диаметру или наименьшей стороне прямоугольной заготовки.

Определение оптической однородности не является измерением в полном смысле этого слова, это скорее оценка, поэтому погрешность для этой характеристики не устанавливается.

Метод измерения двулучепреломления на полярископе-поляриметре основан на измерении угла поворота анализатора полярископа-поляриметра (раздел 2.3.7, рис. 2.3.40), необходимого для компенсации разности хода при двулучепреломлении в оптическом материале при длине волны λ = 0,55 мкм. Поляризатор и

анализатор находятся в скрещенном положении и образуют угол 45° с направлениями главных напряжений. Причиной двулучепреломления в стекле являются внутренние напряжения, образовавшиеся при неравномерном охлаждении расплава стекла после завершения процесса варки и отжига и приводящие к искусственной анизотропии деформаций. Категория стекла по двулучепреломлению определяется согласно ГОСТ 23136–93 «Материалы оптические. Параметры» разностью хода обыкновенного и необыкновенного лучей по формуле

$$\Delta = \Delta n \cdot l, \tag{3.1.14}$$

где Δn – разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, определенная из соотношения (2.3.50); l – толщина образца стекла.

Метод определения бессвильности стекла по оценке теневой картины, получаемой на экране проекционной установки (рис. 3.1.7), основан на визуальном наблюдении теневой картины и сравнении наблюдаемой картины свили с картиной свили контрольного образца или прямых измерениях параметров свилей. Согласно ГОСТ 23136–93 «Материалы оптические. Параметры» категории бессвильности оцениваются по длине свили, расстоянию между ними, площади занятой свилями, глубине залегания.

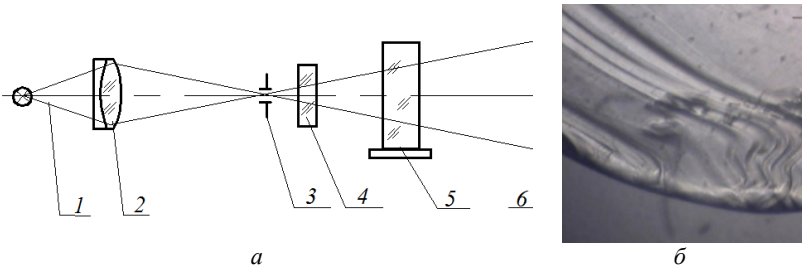


Рис. 3.1.7. Проекционная установка для наблюдения и оценки бессвильности и пузырности образцов оптического стекла по теневой картине *а*: *1* – источник излучения; *2* – конденсор; *3* – сменная диафрагма; *4* – светофильтр; *5* – держатель для образца стекла; *6* – экран; *б* – теневая картина потока свилей на краю образца

Свили – прозрачные нитевидные или слоистые участки в стекле, отличающиеся по показателю преломления от окружающей массы стекла, образуются в результате ***непровара*** массы стекла и представляют собой след мешалки.

Метод определения пузырности образца стекла путем визуального просмотра на кране теневой проекционной установки основан на визуальном наблюдении теневой картины на темном фоне и определении размеров и числа имеющихся в образце пузырей для оценки категории пузырности согласно ГОСТ 23136–93 «Материалы оптические. Параметры».

Пузырность – газовые пузыри в стекле и приравниваемые к ним включения, образующиеся в результате варки стекла.

3.2. Измерение геометрических размеров оптических деталей и систем

Геометрические размеры оптических деталей задают взаимное расположение и форму исполнительных и вспомогательных поверхностей оптических деталей. Величины этих размеров рассчитываются в процессе разработки оптических систем, отображаются в конструкторской документации на изделие и являются основным руководством для оптика в процессе изготовления оптических деталей и сборки оптических систем. Эти же значения являются основанием для выбора средств измерения по диапазону измеряемых величин в процессе производственного контроля и аттестации деталей.

Помимо номинальных значений геометрических размеров, в документации отражается диапазон допустимых значений этих параметров – поле допусков. Поле допусков также является руководством для оптика для принятия решения об окончании процесса обработки и используется для выбора средств измерения по классу точности.

К геометрическим размерам относятся параметры, характеризующие оптическую деталь: толщина, децентрировка, диаметр, размер рабочей грани, угол, радиус кривизны, фокус, фокальный отрезок.

3.2.1. Методы измерения габаритных размеров оптических деталей

Габаритные размеры оптических деталей, такие как диаметр или размер рабочей грани, определяют с помощью универсального мерительного инструмента, как-то: линейка или штангенциркуль (см. раздел 2.2.3). В особых случаях для этой цели может быть использован измерительный микроскоп (см. раздел 2.3.4). Эти измерения стандартны и не представляют особых трудностей в методическом и приборном отношении.

Другое дело – толщина. Толщина относится к оптическим параметрам, поскольку задает взаимное расположение оптических исполнительных поверхностей и должна быть выполнена с достаточно жесткими допусками.

Линзы имеют две толщины:

– толщина по краю $t_{кр}$;

– толщина по оптической оси t_o.

Толщина $t_{кр}$ является справочным, вспомогательным размером и не имеет жесткого допуска, поэтому ее в большинстве случаев не контролируют, а используют при измерении децентрировки.

Толщина t_o относится к основным оптическим параметрам и определяется расстоянием $d = t_o$ между вершинами сферических поверхностей линзы вдоль оптической оси. Допуск на толщину обычно составляет 0,1–0,01 мм.

На заготовительных операциях толщину линз измеряют скобами (см. раздел 2.2.4). Скобы не имеют отсчетных устройств для определения отклонений размеров, но позволяют определить, находится ли размер в пределах допуска. Толщину линз можно также измерить с помощью штангенциркуля или индикатора. На стадии шлифования и полирования достигается окончательное формирование толщины линзы. Для ее измерения используют гладкие микрометры (см. раздел 2.2.3) и ***толщиномеры***.

На рис. 3.2.1 приведена схема прямого измерения толщины с помощью контактного толщиномера, являющегося разновидностью длинномера (раздел 2.3.6).

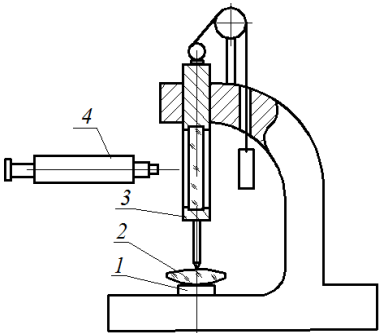


Рис. 3.2.1. Схема измерения толщины линзы с помощью контактного толщиномера: *1* – столик; *2* – контролируемая линза; *3* – стеклянная шкала; *4* – отсчетный микроскоп

Проверяемую линзу *2* помещают на столик прибора и центрируют относительно оси. Наконечник измерительного стержня приводят в соприкосновение с поверхностью линзы *2* и снимают отсчет по шкале *3* с помощью отсчетного микроскопа *4*. Второй отсчет выполняют после удаления линзы и приведения в соприкосновение измерительного стержня с опорной пятой.

Упомянутые методы являются прямыми, достаточно точными (при выборе соответствующего средства измерения), но контактными, и потому их применение может привести к повреждению полированной поверхности. От этого недостатка свободен косвенный оптический метод. С помощью горизонтального микроскопа (см. рис. 2.3.23), снабженного устройством для точного отсчета продольных перемещений, можно измерять толщины пластин, линз, воздушных промежутков путем продольной наводки на оптические поверхности, расстояние между которыми нужно измерять.

При измерении толщины плоскопараллельной пластины *2* (рис. 3.2.2, *а*) микроскоп фокусируют на поверхности P_1 и P_2.

Причем при фокусировании на P_2 предметную точку микроскопа совмещают с точкой B' – изображением точки B. Толщину линзы определяют по формуле

$$d = n \cdot z, \qquad (3.2.1)$$

где z – значение перемещения микроскопа вдоль шкалы *3*; n – показатель преломления материала пластины.

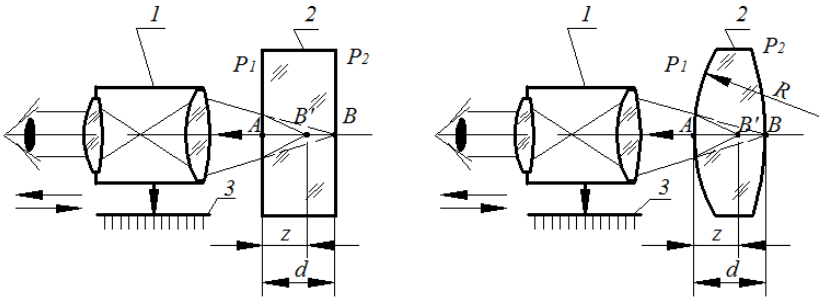


Рис. 3.2.2. Схемы измерения толщин с помощью горизонтального микроскопа: *а* – плоскопараллельной пластины; *б* – двояковыпуклой линзы

Измерение толщины линзы *2* (рис. 3.2.2, *б*) выполняют аналогичным способом с последующим вычислением по формуле

$$d = \frac{n \cdot R \cdot z}{R-(n-1)\cdot z}, \qquad (3.2.2)$$

где R – радиус кривизны поверхности P_1.

Недостатком способа является необходимость предварительного измерения конструктивных параметров n и R, входящих в расчетные формулы (3.2.1) и (3.2.2).

Для погрешности измерений толщины этим методом после логарифмического дифференцирования формул (3.2.1) и (3.2.2) и использования формулы для суммирования случайных погрешностей (1.2.5) можно записать:

– для плоских поверхностей

$$\Delta d = \sqrt{\Delta t_{\text{o}}^2(n,z) + \Delta t_{\text{o}}^2(R)}; \qquad (3.2.3)$$

– для линз

$$\frac{\Delta t_{\text{o}}}{t_{\text{o}}} \cong \frac{\Delta n}{n} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta z}{z}, \qquad (3.2.4)$$

где $\frac{\Delta t_{\text{o}}(n,z)}{t_{\text{o}}} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta z}{z}$ – относительная погрешность измерения толщины плоскопараллельной пластины, связанная с погрешностями:

- Δn – измерения показателя преломления стекла,
- Δz – продольными наводками микроскопа;

$\Delta t_o(R) \cong \frac{n\cdot(n-1)\cdot z^2}{\frac{D^2}{4\cdot N\cdot\lambda}}$ – абсолютная погрешность измерения толщины плоскопараллельной пластины, связанная с допуском на общую ошибку N изготовления первой поверхности, которая является стрелкой прогиба и приводит согласно (3.2.11) к сферической форме поверхности радиусом $\frac{D^2}{4\cdot N\cdot\lambda}$; λ = 0,55 мкм; D – световой диаметр, на котором определена ошибка N; ΔR – погрешность изготовления радиуса кривизны первой поверхности линзы.

Этот способ неприменим для деталей большой толщины, так как переднее фокусное расстояние серийных микрообъективов не превышает 30 мм.

Специализированный прибор, совмещающий в себе достоинства контактных методов и оптического, приведен на рис. 2.3.25 и представляет собой двойной автоколлимационный микроскоп, скомпонованный в схему оптического толщиномера. Измерения, выполняемые на таком приборе, являются прямыми и бесконтактными. Погрешность измерения случайна и существенно зависит от числовой апертуры объектива, поскольку последняя влияет на предел чувствительности продольных наводок. Принято считать, что погрешность измерения толщины с помощью оптического толщиномера составляет ±0,02…0,03 мм.

Воздушные промежутки между оптическими деталями в процессе сборки могут быть замерены дифференциальным методом с помощью двух индикаторных головок и приспособления, представленного на рис. 3.2.3. Это устройство содержит основание *11*, на котором закреплены: стол *10* и стойка *6* с резьбой и шпоночным пазом. Стол *1* и кронштейн *5* могут перемещаться вдоль стойки при вращении гаек *7*.

Методика измерений сводится к следующим действиям:

1. Индикаторы *3* и *9* закрепляются на кронштейне.

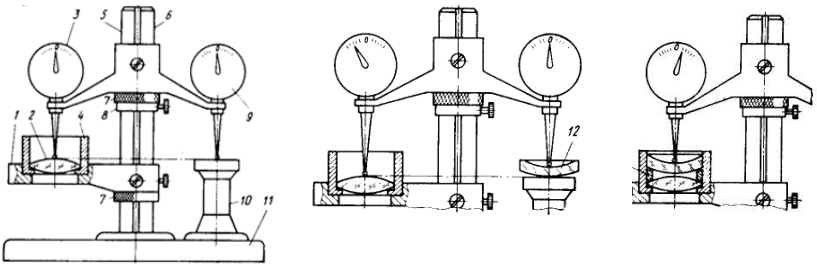
2. Оправу объектива *4* с установленной на штатное место линзой *2* располагают на столе *1* центрированно относительно измерительного стержня индикатора *3*. Стол *1* и кронштейн сдвигают с

помощью гаек *7* таким образом, чтобы оба индикатора показывали нулевые отсчеты (рис. 3.2.3, *а*).

3. Следующую линзу объектива *12* устанавливают на стол *10* центрированно относительно измерительного стержня индикатора *9* (рис. 3.2.3, *б*) и опускают кронштейн с индикаторами до тех пор, пока индикатор *9* не покажет 0. Положение кронштейна фиксируется с помощью упора *8*.

4. Приподняв кронштейн с индикаторами, вставляют в оправу штатное опорное кольцо *13* и линзу *12* со стола *1* (рис. 3.2.3, *в*).

5. Опускают кронштейн до упора *8*, отсчет по индикатору *3* равен воздушному промежутку между вершинами линз.



а *б* *в*

Рис. 3.2.3. Метод измерения воздушных промежутков между линзами в процессе сборки оптических систем

Смещение поверхностей линз в процессе изготовления называется ***децентрировкой***. Предельный размер децентрировки *с* определяет допустимое несовмещение оптической оси линзы с ее механической осью, когда центр кривизны одной из поверхностей либо оба центра не лежат на геометрической оси линзы. Децентрировку для каждой из поверхностей обычно оценивают линейным значением сдвига соответствующего центра кривизны поверхности. На рис. 3.2.4 показана децентрированная линза *3*, у которой центр кривизны O_1 поверхности *1* лежит на геометрической оси линзы.

Децентрировку в этом случае оценивают одной из следующих величин:

– сдвигом c_1 центра O_2 кривизны поверхности *2*;

– сдвигом c_2 оптической оси в задней главной плоскости H' линзы;

– наибольшей разностью толщины на краю линзы –

$$\Delta = t_{кр}^{max} - t_{кр}^{min}, \tag{3.2.5}$$

– углом наклона γ поверхности *2* вокруг ее вершины по отношению к поверхности *1* (β – угол наклона оптической оси).

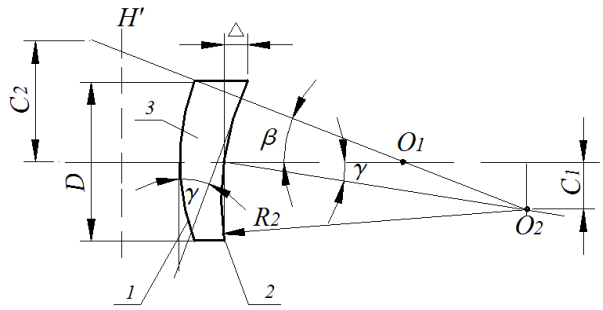


Рис. 3.2.4. Децентрированная линза

Эти величины связаны между собой приближенными соотношениями:

$$c_2 = {c_1 \cdot (n-1) \cdot f'}/{R_2} = f' \cdot \gamma \cdot (n-1), \tag{3.2.6}$$

$$\Delta \approx {c_1 \cdot D}/{R_2}, \tag{3.2.7}$$

$$\gamma = {c_1}/{R_2}, \tag{3.2.8}$$

где n – показатель преломления материала линзы; f' – заднее фокусное расстояние, R_2 – радиус кривизны поверхности *2*; D – полный диаметр линзы, $t_{кр}^{max}$ – максимальная толщина на краю линзы, $t_{кр}^{min}$ – минимальная толщина по краю линзы.

В чертеже детали указывается, какая именно из названных величин децентрировки имеется в виду.

В практике оптических измерений применяется два основных метода: контактный по разнотолщинности на краю линзы и бесконтактный – автоколлимационный.

Схема контактного измерения децентрировки Δ представлена на рис. 3.2.5. Контролируемая деталь *1* помещается нижней рабочей поверхностью на горизонтальные призмы *2* и прижимается к упорным призмам *3*. Наконечник измерительного стержня головки приводят в соприкосновение с верхней поверхностью линзы *1* и вращают ее, прижимая к упорным призмам. В процессе вращения снимают отсчеты по шкале индикатора в месте минимальной толщины – $t_{\text{кр}}^{\max}$ и в месте максимальной толщины – $t_{\text{кр}}^{\min}$. Значение децентрировки Δ определяется по формуле (3.2.5). При определенном навыке погрешность измерений определяется погрешностью индикаторной головки.

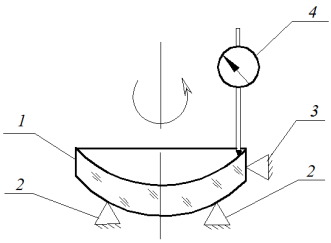


Рис. 3.2.5. Схема измерения децентрировки Δ с помощью измерительной головки: *1* – контролируемая деталь; *2* – горизонтальная призма; *3* – упорная призма; *4* – индикатор

Величину децентрировки c_1 измеряют с помощью бесконтактного устройства, получившего название ***косиномер***. Он представляет собой двойной автоколлимационный микроскоп с двумя трубками Забелина (см. раздел 2.3.4), смонтированными на общем основании (рис. 3.2.6).

Верхняя трубка состоит из источника света *1*, конденсора *2*, наклонного зеркала с прорезанным в алюминиевом слое перекрестием *3*, объектива *18*, вспомогательного объектива *4*, экрана с прозрачной шкалой в центральной части *5* и окуляра *6*. Контроли-

руемая деталь помещается рабочей поверхностью на горизонтальные призмы *15* и прижимается к упорным призмам *16*. С помощью зеркала *14* в систему введена вторая – нижняя трубка, аналогичная верхней *7–13*.

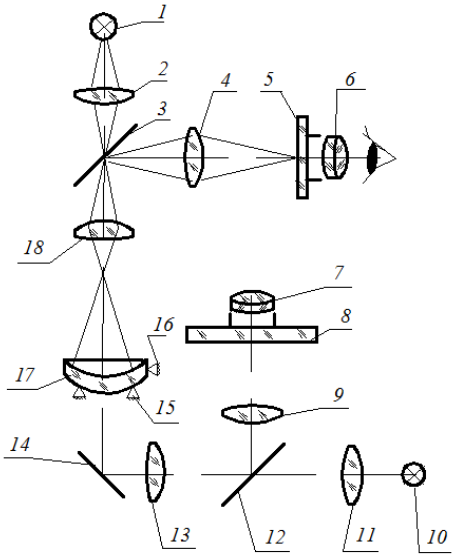


Рис. 3.2.6. Схема измерения децентрировки c_1 с помощью косиномера

Эти трубки представляют собой автоколлимационные микроскопы с переменной сходимостью, которая обеспечивается перемещением объективов *13* и *18* вдоль осей их тубусов. При измерении верхнюю трубку настраивают на центр кривизны верхней поверхности и, прижимая линзу к упорной призме, вращают ее, наблюдая за биением автоколлимационного блика. Диаметр биения равен четырехкратной децентрировке c_1. Смещение узловой точки можно измерить непосредственно в проходящих параллельных пучках. Для этого нижнюю трубку настраивают на бесконечность, верхнюю – на фокальную плоскость линзы. Диаметр биения изображения дает удвоенную величину децентрировки c_1. По-

грешность измерения связана с поперечными наводками трубок Забелина и может быть определена посредством обработки результатов измерения с учетом коэффициентов: 2 – для просветной схемы и 4 – для автоколлимационной схемы измерений.

3.2.2. Методы измерения радиусов кривизны исполнительных поверхностей

Наиболее распространенный метод измерения радиуса кривизны реализуется с помощью сферометра. Сферометр (см. рис. 2.3.36) используется в качестве средства технологического контроля в процессе изготовления оптических поверхностей. Эти измерения являются контактными и косвенными и заключаются в измерении стрелки прогиба h сферической поверхности и последующем расчете радиуса кривизны по формуле (2.3.48).

Если найти полный дифференциал формулы (2.3.48), то можно получить для погрешности измерений с помощью кольцевого контактного сферометра:

$$\Delta R = \frac{2r \cdot \Delta r}{2h} + \frac{\Delta h}{2} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{2h^2}\right) + \Delta\rho, \qquad (3.2.9)$$

где Δr – погрешность аттестации радиуса кольца; Δh – погрешность измерения стрелки прогиба на сферометре; $\Delta\rho$ – погрешность аттестации радиуса шарика.

Метод пробных стекол используется в качестве рабочего инструмента для контроля радиусов кривизны полированных поверхностей средней и высокой точности. По ГОСТ 2786–76 имеется три типа пробных стекол: рабочие (РПС), контрольные (КПС), и основные (ОПС). РПС предназначены для контроля поверхностей линз, КПС – для проверки РПС, а ОПС – для контроля КПС.

Контроль радиусов кривизны поверхностей изделий производится с помощью интерференционной картины, которая наблюдается при наложении пробного стекла на проверяемое изделие в интерферометре Ньютона (см. раздел 2.3.8). Проверка осуществляется следующим образом. Рабочие поверхности проверяемого из-

делия и пробного стекла перед выполнением контроля тщательно промываются от загрязнений и очищаются от пыли. После этого пробное стекло *2* (рис. 3.2.7) накладывают на контролируемую деталь *1* и в рассеянном отраженном свете наблюдают интерференционную картину (рис. 3.2.8), возникшую в промежутке между контактирующими поверхностями.

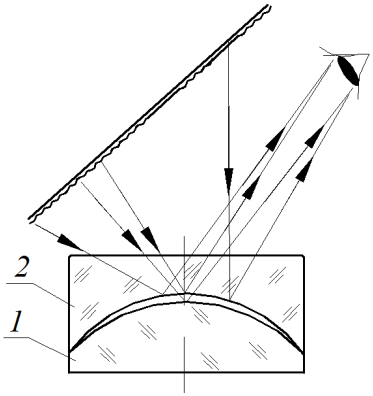


Рис. 3.2.7. Контроль радиуса кривизны пробным стеклом

При контроле методом пробного стекла допуск на отклонение формы поверхности задается числом интерференционных колец – *N*, наблюдаемых на всей проверяемой поверхности.

Для определения знака ошибки осуществляют нажим на пробное стекло, направляя усилие нажима вдоль оси изделия. При нажиме следят за движением интерференционных колец. Если кольца стягиваются к центру, то в центре имеется зазор (яма), т.е. радиус кривизны выпуклой проверяемой поверхности больше радиуса пробного стекла (для вогнутой, наоборот, $N < 0$). Если при нажиме кольца расширяются, уходя от центра, то зазор имеется на краю (ошибка – бугор, $N > 0$).

Разность стрелок прогиба пробного стекла и измеряемой детали согласно (П.169) запишем в виде

$$\Delta = \frac{D^2}{8}\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R}\right) = \frac{D^2}{8}\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0 + \Delta R}\right), \qquad (3.2.10)$$

где R_0 – радиус кривизны пробного стекла; $R = R_0 + \Delta R$ – радиус кривизны измеряемой детали; D – диаметр зоны измерения.

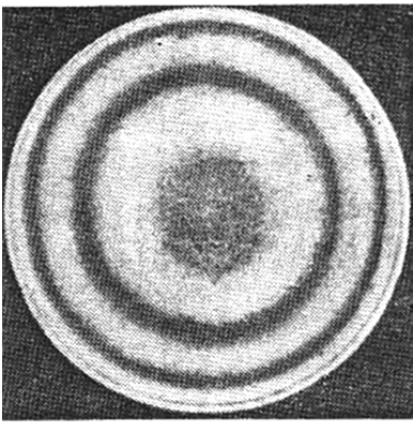


Рис. 3.2.8. Интерференционная картина при наложении пробного стекла. Общая ошибка составляет 4 кольца интерференционной картины. Разность стрелок прогиба между пробным стеклом и измеряемой поверхностью:
$\Delta = 4 \cdot {}^{\lambda}/_{2} = 1{,}08$ мкм

Приняв $|R_0| \gg |\Delta R|$, с учетом $\Delta = N\frac{\lambda}{2}$ получим формулу для расчета радиуса кривизны:

$$R = R_0 + 4N\lambda\frac{{R_0}^2}{D^2}. \qquad (3.2.11)$$

После дифференцирования (3.2.11) имеем для погрешности измерения радиуса ΔR по методу пробных стекол:

$$\Delta R = \Delta R_0\left(1 + 8\frac{R_0 N\lambda}{D^2}\right) + 4\Delta N\lambda\frac{{R_0}^2}{D^2} + 8\Delta D N\lambda\frac{{R_0}^2}{D^3}, \qquad (3.2.12)$$

где ΔR_0 – погрешность аттестации радиуса пробного стекла (определяется классом пробного стекла по ГОСТ 1807–75); ΔN – погрешность измерения общей ошибки поверхности, обычно принимаемая $\Delta N = 0{,}5 - 0{,}25$ кольца; ΔD – погрешность измерения диаметра.

Для относительной погрешности можно записать:

$$\frac{\Delta R}{R} \cong \frac{\Delta R_0}{R_0}\left(1 + 8\frac{R_0 N\lambda}{D^2}\right) + 4\Delta N\lambda\frac{R_0}{D^2} + 8\frac{\Delta D}{D}N\lambda\frac{R_0}{D^2}. \qquad (3.2.13)$$

Метод измерения радиуса сферической поверхности по кольцам Ньютона применим для измерения больших радиусов выпуклых и вогнутых сферических поверхностей. Для получения колец Ньютона на линзу *7* накладывают пластину *6* (рис. 3.2.9). Кольца наблюдают с помощью измерительного микроскопа *4*. Разность хода между интерферирующими лучами равна удвоенной величине воздушного зазора Δ_n между плоской и сферической поверхностями.

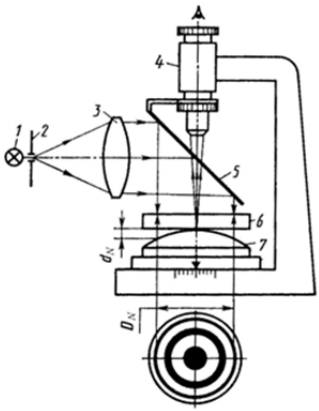


Рис. 3.2.9. Измерение больших радиусов кривизны по кольцам Ньютона с помощью измерительного микроскопа [25]: *1* – источник света; *2* – диафрагма; *3* – коллимирующий объектив; *4* – измерительный микроскоп; *5* – светоделитель; *6* – эталонная пластина; *7* – контролируемая деталь

Толщина воздушного зазора (разность стрелок прогиба) связана с порядковым номером *n* темного кольца соотношением

$$\Delta_n = {n\lambda}/{2}. \qquad (3.2.14)$$

Темное кольцо диаметром D_N соответствует воздушному зазору толщиной

$$\Delta_n = D_n^2 / 8 \cdot R, \tag{3.2.15}$$

где R – измеряемый радиус.

Отсюда получим:

$$R = D_n^2 / 4 \cdot n \cdot \lambda. \tag{3.2.16}$$

Измерив диаметр кольца D_n и зная его номер n, по формуле (3.2.16) можно вычислить радиус R сферической поверхности. Этот метод аналогичен методу пробных стекол, но в отличие от последнего предполагает использование только одного эталона с плоской поверхностью для достаточно большого класса деталей.

При размещении плоского пробного стекла на поверхности выпуклой сферы возможна деформация контролируемой детали в месте соприкосновения под весом пробного стекла. Для того чтобы эта деформация не сказывалась на погрешности измерений в виде систематической ошибки, производят измерение диаметров D_n и D_m соответственно n-го и m-го колец. Тогда из формулы (3.2.15) имеем:

$$\Delta_m - \Delta_n = D_m^2 / 8 \cdot R - D_n^2 / 8 \cdot R \tag{3.2.17}$$

и для радиуса кривизны

$$R = (D_m^2 - D_n^2) / 4 \cdot (m - n) \cdot \lambda. \tag{3.2.18}$$

После дифференцирования (3.2.18) получим для относительной погрешности измерения радиуса:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{2(D_m \Delta D_m + D_n \Delta D_n)}{(D_m^2 - D_n^2)}, \tag{3.2.19}$$

где ΔD_m и ΔD_n – соответственно погрешности поперечной наводки измерительного микроскопа на середину m-го и n-го колец.

Погрешность совмещения в i-м кольце обычно принимается равной величине

$$\Delta D_i = 0{,}2(D_{i+1} - D_i), \tag{3.2.20}$$

где $D_{i+1} - D_i$ – ширина i-го кольца.

Воспользовавшись формулами (3.2.15) и (3.2.16), получим

$$D_{i+1} - D_i \cong 2\,{}^{R\lambda}/_{D_i}\,. \tag{3.2.21}$$

После подстановки в (3.2.19) имеем для погрешности

$$\frac{\Delta R}{R} \cong \frac{0{,}2}{m-n}. \tag{3.2.22}$$

Метод измерения радиуса кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа представлен на рис. 3.2.10.

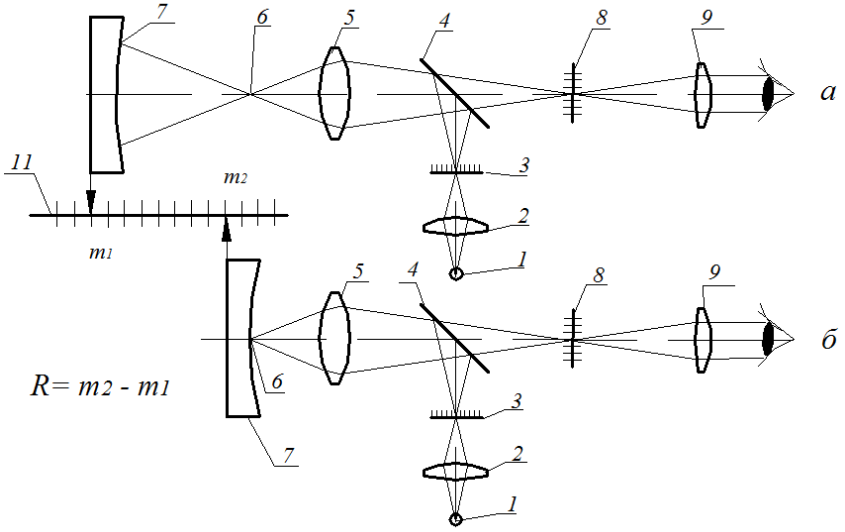


Рис. 3.2.10. Схема метода измерения радиуса кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа: *1* – источник света; *2* – конденсор; *3* – сетка; *4* – светоделитель; *5* – объектив; *6* – центр кривизны контролируемой поверхности; *7* – контролируемая поверхность; *8* – сетка; *9* – окуляр

В этом методе используется автоколлимационный микроскоп (см. раздел 2.3.4), имеющий измерительное перемещение вдоль

своей оси и оси сферической поверхности проверяемой детали *7*. Для измерения радиуса кривизны осевым перемещением микроскопа (продольными наводками) последовательно добиваются получения резкого автоколлимационного изображения сетки микроскопа при наведении его на центр кривизны (рис. 3.2.10, *а*), а затем на вершину поверхности измеряемой сферы (рис. 3.2.10, *б*). Для отсчета перемещений используются самые разные технические средства – начиная от шкалы рельса оптической скамьи и заканчивая лазерным измерителем перемещений (раздел 4.1). Разность отсчетов для этих крайних положений микроскопа равна измеряемому радиусу кривизны поверхности. Максимальный радиус кривизны выпуклой поверхности ограничен передним рабочим отрезком объектива микроскопа, а для вогнутой – диапазоном перемещения микроскопа или детали.

Погрешность измерения радиуса ΔR по этому методу согласно (1.2.5) может быть определена следующим образом:

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2}\ , \qquad (3.2.23)$$

где ΔR_1 – погрешность измерения, связанная с неточностью отсчетного устройства; $\Delta R_2(\text{мкм}) = 0{,}4\ \text{мкм}\ (^{R}/_{D})^2$ – погрешность позиционирования при двукратной продольной наводке согласно (2.1.23); D – диаметр измеряемой детали.

Аналогичная методика измерений может быть реализована с использованием цифрового интерферометра с совмещенными ветвями (см. раздел 4.1). В этом случае в качестве индикатора продольной наводки является искривление полос интерференционной картины, а для измерения перемещений использован лазерный интерферометр.

Для измерения больших радиусов кривизны вместо микроскопа применяют автоколлимационную зрительную трубу (рис. 3.2.11). Окуляр *3* зрительной трубы должен быть снабжен шкалой для отсчета продольных перемещений. Автоколлимационную трубу стандартным методом выверяют на бесконечность и устанавливают перед контролируемой деталью *1*. Перемещением окуляра *3* добиваются получения автоколлимационного изображения перекрестья зрительной трубы. Тогда по измеренному перемещению

окуляра x' искомый радиус кривизны R может быть вычислен по формуле

$$R = -{f'^2}/{x'} - f' + d, \tag{3.2.24}$$

где d – расстояние между поверхностью и зрительной трубой.

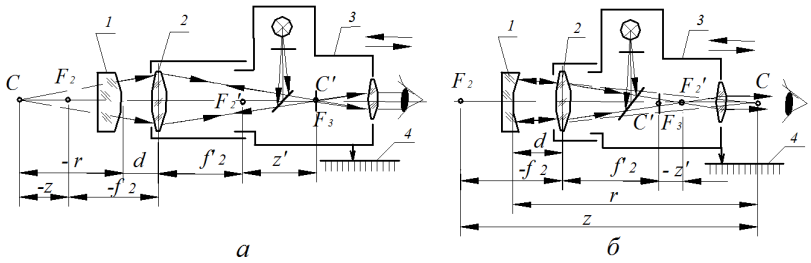


Рис. 3.2.11. Схемы измерения радиусов кривизны сферических поверхностей с помощью автоколлимационной зрительной трубы:
а – выпуклых; *б* – вогнутых [25]

При $|R| > 10$ м величиной d можно пренебречь, и тогда имеем для погрешности, связанной с неточностью отсчета (порогом чувствительности продольных наводок) $\Delta x'$, и погрешностью аттестации зрительной трубы $\Delta f'$:

$$\Delta R = \left(1 + 2\,{f'}/{x'}\right)\Delta f' + \left({f'}/{x'}\right)^2 \cdot \Delta x'. \tag{3.2.25}$$

3.2.3. Методы измерения фокусных расстояний и фокальных отрезков

Схема ***измерения фокусного расстояния методом увеличений*** представлена на рис. 3.2.12.

Измеряемая деталь *4* (положительная линза или объектив) помещается на оптическую скамью и освещается с помощью коллиматора скамьи *2*. При этом объектив коллиматора *3* с фокусным расстоянием f'_k формирует изображение тест-объекта *1* размером

y в бесконечности. В этом случае измеряемая деталь формирует изображение тест-объекта в своей задней фокальной плоскости размером y'. Размер изображения измеряется с помощью горизонтального микроскопа *5*, а искомое фокусное расстояние вычисляется по формуле

$$f' = f'_k \cdot {}^{y'}/_{y}, \tag{3.2.26}$$

где y – размер предмета (расстояние между штрихами сетки или базовыми рисками миры); f'_k – фокусное расстояние объектива коллиматора.

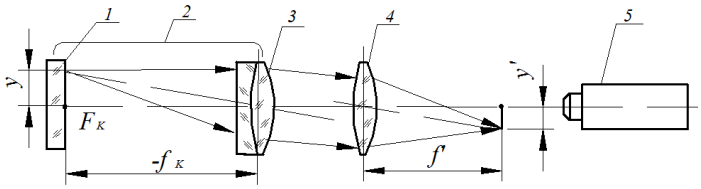


Рис. 3.2.12. Схема измерения фокусного расстояния положительной линзы методом увеличения

Применив к (3.2.26) логарифмическое дифференцирование, получим для относительной погрешности измерений

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta f'_k}{f'_k} + \frac{\Delta y'}{y'} + \frac{\Delta y}{y}, \tag{3.2.27}$$

где $\Delta f'_k$ – погрешность аттестации объектива коллиматора; $\Delta y'$ – погрешность отсчета размера y'; Δy – погрешность аттестации тест-объекта.

Схема измерения фокусного расстояния отрицательных оптических деталей приведена на рис. 3.2.13. Для измерения на оптической скамье используются вспомогательный положительный объектив *5* и зрительная труба *7*.

Объектив *5* и измеряемая оптическая деталь *6* устанавливаются на оптической скамье таким образом, что они образуют афокальную телескопическую систему Кеплера. Взаимное расположение

объектива *5* и детали *6* контролируется с помощью зрительной трубы *7*. При этом изображение тест-объекта *3*, сформированное объективом коллиматора оптической скамьи *4*, афокальной системой, состоящей из *5* и *6*, формируется в фокальной плоскости объектива зрительной трубы и наблюдается с помощью окуляра. Отсутствие параллакса свидетельствует о правильной установке *6* относительно *5*.

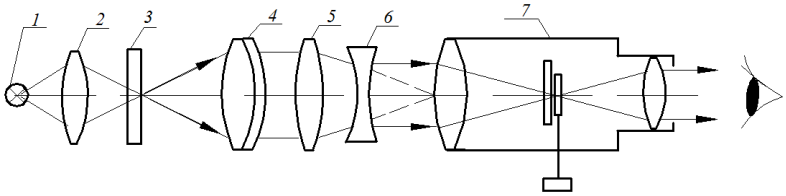


Рис. 3.2.13. Схема измерения фокусного расстояния отрицательных линз:
1 – источник света; *2* – конденсор; *3* – тест-объект; *4* – объектив коллиматора; *5* – положительный объектив; *6* – отрицательная линза; *7* – зрительная труба

Для определения фокусного расстояния отрицательного объектива *6* производят два измерения размера изображения тест-объекта, а именно: размера y' в отсутствие системы Кеплера и размера y'' с системой Кеплера. Фокусное расстояние f' отрицательной системы может быть определено из очевидного соотношения

$$\frac{f'_n}{f'} = \frac{y'}{y''}, \tag{3.2.28}$$

где f'_n – фокусное расстояние вспомогательного положительного объектива *5*. Из (3.2.28) получим для фокусного расстояния

$$f' = y''\frac{f'_n}{y'} \tag{3.2.29}$$

и после логарифмического дифференцирования для погрешности измерения

$$\frac{\Delta f'}{f'} = \frac{\Delta f'_n}{f'_n} + \frac{\Delta y'}{y'} + \frac{\Delta y''}{y''}, \tag{3.2.30}$$

где $\Delta f'_n$ – абсолютная погрешность аттестации вспомогательного объектива *5*; $\Delta y' \approx \Delta y'' = 0{,}1 \cdot 10^{-3} f'_{mp} \Big/ D$ – погрешность измерения размеров (порог чувствительности поперечных наводок) с помощью зрительной трубы с фокусным расстоянием объектива f'_{mp} и световым диаметром *D* в соответствии с формулой (2.1.24).

Из формул (3.2.27) и (3.2.30) следует, что погрешность измерения фокусного расстояния по методу увеличения в основном определяется погрешностью аттестации вспомогательных оптических систем. От этого недостатка свободен метод Аббе, основанный на определении увеличения для нескольких положений предмета. Схема измерений по методу Аббе приведена на рис. 3.2.14. С помощью измерительного микроскопа *1* измеряются размеры y_1' и y_2' изображений предметов y_1 и y_2, расположенных на расстояниях x_1 и x_2 соответственно.

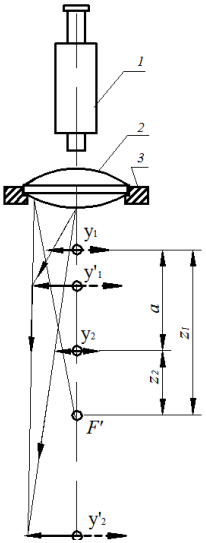


Рис. 3.2.14. Измерение фокусного расстояния оптических деталей по методу Аббе: *1* – измерительный микроскоп; *2* – контролируемый объектив; *3* – держатель объектива

Изображения формируются измеряемым объективом *2*, расположенным на специальном держателе *3*, установленном на предметном столе измерительного микроскопа *1*. В качестве предмета используются, как правило, стеклянные штриховые линейки (см. раздел 2.2.3).

Из рис. 3.2.14 и формулы Ньютона имеем для положений изображений участков шкалы линейки размером y_1 и y_2

$$x_1 = f' \frac{y_1}{y_1'} \text{ и } x_2 = f' \frac{y_2}{y_2'}, \tag{3.2.31}$$

где f' – фокусное расстояние измеряемого объектива. Из (3.2.31) имеем для фокусного расстояния

$$f' = \frac{a}{\frac{y_2}{y_2'} - \frac{y_1}{y_1'}}, \tag{3.2.32}$$

где $a = x_2 - x_1$.

Измерения по методу Аббе могут быть реализованы с помощью специализированного измерительного микроскопа – ***фокометра Аббе***, имеющего встроенную оптическую линейку с устройством для ее перемещения и измерения этого перемещения. Однако для этой же цели, как правило, используют стандартный измерительный микроскоп. В этом случае оптическая линейка располагается на предметном столе этого микроскопа под измеряемым объективом, а расстояние $a = x_2 - x_1$ задается с помощью концевой меры, подкладываемой под линейку. Размер предмета *y* определяется по числу делений линейки в поле зрения измерительного микроскопа, а размер изображения *y'* – отсчетным устройством микроскопа.

Выражение для погрешности измерения по методу Аббе достаточно громоздкое, чтобы его приводить здесь. Однако априори понятно, что эта погрешность в основном связана с погрешностью поперечных наводок при измерении размеров оптических изображений оптической линейки. Составляющие погрешности, связанные с измерением a и расстояния между штрихами, могут быть очень малыми. Поэтому оценку погрешности измерений лучше всего производить статистическими методами обработки. В практике оптических измерений принято считать, что метод Аббе позволяет измерять фокусные расстояния с погрешностью 0,2–0,5%.

Следует также заметить, что погрешность измерения тем меньше, чем больше размер предмета, поэтому фокусные расстояния оптических систем с большими световыми диаметрами могут быть замерены с большей точностью.

Метод измерения фокальных отрезков на оптической скамье (рис. 3.2.15). Измеряемая деталь *3* помещается на оптическую скамью и освещается с помощью коллиматора скамьи. При этом объектив коллиматора *2* формирует изображение тест-объекта *1* в бесконечности. В этом случае измеряемая деталь формирует изображение тест-объекта в своей задней фокальной плоскости, которое наблюдается с помощью горизонтального микроскопа *4*.

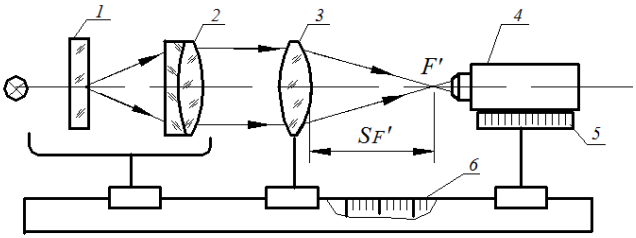


Рис. 3.2.15. Метод измерения фокальных отрезков на оптической скамье:
1 – тест-объект; *2* – объектив коллиматора; *3* – контролируемая деталь;
4 – горизонтальный микроскоп

Для измерения фокального отрезка осевым перемещением микроскопа (продольными наводками) последовательно добиваются получения резкого изображения последней оптической поверхности измеряемой детали, а затем – изображения тест-объекта в задней фокальной плоскости детали. Разность отсчетов для этих крайних положений микроскопа равна измеряемому фокальному отрезку:

$$S'_{f'} = n_2 - n_1, \qquad (3.2.33)$$

где n_2 и n_1 – отсчеты соответствующих положений микроскопа, полученные по линейке оптической скамьи *6* с учетом нониального отсчета по шкале *5* точной фокусировки микроскопа.

Погрешность измерения фокального отрезка зависит от порога чувствительности продольной наводки микроскопа – $\Delta S'_{\text{м}}$, погрешности установки коллиматора на бесконечность – $\Delta S'_{\text{к}}$ и погрешности шкалы измерений – $\Delta S'_{\text{ш}}$ и может быть оценена как сумма случайных погрешностей из формулы

$$\Delta S'_{f'} = \sqrt{\Delta S'^{\,2}_{\text{к}} + \Delta S'^{\,2}_{\text{м}} + \Delta S'^{\,2}_{\text{ш}}}. \qquad (3.2.34)$$

При этом $\Delta S'^{\,-1}_{\text{к}} = \frac{L_\infty}{f'^2} = \frac{1{,}25 \cdot 10^3 \cdot D_{\text{к}}}{f'^2}$ – согласно (2.3.15) и формуле Ньютона; $\Delta S'_{\text{м}} = {}^{0{,}2\ \text{мкм}}/_{A^2}$ – согласно (2.1.23); $\Delta S'_{\text{ш}} \approx 0{,}1$ мм – принимается исходя из цены деления 1 мм и класса точности шкалы, используемой в конструкции оптической скамьи; f' – фокусное расстояние измеряемого объектива.

3.2.4. Методы измерения углов клиньев и призм, пирамидальности

В оптическом приборостроении используется много оптических деталей, требующих угловых измерений, а именно:

– призмы;

– клинья – призмы с малым углом между оптическими поверхностями;

– плоскопараллельные пластины – клинья с номинально нулевым углом между оптическими поверхностями.

При этом с точки зрения средств измерения и погрешностей выделяют:

– углы между основными поверхностями, которые должны быть измерены достаточно точно, поскольку определяют оптическую функцию детали;

– углы между основными и вспомогательными поверхностями. Если номинальное значение этого угла равно 0, то говорят об ошибке ***клиновидности***, если номинальное значение равно 90° – о ***пирамидальности.*** Клиновидность и пирамидальность имеют большое значение, когда вспомогательная поверхность является базовой. Точность измерения в этом случае является умеренной;

– углы между вспомогательными поверхностями. Как правило, не имеют большого значения для работы прибора и не выходят за пределы общетехнических требований.

Если речь идет об измерении углов с погрешностью порядка 1–5 угл. мин. и нет риска повредить поверхность, то для измерения углов в оптических деталях используют универсальный измерительный инструмент: угольники, угломеры (см. раздел 2.2). В противном случае следует применять оптические методы измерения, для реализации которых используются универсальные оптические приборы: гониометры, оптические скамьи и автоколлиматоры (см. раздел 2.3), предназначенные для работы с полированными поверхностями.

Коллимационные гониометрические методы измерения углов оптических деталей основаны на работе гониометра с коллиматором и зрительной трубой. Наиболее часто используемые схемы измерений углов призм представлены на рис. 3.2.16.

По схеме, приведенной на рис. 3.2.16, *а*, призму *1* базируют на неподвижном столе *2* гониометра так, чтобы ребро измеряемого угла θ разделяло пополам пучок лучей, выходящий из коллиматора *3*. Затем зрительную трубу *4* последовательно устанавливают так, чтобы изображение A' щели коллиматора A, построенное при отражении лучей от рабочих граней призмы, совместилось с вертикальным штрихом сетки зрительной трубы. Тогда искомый угол

$$\theta = {(a_1 - a_2)}/{2}, \qquad (3.2.35)$$

где a_1 и a_2 – отсчеты по лимбу гониометра.

По схеме, приведенной на рис. 3.2.16, *б*, зрительную трубу *4* устанавливают так, чтобы ее оптическая ось составляла минимально возможный угол φ с осью коллиматора *3*, и закрепляют неподвижно. Призму *1* базируют на вращающемся столе *2* и поворотом столика с призмой последовательно добиваются совмещения изображения щели коллиматора с вертикальным штрихом сетки зрительной трубы. Тогда имеем для искомого угла

$$\theta = 180 - (a_1 - a_2), \qquad (3.2.36)$$

где a_1 и a_2 – отсчеты по лимбу гониометра.

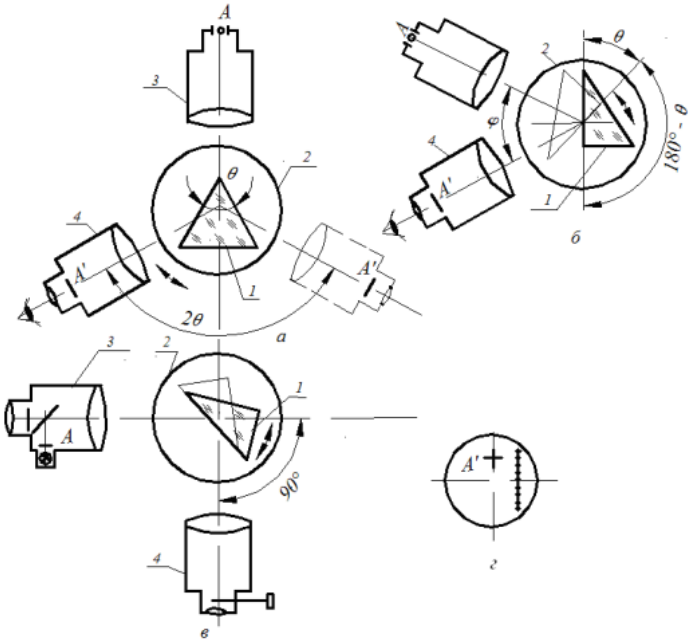


Рис. 3.2.16. Коллимационные методы измерения углов оптических деталей на гониометре [25]: *а, б* – углов призмы; *в* – пирамидальности; *г* – оптическое измерительное изображение зрительной трубы гониометра при измерениях пирамидальности

Для измерения пирамидальности (рис. 3.2.16, *в*) в коллиматор *3* устанавливается автоколлимационный окуляр, а в зрительную трубу *4* – окулярный микрометр с вертикальным расположением измерительной шкалы. Призму *1* помещают на вращающийся стол *2* так, чтобы одно из ребер призмы было параллельно оси вращения стола. Коллиматор и зрительную трубу устанавливают под углом 90°. Поворачивая стол с призмой вокруг вертикальной оси, последовательно добиваются таких положений рабочих граней призмы, при которых изображения A' центра перекрестья A, полученные при отражении от этих граней, совпадут с вертикальным штрихом сетки окулярного микрометра (рис. 3.2.16, *г*). Если

призма пирамидальна, то эти изображения будут находиться на разной высоте. Совместив горизонтальный штрих сетки окулярного микрометра с центром каждого изображения, снимают отсчеты a_1 и a_2. Если угол отклонения лучей за счет пирамидальности $\gamma = a_1 - a_2$, то собственно пирамидальность может быть определена по формуле

$$\pi = \gamma \sqrt{2}/2. \qquad (3.2.37)$$

Измерения углов оптических деталей на гониометре являются прямыми. Поэтому для оценки погрешности измерения следует воспользоваться соответствующими метрологическими характеристиками используемого прибора.

Любая оптическая призма, или клин, предназначена для отклонения проходящего лучей от первоначального направления. Этот угол отклонения ω является показателем правильности работы призмы, следовательно, подлежит аттестации при приемке.

На рис. 3.2.17 представлены схемы измерения углов отклонения призм на гониометре.

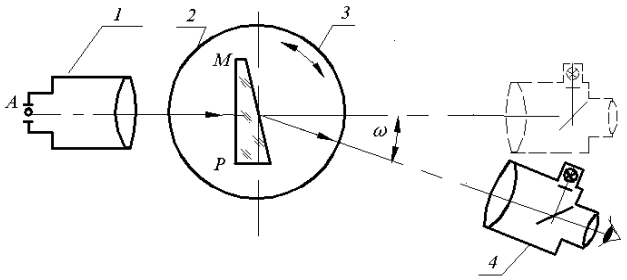


Рис. 3.2.17. Коллимационные методы измерения углов отклонения лучей оптическими деталями на гониометре

Измерение углов отклонения призм на гониометре производят по схеме, приведенной на рис. 3.2.17. Сначала совмещают оптическую ось трубы *4*, снабженной автоколлимационным окуляром, с осью коллиматора *1* и по лимбу снимают отсчет a_1. Затем на стол

гониометра *2* устанавливают измеряемую деталь *3* так, чтобы ее входная грань *MP* была перпендикулярна к оси зрительной трубы. Перпендикулярность устанавливается и проверяется по автоколлимации лучей. После этого совместно вращают стол и зрительную трубу до совмещения вертикального штриха зрительной трубы с изображением щели коллиматора. В этом положении снимают отсчет a_2.

Искомый угол отклонения определяется из формулы

$$\omega = a_1 - a_2. \tag{3.2.38}$$

Для устранения хроматизма клина освещение следует выбирать монохроматичным.

Коллимационный метод измерения угла отклонения на оптической скамье приведен на рис. 3.2.18.

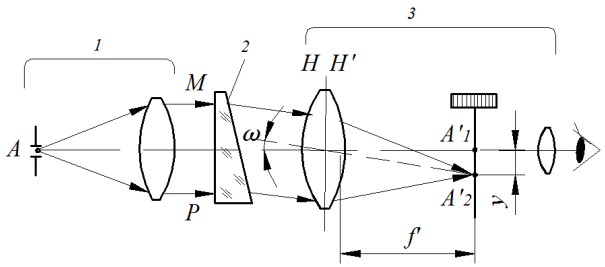


Рис. 3.2.18. Измерение угла отклонения клина на оптической скамье [25]: *1* – коллиматор; *2* – клин; *3* – зрительная труба

Коллиматор *1* со щелью и зрительную трубу *3* устанавливают соосно на оптической скамье. В этом случае изображение A'_1 точки *A* расположено на оси системы. Затем между объективами коллиматора и зрительной трубы помещают измеряемый клин *2*. При этом изображение A'_2 точки *A* смещается на расстояние *y*, измеряемое окулярным микрометром зрительной трубы. Тогда имеем для угла отклонения клина

$$\omega = arctg\left(\frac{y}{f'}\right) \tag{3.2.39}$$

и после логарифмического дифференцирования для погрешности

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta f'}{f'}, \qquad (3.2.40)$$

где $f', \Delta f'$ – фокусное расстояние и погрешность его аттестации для зрительной трубы; Δy – погрешность измерения расстояния y с помощью окуляр-микрометра (поперечной наводки), устанавливаемая, как правило, статистическими методами.

Автоколлимационные методы измерения углов оптических деталей применяются для высокоточных (менее 1 угл. сек.) измерений углов. На рис. 3.2.19 приведена схема контроля клиновидности плоскопараллельных пластин с помощью автоколлиматоров АК (см. табл. 2.3.3).

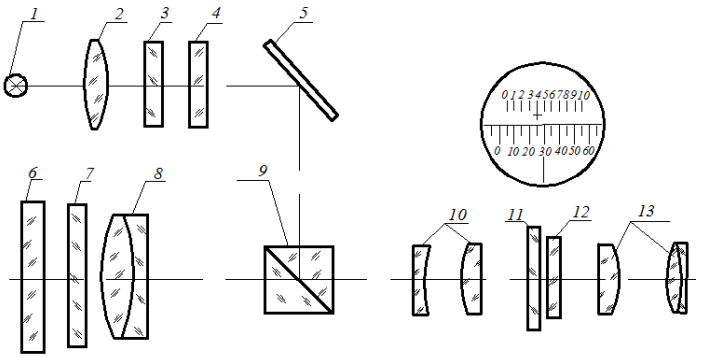


Рис. 3.2.19. Схема контроля клиновидности плоскопараллельных пластин на автоколлиматоре АК [37]: *1* – источник света; *2* – конденсор; *3* – светофильтр; *4* – тест-объект, имеющий вид темного перекрестья на светлом фоне; *5* – зеркало; *6* – дополнительное автоколлимационное плоское зеркало; *7* – контролируемая пластина; *8* – объектив автоколлиматора; *9* – светоделительный кубик автоколлиматора, *10* – линзовый компенсатор, положительная линза которого жестко связана со шкалой отсчета секунд *12* и перемещается вместе с ней с помощью маховичка тонкой наводки; *11* – неподвижная шкала отсчета минут

Автоколлимационные изображения тест-объекта автоколлиматора от автоколлимационного зеркала получают дважды: первый раз без пластины, второй раз с измеряемой пластиной. В результа-

те пучок лучей от тест-объекта, пройдя контролируемую пластину, образует на шкале автоколлимационное изображение перекрестья, смещенное относительно первоначального положения на угол

$$\alpha = 2\theta(n-1)\,, \qquad (3.2.41)$$

где θ – величина клиновидности пластины; n – показатель преломления стекла, из которого она изготовлена.

Погрешность измерения угла отклонения $\omega = {}^{\alpha}/_{2}$ определяется погрешностью используемого автоколлиматора, погрешность измерения клиновидности после логарифмического дифференцирования определяется по формуле

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta n}{n}, \qquad (3.2.42)$$

где Δn и n могут быть определены по марке и категории используемого стекла.

Для измерения угловых размеров призм автоколлимационным методом применяются различные типы специализированных автоколлиматоров с изломом оптической оси (рис. 3.2.20). В этих приборах изломы оси и организация автоколлимации используют геометрические особенности конструкции исследуемых призм.

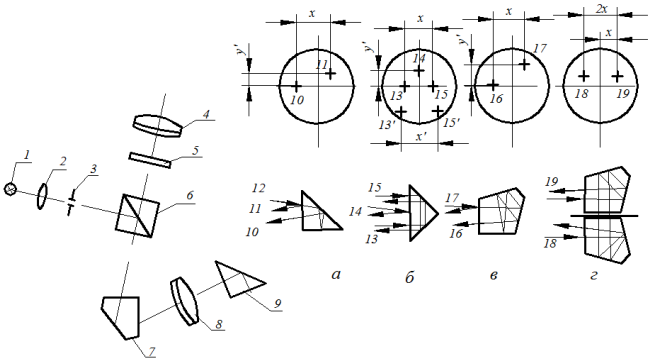


Рис. 3.2.20. Схемы автоколлиматоров для проверки угловых размеров призм [37]: *1* – источник света; *2* – конденсор; *3* – диафрагма; *4* – объектив; *5* – сетка; *6* – светоделительный кубик; *7* – призма; *8* – объектив; *9* – призма

Известны технические решения (рис. 3.2.21), реализующие интерференционные схемы измерения углов, основанных на наблюдении и измерении интерференционной картины.

Пример 3.2.1. На рис. 3.2.21 приведена схема интерферометра ИЗК-461 для контроля клиновидности плоскопараллельных пластин интерференционным методом.

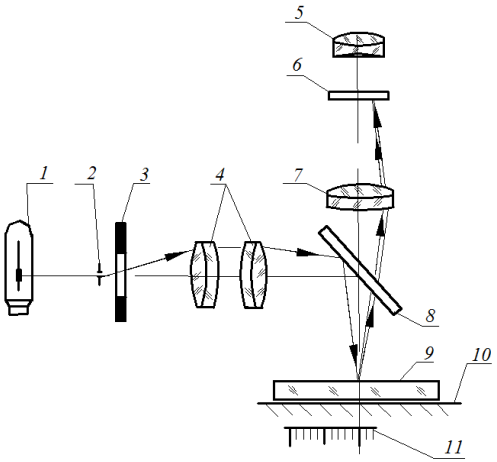


Рис. 3.2.21. Схема интерферометра Чапского для измерения клиновидности плоскопараллельных пластин [37]: *1* – источник монохроматического излучения; *2* – диафрагма; *3* – блок светофильтров; *4* – коллимирующий объектив; *5* – окуляр зрительной трубы; *6* – измерительная сетка; *7* – объектив зрительной трубы; *8* – светоделительная пластина; *9* – измеряемая плоскопараллельная пластина; *10* – двухкоординатный стол с измеряемым перемещением; *11* – шкала для измерения перемещения

В основу конструкции этого прибора положен метод наблюдения полос равной толщины в тонких пленках. Деталь устанавливается так, что ребро клина перпендикулярно направлению измерения, при этом не наблюдается изменений в интерференционной картине в направлении перемещения детали поперечным суппортом. Перемещение детали в продольном направлении вызовет максимальное изменение полос интерференционной картины. По количеству полос интерференционной картины m, пробежавших в

поле зрения зрительной трубы при продольном перемещении клина на расстояние l, можно рассчитать угол клина по формуле

$$\theta = m\lambda/2nl, \tag{3.2.43}$$

а погрешность после логарифмического дифференцирования может быть записана в виде

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta l}{l}. \tag{3.2.44}$$

Подобные решения имеют несомненные преимущества, связанные с высокой производительностью, достаточно легко автоматизируются, но тем не менее не получили широкого распространения в практике оптического контроля ввиду того, что не дают существенного выигрыша по метрологическим характеристикам в сравнении с визуальными, например автоколлимационными методами. То же самое можно сказать и о фотоэлектрических методах и устройствах (см. табл. 2.3.3) измерения углов оптических деталей.

3.3. Методы и устройства для контроля геометрии оптических поверхностей

Качество оптических поверхностей почти всегда является решающим фактором, определяющим качество всего прибора в целом. При этом под качеством поверхности, как правило, понимают совершенство ее формы, которое в свою очередь имеет макро- и микросоставляющие. Под макросоставляющей или собственно формой поверхности понимается соответствие изготовленной поверхности ее теоретическому виду (табл. 3.3.1). Микрогеометрические отклонения определяют шероховатость поверхности.

Между этими видами погрешностей нет четкого физического различия, однако условно их можно разделить по отношению характерного размера (***средний шаг неровностей профиля***) отклонения вдоль поверхности S к значению отклонения Δ от номинальной формы. Неровности, для которых отношение $S/\Delta < 40$,

относят к шероховатости, при $40 < S/\Delta < 1\,000$ – к волнистости, при $1\,000 < S/\Delta$ – к отклонениям формы.

Качество поверхности при обработке заготовки оптической детали зависит от многих технологических факторов: режимов обработки (скорости резания, подачи); кинематики и настройки станка, материала и качества поверхности инструмента; зернистости и качества абразивных материалов; механических свойств, химического состава и структуры материала заготовки; состава смазывающе-охлаждающей жидкости и др.

Для высокоточных оптических поверхностей допустимое отклонение действительной формы от ее теоретического вида исчисляется сотыми долями микрометра. Выявить эти отклонения, определить их характер и значение – основная задача оптического производственного контроля. Поэтому успех оптического проекта в большинстве случаев определяется качеством и подготовкой операций контроля формы поверхности.

Шероховатость поверхностей в значительной степени определяет основные эксплуатационные свойства деталей и узлов – уровень светорассеяния, износостойкость, сопротивление усталости, надежность посадок, контактную жесткость и теплопроводность стыков сопряженных деталей, коррозионную стойкость. Поэтому характеристики шероховатости поверхности строго нормируются и подвергаются постоянному анализу в технологических исследованиях и контролю в процессе производства.

Общей погрешностью поверхности называется такое отклонение от ее теоретического вида, при котором вид поверхности (формула, математически описывающая поверхность) остается неизменным. ***Например***, при изготовлении сферической поверхности с заданным радиусом может быть получена строго сферическая поверхность, но с другим радиусом кривизны. При изготовлении плоской поверхности часто получают сферическую поверхность с очень большим радиусом кривизны.

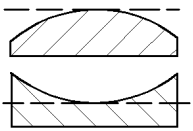
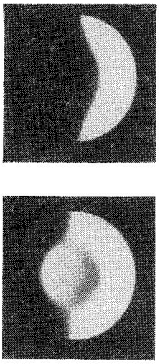
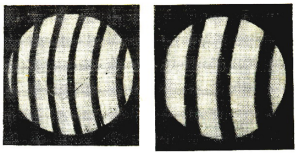
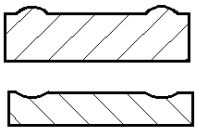
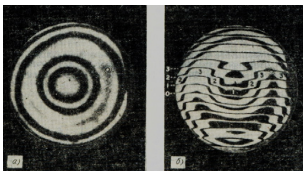
В большинстве практических случаев важно сохранить неизменным именно вид поверхности. Наличие общей погрешности влечет за собой, как правило, изменение характеристик оптической системы, в частности f', но незначительно влияет на ухуд-

шение качества изображения, что справедливо в небольших пределах.

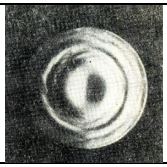
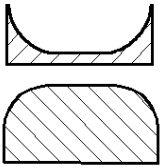
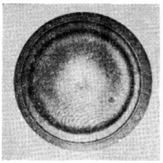
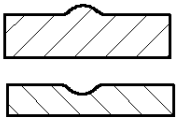
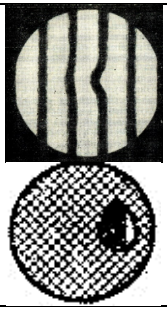
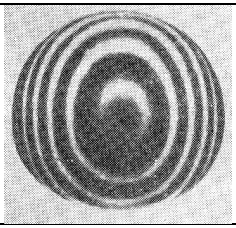
Зональной погрешностью называется такое отклонение реальной поверхности от ее теоретического вида, при котором не нарушается ее осевая симметрия. Наиболее типичным примером зональной ошибки является так называемый ***завал края***, когда форма реальной поверхности резко отклоняется от теоретического вида на краю изделия. Завал края образуется при обработке поверхностей в результате слишком большого выноса инструмента за край детали. Зональные ошибки, как правило, вызывают значительное ухудшение качества изображения.

Таблица 3.3.1

Виды ошибок оптических поверхностей и оптические измерительные изображения

Вид ошибки. Изображение профиля поверхности, вызывающего ошибку, приведенного к плоскости	**Оптические измерительные изображения**	
	Теневые	**Интерференционные**
Общая ошибка 		
Зональная ошибка 		

Окончание табл. 3.3.1

Вид ошибки. Изображение профиля поверхности, вызывающего ошибку, приведенного к плоскости	Оптические измерительные изображения	
	Теневые	Интерференционные
Волнистость		
Зональная на краю 		 
Местная ошибка 		
Астигматизм		

Волнистостью поверхности называется квазипериодическая зональная ошибка со средним периодом, существенно меньшим размеров поверхности.

Местной (локальной) погрешностью называется отклонение отдельного участка поверхности от ее теоретического вида. Если этот участок поверхности мал (что чаще всего и бывает на практике), то местная погрешность не вызывает существенного снижения качества изображения.

Пример 3.3.1. На рабочей поверхности астрономических зеркал часто возникают местные ошибки формы, локализованные в малой области, обусловленные многими технологическими факторами. Иногда эти участки закрывают непрозрачными экранами, при этом качество изображения практически остается неизменным, так как из общего волнового фронта выключаются участки, площадь которых ничтожно мала по сравнению с общей площадью рабочей поверхности зеркала.

Наиболее вредна ***астигматическая погрешность*** поверхности, под которой понимают отклонение всей формы поверхности от ее теоретического вида, причем значение этих отклонений различно в разных направлениях от вершины поверхности к ее краям. Поверхность теряет осесимметричную форму, а кривизна ее в двух взаимно перпендикулярных направлениях становится различной, что приводит к существенному снижению качества изображения. Астигматическая погрешность поверхности, по существу, полностью изменяет ее теоретический вид: вместо осесимметричной поверхности получают, как правило, поверхность с двумя плоскостями симметрии.

Шероховатость поверхностей регламентируется ГОСТ 2789–73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» и соответствующими рекомендациями и задается с помощью параметров R_z и $R_a \approx 4R_z$, которые в применении к оптическим поверхностям имеют значения от $R_z = 360$ для поверхностей, полученных прессованием или алмазным точением, до $R_z = 0{,}025$ для исполнительных поверхностей, полученных на смоляном полировальнике. Параметр R_a (указывается по умолчанию) означает, что в пределах базовой длины нормируется средняя высота всех неровностей

профиля; а R_z означает, что нормируется средняя высота наибольших неровностей микрорельефа поверхности.

Пример 3.3.2. Указанные на чертеже, приведенном на рис. 3.3.1, параметры шероховатости означают, что средняя высота всех неровностей профиля на шлифованной вспомогательной цилиндрической поверхности линзы не должна превосходить 2,5 мкм. А R_z 0,05 – средняя высота наибольших неровностей полированных сферических исполнительных поверхностей – не более 0,05 мкм.

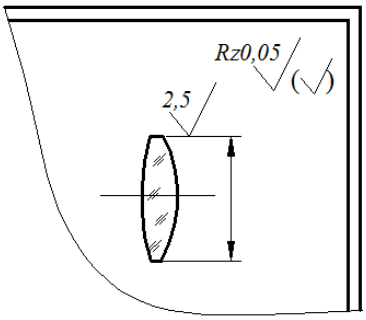


Рис. 3.3.1. Обозначение шероховатостей
на рабочем чертеже оптического компонента

Чистота оптических поверхностей определяется по ГОСТ 11141–84 «Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля» в применении к полированным поверхностям с R_z не более 0,1 мкм и регламентирует поперечные и продольные размеры дефектов полированной поверхности, их суммарную длину, число и скопления дефектов поверхности. Устанавливается чистота поверхности в виде класса чистоты, обозначаемого буквой *P*.

Поскольку основной задачей оптических приборов является формирование изображений, требования к качеству изготовления формы исполнительных поверхностей сравнимы с длиной световой волны. Поэтому нет ничего удивительного в том, что в оптическом приборостроении для измерения формы поверхностей и качества объективов, в основном, применяются способы, используемые для контроля волновых фронтов: теневые и интерференционные.

Погрешности изготовления формы поверхностей в оптике устанавливаются с помощью оптических измерительных изображений, формируемых интерференционным или теневым способом в выходном зрачке измеряемой оптической детали или системы. Обработка оптического измерительного изображения численным (после оцифровки) или визуальным способом дает возможность получить измерительную информацию о погрешности. Эта измерительная информация может быть представлена одним из следующих способов:

– число, характеризующее:
  - амплитуду ошибки – *P-V* (peak to value),
  - среднеквадратичное отклонение ошибки – *RMS* (root middle square);

– профиль отклонения поверхности от номинального значения:
  - волнового фронта в выходном зрачке $\Delta W(m')$,
  - поверхности контролируемой детали $\Delta(x)$;

– карта отклонений поверхности от номинального значения:
  - волнового фронта в выходном зрачке $\Delta W(m', M')$,
  - поверхности контролируемой детали $\Delta(x, y)$.

Практика технологического контроля такова, что обычно измеряются сферические волновые фронты, и для перехода от ошибки волнового фронта к ошибке поверхности достаточно воспользоваться простыми соотношениями:

– если измерения выполняются в автоколлимации от измеряемой поверхности

$$\Delta(x, y) = 2 \cdot \Delta W(m', M'); \tag{3.3.1}$$

– если измерения производятся на просвет измеряемой поверхности

$$\Delta(x, y) = (1 - n) \cdot \Delta W(m', M'); \tag{3.3.2}$$

– если измерения производятся в автоколлимации, но деталь стоит в схеме контроля на просвет

$$\Delta(x, y) = 2 \cdot (1 - n) \cdot \Delta W(m', M'). \tag{3.3.3}$$

Однако в ряде случаев, таких как:

– контроль асферических волновых фронтов;

– в расчетных целях;

– при необходимости учета реальных форм деталей, входящих в схему измерительной установки –

возникает необходимость перехода от ошибки волнового фронта к ошибке поверхности, и тогда следует воспользоваться более сложными алгоритмами.

Пример 3.3.3. Наиболее эффективным для этих целей представляется компенсационный алгоритм синтеза оптических поверхностей, описанный, например, в [65, 66]. Основой этого технического решения является термин «эйконал», под которым понимается оптическая длина пути, пройденного лучом (П.166) от источника до исследуемой поверхности:

$$F = \sum L_i \cdot n_i \ , \qquad (3.3.4)$$

где n_i – показатель преломления среды *i*, в которой волна проходит путь L_i, вычисляемый вдоль луча (рис. 3.3.2).

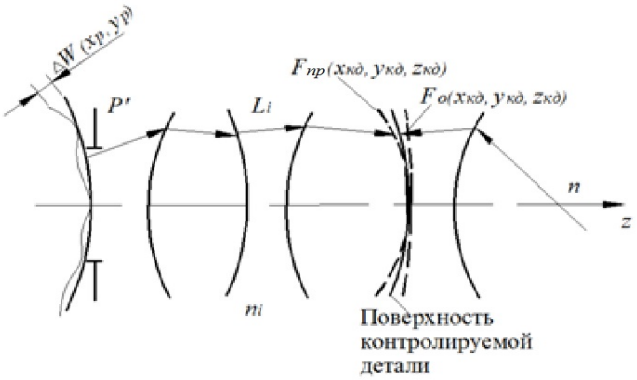


Рис. 3.3.2. К вопросу о компенсационном алгоритме расчета отклонения формы поверхности по значению величины отклонения волнового фронта в выходном зрачке *P′*

Обозначим $z_p^{\text{н}} = z_p^{\text{н}}(x_p.y_p)$ уравнение номинального волнового фронта, сформированного схемой контроля согласно теоретиче-

ским представлениям. Волновой фронт является поверхностью равного эйконала, поэтому если известна форма волнового фронта в выходном зрачке P' по результатам измерения $z_p = z_p^{\text{н}}(x_p.y_p) + \Delta W(x_p.y_p)$, то можно найти ***предметный эйконал*** на контролируемой поверхности от этого волнового фронта – $F_{\text{пр}}(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}})$, используя стандартную процедуру расчета хода луча через оптическую систему, состоящую из поверхностей, расположенных между выходным зрачком и контролируемой поверхностью. При этом контролируемая поверхность задана своим номинальным уравнением $z_{\text{к.д}} = z(x_{\text{к.д}}.y_{\text{к.д}})$. С другой стороны, свет идет от источника до контролируемой поверхности. Таким же образом можно рассчитать ***опорный эйконал*** на контролируемой поверхности – $F_0(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}})$ волнового фронта, распространяющегося от точечного источника. Поскольку контролируемая поверхность выполняет функцию преобразования F_0 в $F_{\text{пр}}$, то на контролируемую поверхность следует «нанести» ***эйконал записи*** $F_{\text{з}}\ (x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}})$, определяемый равенством

$$F_{\text{з}}(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}}) = F_0(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}}) - F_{\text{пр}}(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}}). \quad (3.3.5)$$

Для этого к номинальной форме поверхности следует добавить оптическую длину пути $\Delta(x, y)$, определяемую из соотношения

$$\Delta(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}) = \frac{F_{\text{з}}(x_{\text{к.д}}, y_{\text{к.д}}, z_{\text{к.д}})}{n-1}. \quad (3.3.6)$$

При больших значениях $F_{\text{з}}$ возникает необходимость итерационного процесса, что связано с погрешностью переноса точек поверхности на криволинейной поверхности.

При таком способе обработки данных автоматически учитываются форма и взаимное расположение всех поверхностей, входящих в схему контроля, устраняются систематические ошибки, связанные с фактической формой этих поверхностей, и остаточные волновые аберрации.

3.3.1. Теневые методы контроля формы поверхности

Контроль формы волнового фронта теневыми методами сводится к получению теневого измерительного изображения визу-

ализирующего элемента, помещенного в пучок лучей, и последующей интерпретации искажений теневого изображения для качественного контроля или выполнения соответствующих измерений для получения количественной информации о контролируемом волновом фронте или формирующей его оптической системе.

В зависимости от положения визуализирующего элемента по отношению к фокальной плоскости различают следующие теневые методы:

– сфокусированных диафрагм – диафрагма в фокальной плоскости;

– расфокусированных диафрагм – диафрагма вне фокальной плоскости.

Далее теневые методы классифицируются в зависимости от вида визуализирующего элемента и источника света. Для реализации теневых методик используется теневой прибор в различных модификациях. На рис. 2.3.1 приведено техническое решение малогабаритного телевизионного теневого прибора. Такое устройство, будучи установлено на двухкоординатный стол с возможностью прецизионного перемещения и измерения этого перемещения по двум координатам из комплекта оптической скамьи ОСК-2ЦЛ, позволяет реализовать практически все теневые методики получения теневых измерительных изображений и метрологически обеспечить процесс получения измерительной информации о форме исследуемой поверхности.

Метод точки (щели) и ножа (Фуко–Максутова) для качественного контроля сферических волновых фронтов. В 1856 г. Леон Фуко предложил метод исследования качества оптических поверхностей и систем, сыгравший огромную роль в оптическом приборостроении. По утверждению Д.Д. Максутова [35], внесшего значительные усовершенствования в метод Фуко, можно без труда обнаружить дефекты отражающей поверхности порядка 1/50 длины волны света, а при определенном опыте – 1/200.

Сущность метода Фуко представлена на рис. 3.3.3.

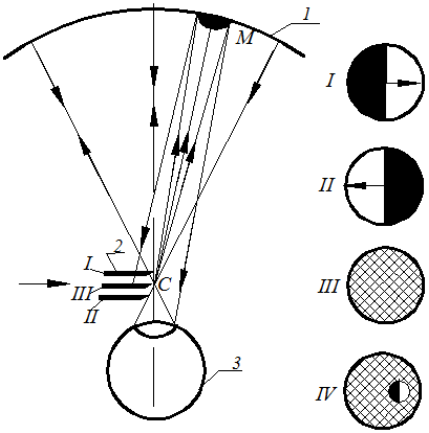


Рис. 3.3.3. Схема образования теневых картин по методу Фуко

Пусть в центре кривизны *C* сферического зеркала *1* установлен точечный источник света или его изображение. Если зеркало имеет сферическую форму, то после отражения от него лучи вновь вернутся в т. *C*, образуя строго гомоцентрический пучок лучей. Сосредоточим глаз наблюдателя таким образом, чтобы все отраженные лучи прошли через зрачок глаза и достигли сетчатки. В этом случае наблюдатель увидит равномерно освещенную поверхность зеркала. Расположим вблизи точки *C* непрозрачный экран *2* с острым краем (например, лезвие бритвы). Этот экран получил название ***нож Фуко***. Начнем перемещать нож в направлении, перпендикулярном к оси пучка (показано стрелкой). При передвижении ножа в положение *I* по мере перекрытия лучей наблюдатель увидит движение тени слева направо. На рис. 3.3.3 показан вид теневой картины для положения *II* в момент касания лезвием ножа оси пучка. Если нож находится в положении *II*, то наблюдатель видит то же явление, но в обратной последовательности.

Если нож находится в положении *III* (точно против центра кривизны зеркала), то при движении его слева направо происходит равномерное по всей поверхности понижение освещенности.

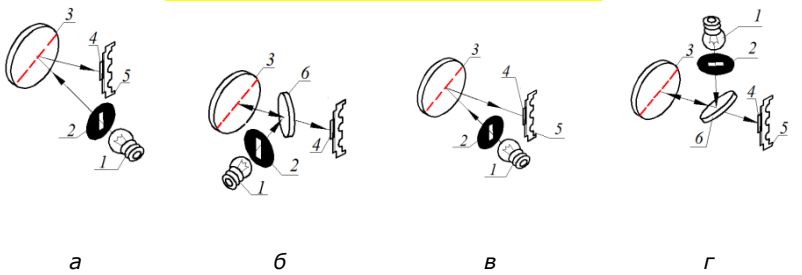
Предположим теперь, что на поверхности зеркала имеется деформированный участок (локальная ошибка) *M* в виде бугра, а нож находится в чувствительном положении *III*. Наблюдатель увидит поверхность зеркала равномерно освещенной, кроме участка *M*, у которого правая часть окажется светлой, а левая – темной, так как отраженные лучи от правой половины бугра попадают в глаз, а от левой задерживаются ножом. Возникает характерная теневая картина (положение *IV*), позволяющая определить протяженность деформированного участка *M* и его положение на поверхности зеркала.

Д. Максутов усовершенствовал метод Фуко, заменив точечный источник света узкой щелью (рис. 3.3.6). В результате достигается огромный выигрыш в освещенности теневой картины и возрастает чувствительность метода. На рис. 3.3.4 приведена фотография теневой картины реальной оптической детали с общей, зональными и локальными ошибками.



Рис. 3.3.4. Фукограмма некачественного зеркала

Конструктивная реализация теневого прибора, особенно это касается освещения с помощью щели, требует эффективного технического решения узла развязки освещающего и анализируемого волновых фронтов, поскольку это связано с остаточными волновыми аберрациями. Различают четыре варианта узлов развязки, приведенных на рис. 3.3.5.



а *б* *в* *г*

Рис. 3.3.5. Варианты относительного размещения щели и ножа теневого прибора: *а, г* – фотометрирование производится в сагиттальном сечении; *б, в* – фотометрирование производится в меридиональном сечении (направлении разнесения щели и ножа): *1* – источник света; *2* – щель; *3* – контролируемая поверхность; *4* – изображение щели; *5* – нож (лезвие бритвы); *6* – светоделительная пластина. Красная штриховая линия – направление фотометрирования теневой картины

На схемах рис. 3.3.5, *а* и *в* представлено внеосевое расположение щели и ножа, на рис. 3.3.5, *б* и *г* – схемы со светоделительной пластиной. Все четыре варианта имеют право на существование, но в вариантах *а* и *в* возникает остаточная волновая аберрация, связанная с внеосевым падением освещающего фронта на исследуемую поверхность, в вариантах *б* и *г* аберрация обусловлена двукратным прохождением сферического пучка лучей через плоскопараллельную пластину.

Пример 3.3.4. В статье [52] исследованы варианты узла развязки для схемы исследования сферического зеркала (рис. 3.3.6) с параметрами $D/f' = 1000/1000$.

Численный анализ вариантов узла развязки для этого случая основан на использовании стандартного расчета волновых аберраций с помощью любой программы. В табл. 3.3.2 в качестве примера приведены результаты таких расчетов. Этот простой пример позволяет сделать достаточно важный практический вывод о том, что конструктивно более выгодной является схема рис. 3.3.5, *а*, поскольку позволяет достаточно сильно разнести нож и щель в меридиональном сечении (до 10 мм). При этом значение остаточной аберрации в направлении фотометрирования в сагиттальном сечении является очень малым (не превосходит $-0{,}3 \cdot 10^{-4}$мкм).

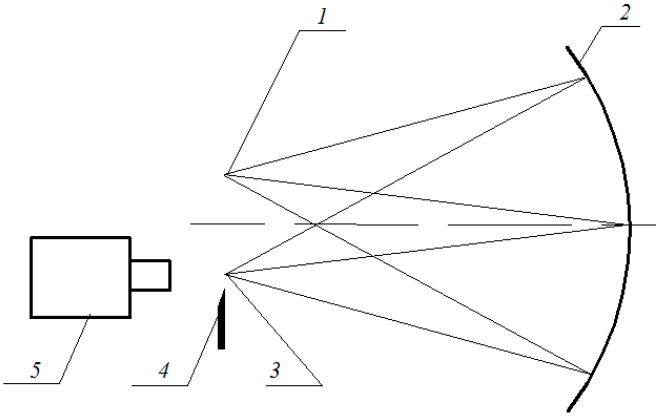


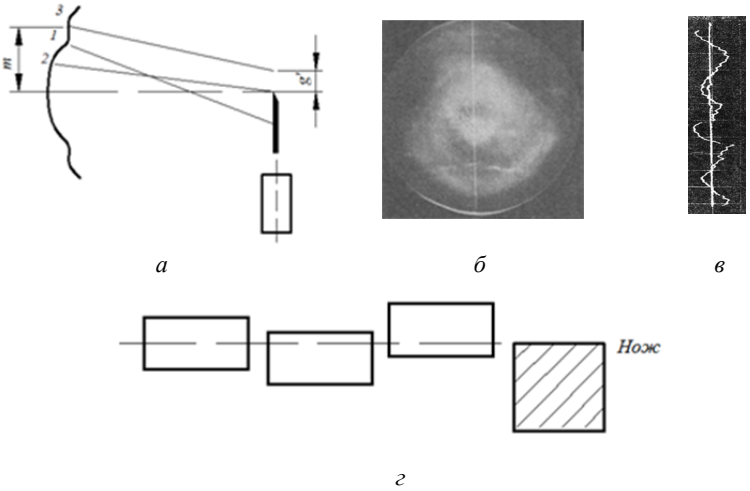
Рис. 3.3.6. Схема Фуко–Максутова для исследования вогнутых сфер: *1* – линейный источник света – щель; *2* – контролируемая сфера; *3* – изображение щели; *4* – нож Фуко (он же анализатор *1*); *5* – фотоэлектрическое приемное устройство (цифровая видеокамера)

Таблица 3.3.2

Зависимость остаточной волновой аберрации теневого прибора от его оптической схемы

Варианты	**Максимальная волновая аберрация в сагиттальном сечении, мкм**		**Максимальная волновая аберрация в меридиональном сечении, мкм**		
			в правой полуплоскости		**в левой полуплоскости**
Внеосевое, разнесение 0,5 мм	$-0{,}9 \cdot 10^{-9}$	Рис. 3.3.5, *а*	$-0{,}2 \cdot 10^{-3}$	Рис. 3.3.5, *в*	$-0{,}19 \cdot 10^{-3}$
Внеосевое, разнесение 1,5 мм	$-0{,}3 \cdot 10^{-8}$		$-0{,}8 \cdot 10^{-3}$		$-0{,}76 \cdot 10^{-3}$
Внеосевое, разнесение 2,5 мм	$-0{,}1 \cdot 10^{-6}$		$-5{,}24 \cdot 10^{-2}$		$-4{,}6 \cdot 10^{-2}$
Внеосевое, разнесение 5 мм	$-0{,}2 \cdot 10^{-5}$		–0,022		–0,017
Внеосевое, разнесение 10 мм	$-0{,}3 \cdot 10^{-4}$		-0,099		–0,059
Плоскопараллельная пластина толщиной 2,5 мм, размером 30 мм	–0,095	Рис. 3.3.5, *г*	–1,917	Рис. 3.3.5, *д*	–2,192

Метод Филбера для количественного контроля сферических волновых фронтов. В определенном приближении, по сути дела, каждая часть волновой поверхности, сформированной контролируемой деталью, создает свое элементарное изображение источника света в плоскости ножа (рис. 3.3.7, *а*). При этом если фокус зоны короче, то элементарное изображение ниже кромки ножа, если фокус длиннее, то выше. Если источник достаточно протяженный, то нож, доведенный до оптической оси, частично перекрывает элементарные изображения источников: от зоны *1* – до половины, от зоны *2* – почти полностью, от зоны *3* – очень немного (рис. 3.3.7, *г*). Понятно, что все сказанное касается той половины детали, которая лежит выше оптической оси, относительно нижней половины все остается справедливым с точностью до наоборот.



а *б* *в* *г*

Рис. 3.3.7. Связь фотометрического профиля теневой картины с профилем поперечных аберраций: *а* – схема формирования теневой картины с достаточно широкой щелью; *б* – теневая картина с выделенным профилем фотометрирования; *в* – фотометрический профиль на экране осциллографа; *г* – схема формирования элементарных изображений щели

На основании этих соображений можно показать, что освещенность в точках профиля (фотометрический профиль) теневой кар-

тины $E(m')$, измеренная в направлении, перпендикулярном кромке ножа, пропорциональна профилю поперечных аберраций $\delta g'(m')$:

$$E(m') \sim \delta g'(m'), \tag{3.3.7}$$

где m' – координата точки в плоскости выходного зрачка в направлении, перпендикулярном ножу.

Это положение легло в основу ***метода Филбера*** (1967). Другим важным техническим решением, предложенным Филбером, было использование телевизионной техники. Теневая картина строится на сигнальной пластине (рис. 3.3.7, *б*) телевизионной передающей трубки с помощью объектива, сфокусированного на контролируемую деталь. Телевизионный кадр от передающей трубки поступает на видеоконтрольное устройство. С помощью промышленного осциллографа, имеющего блок выделения телевизионной строки, можно на экране осциллографа получить кривую поперечной аберрации (рис. 3.3.7, *в*) любой хорды, перпендикулярной к кромке ножа. При этом важно, что профиль поперечных аберраций получается в виде электрического сигнала. Это дает возможность интегрировать его, например, с помощью аналоговой электрической цепочки и также вывести на экран осциллографа, т.е. получить волновые аберрации волнового фронта согласно известной формуле (П.149)

$$\Delta W(m') = \frac{1}{R}\int_0^{m'} \delta g'(m')dm', \tag{3.3.8}$$

где в качестве измеряемого параметра используется R – радиус кривизны исследуемого волнового фронта.

С помощью современной видео- и цифровой техники этот метод может быть реализован гораздо более просто, однако в силу своих ограничений имеет умеренную точность. Принято считать, что погрешность телевизионного фотометрического теневого метода составляет ~1/50 длины волны света.

Причин такого ограничения по сравнению с методом Фуко–Максутова несколько:

– так как метод Филбера является фотометрическим, неравномерность коэффициента отражения различных участков исследуемой поверхности воспринимается как погрешность ее формы;

– порог контрастной чувствительности фотоприемного устройства в области малых контрастов;

– допущение (3.3.7) справедливо при следующих ограничениях:

○ когда ширина щели согласована с величиной поперечных аберраций, обеспечивая перекрывание ножом всех элементарных изображений щели,

○ когда отклонения профиля достаточно гладкие, т.е. в пределах элементарного участка поверхности можно считать его форму сферической, и элементарное изображение является безаберрационным,

○ характерный масштаб S_i отклонения формы достаточно большой, чтобы пренебречь дифракционными явлениями;

– наличие измеряемого параметра – R, погрешность измерения которого напрямую влияет на результат;

– наличие процедуры калибровки, позволяющей превратить соотношение (3.3.7) в равенство.

Из этих причин остановимся здесь на последней ввиду того, что она представляет методический интерес.

Пример 3.3.5. Методика фотометрической калибровки в методе Филбера может быть построена следующим образом. Из рис. 3.3.8 освещенность площадки $\Delta S'(m')$ в точке с координатами $(m', 0)$ согласно (П.56) равна

$$E(m', 0) = \frac{a \cdot b \cdot B}{\Delta S'(m') \cdot R^2} \cos\alpha_1 \cdot \cos\alpha_2, \qquad (3.3.9)$$

где α_1 – угол, под которым луч, идущий от площадки $\Delta S'(m')$, ориентирован по отношению к нормали к этой площадке; α_2 – угол, под которым луч, идущий от площадки $\Delta S'(m')$, ориентирован по отношению к нормали к плоскости формирования элементарного изображения источника; R – радиус кривизны анализируемого фронта; B – яркость источника света.

Предположения, при которых калибровка может быть выполнена корректно:

○ $\cos\alpha_1 \approx 1$, $\cos\alpha_2 \approx 1$;

○ $\Delta S'$ одинакова для всех точек $(m', 0)$ поверхности;

○ у аберраций волнового фронта отсутствует сагиттальная составляющая;

○ индикатриса источника света – ламбертовская и не зависит от положения т. $(m',0)$;

○ фотоприемное устройство имеет коэффициент усиления, постоянный по кадру, АРУ – отключено, все пиксели имеют одинаковую чувствительность, осциллограф имеет линейную характеристику, диапазон фотоприемного устройства – линейный;

○ у объектива камеры отсутствует дисторсия.

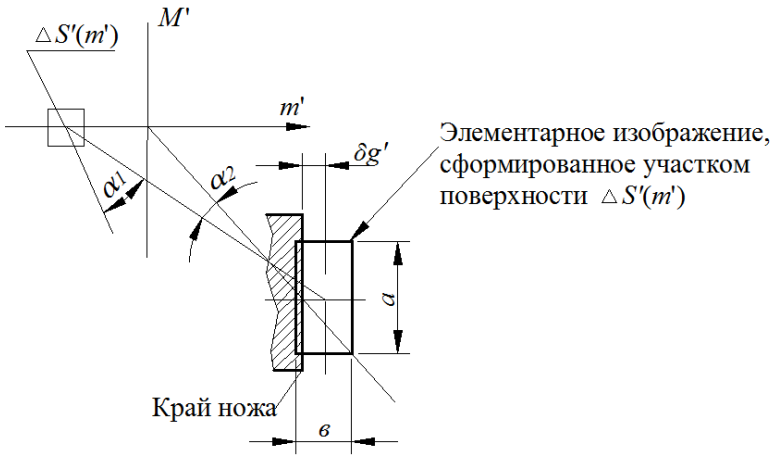


Рис. 3.3.8. Освещенность изображения элементарной площадки $\Delta\varpi'(m')$ в теневом методе Филбера при перекрывании ножом изображения щели, сформированного элементарной площадкой

Если это верно, можно записать для фотометрического сигнала на экране осциллографа в отсутствие ножа:

$$E^0(k_м m',0) = b \cdot k \cdot B, \qquad (3.3.10)$$

где $k_м$ – коэффициент масштабирования профиля детали к горизонтальной шкале осциллографа.

При введении ножа уменьшается площадь элементарного источника, следовательно, в соответствии с рис. 3.3.9 будем иметь освещенность в т. $(m',0)$, зарегистрированную на экране осциллографа:

$$E^1_н(k_м m',0) = {}^{b \cdot k \cdot B}/_2 + k \cdot B\left(l_1 + \delta g'(k_м m')\right), \qquad (3.3.11)$$

где l_1 – положение ножа относительно оптической оси.



Рис. 3.3.9. К методике калибровки схемы теневых измерений по методу Филбера

Для калибровки необходимо выполнить следующие действия.

1. Выбрать ширину щели, достаточную для регистрации теневой картины.

2. Зарегистрировать на экране осциллографа фотометрический профиль $E^0(k_м m', 0)$ вдоль выделенной строки телевизионного растра (рис. 3.3.7, *в*). Амплитуда профиля должна иметь постоянное значение в пределах скана. Наличие фотометрической неоднородности свидетельствует о загрязненности поверхности или неравномерности индикатрисы излучения источника света. Помимо этого, на экране не должно быть пересветки. В противном случае следует уменьшить яркость источника освещения. Если это все выполняется, определить на экране осциллографа уровень: $A_0 = E^0(k_м m', 0)$.

3. Ввести нож в каустику до соприкосновения с оптической осью. При этом нож должен коснуться всех элементарных изображений. Если это не так, вернуться на п. 1. Установить факт касания оптической оси можно по симметрии теневой картины. При этом положении ножа ширина элементарного изображения щели составит $b/2 + \Delta g'(k_м m')$, а фотометрический профиль на экране осциллографа описывается функцией

$$E_н(k_м m', 0) = b \cdot k \cdot B/2 + k \cdot B \cdot \delta g'(k_м m'). \qquad (3.3.12)$$

4. Записать сигнал $E_н(k_м m', 0)$.

5. Переместить нож в пределах каустики и зафиксировать отсчет l_1 положения ножа по отсчетному устройству стола теневого прибора в направлении, перпендикулярном оптической оси. Смещение ножа должно быть достаточно малым, чтобы не приводить к существенным изменениям в профиле теневой картины. Зарегистрировать на экране осциллографа фотометрический профиль $E^1_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0)$, соответствующий этому положению ножа.

6. Переместить нож в пределах каустики и зафиксировать отсчет l_2 положения ножа по отсчетному устройству стола теневого прибора в направлении, перпендикулярном оптической оси. Зарегистрировать на экране осциллографа фотометрический профиль

$$E^2_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0) = {}^{b\cdot k\cdot B}/_{2} + k\cdot B\big(l_2 + \delta g'(k_{\text{м}}m')\big) \qquad (3.3.13)$$

и зафиксировать отсчет l_2 положения ножа по отсчетному устройству стола теневого прибора в направлении, перпендикулярном оптической оси. l_1 и l_2 должны быть такими, чтобы обеспечить расположение ножа вблизи оптической оси. Знак при l_1 и l_2 определяется следующим образом: он положительный, если направление смещения ножа от оптической оси, в противном случае – отрицательный.

7. Вычитая $E^2_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0)$ из $E^1_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0)$, получим

$$E^1_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0) - E^2_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0) = k\cdot B\cdot(l_1 - l_2). \qquad (3.3.14)$$

Отсюда определим цену деления вертикальной шкалы осциллографа

$$k' = (k\cdot B)^{-1} = \frac{(l_1 - l_2)}{E^1_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0) - E^2_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0)}. \qquad (3.3.15)$$

8. Привести сигнал $E_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0)$ к виду

$$\delta g'(k_{\text{м}}m') = k'\left(E_{\text{н}}(k_{\text{м}}m',0) - \frac{A_0}{2}\right). \qquad (3.3.16)$$

9. Выполнить интегрирование по (3.3.8).

Описанная методика дает представление о том, насколько квалифицированно и субъективно выполняются измерения по методу Филбера. Собственно, это и является причиной его малой распространенности.

Метод щели (точки) и нити для количественного контроля асферических волновых фронтов. Суть этого метода заключается

в том, что перекрытие изображения щели осуществляется с помощью тонкой нити, а не ножа. Хотя содержание теневого метода остается прежним, внешний вид теневой картины оказывается существенно другим. Она представляется в виде буквы Ф (рис. 3.3.10), а зоны, в центрах кривизны которых находится в данный момент нить, кажутся темными. Все остальное поле теневой картины остается светлым.



а *б* *в*

Рис. 3.3.10. Теневые картины, полученные методом щели и нити: *а* – нить в фокусе зоны, сравнительно близкой к центру зеркала (0,6 половины светового диаметра); *б* – нить в более далекой зоне (0,7 половины светового диаметра); *в* – нить в зоне 0,8 светового диаметра

По сравнению с классическим, этот метод особенно выигрывает при исследовании волновых фронтов, существенно отличающихся от сферических. Если выполнить разметку зон на контролируемой детали и снабдить теневой прибор устройством для измерения продольных перемещений, то с помощью описанной методики можно измерить продольные аберрации контролируемого волнового фронта и восстановить профиль исследуемой детали. В такой интерпретации получается количественный метод, применимый, в силу своей специфики, преимущественно для асферических волновых фронтов. При этом существуют две модификации способа:

– ***измерение продольных аберраций зеркала*** (часто применяется другой термин – ***продольных аберраций нормалей***), когда щель теневого прибора перемещается вдоль оси при продольной наводке на зоны *m'* вместе с нитью (рис. 3.3.11, *а*);

– ***измерение продольных аберраций волнового фронта***, когда щель теневого прибора расположена неподвижно в центре парак-

сиальной кривизны волнового фронта, а при продольной наводке теневого прибора на зоны *m'* вдоль оси перемещается только нить (рис. 3.3.11, *б*).

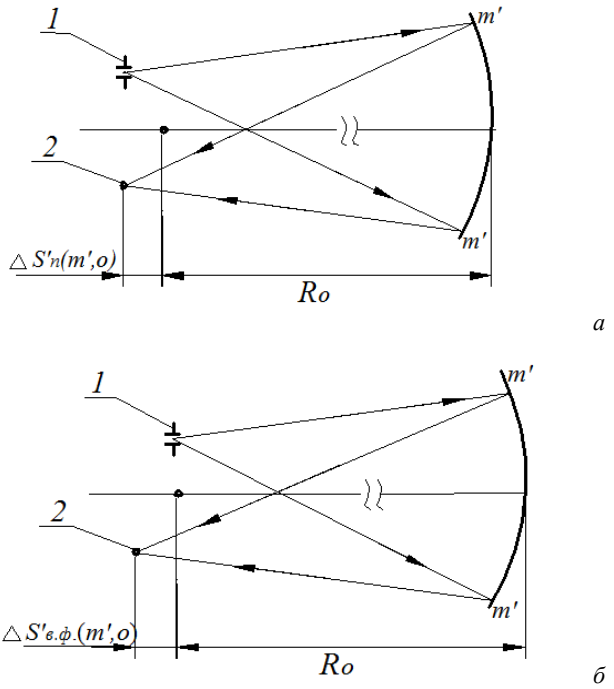


Рис. 3.3.11. Схема контроля формы оптических поверхностей по продольным аберрациям по методу щели – *1* и нити – *2*: *а* – выполняются измерения продольных аберраций нормалей; *б* – выполняются измерения продольных аберраций волнового фронта

Принципиальных отличий у этих двух способов нет, но разными являются конструкция теневого прибора и интерпретация данных измерений: в первом случае речь идет об отклонении формы поверхности – $\Delta(m')$, во втором – об аберрациях волнового фронта – $\Delta W(m')$. Первый способ имеет предпочтительное применение при схемах контроля в автоколлимации, второй – при контроле на просвет.

Пример 3.3.6. Обработка данных при контроле формы поверхностей посредством измерения продольных аберраций зеркала методом щели и нити может быть организована следующим образом.

Обозначим $\Delta S^{\text{т}}(m')$ – расчетное значение продольных аберраций зеркала.

Если при измерении по схеме (рис. 3.3.11, *а*) были получены реальные значения продольных аберраций $\Delta S(m')$, то отступление от теоретического значения может быть определено по формуле

$$\Delta\big(\Delta S(m')\big) = \Delta S(m') - \Delta S^{\text{т}}(m'). \qquad (3.3.17)$$

Используя известную формулу (П.150) для связи поперечной и продольной аберраций, получим

$$\delta g'(m') = \Delta S(m') \cdot \frac{m'}{R}, \qquad (3.3.18)$$

где R – параксиальный радиус кривизны исследуемого волнового фронта. И тогда из (3.3.8) получим для отклонения формы поверхности

$$\Delta(m') = \frac{1}{R^2}\int_0^{m'} \Delta\big(\Delta S(m')\big) \cdot m' dm'. \qquad (3.3.19)$$

Метод Ронки для качественного контроля сферических волновых фронтов является одним из методов расфокусированных диафрагм. В качестве визуализирующего элемента используется решетка, состоящая из туго натянутых нитей. Сущность метода показана на рис. 3.3.12.

Пусть Σ – сферическая волновая поверхность, фокусом которой является т. О. На пути пучка лучей установлена решетка Р, вид которой приведен в поз. 1. В плоскости наблюдения теневой картины Т от соответствующей нити наблюдается тень в виде прямой линии. Если теневая картина наблюдается глазом, аккомодированным на деталь, то тень наблюдается в плоскости аккомодации глаза. В поз. 2 сплошными линиями показана теневая картина Ронки для сферической волновой поверхности Σ. Если волновой фронт Σ′ имеет, например, приподнятый край, то это значит, что краевые зоны имеют более короткий фокус, чем параксиальные.

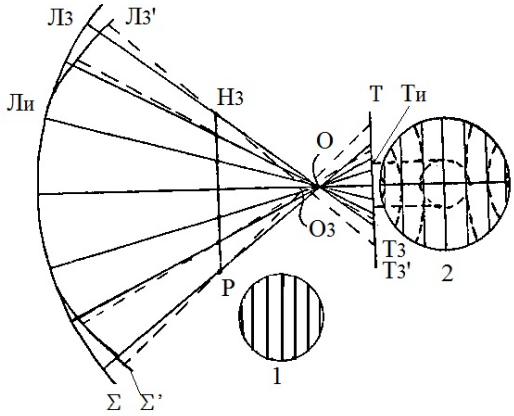


Рис. 3.3.12. Схема, поясняющая сущность метода Ронки

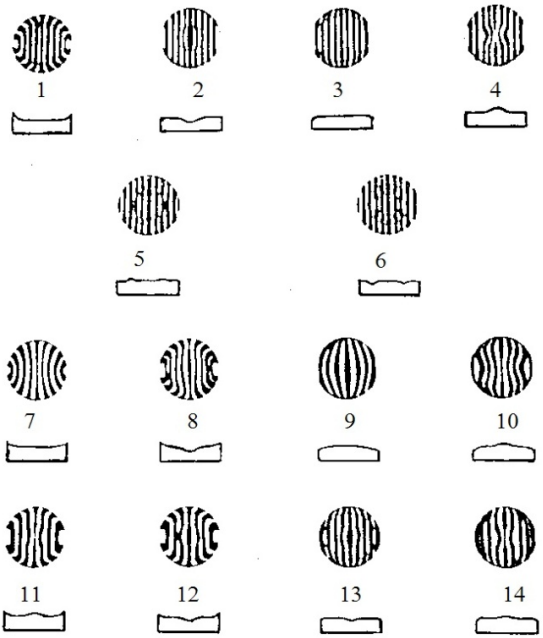


Рис. 3.3.13. Теневые картины Ронки и соответствующие отклонения волнового фронта от номинальной формы

Отсюда следует, что теневая картина будет иметь вид искривленных линий, форма которых напоминает букву Ж (показано пунктирными линиями в поз. 2). Таким образом, по искривлению теневой картины можно судить о характере ошибки волнового фронта (следовательно, и детали) и ее месторасположении. На рис. 3.3.13 приведены наиболее часто встречающиеся дефекты поверхности и их теневые картины Ронки – ***ронкиграммы***.

Метод криволинейного экрана (нуль-теста Ронки) для количественного контроля асферических волновых фронтов. Метод криволинейного экрана во всем аналогичен методу решетки Ронки и представляет собой модификацию последнего для контроля деталей, формирующих асферические волновые поверхности. Асферическая волновая поверхность номинально имеет аберрацию, представляющуюся в виде общей ошибки. Следовательно, теневая картина от решетки Ронки будет иметь общее искривление к краю, на фоне которого будет очень сложно распознать искривление, связанное с ошибкой детали. Поэтому для асферических волновых фронтов рассчитывается криволинейный экран таким образом [30], что при установке его на место решетки в плоскости наблюдения имеет место компенсация кривизны линий экрана. Интерпретация теневых картин от криволинейного экрана аналогична картинам, приведенным на рис. 3.3.13.

В работе [67] обсуждаются вопросы, связанные с ограничениями и погрешностями метода Ронки. Здесь показано, что:

– предел чувствительности метода Ронки существенно зависит от схемы контроля, параметров контролируемой детали, качества фотоприемного устройства, приводятся соотношения, позволяющие оценить этот предел;

– качественный контроль по методу Ронки является достаточно грубым и может использоваться только на начальных стадиях обработки оптики. Предел чувствительности при определении общей ошибки находится на уровне 5 мкм, зональной – 0,5 мкм;

– количественный контроль по методу Ронки имеет предел чувствительности на уровне критерия Рэлея (0,1 мкм). Но при этом фотоприемное устройство теневого прибора должно иметь линейные искажения не выше 0,1%, а разрешающая способность –

5–8 мкм. Теневой прибор должен быть оборудован техническими средствами для точного позиционирования экрана Ронки.

Метод Гартмана для количественного контроля сферических волновых фронтов. В 1904 г. И. Гартман разработал количественный метод измерения остаточных аберраций оптических систем. Метод основан на законах геометрической оптики, просто осуществляется на практике без применения дополнительных оптических элементов и в то же время имеет достаточно высокую точность. Рассмотрим сущность метода на примере исследования объектива *О* (рис. 3.3.14), создающего в общем случае негомоцентрический пучок лучей. За объективом в плоскости выходного зрачка *P'* устанавливают диафрагму *Д* с отверстиями, симметрично расположенными по зонам выходного зрачка. За диафрагмой устанавливают фотопластинку ФП в предфокальное (см. рис. 3.3.14) или зафокальное положения (возможен вариант, когда регистрируются две гартманограммы) на расстоянии *a* от диафрагмы Гартмана.

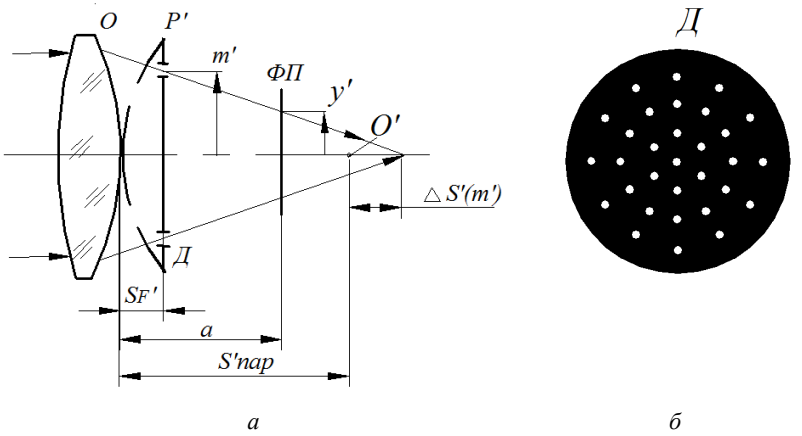


Рис. 3.3.14. Схема получения гартманограмм при исследовании объектива по методу Гартмана: *а* – схема измерительного эксперимента; *б* – вид диафрагмы Гартмана

Параметры схемы – параксиальный фокальный отрезок $S'_{\text{пар}}$ и отрезок *a* должны быть точно измерены, причем расстояния

$z_1 - z_2$ и z_0 также должны быть точно измерены. Проявленные фотопластинки называют ***гартманограммами***. При фотографировании удаленного источника света, например звезды, узкие пучки света пройдут через отверстия диафрагмы *Д* узкими пучками и оставят на фотопластинках следы в виде пятен малого диаметра. Центр каждого пятна можно принять за точку пересечения луча, проходящего через центр отверстия диафрагмы Гартмана на соответствующей высоте m' в выходном зрачке. Измерив на гартманограммах координаты точек пересечения лучей с фотопластинками y с помощью измерительного микроскопа, можно записать для продольной аберрации $\Delta S(m')$ соотношение

$$\frac{m'}{S'_{\text{пар}} - S'_{p'} + \Delta S(m')} = \frac{m' - y}{a}, \tag{3.3.20}$$

где $S'_{p'}$ – положение выходного зрачка относительно последней оптической поверхности.

Отсюда получим

$$\Delta S(m') = \frac{m'a}{m' - y} + S'_{p'} - S'_{\text{пар}}. \tag{3.3.21}$$

Для нахождения $\Delta(m')$ может быть использовано соотношение (3.3.19).

$S'_{\text{пар}} - S'_{p}$ может быть либо измерено, либо вычислено из результатов измерения гартманограмм для самого низкого отверстия, расположенного в параксиальной зоне волнового фронта.

Диаметры отверстий не должны быть очень большими, иначе их тени на гартманограмме могут соединиться, и не должны быть очень маленькими, иначе дифракционные явления сильно снижают точность при измерении координат на гартманограмме. Общепринятые рекомендации:

– для диаметров отверстий

$$d \approx {S'_{\text{пар}}}/{500}, \tag{3.3.22}$$

– для их взаимного расположения

$$l \geq 0{,}005 f'. \tag{3.3.23}$$

Вопросы, связанные с ограничениями и погрешностями метода Гартмана, оптимальной конфигурацией и расположением диафрагмы Гартмана, подробно обсуждаются, например, в [68].

3.3.2. Интерференционные методы контроля формы поверхности

Измерение формы оптических поверхностей методом пробных стекол. Этот метод относится к интерференционным, и его суть описана в разделе 3.2.2. Качество поверхности оценивают по виду интерференционной картины, локализованной в воздушном зазоре между контролируемой и эталонной поверхностями. Интерференционную картину можно получить в виде замкнутых колец или полос.

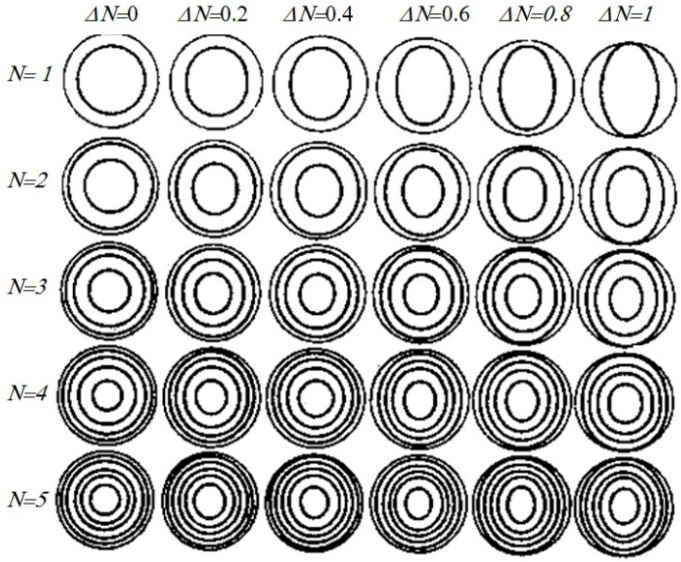


Рис. 3.3.15. Астигматические погрешности сферических поверхностей, контролируемых пробными стеклами

Интерференционные кольца используют для оценки астигматической погрешности и погрешности радиуса. Для выявления и оценки местных погрешностей, а также дефектов краевых зон целесообразно получить интерференционную картину в виде полос. Для этого слегка нажимают на край пробного стекла. При визуальной оценке погрешность радиуса N измеряется с точностью приблизительно 0,5 кольца, другие дефекты – с точностью 0,1 ширины полосы. Цена одного интерференционного кольца или полосы равна $\lambda/2$, где λ – длина волны света, используемого для контроля. При контроле в белом свете обычно принимают $\lambda = 0{,}55$ мкм.

Кольца при наличии астигматизма принимают эллиптическую форму (рис. 3.3.15). В этом случае астигматизм поверхности оценивают по разности числа интерференционных колец в двух диаметральных сечениях – ΔN.

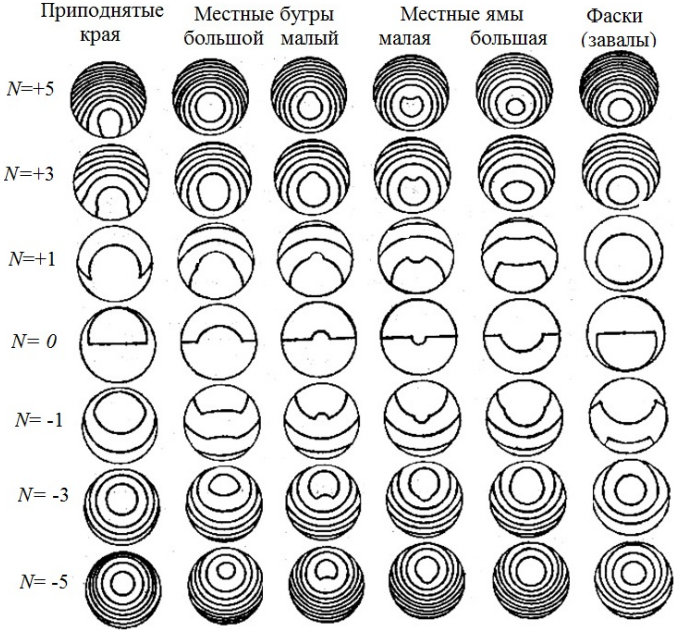


Рис. 3.3.16. Местные ($\Delta N = 0{,}5$) и общие ($N = \pm 5$) погрешности поверхностей, контролируемых пробными стеклами

В оптических цехах для оценки значений местных погрешностей используют специальные плакаты (рис. 3.3.16), которые помогают быстро оценить значение местной погрешности ΔN в типовых случаях.

Главное преимущество контроля поверхностей с помощью пробного стекла заключается в его простоте, а также возможности использования непосредственно на рабочем месте. Однако метод имеет и существенные недостатки:

– необходимость тщательной очистки поверхности контролируемой детали и уравнивания температуры детали и пробного стекла, что значительно снижает производительность контроля;

– возможность повреждения контролируемой поверхности при наложении на нее пробного стекла;

– сравнительно низкая точность метода;

– ограниченность контролируемых деталей имеющейся номенклатурой пробных стекол;

– громоздкость хозяйства, связанного с пробными стеклами.

Измерение формы оптических поверхностей с помощью интерферометров. Более универсальными и свободными от перечисленных недостатков представляются промышленные интерферометры, где реализуется сравнение (интерференция) волновых фронтов, сформированных эталоном и контролируемой деталью. Количественная оценка погрешностей изготовления деталей, производимая визуально, аналогична оценке погрешностей методом пробных стекол. При этом цена полосы при контроле деталей на отражение составляет $\lambda/2$, при контроле деталей на просвет – $\lambda/2 \cdot (n-1)$. Погрешность визуальных интерферометрических измерений составляет 0,1 интерференционной полосы.

Конструкции интерферометров достаточно разнообразны.

В последнее время получили распространение промышленные цифровые интерферомеры. В этих приборах посредством цировой обработки интерферограмм результат измерений получается в виде карты отклонений поверхности от номинальной формы. Такое представление измерительной информации дает уникальные возможности для технологии, поскольку позволяет решать обратную задачу – изменение технологических режимов с целью достижения

идеальной формы поверхности, т.е. автоматизировать управление станком.

Пример 3.3.7. В качестве примера такой технологической задачи приведем фотографии с сайта URL:http//www.lzos.ru со ссылкой на статью Magomed A. Abdulkadyrov*, Alexey P. Patrikeev, Sergey P. Belousov, Vitaliy V. Pridnya, Vladimir E. Patrikeev, Alexandr N. Ignatov, Andrey V. Polyanchikov, Alexandr P. Semenov, Yury A. Sharov «M2 Secondary Mirror Manufacturing for VISTA Project», опубликованную на этом же сайте. Фото приведены на рис. 3.3.17.



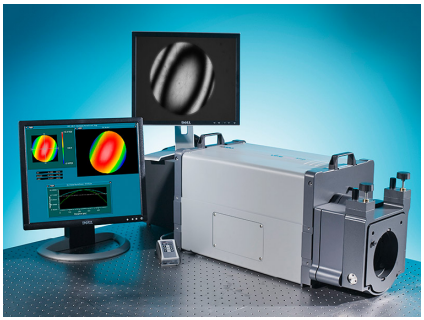
а *б* *в*

Рис. 3.3.17. Автоматизированная доводка облегченного выпуклого гиперболического вторичного зеркала диаметром 1240 мм для телескопа международного проекта VISTA на автоматизированном станке АД-2000: *а* – процесс автоматизированной доводки; *б* – интерферограмма волнового фронта до автоматизированной обработки, полученная в автоколлимационной схеме с использованием анаберрационных точек гиперболы (рис. 3.3, *а*); *в* – интерферограмма поверхности зеркала после автоматизированной обработки с вычетом ошибок изготовления вспомогательных элементов схемы контроля

Ввиду того, что цифровой интерферометр является достаточно дорогим средством измерения, принципиальной является возможность использовать его для как можно большей номенклатуры изделий. Поэтому разработчики интерферометров идут по пути агрегатирования приборов.

Пример 3.3.8. Классическим вариантом такого интерферометрического конструктора являются приборы компании ZYGO (URL:http//www.zygo.com).

Основой устройства является интерферометрический блок GPI (рис. 3.3.18, *а*), в котором скомпонованы передающая, фотоприемная и вычислительная части интерферометра.



а



б

Рис. 3.3.18. Интерферометр GPI: *а* – внешний вид с устройствами отображения оптических измерительных изображений и измерительной информации; *б* – сменные оптические пропускающие компоненты, формирующие фокусность освещающего пучка и содержащие эталонные сферические поверхности

С помощью комплекта принадлежностей, приведенных на рис. 3.3.19, могут быть реализованы различные интерферометрические схемы, решающие многочисленные задачи оптического производственного контроля формы оптических поверхностей.

Компоновка прибора для реализации той или иной схемы измерения может быть произведена либо на оптическом столе, либо с помощью специализированных оснований. Специальные варианты компоновки (рис. 3.3.20) позволяют реализовать:

– схему цехового интерферометра с вертикальным размещением, обеспечивающую минимальные вибрации;

– схему измерения радиуса автоколлимационным методом с контролем наводок по интерференционной картине;

– схему контроля асферических поверхностей по методу автоколлимационных точек;

– схему крупногабаритного интерферометра.

Если отвлечься от частных моментов, то основные преимущества интерференционного метода контроля оптических поверхностей перед теневым можно сформулировать следующим образом:

– он по своей сути является количественным и достаточно точным;

– дает полную и наглядную информацию обо всей поверхности;

– результат контроля практически не зависит от состояния поверхности.

С другой стороны, основные преимущества теневого метода перед интерференционным:

– высокая точность контроля;

– чрезвычайная простота аппаратурной реализации;

– отсутствие эталонных элементов в схемных решениях.

Решение по использованию той или иной методики для данной детали зависит от оснащенности измерительной лаборатории оптического предприятия, сложившихся традиций контроля, особенностей измерительной задачи. При изготовлении особо ответственных, дорогих и сложных деталей стараются применять весь имеющийся арсенал методов контроля.

Пример 3.3.9. На рис. 3.3.21 представлены результаты технологического контроля формы поверхности параболического зеркала диаметром $D = 500$ мм с уравнением поверхности $y^2 = 4500x$, т.е. величина параксиального радиуса кривизны составляет $R_0 = 2250$ мм. Зеркало предназначено для изготовления лидара, являющегося дифракционно ограниченной системой. Допуск на погрешность формы поверхности 0,08 мкм.

Представленные на рис. 3.3.21 результаты показывают, что изготовленная деталь удовлетворяет допуску формы и имеет зональную ошибку, амплитуда которой не превосходит $P - V \approx 0{,}03$ мкм. Однако эти результаты справедливы для одного сечения детали, перпендикулярного краю ножа. В иных сечениях информации о форме детали нет.

Поэтому для аттестационного контроля была собрана схема интерферометра с совмещенными ветвями с использованием анаберрационных точек параболы по рис. 3.3.25, *г*. Полученная интерферограмма представлена на рис. 3.3.22, *а*.

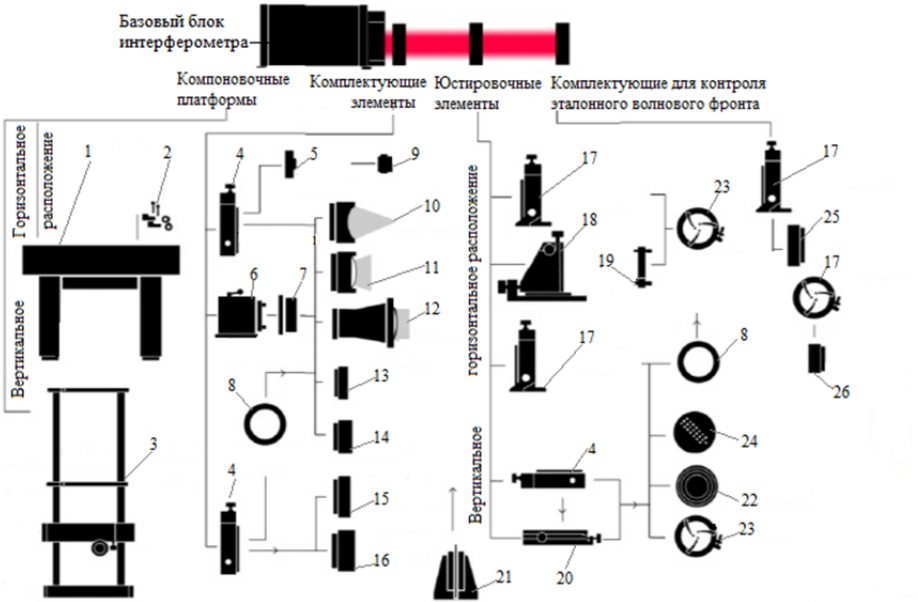


Рис. 3.3.19. Комплектующие интерферометра GPI: *1* – виброизоляционный стол; *2* – крепежные элементы; *3* – вертикальная стойка; *4* – универсальная оправа, *5* – байонетная оправа; *6* – светоделитель; *7* – фильтр; *8* – переходник; *9* – сферический оптический компонент; оптика, формирующая сходящийся (*10*) и расходящийся (*11*) волновые фронты; *10* – фокусирующая оптика; *12* – расширитель пучка; *13* и *15* – плоскопараллельные пластины; *14* и *16* – сферическая оптика; *17* – двухкоординатная юстировочная оправа; *18* – трехкоординатная оправа; *19* – поворотная оправа; *20* – X-Y позиционер; *21* – фильтр; *22* – диафрагма; *23* – самоцентрирующийся держатель; *24* – держатель; *25* – эталонная плоская поверхность; *26* – эталонная сферическая поверхность



а *б*

в

г

Рис. 3.3.20. Различные компоновки интерферометра GPI для:
а – цеховых измерений; *б* – контроля асферических поверхностей;
в – контроля крупногабаритных поверхностей; *г* – измерения радиусов кривизны

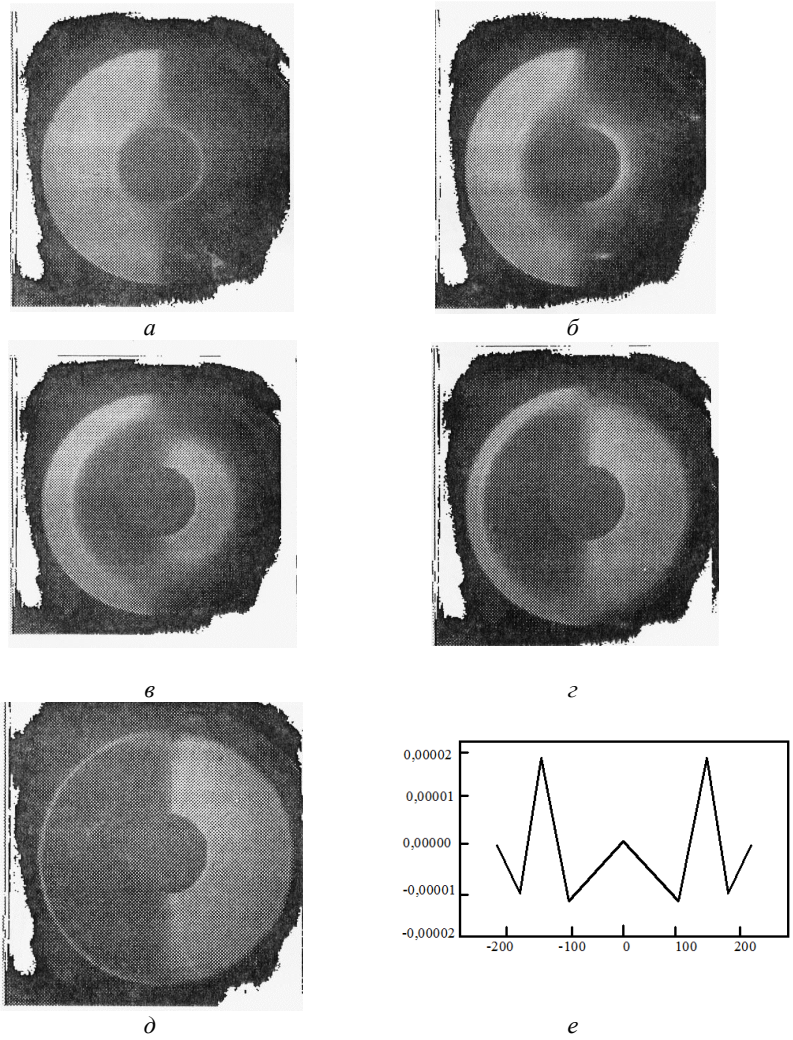
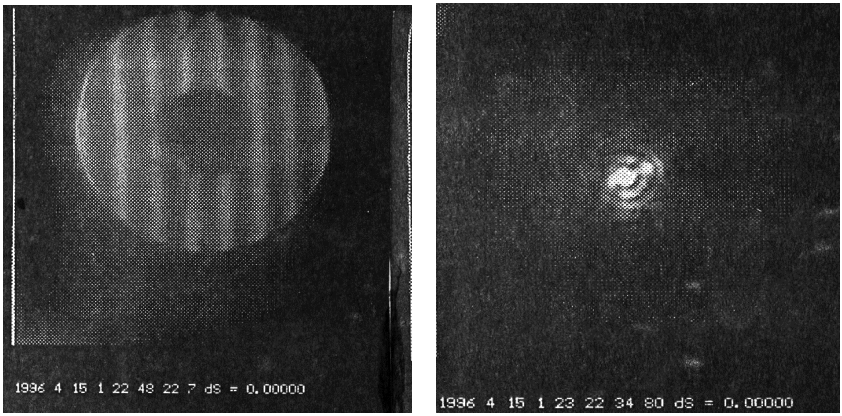


Рис. 3.3.21. Результаты технологического контроля параболического зеркала по продольным аберрациям по теневому методу щели и ножа. Разметка зон производилась на экране видеоконтрольного устройства. *а–д* – наводка ножа и установка его тени в зоне – визуально; *е* – восстановленный профиль отклонений формы поверхности от идеальной формы



а *б*

Рис. 3.3.22. Результаты аттестационного контроля параболического зеркала в автоколлимационной схеме по интерферограмме – *а* и по фокальному пятну – *б*

Искривления полос интерференционной картины в средней зоне видны, но с трудом. Это говорит о том, что погрешность изготовления поверхности (если это не относится к вспомогательному плоскому зеркалу) находится на уровне $\Delta N = 0{,}15$ интерференционной полосы, что при цене полосы $\lambda/4$ и длине волны лазера интерферометра $\lambda = 0{,}63$ мкм соответствует отклонению формы поверхности $P - V \approx 0{,}025$ мкм. Это в общем согласуется с данными технологического контроля. Но на интерферограмме видны значительные искривления (до половины интерференционной полосы) в краевой и центральной зонах поверхности вблизи центрального отверстия. Это указывает на наличие (значительных по величине, но малых по занимаемой площади) локальных ошибок в соответствующих зонах с амплитудой до $P - V \approx 0{,}1$ мкм. Однако это значение не укладывается в значение критерия Рэлея для волнового фронта ($\lambda/4$), следовательно, структура пятна рассеяния будет отлична от дифракционной. Для проверки этого факта в той же схеме контроля было рассмотрено с помощью горизонтального микроскопа фокальное пятно, сформированное исследуемой параболой. Его изображение приведено на рис. 3.3.22, *б*. Фокальное пятно очень

напоминает дифракционное, за исключением малых особенностей, проявляющихся в виде небольших разрывов колец. Эти особенности как раз и связаны с теми локальными ошибками, которые видны на интерферограмме на рис. 3.3.22, *а*. В этом можно убедиться, перекрывая соответствующие места на зеркале с помощью непрозрачного экрана. По согласованию с заказчиком было принято решение об остановке обработки зеркала, поскольку конструкцией прибора предполагается работа изделия с сечением фокального пятна, и при определенной ориентации изделия в приборе небольшие дефекты зеркала не будут сказываться на работоспособности устройства.

3.3.3. Контроль формы асферических поверхностей

Особенность асферических поверхностей, накладывающая ограничение на применение принятых методик, заключается в том, что радиус кривизны асферических поверхностей номинально не является постоянным и зависит от высоты зоны поверхности. Отсюда следует, что для контроля формы поверхности могут быть использованы контактные методы с применением длиномеров или оптиметров.

Контактный метод измерения формы асферической поверхности кольцевым контактным сферометром сводится (рис. 3.3.23) к нахождению величины отклонения стрелки асферической поверхности x_i на данной зоне y_i от стрелки соответствующей номинальной поверхности, определенной уравнением $x = f(y)$. Высота зоны y_i определяется радиусом кольца сферометра, поэтому для того чтобы получить достаточное количество отсчетов, необходимо иметь достаточный набор колец. Погрешность измерения не превосходит 3 мкм.

Контактный метод измерения формы асферической поверхности полярным координатометром (рис. 3.3.24) сводится к определению приращения радиуса при изменении угла φ. При этом ось вращения щупа должна совпадать с параксиальным центром кривизны асферической поверхности.

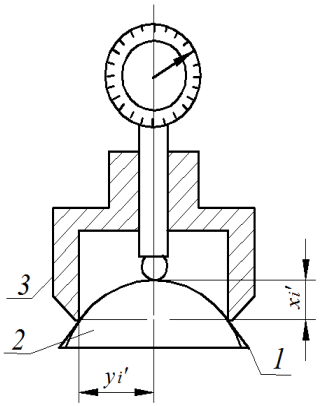


Рис. 3.3.23. Измерение формы асферической поверхности накладным контактным сферометром: *1* – измеряемая асферическая поверхность; *2* – номинальный профиль асферической поверхности; *3* – накладной контактный сферометр

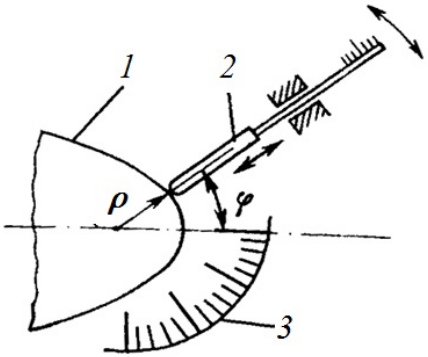


Рис. 3.3.24. Измерение формы асферической поверхности на полярном координатометре: *1* – измеряемая асферическая поверхность; *2* – щуп; *3* – лимб измерения угла поворота щупа

Описанные в предыдущем разделе методы и устройства обеспечивают бесконтактный контроль деталей сферической формы или деталей, формирующих сферические волновые фронты. При разработке схем контроля деталей асферической формы или дета-

лей, формирующих асферические волновые фронты, чаще всего используют:

– ***автоколлимационные анаберрационные схемы***;

– дополнительные оптические элементы – ***компенсаторы***.

Автоколлимационные схемы могут быть реализованы тогда, когда исследуемая деталь имеет ***анаберрационные точки,*** т.е. такие положения предмета и его изображения, при которых соответствующие волновые поверхности являются гомоцентрическими. Так, например, анаберрационными точками параболы являются ее параксиальный фокус и бесконечность. То есть при размещении точечного источника света в фокусе отраженный параболой фронт будет плоским и безаберрационным – ***стигматическим***. И наоборот, если на параболу нормально падает плоский волновой фронт, то отраженный ею волновой фронт будет стигматическим с центром в фокусе. Все асферические поверхности второго порядка имеют анаберрационные точки. На рис. 3.3.25 приведены варианты соответствующих автоколлимационных схем.

Поскольку на выходе автоколлимационной схемы формируется сферический волновой фронт, для исследования его формы может быть использован практически любой метод и прибор, предназначенный для бесконтактного контроля формы сферических поверхностей.

Компенсационные методы контроля формы асферических оптических поверхностей. Сущность метода, основанного на компенсации аберраций нормалей асферической поверхности, заключается в том, что вся совокупность лучей, выходящих из дополнительной оптической системы – ***компенсатора***, полностью совпадает с нормалями к контролируемой поверхности.

В качестве примера рассмотрим рис. 3.3.26.

Здесь на линзу *1*, выполняющую роль компенсатора, падает гомоцентрический расходящийся пучок лучей. Параметры компенсатора рассчитаны таким образом, что любой луч, выходящий из него, падает нормально на асферическую поверхность *2* и после отражения от нее повторяет свой путь в обратном направлении. Таким образом, компенсационная схема также является автоколлимационной, но не анаберрационной, поскольку между компен-

сатором и контролируемой деталью волновой фронт не является гомоцентрическим.

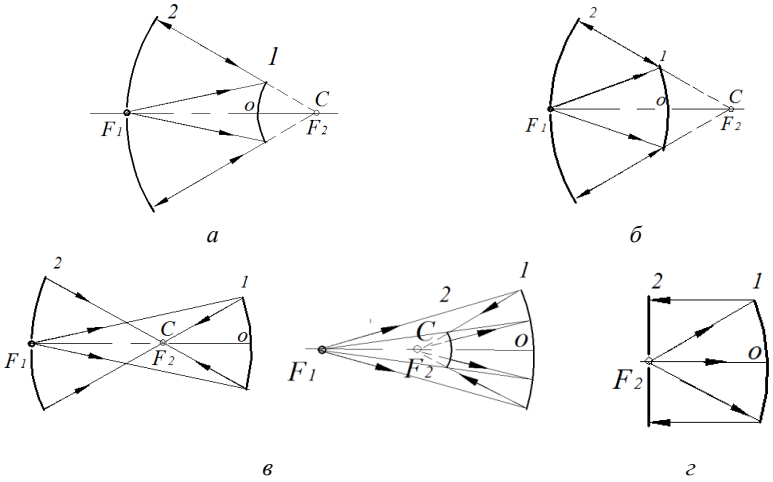


Рис. 3.3.25. Автоколлимационные системы для контроля формы асферических поверхностей второго порядка: *а, б* – соответственно выпуклых и вогнутых гиперболических; *в* – вогнутых эллиптических; *г* – вогнутых параболических. *С* – центр кривизны автоколлимационного зеркала *2*

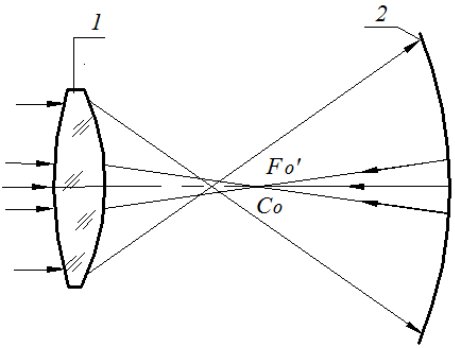


Рис. 3.3.26. Ход лучей в компенсационной системе контроля асферической поверхности

Способы исполнения компенсаторов разнообразны. В частности, компенсатор может представлять собой как традиционную

оптическую систему, так и синтезированную голограмму. Криволинейный экран в методе нуль-теста Ронки также является примером компенсатора.

3.3.4. Методы измерения шероховатости

При оценке шероховатости поверхности возникают некоторые специфические метрологические проблемы. Чертежом, как правило, задаются требования к шероховатости всей рабочей поверхности детали. Контроль соблюдения этих требований осуществляется обычно по некоторому числу профилей ограниченной длины. При этом возникают вопросы:

– какой длины должен быть каждый обследуемый профиль, т.е. участок измерения;

– сколько должно обследоваться таких участков;

– какие участки выбирать для измерений, чтобы оценить качество поверхности в целом.

Оценку шероховатости поверхности можно производить комплексно (путем сравнения с эталонной поверхностью или другими способами) либо поэлементно, измеряя отдельные параметры шероховатости поверхности.

Комплексные визуальные методы контроля шероховатости и чистоты оптических поверхностей реализуются с помощью микроскопа с увеличением $6^{\times}$–$25^{\times}$ путем сравнения с образцами шероховатости и чистоты. В свою очередь образцы чистоты аттестуются с помощью измерительного микроскопа, например УИМ 23, в соответствии с ГОСТ 11147–76, а образцы шероховатости по ГОСТ 2789–73 – с помощью приборов, описанных ниже в этом разделе.

Комплексный рефлектометрический метод имеет в своей основе закон Ламберта:

$$I_r = I_0 \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta, \qquad (3.3.24)$$

где I_0 – сила света излучения, падающего на образец; I_r – сила света, отраженного от образца; α – угол падения излучения, направленного на образец; β – угол, под которым измеряется излучение, отраженное от образца.

При фиксированных углах падения и наблюдения и длине волны коэффициент отражения может служить сравнительной мерой шероховатости отражающей поверхности.

Рефлектометр (см. раздел 2.3.7), основанный на этом принципе, позволяет сделать комплексный метод измерения шероховатости и чистоты поверхности объективным. При этом образец сравнения, по которому настраивается прибор, должен быть выполнен из стекла одинаковой марки с испытуемым образцом и обработан по одинаковой технологии.

Схема прибора приведена на рис. 3.3.27. Свет от источника *4* направляется объективом *3* через регулируемую диафрагму *2* и призму *1* на испытуемую шлифованную поверхность *AB* под углом 84° к ее нормали. Отраженный от этой поверхности свет направляется призмой *10*, объективом *9* через диафрагму *7* дополнительной линзой *6* на фотоэлемент *5*, связанный с микроамперметром *8*. Погрешность оценки шероховатости с помощью такого сравнительного фотоэлектрического рефлектометра не превышает 20%.

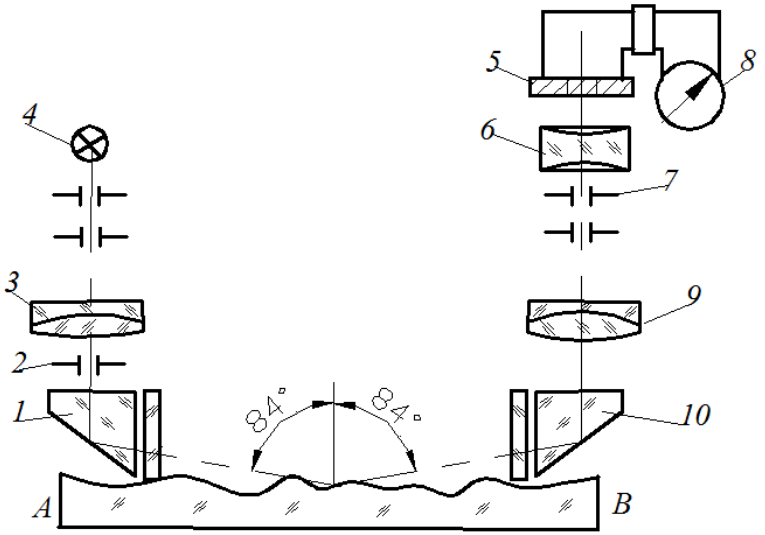


Рис. 3.3.27. Схема фотоэлектрического рефлектометра

Измерение параметров шероховатости оптическими приборами производится бесконтактными методами, среди которых наибольшее распространение получили методы светового сечения, теневого сечения, микроинтерференционные, с применением растров.

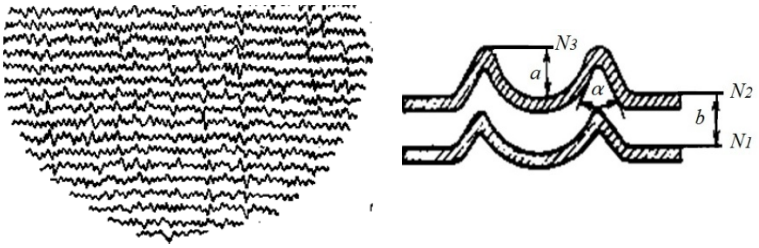
Метод светового сечения заключается в наблюдении изображения щели, спроектированной на шероховатую поверхность в двойной микроскоп Линника (см. пример 2.3.10). При этом по искривлению изображения измеряют параметры шероховатости R_Z и S.

Микроинтерференционный метод реализуется с помощью микроинтерферометра Линника (раздел 2.3.26), предназначенного для лабораторных измерений параметров R_z и S и фотографирования микронеровностей чистых поверхностей с R_z = 0,03–1 мкм.

На рис. 3.3.28, *а* приведена микроинтерферограмма поверхности, сфотографированная на микроинтерферометре МИИ-4. Каждая интерференционная полоса на ней (рис. 3.3.28, *б*) представляет собой изображение полосы профиля поверхности. Высоты микронеровностей (мкм) определяют путем измерения искривления интерференционной полосы a по отношению к интервалу полос b (рис. 3.3.28, б):

$$R_Z == a/b \times \lambda/2 = 0{,}275a/b, \qquad (3.3.25)$$

где λ = 0,55 мкм – длина световой волны микроинтерферометра.



а *б*

Рис. 3.3.28. Измерение шероховатости с помощью микроинтерферометра:
а – поле зрения микроинтерферометра в режиме многолучевой интерференции;
б – схема для определения R_Z

В тех случаях, когда необходимо определить и шаг неровностей, его подсчитывают по формуле

$$S = 2a \operatorname{tg}(\alpha/2), \qquad (3.3.26)$$

где α – угол профиля, измеряемый при помощи окулярного микрометра.

Щуповой метод измерения параметров шероховатости. При щуповом (контактном) методе измерения неровностей поверхности в качестве щупа используют остро заточенную иглу, поступательно перемещающуюся по определенной трассе относительно поверхности. Ось иглы располагают по нормали к поверхности. Опускаясь во впадины, а затем поднимаясь на выступы во время движения ощупывающей головки по испытуемой поверхности, игла колеблется относительно головки соответственно огибаемому профилю. Механические колебания иглы преобразуются, как правило, в электрические при помощи электромеханического преобразователя того или иного типа. Снятый с преобразователя полезный сигнал усиливают, а затем измеряют его параметры, характеризующие неровности исследуемой поверхности – ***профилометрирование***, или записывают параметры профиля поверхности в заранее выбранных вертикальном и горизонтальном масштабах – ***профилографирование***.

Щуповые электромеханические приборы, предназначенные для прямых измерений параметров шероховатости поверхности и записи профиля, называют ***профилометрами-профилографами.***

В щуповых приборах для измерения параметров шероховатости поверхности применяются индукционные, индуктивные, электронные и пьезоэлектрические преобразователи механических колебаний иглы в электрические сигналы.

3.3.5. Контактные методы измерения волнистости

Сигнал, полученный с помощью сканирующего профилографа-профилометра, может быть использован для получения параметров, характеризующих несовершенство геометрии поверхности.

Такие устройства представляют собой контактные измерительные машины с микроощупывающими головками. Классическими и непревзойденными устройствами такого типа являются приборы компании Taylor Hobson Ltd. (Великобритания) с индуктивными микроощупывающими головками.

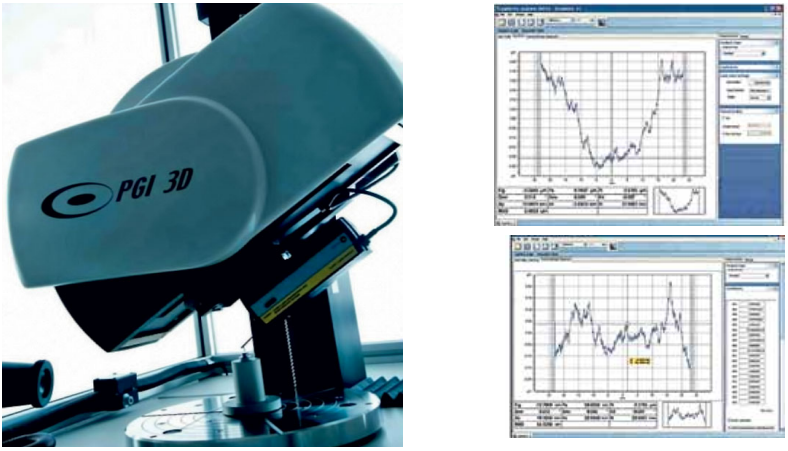
Пример 3.3.10. На рис. 3.3.29 приведен прибор этой компании FormTalysurf PGI 3D Optiks, разработанный специально для контроля оптики.



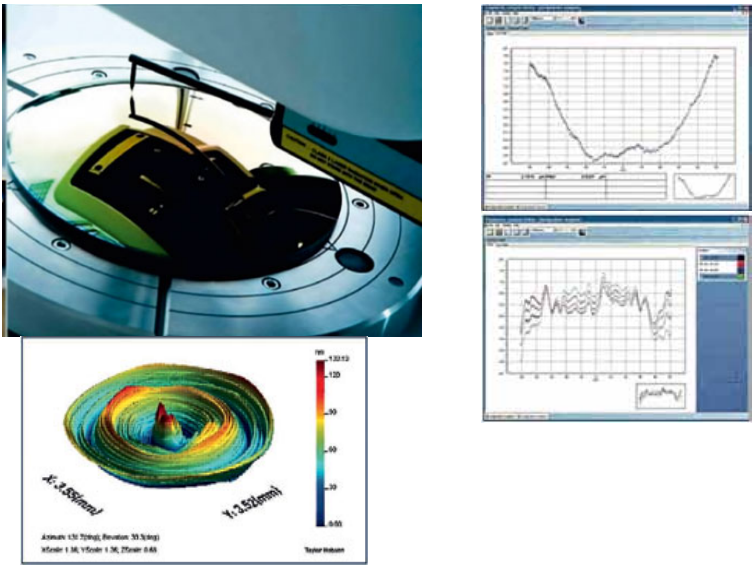
а *б*

Рис. 3.3.29. Система для контроля оптики PGI 3D Optics:
а – внешний вид; *б* – измерительная головка, сканирующая микролинзу
(URL: http//www.taylor-hobson.ru)

PGI 3D Optiks представляет собой измерительную машину с организацией сканирования детали по трем координатам по заданному закону. При этом индуктивная ощупывающая головка находится в контакте с измеряемой деталью, отслеживая тем самым отступления поверхности от номинальной формы, описываемой этим законом. Система обеспечивает выполнение комплексной оценки погрешности формы детали и неравномерности кривизны поверхности для большинства литых, шлифованных деталей или деталей после алмазной обработки.



а



б

Рис. 3.3.30. Возможности FormTalysurf PGI 3D Optiks для контроля оптики: *а* – контроль формы микролинзы; *б* – контроль асферической поверхности (URL: http//www.taylor-hobson.ru)

С помощью данных, полученных с прибора FormTalysurf PGI, можно проанализировать форму, в том числе асферической оптической поверхности, и передать результаты анализа для корректировки режимов обработки с целью оптимизации производственного процесса.

Рисунок 3.3.30 дает представление о возможностях прибора и его принципах работы.

Осесимметричную оптическую систему можно проверить на неравномерность кривизны поверхности путем наложения профилей погрешности формы по сечениям, полученным в различных диаметральных направлениях. При помощи одного нажатия кнопки мыши пользователь может увидеть общий профиль поверхности и результаты отклонения от заданной формы детали в цифровом виде.

Зарегистрированные сигналы от индукционного датчика для каждого образца, т.е. для каждого эксперимента, сохраняются в виде отдельных файлов, которые затем по специальным программам подвергаются математической обработке и представляются в виде графика развертки профилограммы $\Delta(x)$. При исследовании погрешностей обработки деталей с известной номинальной поверхностью широко используют методы спектрального анализа. В соответствии с этим функцию погрешности формы обработанной поверхности $\Delta(x)$ для любого поперечного сечения можно представить в виде ряда Фурье с конечным числом членов $i = n$:

$$\Delta(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{n}(a_i \cos\xi_i x + b_i \sin\xi_i x) = \frac{a}{2} + \\ + \sum_{k=1}^{n}(c_i \cos(\xi_i x + \varphi_i), \tag{3.3.27}$$

в котором коэффициенты и величины определяются соотношениями:

$$a_i = \frac{1}{2L}\int_{-L}^{+L} \Delta(x)\cos\xi_i x dx\ ; \\ b_i = \frac{1}{2L}\int_{-L}^{+L} \Delta(x)\sin\xi_i x dx;\ \ a_0 = \frac{1}{2L}\int_{-L}^{+L} \Delta(x)\,dx; \\ c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}\ ; \tag{3.3.28}$$

$$\xi_i = \frac{2\pi i}{L_0}. \qquad (3.3.29)$$

При таком представлении функции $\Delta(x)$ члены ее разложения и величины имеют определенный физический смысл. Нулевой член разложения $\frac{a_0}{2}$ равен среднему значению функции в пределах всего профиля, т.е. длины сканирования детали L_0. Эта величина характеризует отклонение положения профиля относительно линии сканирования и не зависит от координаты x. Первый член разложения $\sqrt{a_1^2 + b_1^2}\ \cos(\xi_1 x + \varphi_1)$ характеризует общую ошибку с амплитудой $c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ и фазой φ_1, характеризующей ***децентрировку***, т.е. смещение общей ошибки относительно центра детали $x = 0$. Второй член ряда Фурье характеризует ***овальность***, третий – ***огранку с трехвершинным профилем*** (широкую зональную ошибку в средней зоне) и т.д. В конечном счете коэффициент $c_i \neq 0$ говорит о том, что в погрешности профиля $\Delta(x)$ присутствует i-я гармоника, т.е. составляющая, имеющая пространственную частоту $\xi_i = \frac{2\pi i}{L_0}$. Величина этого присутствия, усредненная в пределах длины сканирования L_0, определяется собственно амплитудой c_i.

Гармоники с $i > 4$ характеризуют волнистость в поперечном сечении, а при больших значениях i – шероховатость. При этом величина c_i определяет среднюю амплитуду i-го отклонения формы поверхности в применении к шероховатости – $c_i = R_Z$. Пространственная частота $\xi_i = \frac{2\pi}{S_i}$, где S_i – средний период (средний шаг неровностей) i-й гармоники. При такой постановке задачи автоматически отпадают вопросы, поставленные в начале этого раздела, в том числе и по поводу границы, при которой волнистость переходит в шероховатость.

Поскольку средний размер неровностей шероховатости для оптики составляет $S_i \leq 0{,}1$ мм, то гармоника, с которой начинается шероховатость, имеет порядок

$$i \geq \frac{L}{0{,}1}. \qquad (3.3.30)$$

Учитывая это обстоятельство, при исследовании формы и разложении функции $\Delta(x)$ в ряд Фурье обычно ограничиваются первыми 5–7 гармоническими составляющими, а величину шероховатости определяют по гармоникам более высокого порядка. Поэтому принятая практика контроля формы поверхности заключается в том, что контроль формы поверхности выполняют одними методами и средствами измерений, а определение класса шероховатости – другими. А поскольку это так, то и интерпретация результатов измерения может быть иная. Так, например, в оптике больше принято представлять ошибку поверхности не в виде ряда Фурье, а в виде ряда по полиномам Цернике.

3.3.6. Метод переналожений в задачах контроля формы поверхности

В практике оптических измерений ***метод переналожений*** встречается достаточно часто [37]. Суть его заключается в том, что исследуемая поверхность (рис. 3.3.31) большой апертуры разбивается на k участков, на каждом из которых выполняется контроль с помощью прибора с малой апертурой. Суммарная ошибка измерений ΔN на полной апертуре зависит от числа стоянок k и оценивается на основании (1.2.5) с помощью следующего равенства:

$$\Delta N = \Delta n \cdot \sqrt{k}, \tag{3.3.31}$$

где Δn – ошибка оценки погрешности измерений на одной стоянке.

Подобная практика измерений имеет место не только в задачах контроля формы оптических поверхностей, но и в других областях знаний. Поэтому в целях формализации задачи часто применяется более универсальная терминология – ***базовые методы***. Под базовыми здесь понимаются методы измерений, использующие несколько датчиков, расположенных вдоль линии визирования и образующих измерительную базу. При этом сигналы с датчиков могут анализироваться как отдельно, так и совместно. Эти методы позволяют более достоверно осуществлять динамические измерения геометрии объекта, что чрезвычайно существенно при активном контроле, например в технологическом процессе. Действи-

тельно, использование нескольких датчиков позволяет учесть перемещение измеряемого объекта в целом и тем самым снизить требования к жесткости его удержания (фиксации) при измерении.

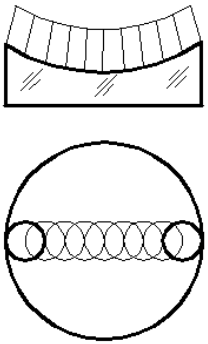


Рис. 3.3.31. Схема контроля формы протяженной поверхности с помощью пробных стекол малых апертур по методу переналожений

Степень соответствия сигнала, полученного с такой системы датчиков, и контролируемого профиля поверхности зависит от многих параметров: способа опроса датчиков, их взаимного расположения, ориентации измерительной базы в пространстве, соотношения размеров измерительной базы и контролируемой поверхности и т.п. Влияние перечисленных факторов на вид измеренного сигнала формально может быть описано в терминах фурье-оптики. Действительно, информация о рельефе поверхности представляется в виде набора отсчетов, сделанных вдоль линии визирования. Ориентация измерительной базы и соотношение ее размера с характерными масштабами измеряемого профиля могут изменяться в каждой конкретной стоянке, в зависимости от характера поверхности. При этом часть информации о контролируемом профиле может быть утеряна. На рис. 3.3.32 приведен пример, когда теряется информация об общей кривизне поверхности, хотя информация об изменениях, характерные масштабы которых меньше измерительной базы, будет выявлена достаточно подробно. Этот процесс мо-

жет быть представлен как фильтрация определенных пространственных частот, в рассмотренном случае – низких.

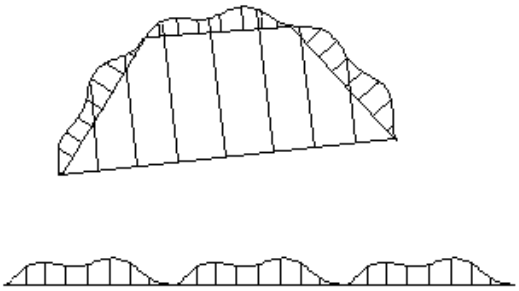


Рис. 3.3.32. Потеря информации об общей кривизне поверхности при базовых измерениях

С этой точки зрения измерительная база, образованная несколькими датчиками, формально является фильтром пространственных частот [61].

Для того чтобы показать это, рассмотрим рис. 3.3.33.

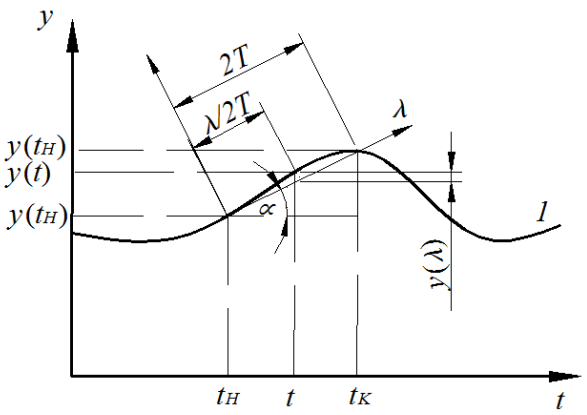


Рис. 3.3.33. К выводу соотношения (3.3.36):
1 – измеряемый профиль

Пусть с помощью измерительной базы размером b исследуется поверхность, профиль которой описывается функцией $y(x)$. Предположим, что измерительная база привязана своими концами к точкам поверхности $x_н$ и $x_к$, тогда в процессе перемещения измерительной базы прибором измеряется модифицированная функция $y'(x)$, описываемая соотношением

$$y'(x) = \left[y(x) - \frac{y(x_н)+y(x_к)}{2}\right]\cos\alpha, \tag{3.3.32}$$

где α – угол наклона измерительной базы к оси x.

Координаты точек $x_н$ и $x_к$ могут быть записаны в виде

$$x_н = x - b\lambda\cos\alpha, \tag{3.3.33}$$

$$x_к = x + b(1-\lambda)\cos\alpha, \tag{3.3.34}$$

где λ – координата точки x относительно начала измерительной базы, отнесенная к ее длине. Применяя к функции $y'(x)$ преобразование Фурье и используя хорошо известные теоремы фурье-анализа [19], получим

$$F\big(y'(x)\big) = F\big(y(x)\big)\cdot F(\xi), \tag{3.3.35}$$

где $F\big(y'(x)\big)$ и $F\big(y(x)\big)$ – фурье-образы функций $y'(x)$ и $y(x)$ соответственно; $F(\xi)$ – функция, описывающая пропускание фильтра пространственных частот; ξ – пространственная частота.

Для $F(\xi)$ имеем

$$F(\xi) = \left[1 - \frac{\exp(i\xi\lambda b\cos\alpha)+\exp(-i\xi(1-\lambda)b\cos\alpha)}{2}\right]\cos\alpha. \tag{3.3.36}$$

Собственно (3.3.35) и (3.3.36) доказывают высказанное выше предположение о фильтрующих свойствах измерительной базы.

Свойства фильтра зависят от его параметров, а именно:

– положения датчика, измеряющего стрелку прогиба относительно измерительной базы (параметр λ);

– общей кривизны поверхности, задаваемой параметром $\cos\alpha$;

– размера измерительной базы b.

Если известны эти параметры, искомый профиль поверхности $y(x)$ может быть восстановлен по измеренному сигналу $y'(x,b)$ с использованием модели фильтра (3.3.36) согласно следующему алгоритму:

$$y'(x,b) \xrightarrow{F} Y'(\xi) \xrightarrow{Y^{\wedge\prime}(\xi)/F(\xi)} Y(\xi) \xrightarrow{F^{-1}} y(x), \tag{3.3.37}$$

здесь знаки $\xrightarrow{F}$ и $\xrightarrow{F^{-1}}$ обозначают процедуру прямого и обратного фурье-преобразований. Тем самым можно формально избежать потери измерительной информации.

Однако все это справедливо тогда, когда функции $y(x)$ и $y'(x)$ имеют область определения $(-\infty;\infty)$. С реальными сигналами это не так, поскольку апертура измеряемой поверхности *L* всегда конечна. Обработка таких сигналов возможна только при условии корректного аналитического продолжения или использования отсекающих функций, в противном случае из-за эффекта Гиббса имеет место сильное искажение обрабатываемого сигнала.

Пример 3.3.11. В работах [62] и [63] проанализированы эти методы устранения эффекта Гиббса в применении к номинально плоской поверхности, т.е. $\cos\alpha = 0$, и размещению среднего датчика в середине измерительной базы, т.е. $\lambda = {}^{1}/_{2}$. В этом случае выражение для функции пропускания фильтра существенно упрощается и может быть записано в виде

$$F(\xi) = 2\sin^2\left({}^{b\xi}/_{4}\right). \qquad (3.3.38)$$

Дискретность задания функции $y'(x,b)$ на ограниченном интервале приводит к трудностям использования численного алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) при восстановлении функции. Известно, что алгоритм БПФ предполагает бесконечную область определения функции $y(x)$. При использовании конечного фрагмента функции алгоритм осуществляет ее продолжение простым копированием заданного фрагмента. Если начальное и конечное значения фрагмента не совпадают, то в восстановленном сигнале наблюдаются краевые выбросы (рис. 3.3.34, *а*). Это явление известно как ***эффект Гиббса.***

Этот факт необходимо учитывать при восстановлении сигнала, полученного в реальных измерениях. Действительно, дискретность функции $y'(x,b)$ предполагает ограничение ее спектра частотой $\xi_{\max} = {}^{1}/_{2}\tau$, где τ – шаг дискретизации, что фактически является умножением фурье-образа функции $y'(x,b)$ на прямоугольный импульс, которое и приводит при обратном преобразовании Фурье к явлению Гиббса в виде краевых выбросов. Влияние эффекта Гиббса уменьшается с использованием различного вида «окон». Но это все равно приводит к потере информации на краях восстановленного сигнала (рис. 3.3.34, *б*) и требует корректного

решения задачи аналитического продолжения начального сигнала (рис. 3.3.34, *в*).

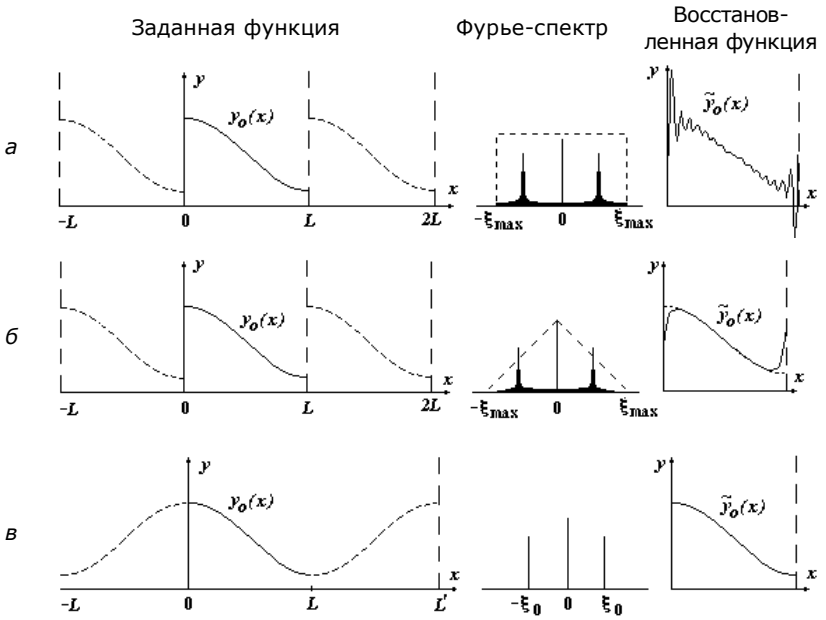


Рис. 3.3.34. Эффект Гиббса и аналитическое продолжение функции при БПФ

Первое условие, при котором аналитическое продолжение можно считать корректным, достаточно очевидно и формулируется следующим образом. Интервал L_0 должен быть спланирован таким образом в процессе измерений, что начальное и конечное значения фрагмента функции $y'(x,b)$ должны совпадать по величине и значению производной на границах этого интервала:

$$\begin{gathered} y(0) = y(L_0), \\ \left.\frac{\partial y(x)}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial y(x)}{\partial x}\right|_{x=L_0}. \end{gathered} \qquad (3.3.39)$$

В процессе моделирования, в отличие от реальной ситуации, при восстановлении сигнала $y_0(x)$, заданного в явном виде на интервале $[0,\ L_0]$, имеется возможность использовать его точное

аналитическое продолжение на интервале [*0 , L*] в соответствии с условием (3.3.39), что полностью позволяет исключить разрывы функции $y(x)$ и связанные с ними краевые эффекты.

При моделировании восстановления заданного гармонического сигнала $y_0(x) = A_0 \sin(\xi_0 x + \varphi_0)$ не наблюдалось искажения восстановленного сигнала $\widetilde{y_0}(x)$ по частоте и начальной фазе. В то же время имеет место невязка сигналов по амплитуде (рис. 3.3.35, *а, б*). Этот же результат (рис. 3.3.35, *в, г*) наблюдался при восстановлении квазигармонического сигнала типа

$$y_0(x) = A_0 \sin(\xi_0 x + \varphi_0) + A_1 \sin(\xi_1 x + \varphi_1). \qquad (3.3.40)$$

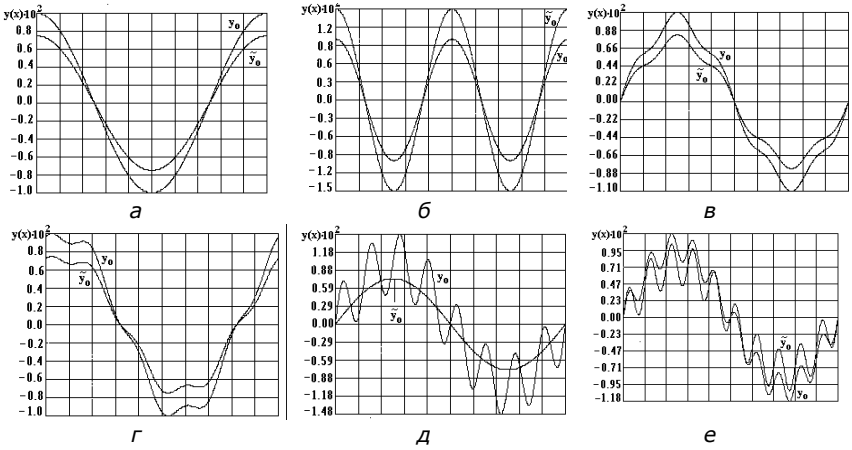


Рис. 3.3.35. Примеры заданного $y_0(x)$ и восстановленного $\tilde{y}_0(x)$ гармонических и квазигармонических сигналов при: *а* – $\xi_0 = 2\pi/2b$; *б* – $\xi_0 = 2\pi/b$; *в* – $\xi_0 = 2\pi/2b$, $\xi_1 = 10\pi/2b$, $\varphi_0 = 0, \varphi_1 = 0$; *г* – $\xi_0 = 2\pi/2b$, $\xi_1 = 10\pi/2b$, $\varphi_0 = \pi/3$, $\varphi_1 = \pi/2$; *д* – $\xi_0 = 2\pi/2b$, $\xi_1 = 8\pi/b$; *е* – $\xi_0 = 2\pi/2b$, $\xi_1 = 10\pi/b$

Результаты моделирования, приведенные на рис. 3.3.35, *д, е,* показывают, что некоторые частоты подвергаются дискриминации, т.е. воспроизводятся плохо. Это еще раз подтверждает используемое представление об измерительной базе как о фильтре пространственных частот.

Величина невязки имеет выраженную зависимость от длины реализации $L\xi_0$ исходного сигнала и от значения $F(\xi_0)$. В работе [62] показано, что для обеспечения погрешности не более 5% длина реализации сигнала с частотой

$$\xi_0 = {4\pi}/{L_0} \qquad (3.3.41)$$

должна быть больше 15, т.е.

$$L = 15\, L_0. \qquad (3.3.42)$$

Это можно считать вторым условием корректного аналитического продолжения.

Построение передаточной функции измерительной базы имеет еще один практический аспект, который заключается в том, что в любом измерительном эксперименте с протяженными поверхностями могут присутствовать «нежелательные» частоты, происхождение которых не связано с измерительным процессом. Используя фильтрующие свойства измерительной базы, можно спланировать измерительный эксперимент (т.е. выбрать размер базы) таким образом, чтобы дискриминировать эти частоты (см. рис. 3.3.35, *д*).

Пример 3.3.12. На рис. 3.3.36, *а* показан график передаточной функции измерительной базы с центральным расположением среднего датчика для номинально плоской поверхности, описываемый соотношением (3.3.38). Из рис. 3.3.36, *а* можно заключить, что осуществляется полная фильтрация (дискриминация) пространственных частот:

$$\xi_0 = {4\pi n}/{b}, \qquad (3.3.43)$$

где $(n = 0, 1, 2 \ldots)$ в пространственном спектре функции $y(x)$. В терминах размеров это означает, что будет утеряна информация о деталях профиля, имеющих размеры ${b}/{2n}$. Наоборот, максимальное усиление сигнала происходит на частотах

$$\xi_0 = {2\pi(2n+1)}/{b}. \qquad (3.3.44)$$

Из условия $F(\xi) = 1$ легко определить, что без искажений (адекватная передача) фильтр пропускает частоты

$$\xi_0 = {4\pi(n+0{,}5)}/{b}. \qquad (3.3.45)$$

Путем выбора размера измерительной базы возможно получение максимально достоверной информации о заданных масштабах исследуемого профиля поверхности (раздел 4.3.3).

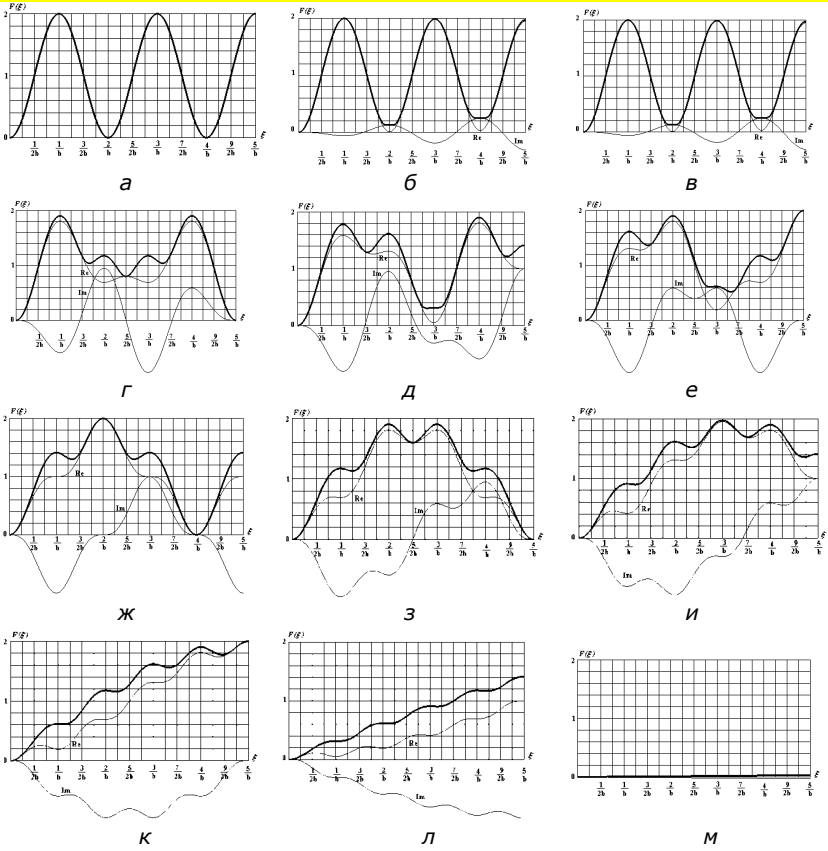


Рис. 3.3.36. Передаточная функция измерительной базы для номинально плоской поверхности при смещении среднего датчика от центра базы на: *а* – $\Delta x = 0$; *б* – $\Delta x = 0{,}01b$; *в* – $\Delta x = 0{,}05b$; *г* – $\Delta x = 0{,}1b$; *д* – $\Delta x = 0{,}15b$; *е* – $\Delta x = 0{,}2b$; *ж* – $\Delta x = 0{,}25b$; *з* – $\Delta x = 0{,}3b$; *и* – $\Delta x = 0{,}35b$; *к* – $\Delta x = 0{,}4b$; *л* – $\Delta x = 0{,}45b$; *м* – $\Delta x = 0{,}499b$

Аналогичного эффекта можно добиться посредством изменения положения среднего датчика. Это дает возможность (рис. 3.3.36, *б*–*м*) оптимизировать параметры фильтра соответственно решаемой измерительной задаче, меняя параметр λ. Подобные ***самосогласованные измерения*** можно реализовать, например, при интерференционном контроле крупногабаритной поверхности с по-

мощью накладных малых апертур. В этом случае в пределах одного переналожения получается массив данных, соответствующих значению стрелок прогиба для разных координат точки отсчета $y'(x(\lambda))$.Термин «самосогласованные измерения» здесь использован в том смысле, что для оптимального выбора данных требуется априорная информация об объекте оптимизации. В таком случае реализуется базовый метод с переменным положением среднего датчика.

И еще одно замечание. В начале этого раздела говорилось о том, что принято разделять ошибку формы поверхности по диапазонам: общая ошибка, ошибка волнистости, ошибка шероховатости. Эти диапазоны различаются по величинам ошибки, их пространственным характеристикам (пространственная частота), средствам измерения для их выявления и технологическим причинам их возникновения. С этой точки зрения из вышеизложенного следует, что базовые методы – методы выявления волнистости. А природа волнистости связана с технологией обработки: размер инструмента, смена технологических режимов, время пребывания в зоне обработки и т.д. Следовательно, информация о пространственных частотах волнистости кроется в характерных размерах S_i, характеризующих эти технологические факторы. Этот вывод позволяет использовать формализм, описанный в этом разделе для:

– оптимизации и планирования процесса измерений с целью выявления тех или иных ошибок, важных для текущего момента обработки;

– получения информации о технологических причинах возникновения волнистости, оптимизируя процесс обработки;

– объективной характеристики качества обработки поверхности с помощью одного числового параметра дифференцированно для каждого источника, усредненного по протяженности детали.

В этом случае можно говорить об оптических измерениях как об инструменте диагностики технологического процесса.

В заключение приведем следующие замечания:

1. При использовании соотношений (3.3.8) и (3.3.18) для перехода от геометрических аберраций к волновым следует помнить о

том, что эти формулы являются приближенными и справедливы при $\mathrm{tg}\sigma' \approx \sin\sigma' \approx \frac{m'}{R}$, т.е. $\sigma' \leq 30°$.

Для больших углов следует применять более сложные соотношения [20].

2. Для методов, описанных в разделе, не приводится анализ погрешностей ввиду сложности аналитических зависимостей. Это не означает, что этот анализ не должен выполняться при реальных измерениях формы оптических поверхностей. Измерительная практика здесь такова, что определение погрешностей производится посредством статистического эксперимента (см. раздел 1.2). При этом заметим, что достоверность результата будет зависеть от добросовестности исполнителя, поскольку в каждой реализации следует менять **все** условия измерений.

Пример 3.3.13. При контроле формы асферической поверхности по методу измерения продольных аберраций поверхности теневым методом щели и нити для получения достоверного результата при оценке погрешности следует поменять от эксперимента к эксперименту следующие параметры:

– разметку зон, включая их количество;

– измерить значение параксиального радиуса кривизны;

– выполнить продольные наводки с помощью разных операторов;

– произвести расчет профиля для этих параметров.

3.4. Методы измерений характеристик оптических систем

После завершения процесса изготовления оптических систем подлежат измерению и аттестации следующие величины, характеризующие их свойства:

– геометрические характеристики:

  ○ фокусное расстояние – f',

  ○ передний или задний фокальные отрезки – S_f, $S'_{f'}$,

  ○ рабочий отрезок – S_Γ,

- видимое увеличение – Г,
- размер поля зрения или изображения в угловой – 2ω или линейной – $2y$ мере,
- диаметр входного и выходного зрачков – D_p, $D'_{p'}$ и их положение S_p и $S'_{p'}$ относительно первой и последней линз оптической системы соответственно;

– светотехнические характеристики:
- светопропускание оптической системы – τ,
- светорассеяние оптической системы – r,
- цветопередача,
- освещенность поля изображения – E_ω;

– характеристики качества изображения:
- разрешающая способность,
- функция рассеяния точки,
- пограничный контраст,
- частотно-контрастная характеристика,
- волновая аберрация.

Необходимость этих оптических измерений связана со следующими обстоятельствами:

– проверка соответствия изготовленной системы ее прямому назначению и требованиям технического задания;

– проверка технологического процесса изготовления изделия и качества сборки;

– оценка возможностей оптической системы для каких-то иных применений, не указанных в показателях назначения.

3.4.1. Методы измерений геометрических характеристик оптических систем

Методы измерения фокусных расстояний и фокальных отрезков оптических систем ничем не отличаются от методов, используемых в процессе производства и аттестации оптических деталей. Поскольку эти вопросы подробно освещены в разделе 3.2, здесь на них особо останавливаться не будем.

Другое дело – ***рабочее расстояние*** или ***рабочий отрезок***. Под этими терминами в прикладной оптике понимается расстояние от

опорного торца оправы объектива до плоскости наилучшего изображения, сформированного системой. Отсюда следует, что рабочее расстояние относится к конструкции законченного изделия и характеризует его возможности по обеспечению взаимозаменяемости при установке в оптический прибор.

Тем не менее методы измерения рабочих отрезков аналогичны методам измерения фокальных отрезков. Разница состоит в начальном отсчете, если для фокального отрезка это фокусировка наблюдательного микроскопа на последнюю оптическую поверхность, то в случае рабочего отрезка это фокусировка на вспомогательную поверхность, помечающую опорный торец.

Визуальный метод измерения фокального отрезка на оптической скамье. На рис. 3.4.1 приведена схема специализированной оптической скамьи для измерения рабочего расстояния с помощью наблюдательного микроскопа.

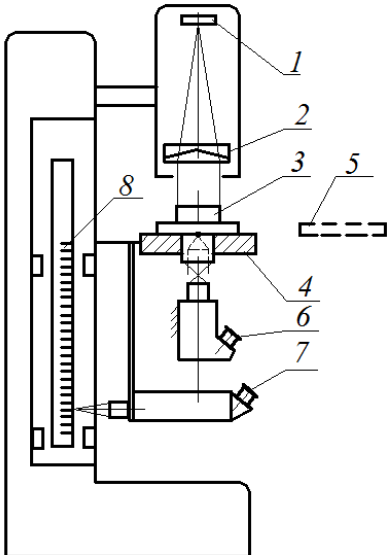


Рис. 3.4.1. Измерение рабочего расстояния визуальным методом на вертикальной оптической скамье: *1* – тест-объект; *2* – объектив коллиматора; *3* – испытуемый объектив; *4* – объективодержатель; *5* – стеклянная пластина; *6* – наблюдательный микроскоп; *7* – отсчетный микроскоп; *8* – шкала

Контролируемый объектив *3* устанавливается опорным торцом в объективодержатель *4* и освещается с помощью коллиматора *2*, в фокусе которого располагается тест-объект *1*.

Изображение тест-объекта, построенное исследуемым объективом, рассматривается с помощью наблюдательного микроскопа *6*. Причем микроскоп является неподвижным, а продольные наводки производятся кремальерным механизмом объективодержателя *4*. Отсчет положения объективодержателя, соответствующего плоскости наилучшей фокусировки изображения тест-объекта, производится с помощью отсчетного микроскопа *7* по шкале скамьи *8*. После этого снимают исследуемый объектив и на опорную плоскость объективодержателя устанавливают стеклянную пластину *5*. Продольной наводкой кремальерного механизма добиваются резкого изображения нижней поверхности пластины в наблюдательном микроскопе и по отсчетному микроскопу снимают второй отсчет. Разность отсчетов дает искомое рабочее расстояние.

Для обеспечения наведения на резкость сторона пластины, соприкасающаяся с опорной плоскостью объективодержателя, должна быть напылена мелом или пудрой. Для обеспечения необходимой точности измерений диаметр объектива коллиматора должен иметь световой диаметр, больший светового диаметра объектива (2.3.14), фокусное расстояние в 3–5 раз больше фокусного расстояния объектива (2.3.13), а числовая апертура наблюдательного микроскопа не меньше числовой апертуры объектива.

При выполнении всех этих рекомендаций погрешность измерений определяется следующими факторами:

– остаточными аберрациями объектива;

– числовой апертурой объектива;

– погрешностями наводок;

– погрешностью установки тест-объекта в фокусе коллиматора;

– погрешностью шкалы;

– погрешностью отсчетного устройства;

– личностными факторами: опыт оператора, утомляемость, субъективность оценки наилучшей резкости на фоне высокой трудоемкости измерений.

Технические решения, направленные на повышение точности измерений рабочего расстояния посредством снижения влияния этих факторов, достаточно очевидны:

– совершенствование отсчетных устройств (раздел 2.1);

– введение фотоэлектрического анализатора изображений (см. раздел 4.1);

– использование дифференциальных методов (рис. 3.4.2).

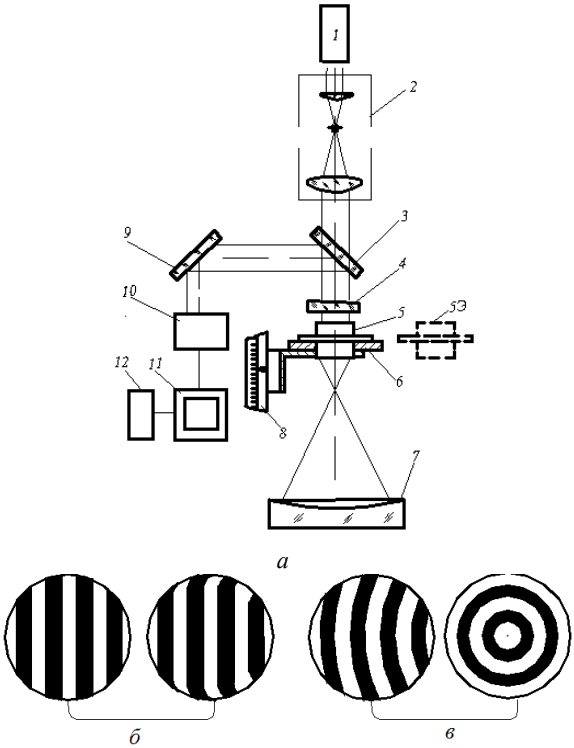


Рис. 3.4.2. Измерение рабочего отрезка дифференциальным методом с помощью интерферометра с совмещенными ветвями: *а* – схема интерферометра; *б* и *в* – интерферограммы. *1* – лазерный источник света; *2* – расширитель лазерного пучка; *3* – светоделитель; *4* – клин с эталонной задней поверхностью; *5*, *5Э* – исследуемый или эталонный объектив; *6* – объективодержатель; *7* – автоколлимационное сферическое зеркало; *8* – фотоимпульсный преобразователь линейных перемещений; *9* – поворотное зеркало; *10* – видеокамера; *11* – монитор; *12* – вычислительное устройство

Дифференциальный интерференционный метод измерения рабочего расстояния объектива. На рис. 3.4.2 представлена оптическая схема интерферометра с совмещенными ветвями (см. раздел 2.3.8) для контроля рабочего расстояния объективов дифференциальным методом.

Для настройки интерферометра (рис. 3.4.2, *а*) используется эталонный объектив Э, который при установке в предметное плечо на опорную плоскость объективодержателя *б* в совокупности с зеркалом образует автоколлимационный ход лучей. О факте окончания наводки свидетельствует отсутствие искривления полос (рис. 3.4.2, *б*). В силу остаточной аберрации объектива можно не достичь полностью прямых эквидистантных полос, тогда ограничиваются прямолинейностью полос в осевой области. Если вместо эталонного объектива на объективодержатель установить исследуемый объектив без изменения настройки интерферометра, то отличие в рабочих отрезках контролируемого и эталонного объективов будет визуализировано в виде искривления полос интерференционной картины (рис. 3.4.2, *в*). Измерив величину искривления полос, по формуле (3.2.11) можно определить разницу ΔS_{Γ} рабочих расстояний исследуемого и эталонного объективов.

Интерферометр может быть оборудован фотоэлектрическим преобразователем перемещений, с помощью которого эта разница может быть измерена прямым способом. Погрешность таких измерений не превосходит 0,02 мм. Метод снижения этой погрешности обсуждается в разделе 4.1. Измеряемая партия объективов может иметь номинально значительную волновую аберрацию – «остаток от расчета». В этом случае следует воспользоваться схемой интерферометра Тваймана–Грина (см. рис. 2.3.48), в опорном плече которого постоянно размещается объектив этой же конструкции для компенсации «остатка от расчета» – ***интерферометр Коломийцова*** [25].

Измерение видимого увеличения зрительной трубы на оптической скамье. В визуальных оптических приборах видимым увеличением называют отношение тангенса угла ω', под которым наблюдают параксиальное изображение предмета глазом вооруженным данным прибором, к тангенсу угла ω, под которым видит этот предмет невооруженный глаз (П.38).

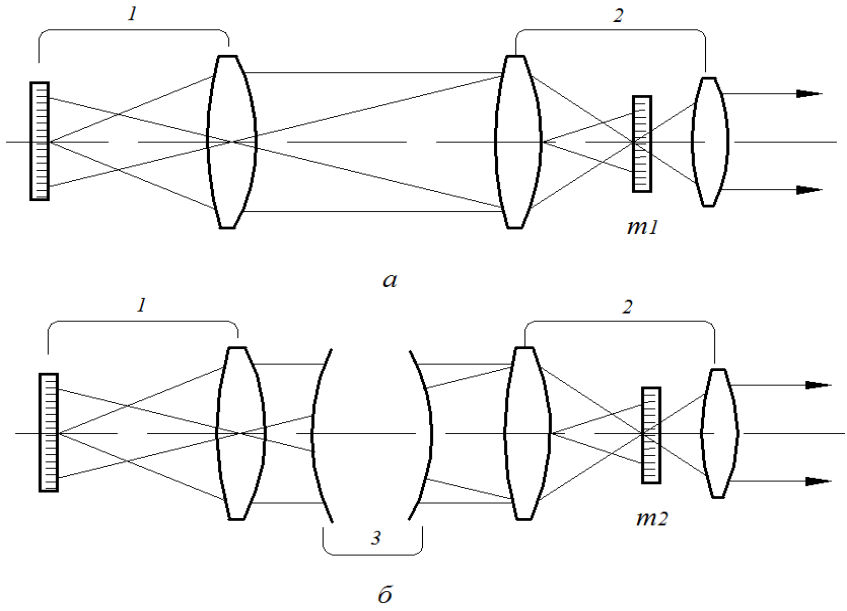


Рис. 3.4.3. Схема измерения видимого увеличения зрительной трубы *3* с помощью коллиматора *1* и вспомогательной зрительной трубы *2*

На рис. 3.4.3 представлена традиционно используемая схема измерения видимого увеличения зрительной трубы. В соответствии с этим методом для измерения видимого увеличения зрительной трубы используют коллиматор *1* с сеткой и дополнительную зрительную трубу *2*. Изображение сетки, построенное коллиматором в бесконечности, наблюдается два раза: один раз – с помощью дополнительной зрительной трубы *2* (рис. 3.4.3, *а*), другой – через исследуемую зрительную трубу *3* и через вспомогательную *2*. Оба раза измеряется число угловых делений m_1 и m_2 сетки дополнительной зрительной трубы, укладывающихся в изображении сетки коллиматора. Тогда искомое видимое увеличение может быть рассчитано по достаточно очевидной формуле

$$\Gamma_т = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (3.4.1)$$

Измерение видимого увеличения микроскопа. Прямое измерение видимого увеличения микроскопа выполняется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.4.4.

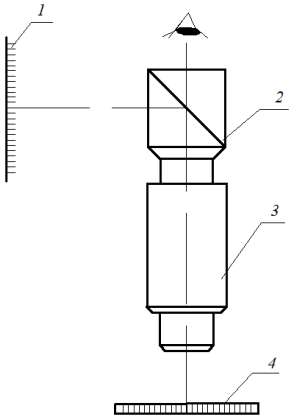


Рис. 3.4.4. Схема устройства для измерения видимого увеличения микроскопа

В соответствии со схемой в глазу наблюдателя посредством светоделительного кубика *2* формируется два изображения: одно изображение шкалы 1, расположенной на расстоянии наилучшего зрения – 250 мм, второе – изображение шкалы объект-микрометра *4*, наблюдаемое через микроскоп *3*. Светоделительный кубик позволяет совместить эти изображения на сетчатке глаза и определить, какое число делений объект-микрометра m_2 укладывается в выбранном отрезке m_1 миллиметровой шкалы. Тогда видимое увеличение микроскопа $\Gamma_м$ определится по формуле

$$\Gamma_{\text{м}} = \frac{m_1 \cdot \tau_1}{m_2 \cdot \tau_2}, \qquad (3.4.2)$$

где τ_1 и τ_2 – соответственно цена деления шкалы и объект-микрометра.

Измерение поля зрения телескопической системы с помощью гониометра. Угловое поле 2ω телескопической системы – удвоенный угол, под которым из центра входного зрачка виден

диаметр полевой диафрагмы, расположенной в общей фокальной плоскости объектива и окуляра.

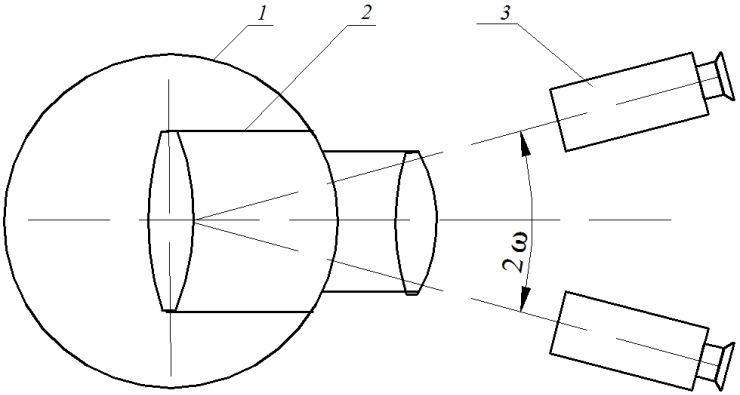


Рис. 3.4.5. Схема измерения поля зрения телескопической системы с помощью гониометра

В соответствии с этим определением поле зрения телескопической системы может быть измерено с помощью гониометра (рис. 3.4.5). В этом случае ось вращения столика гониометра совмещают с плоскостью входного зрачка измеряемой системы *2*. С помощью зрительной трубы гониометра *3* наблюдают правый и левый края полевой диафрагмы, снимая отсчет по лимбу. Разность отсчетов позволяет определить угол поля телескопической системы 2ω в пространстве предметов. Поле зрения в пространстве изображений $2\omega'$ измеряется аналогичным способом, только с осью вращения столика совмещается выходной зрачок телескопической системы.

Измерение поля зрения микроскопа с помощью объект-микрометра. Измерение линейного поля зрения в пространстве предметов выполняют прямым методом с помощью объект-микрометра (см. рис. 2.2.13), установленного на предметный столик микроскопа. Рассматривая через микроскоп шкалу, определя-

ют размер поля в предметной плоскости подсчетом числа делений m шкалы, укладывающихся по диаметру видимого круга:

$$2y = m\tau, \tag{3.4.3}$$

где τ – цена деления шкалы объект-микрометра.

Измерение поля зрения телескопической системы в полевых условиях. Измерение угла поля зрения телескопической системы в полевых условиях выполняют с помощью геодезической рейки или другой протяженной линейки с крупными делениями шкалы (рис. 3.4.6).

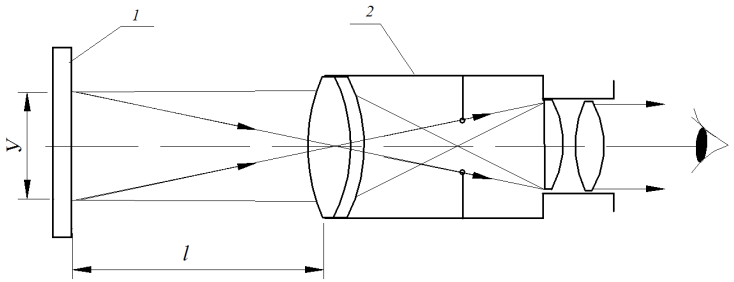


Рис. 3.4.6. Схема измерения поля телескопической системы с помощью геодезической рейки в полевых условиях: *1* – рейка; *2* – телескопическая система

При этих измерениях геодезическую рейку устанавливают на большом расстоянии l (практическая бесконечность (2.3.15)) перпендикулярно оси телескопической системы. При правильном выборе расстояния деления шкалы рейки видны резко, без параллакса. Определяя максимально видимый отрезок рейки y по измеренному параметру l, вычисляют угол поля зрения по формуле

$$2\mathrm{tg}\omega = \frac{y}{l}. \tag{3.4.4}$$

Измерение поля зрения объектива на оптической скамье. Поле зрения объектива ограничивается диаметром D в плоскости наилучшего изображения, в пределах которого наблюдается удо-

влетворительное качество изображения, характеризующееся падением разрешающей способности по сравнению с точкой на оси до допустимых значений, определенных в технических требованиях. Для определения величины этого диаметра можно разместить объектив *3* на оптической скамье в держатель объективов с суппортом для угловых перемещений и измерения угла поворота *4* (рис. 3.4.7).

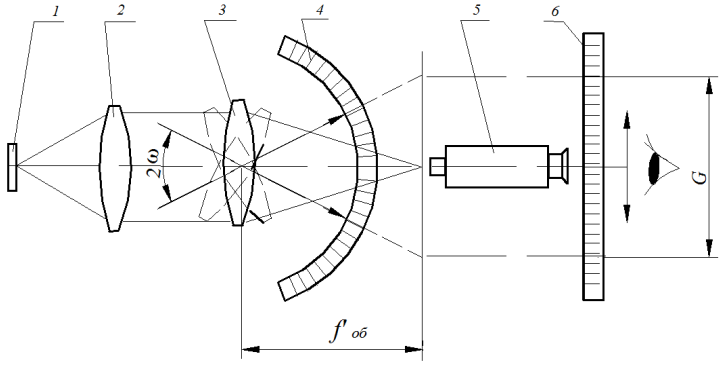


Рис. 3.4.7. Измерение угла поля зрения объектива на оптической скамье с помощью поворотного держателя объективов: *1* – мира; *2* – объектив коллиматора; *3* – исследуемый объектив; *4* – шкала суппорта; *5* – микроскоп; *6* – шкала

Для полноценных измерений ось вращения суппорта должна быть совмещена с передней узловой точкой объектива. Для измерения разрешающей способности в качестве тест-объекта используется стандартная мира *1*, помещенная в фокус коллиматора *2* оптической скамьи. Изображение миры, построенное объективом *3* в его задней фокальной плоскости, рассматривается с помощью горизонтального микроскопа *5*, имеющего горизонтальное перемещение и шкалу с нониальным отсчетом для измерения этого перемещения *6*. Оценка разрешающей способности объектива производится стандартным методом, описанным в разделе 3.4.3 для нормального освещения объектива и для объектива, повернутого на угол $\pm\omega$. Поворот объектива измеряется по шкале суппор-

та, смещение микроскопа для наблюдения внеосевых изображений миры – по шкале поперечных наводок микроскопа. Целью измерений является определение такого угла поворота объектива, при котором значение разрешающей способности не меньше допустимого техническим заданием. В этом случае угол поля зрения объектива определится из соотношения

$$2\mathrm{tg}\omega = \frac{D}{f'} \qquad (3.4.5)$$

Измерение входного и выходного зрачков телескопической системы с помощью динаметра. Динаметр – стеклянная шкала с лупой, предназначенные для измерения зрачков оптических систем (см. рис. 2.2.14). Схема измерений диаметра выходного зрачка телескопической системы приведена на рис. 3.4.8.

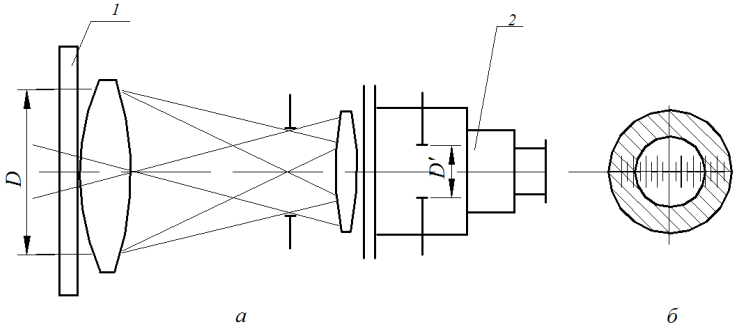


Рис. 3.4.8. Измерение диаметра D'_p, выходного зрачка зрительной трубы с помощью динаметра Рамсдена: *а* – схема измерений; *б* – поле зрения динаметра. *1* – стеклянная шкала; *2* – динаметр

Для измерения диаметра выходного зрачка телескопической системы и определения его положения объектив системы освещают рассеянным светом и, прижав тубус динаметра к наружному краю оправы окуляра телескопической системы, передвигают оправу шкалы динаметра в неподвижном тубусе до тех пор, пока не будет виден резко выходной зрачок системы. Диаметр выходного зрачка измеряют по шкале динаметра, а положение выходного зрачка от торца окуляра определяют по штрихам, нанесенным

сбоку оправы динаметра. За счет телецентрической диафрагмы динаметра измерения получаются достаточно точными, даже несмотря на погрешности продольных наводок. Погрешность измерений не превосходит 0,1 мм.

Для измерения диаметра входного зрачка, расположенного на торце оправы объектива, вплотную к оправе помещают стеклянную шкалу *1* (см. раздел 2.2) и рассматривают ее с помощью динаметра в выходном зрачке. Диаметр входного зрачка равен числу видимых делений шкалы.

Измерение выходного зрачка микроскопа с помощью динаметра. Измерение диаметра и положения выходного зрачка микроскопа с помощью динаметра выполняется так же, как и измерение выходного зрачка телескопической системы с помощью динаметра (см. рис. 3.4.8). Для создания рассеянного освещения в предметное поле микроскопа помещают матовое стекло, изображение которого рассматривают в выходном зрачке. После фиксации выходного зрачка на матовое стекло укладывают объект-микрометр и продольными наводками микроскопа добиваются резкого изображения шкалы объект-микрометра в выходном зрачке. Если m – число делений шкалы, видимых в окуляр динаметра, а τ – цена деления объект-микрометра, то диаметр входного зрачка микроскопа определится соотношением

$$D_p = \tau m. \qquad (3.4.6)$$

Измерение диаметров зрачков объектива с помощью микроскопа. Для измерения зрачков объектива может быть использован измерительный или горизонтальный микроскоп с отсчетом перемещения перпендикулярно оптической оси с удлиненным фокусным расстоянием (не менее 50 мм) и достаточным измеряемым перемещением. При измерении диаметра входного зрачка контролируемый объектив помещают перед микроскопом входным зрачком к нему и освещают рассеянным светом со стороны выходного зрачка. Микроскоп продольными наводками фокусируют на резкое видение апертурной диафрагмы и производят поперечные наводки на левый и правый края апертурной диафрагмы, снимая отсчеты по шкале перемещений. Разность отсчетов определит зна-

чение диаметра входного зрачка. Установив объектив выходным зрачком к микроскопу, аналогично выполняют измерения диаметра выходного зрачка.

Фокусируя микроскоп продольными наводками на вершину последней поверхности и на изображение апертурной диафрагмы и выполняя отсчет перемещений микроскопа между этими наводками, измеряют положение соответствующих зрачков S_p и $S'_{p'}$.

3.4.2. Методы измерений светотехнических характеристик оптических систем

Измерение коэффициента пропускания на универсальном фотометре. Коэффициентом пропускания τ оптического прибора называют отношение:

$$\tau = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \tag{3.4.7}$$

где Φ_0 – световой поток, падающий на прибор; Ф – световой поток, прошедший прибор.

Схема измерения этой характеристики следует из этого определения и приведена на рис. 3.4.9.

Исследуемая оптическая система *6* освещается источником света с малыми угловыми размерами с помощью коллиматора, состоящего из источника света – лампы накаливания *1*, конденсора *2*, диафрагмы *3* (диаметром 1–2 мм), коллиматорного объектива *4*. Ирисовая диафрагма *5* ограничивает световую трубку, освещающую исследуемую оптическую систему. Световой поток измеряется с помощью стандартного фотометра (см. раздел 2.3.1). Для устранения неравномерности чувствительности светочувствительной площадки фотоприемника, как правило, применяется фотометрическая головка в виде фотометрического шара *8* с селеновым фотоэлементом *9*. Перед фотометрическим шаром в фокальной плоскости объектива устанавливается диафрагма *7*, ограничивающая проникновение паразитных рефлексов от компонентов прибора в фотометрическую головку. Для успеха фотометрических измерений должны выполняться следующие условия:

– измерения проводятся в полностью затемненном помещении;

– размер диафрагмы *5* выбирается таким, чтобы весь поток в отсутствие контролируемой системы попадал вовнутрь фотометрического шара;

– положение фотометрического шара относительно фокуса испытуемой системы таково, что при размещении контролируемой системы в схеме отсутствует виньетирование светового пучка входным отверстием шара.

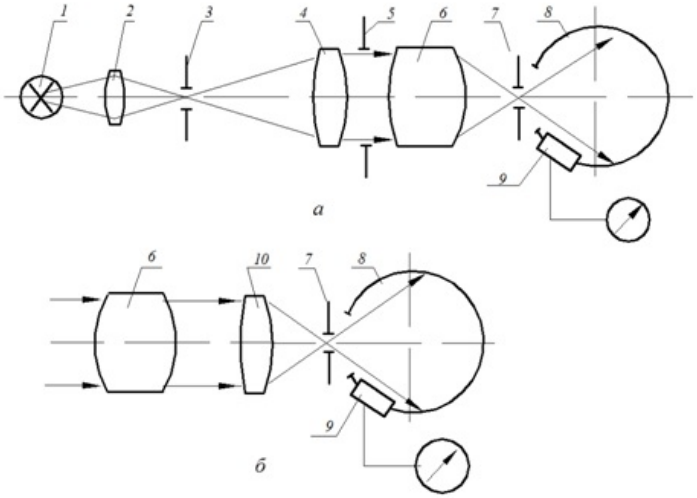


Рис. 3.4.9. Схема измерения коэффициента светорассеяния оптических систем: *а* – объектива, *б* – телескопической зрительной трубы. *1* – источник света – лампа накаливания; *2* – конденсор; *3* – диафрагма диаметром 1–2 мм; *4* – коллиматорный объектив; *5* – ирисовая диафрагма; *6* – исследуемая оптическая система; *7* – диафрагма; *8* – фотометрический шар; *9* – фотоэлемент; *10* – объектив

Установив контролируемый прибор перед фотометрическим шаром, снимают отсчет по шкале фотометра – Ф. Затем снимают отсчет Φ_0 – показаний фотометра без прибора. При измерениях телескопических систем (рис. 3.4.9, *б*) используется дополнительный согласующий объектив *10*.

Для измерения спектрального коэффициента пропускания в качестве источника света используется стандартный монохроматор для освещения диафрагмы *3* и измеряется значение $\tau(\lambda)$ для каждой длины волны λ освещающего света.

Обработка данных измерений и оценка погрешностей производятся статистическими методами, при этом стандартная погрешность для этого метода не превосходит 5%.

Измерение коэффициента светорассеяния с помощью шарового коллиматора. Коэффициентом светорассеяния τ оптического прибора называют отношение

$$\sigma = \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_0}, \tag{3.4.8}$$

где Φ_0 – световой поток, падающий на прибор; Φ_σ – световой поток, рассеянный прибором.

Коэффициент светорассеяния характеризует свойство оптической системы создавать паразитную засветку в плоскости изображения. Источниками этой засветки являются переотражения от границ раздела сред, рассеяние косых пучков оправами деталей, выколки, свили, царапины, пузыри, остаточная шероховатость оптических поверхностей, рассеяние света на шлифованных вспомогательных поверхностях.

Для измерения коэффициента светорассеяния используют шаровой коллиматор (см. раздел 2.3.3). Схема измерения представлена на рис. 3.4.10. Испытуемая система *7* устанавливается перед объективом коллиматора. При измерениях телескопических систем (рис. 3.4.10, *б*) используется дополнительный согласующий объектив.

Световой диаметр испытуемой системы задается с помощью ирисовой диафрагмы *6*. Диаметр пробки шарового коллиматора выбирается из условия [25]

$$D_\text{п} = D'_\text{п} \cdot \frac{f'_\text{к}}{f'_\text{об}}, \tag{3.4.9}$$

где $D_\text{п}$ и $D'_\text{п}$ – диаметры отверстия пробки и ее изображения соответственно; $f'_\text{к}$ – фокусное расстояние объектива коллиматора, равное диаметру шара; $f'_\text{об}$ – фокусное расстояние измеряемого объектива.

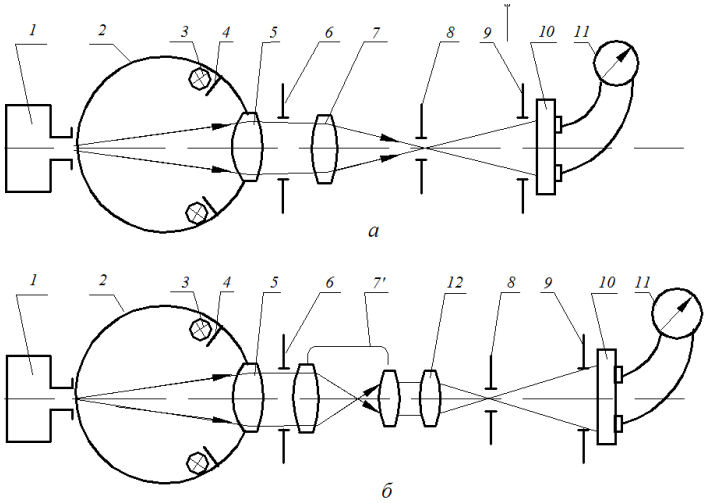


Рис. 3.4.10. Схема измерения коэффициента светорассеяния: *а* – объективов; *б* – телескопических оптических систем. *1* – пробка для имитации черного тела; *2* – шаровый коллиматор; *3* – источники света; *4* – экраны; *5* – объектив коллиматора; *6* – ирисовая диафрагма; *7* – испытуемая система; *8* и *9* – диафрагмы; *10* – фотометрическая головка; *11* – фотометр; *12* – дополнительный объектив

В фокальной плоскости измеряемого объектива устанавливается диафрагма *8*, диаметр которой выбирается равным $D'_{\text{п}}$. Диафрагма центрируется таким образом, что вся световая трубка от черного тела проходит через нее, так что освещенность в плоскости этой диафрагмы создается только за счет света, рассеянного исследуемой оптической системой. Фотометр *11*, оборудованный фотометрической головкой *10* для измерения освещенности, устанавливается за диафрагмой *8* и выполняет измерение освещенности плоскости изображения. Измерения проводятся в полностью затемненном помещении. Отсчет показаний фотометра производится два раза: с пробкой для имитации черного тела – E_σ и со светлым экраном – E_0.

За значение коэффициента светорассеяния принимается величина

$$\sigma = \frac{E_\sigma}{E_0}. \qquad (3.4.10)$$

Обработка данных измерений и оценка погрешностей производятся статистическими методами, при этом стандартная погрешность для этого метода не превосходит 5%.

Измерение коэффициента виньетирования на оптической скамье с помощью ПЗС-камеры. Коэффициентом виньетирования K_Q оптического прибора называют отношение

$$K_Q = \frac{Q_{\omega'}}{Q_0}, \qquad (3.4.11)$$

где $Q_{\omega'}$ – площадь выходного зрачка для поля зрения ω′; Q_0 – полная площадь выходного зрачка.

Измерения действующего отверстия зрачков оптической системы выполняются на оптической скамье с помощью суппорта с вращающейся оправой. Схема измерений приведена на рис. 3.4.11.

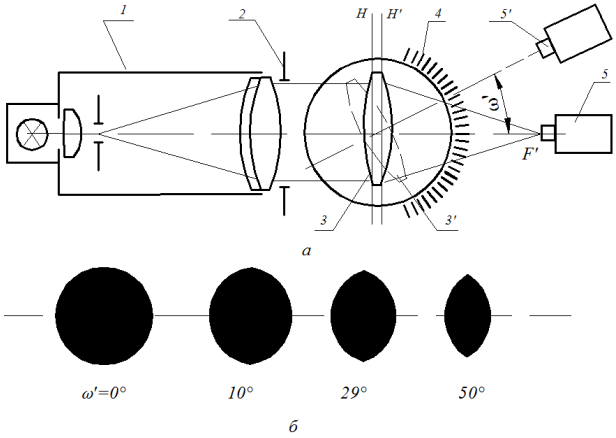


Рис. 3.4.11. Измерение коэффициента виньетирования объектива на оптической скамье с помощью суппорта с вращающейся оправой и цифровой видеокамеры: *а* – схема измерений; *б* – конфигурация выходного зрачка объектива для разных полей зрения ω'

Объектив *3* устанавливается в суппорт *4* таким образом, чтобы ось вращения проходила через переднюю узловую точку и освещалась коллимированным пучком лучей, выходящим из коллима-

тора *1*. Фотоприемное устройство в виде цифровой видеокамеры *5* устанавливается таким образом, чтобы ее входной зрачок совпадал с изображением точечного отверстия, построенного измеряемым объективом. Устройство позиционирования камеры связано с суппортом таким образом, что вращается вместе с объективом и имеет механизм поперечной наводки. В камере *5'* наблюдается выходной зрачок объектива при его повороте на угол ω'. При вращении объектива вместе с камерой с помощью поворота суппорта наблюдают и регистрируют освещенные фигуры, имеющие форму, близкую к эллипсам (рис. 3.4.11, *б*). Соответствующие углы поворота регистрируются по поворотной шкале суппорта. Записанные видеокадры обрабатываются таким образом, что каждому значению угла ставится в соответствие площадь эллипса согласно форме видимого зрачка. Соответствующий коэффициент виньетирования определяется по формуле (3.4.11), где под Q_ω, Q_0 понимается площадь, зарегистрированная на видеокадре.

Измерение освещенности поля изображения с помощью полусферы. Падение освещенности по полю зрения объектива для Ламбертовского освещения подчиняется хорошо известному закону

$$E_{\omega'} = E_0 \cos^4 \omega', \tag{3.4.12}$$

где E_0 – освещенность на оси; ω' – угол поля зрения.

С учетом виньетирования эта формула выглядит следующим образом:

$$E_{\omega'} = K_Q \cdot E_0 \cos^4 \omega'. \tag{3.4.13}$$

Причем влияние коффициента виньтирования может быть как в сторону выравнивания (***аберрационное виньетирование***), так и в сторону еще большего падения освещенности.

Измерение падения освещенности производится по достаточно очевидной схеме, приведенной на рис. 3.4.12.

Наиболее рациональным источником освещения, имитирующим равномерно освещенное поле зрения, является полусфера *1*, внутренняя поверхность которой покрыта специальной матовой краской и освещена лампами накаливания *2*, которые расположены вокруг выходного отверстия *3* полусферы и прикрыты экранами.

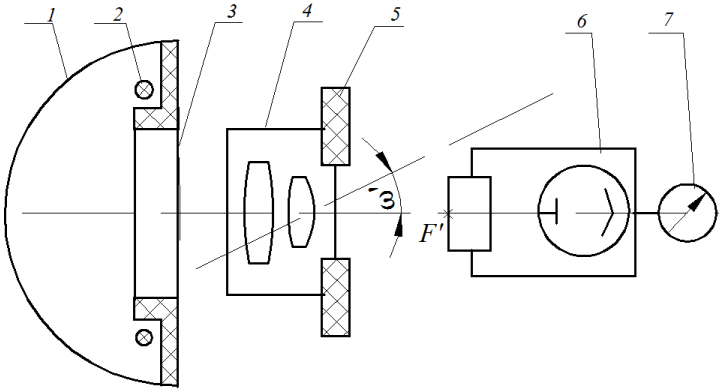


Рис. 3.4.12. Измерение падения освещенности поля зрения объективов:
1 – полусфера; *2* – лампа накаливания; *3* – выходное отверстие полусферы;
4 – объектив; *5* – объективодержатель; *6* – фотометрическая головка;
7 – фотометр

Объектив *4* закрепляется в объективодержателе *5*. В задней фокальной плоскости объектива размещается фотометрическая головка *6* для измерения освещенности площадки плоскости изображения размером, ограниченным размером диафрагмы головки. Измерения освещенности производятся с помощью фотометра *7*. В процессе измерений фотометрическая головка перемещается в фокальной плоскости перпендикулярно оптической оси в различные точки поля изображения объектива. По результатам измерений строится график зависимости:

$$E_{\omega'} = E_{\omega'}(\omega').$$

Измерение цветопередачи объективов колориметрическим методом. Степень соответствия цветовой гаммы предмета цветовой гамме объектива называется ***цветностью (цветопередачей)*** объектива – ГОСТ Р 50678–94 «Съемочные объективы. Определение формулы цветности по ИСО (ИСО/ФЦ)». Поскольку цветопередача обусловлена спектральным пропусканием объектива, согласно ГОСТ Р 50678–94 определение цветности основано на расчете фотографических характеристик для синей, зеленой и красной

областей спектра по коэффициентам спектрального пропускания исследуемого объектива, измеренного в интервале длин волн от 370 до 680 нм.

В колориметрическом методе используют способность человеческого глаза улавливать качественные различия между двумя излучениями различного спектрального состава. Цветовые различия, возникающие в спектре излучения стандартного источника после прохождения через объектив, измеряют с помощью колориметра.

Цветопередачу контролируемого объектива оценивают по изменению координат точек цветности стандартного источника света в цветовом поле, измеряя эти координаты с контролируемым объективом и без него. Изменение координат соответствует искажению цветности стандартного источника света, вносимому контролируемым объективом. Смещение точки цветности в пространстве цветов фиксируется на цветовом графике.

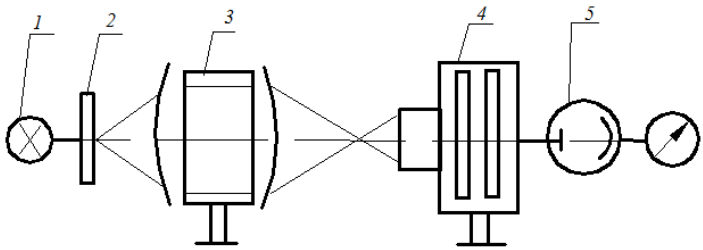


Рис. 3.4.13. Схема колориметра для измерения формулы цветности фотографического объектива: *1* – источник света; *2* – молочное стекло; *3* – объективодержатель; *4* – колориметрическая головка; *5* – фотометр

Измерение координат точек цветности стандартного источника с учетом светопропускания контролируемого объектива выполняют универсальным фотоэлектрическим колориметром. Прибор (рис. 3.4.13) состоит из стандартного источника света *1* с молочным стеклом *2*, объективодержателя 3, колориметрической головки *4*, фотометра *5*.

3.4.3. Методы измерений характеристик качества изображения оптических систем

Изображающие свойства оптических систем могут быть описаны в виде числа или функции в зависимости от особенностей задачи, решаемой с помощью оптического прибора. Какую численную характеристику выбрать, решает конструктор на стадии проектирования и задает это в виде числа в документации. Это может быть:

– разрешающая способность;
– размер кружка рассеяния;
– число Штреля;
– амплитуда волновой аберрации;
– среднеквадратичное отклонение волнового фронта.

После изготовления оптической системы нужно только проверить, удовлетворяет ли качество системы значению того числа, которое заложено в документации. Эти числа могут быть получены непосредственно из измерительного эксперимента посредством прямых измерений, а могут быть рассчитаны из передаточных функций (см. раздел 2.1.3):

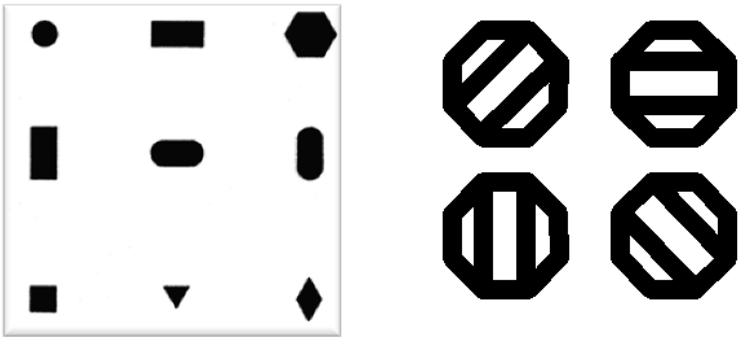
- функции рассеяния точки;
- функции рассеяния линии;
- функции рассеяния края (пограничная кривая);
- геометрической аберрации;
- частотно-контрастной характеристики;
- волновой аберрации.

Поэтому характеризовать изображающие свойства оптических систем с помощью передаточных функций является более универсальным решением. В разделе 2.1.3 была показана взаимосвязь оптических передаточных функций, поэтому достаточно характеризовать свойство оптической системы с помощью какой-то одной, соответствующей специфике решаемой задачи. Чаще всего выбирают ту передаточную функцию, по которой можно определить требуемые чертежом численные характеристики. А выбор: число или функция – это вопрос экономической или практической целесообразности, а также оснащенности оптической измерител-

ной лаборатории. Для задач оптического производственного контроля достаточно числовых характеристик – это проще и дешевле, для анализа свойств системы или управления технологическим процессом нужна функция.

Прямое измерение разрешающей способности оптической системы на оптической скамье. Разрешающая способность (разрешение) оптической системы $R_{o.c}$ характеризует её способность раздельно воспроизводить мелкие детали объекта. Она определяется наибольшим значением частоты штрихов регулярной одномерной решётки – ***миры***, при котором в оптическом изображении эти штрихи ещё могут быть различены (не сливаются). Вид миры определяется спецификой задачи, решаемой с помощью оптической системы, а контраст равен $K = 1$.

Пример 3.4.1. Фрагменты тест-объектов для изучения предельных значений передаточных характеристик оптических систем различного назначения приведены на рис. 3.4.14.



а *б*

Рис. 3.4.14. Фрагменты мир, предназначенных для исследования изображающих свойств различных оптических систем: *а* – различительной способности голографических систем измерения взвешенных частиц; *б* – читаемости для исследования систем репрографии по ГОСТ 13.1.701–95 «Репрография. Микрография. Тест-объекты для контроля качества микроизображения. Типы. Методы контроля»

Наиболее распространенная мира – штриховая мира Фуко из комплекта оптической скамьи – приведена на рис. П.33, ее харак-

теристики представлены в табл. 3.4.1. Схема измерения разрешающей способности представлена на рис. 3.4.15.

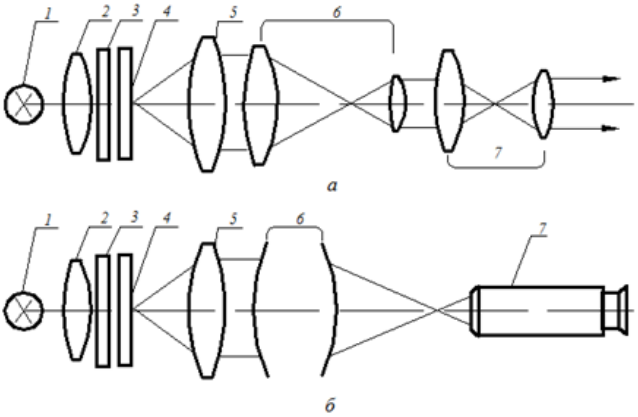


Рис. 3.4.15. Схема измерения разрешающей способности оптической системы *6* на оптической скамье: *а* – для телескопической системы; *б* – для объектива

Для измерения разрешающей способности используется коллиматор оптической скамьи. Мира *4* устанавливается в фокусе коллиматорного объектива *5* и освещается источником света *1* с помощью конденсора *2* через матовое стекло *3*. Ее изображение формируется коллиматорным объективом в бесконечности. Если перед объективом поставить измеряемую оптическую систему *6*, то изображение миры перенесется из бесконечности в бесконечность телескопической оптической системой (рис. 3.4.15, *а*) или в задний фокус объектива (рис. 3.4.15, *б*). Это изображение рассматривается с помощью наблюдательного прибора *7*. Соответственно в первом случае – это зрительная труба, во втором – горизонтальный микроскоп. Апертура микроскопа должна быть не менее задней апертуры исследуемого объектива, а увеличение зрительной трубы должно исключать возможность виньетирования и влияние зрачка глаза наблюдателя на результат.

Целью этого измерительного наблюдения является определение номера элемента штриховой миры, разрешаемой по всем четырем направлениям.

Таблица 3.4.1

Штриховые миры ОСК-2 ЦЛ для определения разрешающей способности оптических систем. В таблице α' – угловое расстояние между серединами соседних полос при $f'_к = 1600$, угл. сек.

Номер миры и номер элемента				α'	Номер миры и номер элемента			α'
25				0,64	12	24		5,44
24				0,68	11	23		5,76
23				0,72	10	22		6,08
22				0,78	9	21		6,48
21				0,81	8	20		6,88
20				0,86	7	19		7,28
19				0,91	6	18		7,68
18				0,98	5	17		8,16
17				1,02	4	16		8,64
16				1,08	3	15		9,2
15				1,15	2	14	№ 5	9,78
14	№ 2			1,22	1	13	25	10,32
13	25			1,29	№ 3	12	24	10,88
12	24			1,36		11	23	11,52
11	23			1,44		10	22	12,16
10	22			1,52		9	21	12,96
9	21			1,62		8	20	13,7
8	20			1,72		7	19	14,5
7	19			1,82		6	18	15,4
6	18			1,92		5	17	16,3
5	17			2,04		4	16	17,2
4	16			2,16		3	15	18,3
3	15			2,30		2	14	19,4
2	14	№ 3		2,44		1	13	20,5
1	13	25		2,58		№ 4	12	21,8
№ 1	12	24		2,72			11	23,5
	11	23		2,88			10	24,5
	10	22		3,04			9	25,9
	9	21		3,24			8	27,4
	8	20		3,44			7	29,06
	7	19		3,64			6	30,8
	6	18		3,84			5	32,5
	5	17		4,08			4	34,6
	4	16		4,32			3	36,8
	3	15		4,60			2	38,8
	2	14	№ 4	4,88			1	41,3
	1	13	25	5,16			№ 5	
13	25			1,29	№ 3	12	24	10,88

После того как этот номер установлен, из паспорта миры (см. табл. 3.4.1) определяют:

– угловое разрешение исследуемой оптической системы

$$\alpha'_{\min} \geq \varphi'_{л};$$

– минимальную разрешаемую деталь изображения, или линейное разрешение, или угловой размер соответствующего штриха

$$y'_{\min} = f'_{об} \cdot \operatorname{tg} \alpha'_{\min} \geq \varepsilon'_{л}; \quad (3.4.14)$$

– максимальную пространственную частоту, передаваемую объективом, или разрешение, выраженное в мм$^{-1}$:

$$N'_{\max} = \frac{1}{f'_{об} \cdot \operatorname{tg} \propto'_{\min}}, \quad (3.4.15)$$

где $\varphi'_{л}$ – угловой предел разрешения по Рэлею для штрихового объекта согласно табл. 2.1.4; $\varepsilon'_{л}$ – линейный предел разрешения по Рэлею для штрихового объекта согласно табл. 2.1.4.

Если для определения разрешающей способности используется иной коллиматор с $f'_{к} \neq 1600$ мм или измерения проводятся для положения предмета на конечном расстоянии S, формулы (3.4.14) и (3.4.15) следует откорректировать.

Для произвольного коллиматора имеем:

$$y'_{\min} = \frac{f'_{об}}{f'_{к}} \cdot \operatorname{tg} \propto'_{\min} \cdot 1600, \quad (3.4.16)$$

$$N'_{\max} = \frac{f'_{к}}{f'_{об} \cdot \operatorname{tg} \propto'_{\min} \cdot 1600}. \quad (3.4.17)$$

Для положения предмета на конечном расстоянии:

$$y'_{\min} = \frac{f'_{об}}{S} \cdot \operatorname{tg} \propto'_{\min} \cdot 1600, \quad (3.4.18)$$

$$N'_{\max} = \frac{S}{f'_{об} \cdot \operatorname{tg} \propto'_{\min} \cdot 1600}. \quad (3.4.19)$$

Косвенное оценивание разрешающей способности оптической системы по частотно-контрастной характеристике. Если для исследуемой оптической системы известна частотно-контрастная характеристика $T(N')$ и кривая контрастной чувстви-

тельности приемника $G(N')$ (рис. 3.4.16), с помощью которого предполагается регистрировать изображение, то за разрешающую способность оптической системы принимается значение пространственной частоты $N' = N'_{\max}$, при которой эти кривые пересекаются [69]. Для глаза за разрешающую способность может быть принята та частота $N'_{\max}$, при которой значение частотно-контрастной характеристики равно предельно различимому контрасту:

$$T_{\min}^{\text{виз}} = 0{,}002. \qquad (3.4.20)$$

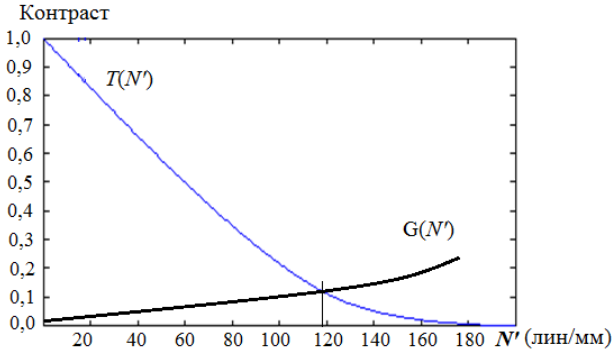


Рис. 3.4.16. Определение разрешающей способности оптической системы по частотно-контрастной характеристике $T(N')$ и кривой контрастной чувствительности фотоприемника $G(N')$

Прямое измерение кружка рассеяния оптической системы на оптической скамье. Схема измерений представлена на рис. 3.4.14, только вместо миры *4* в фокальной плоскости коллиматора устанавливается точечное отверстие с угловым размером не более дифракционного предела для исследуемой оптической системы. Для измерения размера фокального пятна может быть использована шкала измерительного прибора: зрительной трубы или микроскопа. Измерение фокального пятна производится методом поперечных наводок. Измерения достаточно субъективны, поскольку имеет место неопределенность в нахождениии границ фокального пятна при значительных аберрациях (рис. 3.4.19, *а, в, д, ж*).

Косвенное оценивание диаметра кружка рассеяния по функции рассеяния точки. Если известна функция рассеяния точки, то за размер кружка рассеяния принимается размер центрального максимума, т.е. расстояние между первыми минимумами (рис. 3.4.19, *б, г, е, з*).

Косвенное оценивание числа Штреля по функции рассеяния точки. Согласно определению ***число Штреля***, или ***определительная яркость S***, – это отношение наибольших значений освещенности в центре пятна рассеяния реальной системы, для которой волновые аберрации не равны нулю, к освещенности в центре пятна безаберрационной системы с такими же параметрами. Из соотношения (2.1.4) имеем по определению:

$$S = \frac{D(0,0)}{D_0(0,0)}. \qquad (3.4.21$$

Как и иные численные характеристики, число Штреля не имеет особого технологического смысла [68], поскольку не дает оснований для выбора направления движения по совершенствованию оптической системы, но как критерий ее качества является одним из самых основных.

Если обратиться к ФРТ, определенной в реальном измерительном эксперименте с учетом нормировки по (3.4.21), то число Штреля есть не что иное, как значение ФРТ в центре реального фокального пятна, т.е.

$$S = ФРТ(0,0). \qquad (3.4.22)$$

Хорошо известен критерий Штреля, который говорит о том, что высококачественной считается оптическая система, в которой выполняется условие

$$S \geq 0{,}8. \qquad (3.4.23)$$

Сравнивая значение числа Штреля с формулой (3.4.23), можно оценить степень дифракционной ограниченности контролируемой системы.

При небольших аберрациях [72] часть энергии из центрального максимума перекачивается в соседние максимумы и интенсивность в центральном максимуме уменьшается (см. рис. 3.4.17).

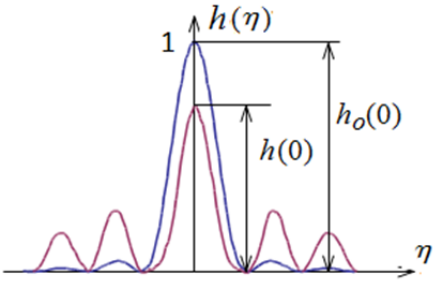


Рис. 3.4.17. Распределение энергии в фокальном пятне для оптической системы с малыми аберрациями: $h_o(0)$ – интенсивность ФРТ в центральном максимуме дифракционно-ограниченной оптической системы, $h(0)$ – интенсивность ФРТ в центральном максимуме реальной системы с малыми аберрациями

В этом случае справедливо соотношение [20]

$$S \cong 1 - W_{\text{скв}}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2. \qquad (3.4.24)$$

Это соотношение дает возможность оценить среднеквадратичное отклонение волнового фронта, не прибегая к измерениям волновой аберрации.

Когда волновые аберрации большие, число Штреля в реальном эксперименте бывает сложно определить ввиду неопределенности положения точки на оси (рис. 3.4.19, *б*), тогда под $D(0,0)$ понимают освещенность в энергетическом центре пятна рассеяния.

Пример 3.4.2. В работе [70] описана оптическая система с переменным фокусным расстоянием, состоящая из основного ***силового компонента***, являющегося стационарным, и четырех подвижных панкратиков, перемещающихся относительно друг друга по определенному закону, так что эквивалентное фокусное расстояние изменяется от $f' = 1{,}5$ м до $f' = 5{,}0$ м (рис. 3.4.18).

Особенностью системы является необходимость перемещения панкратиков на большие расстояния в условиях неопределенности баз. Это приводит к возникновению децентрировок компонентов и, как следствие, искажениям фокального пятна (рис. 3.4.19, *а* и *д*). С целью компенсации этих искажений в конструкцию объектива введено адаптивное зеркало (рис. 3.4.18), форма которого изменя-

ется так, чтобы исправить искажения фокального пятна, связанные с децентрировками.

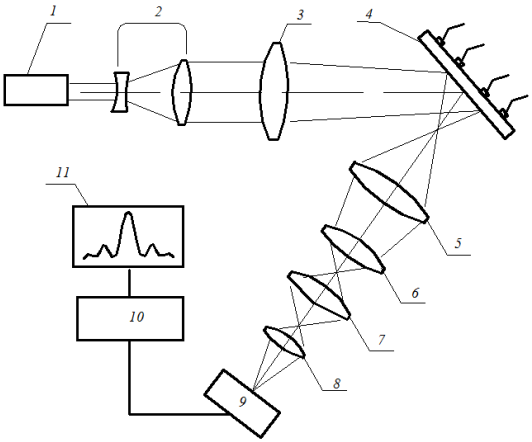


Рис. 3.4.18. Схема установки для исследования панкратической оптической системы с гибким плоским зеркалом на базе биморфного пьезоэлемента: *1* – гелий неоновый лазер; *2* – экспандер лазерного излучения; *3* – силовой компонент панкратической системы; *4* – гибкое адаптивное зеркало; *5–8* – панкратики; *9* – телевизионная камера; *10* – видеоконтрольное устройство с устройством выделения строки; *11* – осциллограф

Эффективность коррекции оценивалась по размеру фокального пятна $Д_{кр}$ и по значению числа Штреля S, который определялся по ФРТ, зарегистрированной с помощью фотоэлектрического сканирования. Фотографии, приведенные на рис. 3.4.19, *г, е, з*, показывают, что в результате коррекции размер фокального пятна уменьшается в 1,5 раза для $f' = 1{,}5$ м и в 1,2 раза для $f' = 5{,}0$ м.

Однако осциллограммы показывают, что эффективность работы корректора заключается не столько в уменьшении диаметра кружка, сколько в перекачке энергии из раздробленных децентрировками фрагментов пятна в центральный максимум. Это показывает число Штреля, значение которого увеличивается в 2,5 раза для $f' = 1{,}5$ м и в 1,8 раза для $f' = 5{,}0$ м. Для оценки числа Штреля использовались осциллограммы, обработанные по формуле (3.4.22) с нормировкой ФРТ по (3.4.30).

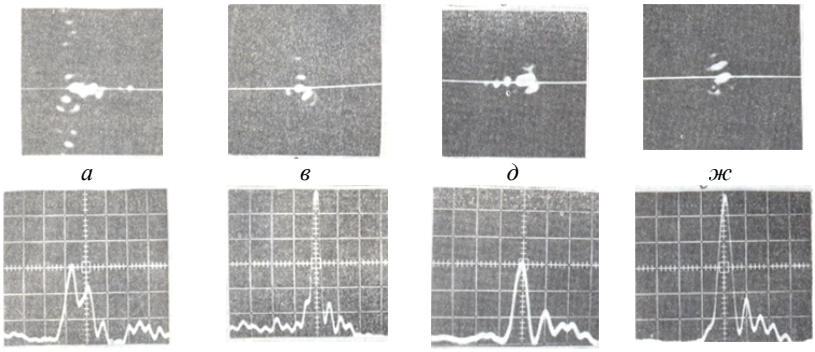


Рис. 3.4.19. Фотографии фокального пятна и осциллограммы распределения освещенности в фокальном пятне до коррекции (*а* и *б*) и после коррекции (*в* и *г*) соответственно для системы с $f' = 1{,}5$ м; то же до коррекции (*б* и *г*) и после коррекции (*ж* и *з*) для системы с $f' = 5{,}0$ м

Оценка наибольшего и среднеквадратичного отклонения волнового фронта по карте (профилю волновой аберрации) в плоскости выходного зрачка. Если известна волновая аберрация в плоскости выходного зрачка, то по этой функции могут быть произведены такие оценки, как наибольшая деформация волнового фронта (наибольшее отклонение или размах) $\Delta W_{\max}$ – *P–V* и среднеквадратичное отклонение волнового фронта $W_{\text{скв}}$ – *RMS*. Для их оценки используются формулы [20]:

$$\Delta W_{\max} = W_{\max} - W_{\min}, \tag{3.4.25}$$

$$W_{\text{скв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \left(W_i - \overline{W}\right)^2}. \tag{3.4.26}$$

где $W_{\max}$ и $W_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное значения волновой аберрации в пределах карты или профиля; W_i – значение волновой аберрации в i-й точке волнового фронта; $\overline{W} = \sum_{i=1}^{k} \frac{W_i}{k}$ – среднее значение волновой аберрации в пределах зрачка; k – количество отсчетов в выходном зрачке при измерении волновой аберрации.

Критерии дифракционного качества оптических систем, связанные с *P–V* и *RMS*, записываются в виде

– критерия Рэлея

$$\Delta W_{\max} \le \lambda/4; \tag{3.4.27}$$

– критерия Марешаля

$$W_{\text{скв}} \le \lambda/16. \tag{3.4.28}$$

Сравнивая значения *P–V* и *RMS* с формулами (3.4.27) и (3.4.28) соответственно, можно оценить степень дифракционной ограниченности контролируемой системы. В случае если ошибка общая, свойства системы следует характеризовать с помощью $\Delta W_{\max}$. Если преобладающей является волнистость, то прибегают к оценке $W_{\text{скв}}$. Для правильной оценки $W_{\text{скв}}$ большое значение имеет расстояние между отсчетами $m'_j - m'_{j-1}$. Согласно теореме Котельникова (Найквиста–Шеннона) должно выполняться соотношение

$$m'_j - m'_{j-1} = \frac{D'_{p'}}{k} \le 2s_i, \tag{3.4.29}$$

где s_i – характерный масштаб волнистости, $D'_{p'}$ – диаметр выходного зрачка.

Прямое измерение структурных функций методами фотоэлектрического сканирования. Несмотря на то что функция рассеяния точки – самая прозрачная и физически очевидная характеристика качества изображения, задача ее измерения не так уж проста. Связано это с малым пространственным масштабом функции рассеяния (это же физическая точка!) и с большим динамическим диапазоном измеряемого сигнала – не менее 4 порядков [5]. Первая неприятность приводит к:

– необходимости организации промежуточного увеличения изображения пятна рассеяния с помощью микрообъектива (отсюда слово микрофотометр). При этом очевидно, что микрообъектив вносит свою лепту в распределение энергии;

– прецизионному механическому сканированию этого изображения с помощью малых диафрагм;

– высоким требованиям по виброзащите измерительного эксперимента;

– прецизионным измерениям перемещения сканирующей диафрагмы.

Преодоление второй неприятности связано с модуляцией / демодуляцией измеряемого светового потока и использованием прецизионных широкодиапазонных фотометров.

После того как решены эти технические проблемы, схема прибора для таких измерений становится очевидной. На рис. 3.4.20 представлено одно из возможных решений с выводом ФРТ на осциллограф [25]. Прибор состоит из оптической скамьи, сканирующего устройства и регистрирующей электронной схемы.

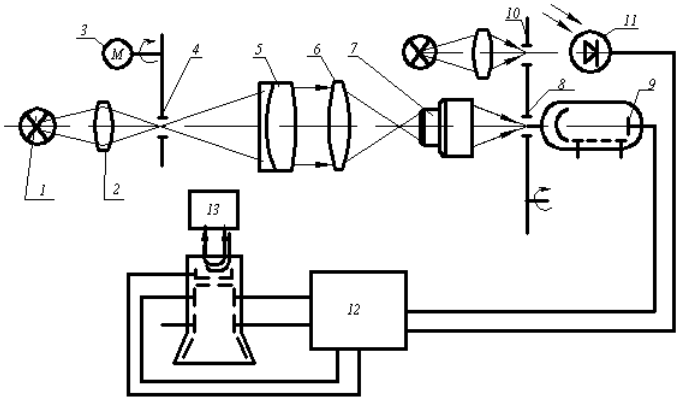


Рис. 3.4.20. Микрофотометр [25] для наблюдения структуры пятна рассеяния оптической системы: *1* – источник света; *2* – конденсор; *3* – модулятор; *4* – диафрагма; *5* – объектив коллиматора; *6* – исследуемый объектив; *7* – микрообъектив; *8* – диафрагма; *9* – ФЭУ; *10* – диск; *11* – фотоприемник; *12* – записывающая электронная система; *13* – электронно-лучевая трубка

Источник света *1* через конденсор *2* освещает диафрагму *4* в фокальной плоскости коллиматорного объектива *5*. Перед диафрагмой размещен модулятор *3* в виде вращающегося диска с отверстиями. Исследуемый объектив *6*, установленный за коллиматором, изображает диафрагму *4* в виде пятна рассеяния, которое

увеличивается вспомогательным микрообъективом *7*. Сканирующее устройство выполнено в виде диска *10* с диафрагмой *8* диаметром 0,02 мм, за которым помещен ФЭУ *9*. За один оборот диска его ось смещается по вертикали на величину диаметра сканирующей диафрагмы с целью получения следующего скана, поскольку реальная ФРТ не обязательно имеет осевую симметрию. Второе отверстие диска *10* с находящимся за ним фотоприемником *11* служит для синхронизации механической и электронной разверток. Фотометрический сигнал выводится на электронно-лучевую трубку *13* через записывающую электронную систему. Измерение протяженности ФРТ – линейный масштаб определяется по времени сканирования, но он подлежит масштабированию, поскольку имеет место увеличение размера реального пятна с помощью микрообъектива. Значение увеличения микрообъектива – параметр, который устанавливается при калибровке линейного масштаба, и это один из основных источников погрешностей при измерениях ФРТ.

Прочие структурные функции – функция рассеяния линии и пограничный контраст – исследуются таким же образом, только для этого следует заменить тест-объект, а именно, вместо точечной диафрагмы использовать щель или полуплоскость соответственно.

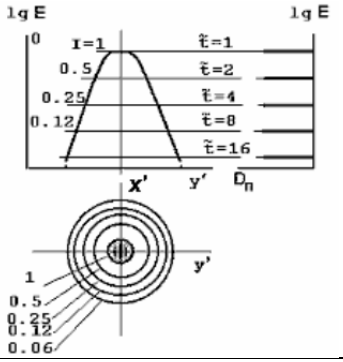
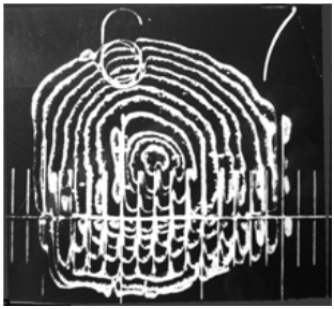
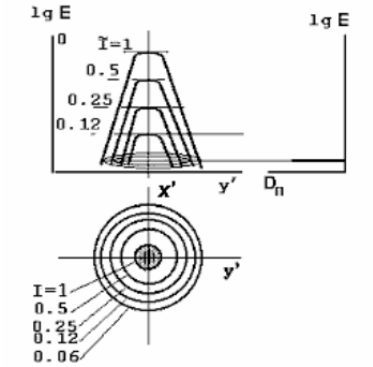
И еще один существенный вопрос возникает при измерении структурных функций – вопрос нормировки. Рассмотрим его на примере функции рассеяния точки. Нормировка ФРТ, по определению, задается соотношением (2.1.4). Однако практически реализовать в процессе измерений такую нормировку можно только имея техническую возможность для преобразования остаточной волновой аберрации исследуемой оптической системы до нуля, поэтому для исключения энергетических преобразований в реальных измерениях *ФРТ* пользуются иной нормировкой [71]:

$$\text{ФРТ}(y', z') = \frac{D(y', z')}{\iint D(y', z')dy'dz'}, \qquad (3.4.30)$$

где $\iint D(y', z')dy'dz'$ представляет собой количество энергии, приходящееся на всю ФРТ. Несложно показать [20], что эти два вида нормировки ФРТ в конце концов дают один и тот же результат.

Таблица 3.4.2

Методы изофотометрии [5] при измерении ФРТ

Метод и схема формирования	Фото фокального пятна со сформированными изофотами
Метод изофотометрии с переменным временем накопления 	
Метод изофотомерии с изменяющимся световым потоком 	

Прямое измерение структурных функций методами фотоэлектрической изофотометрии. Изофотометрия – представление распределения освещенности в виде конечного числа кривых – ***изофот***. Причем каждая изофота представляет собой геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты, но равное значение координаты относительной освещенно-

сти. Для реализации изофотометрических измерений необходим матричный фотоприемник с импульсной характеристикой. Высота импульса задает уровень дискриминации фотометрического сигнала. Для получения системы фотометрических сечений изображения светящейся точки необходимо образовать ряд сечений, расположенных на уровнях относительной освещенности и связанных определённым математическим соотношением.

В зависимости от того, как задаются эти уровни, различают два метода изофотометрии: с изменяющимся временем накопления и с изменяющимся световым потоком (табл. 3.4.2).

В первом случае уровень импульсной характеристики регулируется временем накопления фотометрического сигнала фотоприемной матрицей.

Во втором – задается величиной светового потока при фиксированном времени накопления.

На рис. 3.4.21 представлена схема измерений структурных функций методами фотоэлектрической изофотометрии на оптической скамье. Осветитель, состоящий из лазера *1*, микрообъектива *4* и диафрагмы *5*, формирует тест в соответствии с требуемой структурной функцией: для ФРТ это точка.

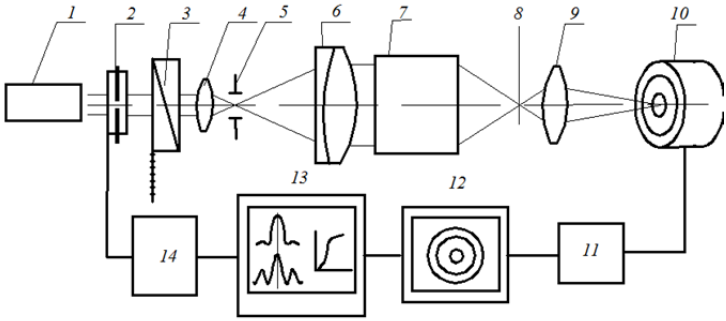


Рис. 3.4.21. Схема измерения ФРТ методом изофотометрии [5]:
1 – лазер; *2* – затвор; *3* – фотометрический клин; *4* – микрообъектив; *5* – диафрагма; *6* – объектив коллиматора; *7* – исследуемая оптическая система; *8* – пятно рассеяния; *9* – микрообъектив; *10* – видеокамера; *11* – электронный блок управления регистрацией изображения; *12* – видеоконтрольное устройство; *13* – компьютер; *14* – блок управления регистрацией

Исследуемая оптическая система *7* устанавливается в положение, соответствующее минимальным аберрациям. Для случая, приведенного на рис. 3.4.20, это бесконечность, поэтому изображение теста до системы формируется в бесконечности с помощью коллиматора оптической скамьи *6*. Пятно рассеяния исследуемой системы *8* увеличивается с помощью микрообъектива *9*, так что его изображение формируется на матрице видеокамеры *10*. Электронный блок управления регистрацией изображения *11* управляет работой камеры, позволяя:

– задавать чувствительность и характеристику камеры;

– задавать уровень дискриминации видеосигнала;

– выполнять его дифференцирование, выделяя линию наивысшего градиента;

– накапливать изображения.

Режим накопления: количество профилей, выбор метода изофотометрии осуществляются блоком управления регистрацией *14*. Управляемый блоком *14* затвор *2* позволяет менять время накопления и служит для реализации метода накопления. Фотометрический клин с устройством отсчета оптической плотности *3* позволяет управлять световым потоком, задавая уровень изофоты в методе управления потоком. Современные смарт-камеры со встроенным процессором позволяют программировать режим работы и совмещать функции затвора, блока регистрации изображения и блока обработки видеосигнала в собственном процессоре. Изофотометрированный видеосигнал транслируется на видеоконтрольном устройстве *12* и обрабатывается компьютером *13* с целью представления цифровых данных, характеризующих структурные функции. Линейный масштаб координат устанавливается с помощью стеклянной линейки, помещаемой в плоскость *8* формирования структурной функции.

По оценкам [5] погрешность измерения структурных функций методом изофотометрии составляет 1,5%.

Прямые измерения геометрических аберраций на оптической скамье. Геометрические аберрации (рис. П.52–П.56) являются одним из расчетных параметров, закладываемых в конструкцию оптических систем при проектировании. Поэтому при аттестации

изготовленной системы измеряют ее геометрические аберрации с целью выявления соответствия реальных аберраций оптических систем их теоретическим значениям. На основании этого судят о возможностях применения реального объектива по его прямому назначению.

Измерения геометрических аберраций объективов выполняются в соответствии с ГОСТ 23700–79 «Объективы съемочные. Методы измерения поперечной аберрации». ГОСТ 23700–79 предполагает, что измерения геометрических аберраций производятся на оптической скамье путем измерения расстояний между точками пересечения с плоскостью изображения главного луча и лучей, проходящих через ряд зон входного зрачка объектива на высоте ρ. Указанные расстояния определяют путем измерения смещения дифракционной картины, образующейся при прохождении узких пучков лучей через пару щелей, устанавливаемой по центру зрачка и в заданной его зоне (рис. 3.4.22). Наблюдение интерференционной картины производится с помощью микроскопа *8*, закрепленного на направляющей со шкалой *9* отсчета положения микроскопа. Для освещения объектива используются некогерентный осветитель оптической скамьи, состоящий из источника света *1*, конденсора *2*, светофильтра *3*, раздвижная щель *4* и коллиматор *5*.

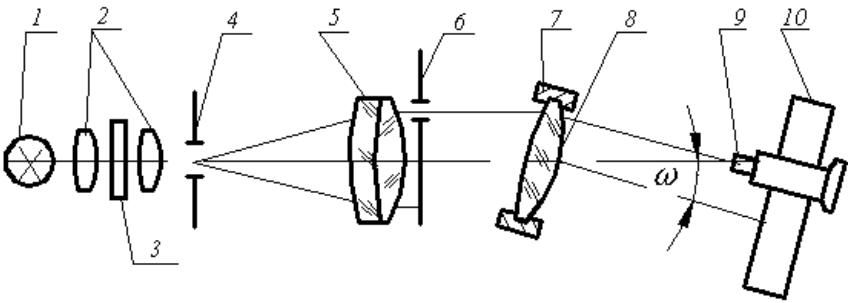


Рис. 3.4.22. Измерение координаты точки пересечения лучей, прошедших через пару щелей во входном зрачке, фокальной плоскости объектива *8* с помощью горизонтального микроскопа *9* и поперечной линейки *10*

Объектив *8* устанавливается в объективодержатель *7*, позволяющий поворачивать объектив вокруг вертикальной оси на угол ω поля изображения. Для моделирования лучей, проходящих через исследуемый объектив, в симметричных точках входного зрачка на заданных высотах ρ используется диафрагма специальной формы *6*. Изображение этой диафрагмы приведено на рис. 3.4.23.

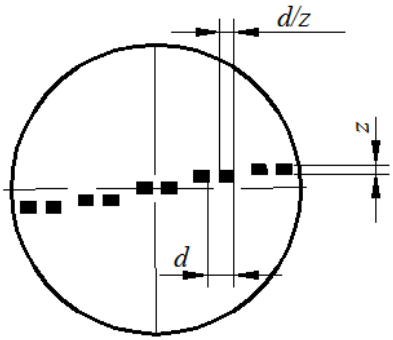


Рис. 3.4.23. Многощелевая специальная диафрагма для измерения геометрических аберраций

Расчеты величин аберраций производятся в соответствии с определением соответствующих аберраций (П.136)–(П.146).

Прямое измерение оптической передаточной функции методом непосредственного сканирования. При прямых измерениях оптической передаточной функции измеряется контраст изображения тест-объектов, имеющих синусоидальное распределение пропускания. Схема измерений может быть собрана на оптической скамье и представлена на рис. 3.4.24. Тест-объект (синусоидальная амплитудная решетка) *1*, помещенный в фокальной плоскости объектива коллиматора *2*, проецируется измеряемым объективом *3* в плоскость щели *4*, расположенной в его задней фокальной плоскости. За щелью располагается фотометрическая головка *5* цифрового фотометра *6*. При перемещении решетки перпендикулярно оптической оси осуществляется фотометрическое сканирование изображения щелью *4*. Апертурный угол и расположение фотометрической головки должны быть такими, чтобы обеспечивался

полный перехват светового потока после щели, а ее ширина не должна превышать 0,1 периода сканируемой решетки. При правильно выбранных размерах щели и апертурном угле фотометрической головки профиль, зарегистрированный фотометром *6*, является тоже синусоидальным. Если решетка имеет контраст: $K(N) = 1$, где N – частота тест-объекта, то контраст профиля $K'(N')$, зарегистрированный фотометром, будет равняться значению частотно-контрастной характеристики $ЧКХ(N') = K'(N')$ на пространственной частоте $N' = N \cdot \frac{f'_{об}}{f'_{к}}$.

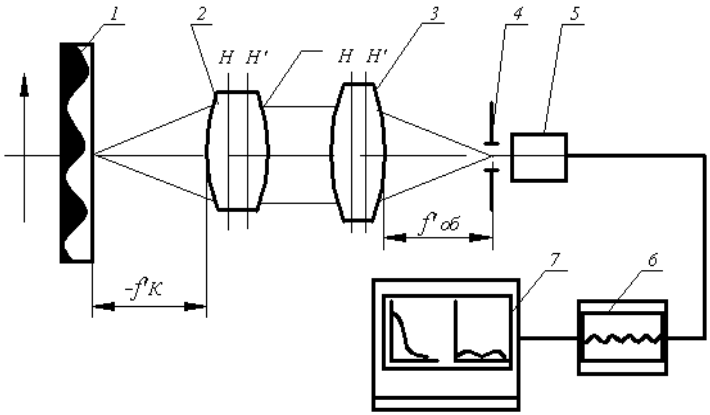


Рис. 3.4.24. Схема прямых измерений оптической передаточной функции:
1 – синусоидальная амплитудная решетка; *2* – объектив коллиматора;
3 – исследуемый объектив; *4* – щель; *5* – фотометрическая головка;
6 – фотометр; *7* – компьютер

Значения $K'(N')$ и N' заносятся в память компьютера *7*. Устанавливая синусоидальные миры с различной частотой *N*, получают функциональную зависимость $ЧКХ(N')$.

Фазовый сдвиг изображения по отношению к тест-объекту можно определить, если на синусоидальные миры нанести метки, смещение *x'* которых в плоскости изображения определяет фазу:

$$\varphi = 2\pi N' x' = ЧФХ(N').$$

Описанный метод позволяет измерять передаточные функции в одном меридиональном сечении. Поскольку реальные оптические системы могут не иметь осевой симметрии, следует повторить измерения для нескольких ориентаций объектива, каждый раз поворачивая его во вращающейся оправе вокруг оси.

Для измерений передаточных функций объектива для внеосевой точки следует наклонить объектив в суппорте и выполнить те же самые измерения, что и для точки на оси.

При измерении передаточных функций в сагиттальных сечениях для внеосевой точки следует повернуть щель анализатора и тест-объект со сканирующим устройством таким образом, чтобы они лежали в сагиттальном сечении.

Косвенное измерение частотно-контрастной характеристики методом электронного фурье-анализа. Синусоидальные миры являются достаточно сложным и дорогим тест-объектом. Поэтому в практических измерениях *ЧКХ* часто используют более простой тест-объект – амплитудные решетки с прямоугольным профилем с контрастом, равным 1. Пропускание прямоугольной решетки с частотой N описывается бесконечным рядом, называемым ***формулой Кольтмена*** [25]:

$$\tau(x, N) = \sin 2\pi Nx + \frac{1}{3}\sin 2\pi\, 3Nx - \frac{1}{5}\sin 2\pi\, 5Nx + \\ + \frac{1}{7}\sin 2\pi\, 7Nx - \cdots. \tag{3.4.31}$$

Схема измерений может быть собрана на оптической скамье и представлена на рис. 3.4.25.

Радиальная штриховая мира *1*, помещенная в фокальной плоскости объектива коллиматора *2*, проецируется измеряемым объективом *3* в плоскость диафрагмы *4*, расположенной в его задней фокальной плоскости. За диафрагмой располагается фотометрическая головка *5* цифрового фотометра *6*. Если $D/2$ – смещение радиальной миры относительно оптической оси, то при ее вращении в предметной плоскости формируется линейная решетка с прямоугольным профилем с пространственной частотой $N = \frac{n}{\pi D}$, где n – число штрихов в радиальной мире; D – диаметр, на котором производится сканирование.

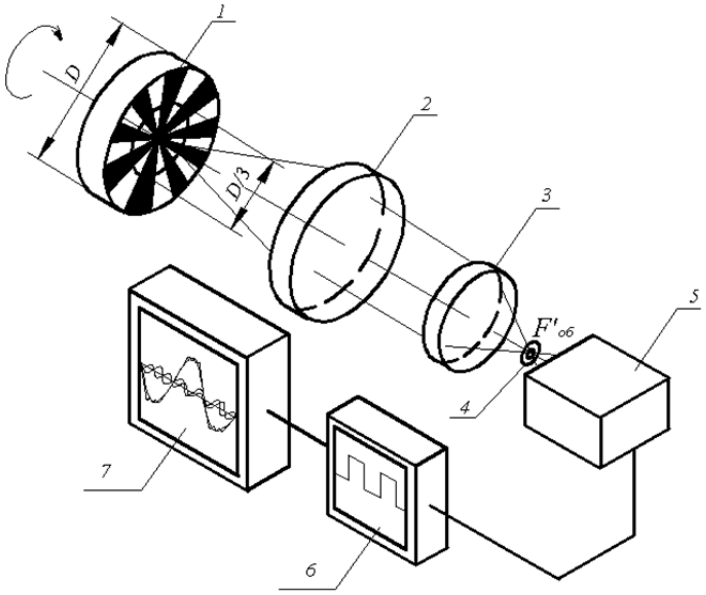


Рис. 3.4.25. Схема измерений *ЧКХ* объективов методом электронного фурье-анализа: *1* – радиальная шриховая мира; *2* – объектив коллиматора; *3* – исследуемый объектив; *4* – диафрагма; *5* – фотометрическая головка; *6* – фотометр; *7* – компьютер

Головка фотометра *5* преобразует сканируемый профиль изображения в электрический сигнал, а фотометр преобразует его в цифровой вид и передает на обработку в компьютер так, что компьютером регистрируется распределение освещенности в изображении тест-объекта $\tau'(x', N')$. В соответствии с формулой Кольтмена (3.4.1), с учетом *ЧКХ* объектива, можно записать для распределения освещенности

$$\tau'(x', N') = K'(N')\sin 2\pi N'x + K'(3N')\frac{1}{3}\sin 2\pi 3N'x' - \\ - K'(5N')\frac{1}{5}\sin 2\pi 5N'x' + + K'(7N')\frac{1}{7}\sin 2\pi 7N'x' - \cdots, \quad (3.4.32)$$

где x' – координата в плоскости формирования изображения развертки; $N' = N \cdot \frac{f'_{об}}{f'_к}{}'$ – пространственная частота изображения тест-объекта.

Алгоритмически выделяя кратные частоты N', $3N'$, $5N'$, $7N'$ и фиксируя соответствующие им значения амплитуд, можно определить $K'(N')$, $K'(3N')$, $K'(5N')$, $K'(7N')\ldots$ и построить функцию *ЧКХ* анализируемого объектива.

Для повышения точности измерений вращающаяся мира должна иметь устройство перемещения и позиционирования перпендикулярно оптической оси, снабженное датчиком линейных перемещений. В такой постановке измерительного эксперимента можно реализовать совокупные измерения. В этом случае измерение освещенности предметной плоскости производят несколько раз, фиксируя при этом ось вращения соответственно для диаметров $D/_3$, $D/_5$, $D/_7$, …, и составляют систему уравнений:

$$\begin{cases} \tau'(x', N') = K'(N')\sin 2\pi N'x' + K'(3N')\frac{1}{3}\sin 2\pi 3N'x' - K'(5N')\frac{1}{5}\sin 2\pi 5N'x' + \\ \qquad +K'(7N')\frac{1}{7}\sin 2\pi 7N'x' - \cdots \\ \tau'(x', 3N') = K'(3N')\sin 2\pi N'x' + K'(9N')\frac{1}{3}\sin 2\pi 9N'x' - K'(15N')\frac{1}{5}\sin 2\pi 1\,5N'x' + \\ \qquad +K'(21N')\frac{1}{7}\sin 2\pi 21N'x' - \cdots \\ \tau'(x', 5N') = K'(5N')\sin 2\pi N'x' + K'(15N')\frac{1}{3}\sin 2\pi 15N'x' - K'(25N')\frac{1}{5}\sin 2\pi 2\,5N'x' + \\ \qquad +K'(35N')\frac{1}{7}\sin 2\pi 35N'x' - \cdots \\ \tau'(x', 7N') = K'(7N')\sin 2\pi N'x' + K'(21N')\frac{1}{3}\sin 2\pi 21N'x' - K'(35N')\frac{1}{5}\sin 2\pi 35N'x' + \\ \qquad +K'(49N')\frac{1}{7}\sin 2\pi 49N'x' - \cdots \\ \qquad \ldots \end{cases} \quad (3.4.33)$$

При этом очень важным является вопрос, откуда начинать измерения и где их заканчивать. Ответ на него зависит от ожидаемых свойств *ЧКХ*:

– как она ведет себя на низких частотах, и за $N'_{\min}$ принять границу верхнего стационарного участка, где значение $K'(N'_{\min}) \approx 1$, при этом $D = \frac{n \cdot f'_{об}}{\pi \cdot N'_{\min} \cdot f'_к}$;

– как она ведет себя на высоких частотах, близких к пределу разрешения, в любом случае следует отбрасывать частоты, значение контраста на которых $K'\left(N'_{\max}\right) \leq 0{,}02$. Априори можно сказать, что нет смысла рассматривать частоты $N'_{\max} > 1000$ мм$^{-1}$.

Косвенное измерение частотно-контрастной характеристики методом оптического фурье-анализа. Сложные синусоидальные миры метода непосредственного сканирования, высокая трудоемкость вычислительной работы метода электронного фурье-анализа и сложность процедуры пространственных измерений *ЧКХ* приводят к методу измерения частотно-контрастной характеристики методом оптического фурье-анализа. При этом предполагается, что оптическая система линейна и фурье-образ объекта, расположенного в передней фокальной плоскости, формируется в ее задней фокальной плоскости с учетом *ЧКХ* оптической системы. Средства измерения такого типа относятся к дифрактометрам (см. раздел 2.3.7).

В сочетании с высокоразрешающими матричными фотоприемниками современных смарт-камер этот метод выглядит особенно перспективным. Для того чтобы избежать механического прецизионного сканирования, присущего первым двум методам, целесообразно выбрать бинарный тест-объект достаточно произвольной формы, но такой, чтобы задача аналитического вычисления его двумерного спектра Фурье не представляла большой проблемы (см. рис. 3.4.14). На рис. 3.4.26 приведена схема измерений *ЧКХ* методом оптического фурье-анализа.

Двумерный бинарный квазипериодический тест-объект *3* с известным пропусканием $\tau(x, e)$ и дискретным спектром пространственных частот $T(N, M)$ помещается в передней фокальной плоскости исследуемого объектива *4*. Для его освещения используются лазерный осветитель *1* с точечной диафрагмой и объектив коллиматора *2*, формирующий монохроматический параллельный пучок лучей. В задней фокальной плоскости исследуемого объектива располагается фотоприемная матрица *5*. Зарегистрированный матрицей смарт-камеры спектр пространственных частот $T'(N, M)$ нормируется на интенсивность нулевой частоты процессором камеры и спектр тест-объекта $T(N, M)$.

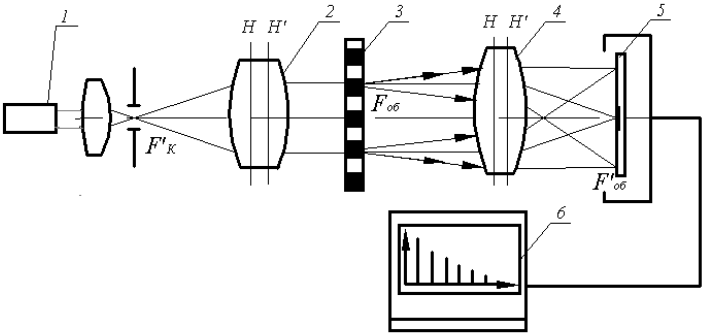


Рис. 3.4.26. Схема измерений *ЧКХ* объектива методом оптического фурье-анализа: *1* – лазерный источник света; *2* – объектив коллиматора; *3* – двумерный бинарный квазипериодический тест-объект модулятор; *4* – исследуемый объектив; *5* – фотоприемная матрица; *6* – компьютер

За частотно-контрастную характеристику принимается отношение

$$\text{ЧКХ}(N,M) = \text{К}(N,M) = \frac{T\prime(N,M)}{T(N,M)}, \qquad (3.4.34)$$

где частоты $N = \frac{f'_{об}}{\lambda \cdot x'}$ и $M = \frac{f'_{об}}{\lambda \cdot y'}$ определяются соответствующими координатами пикселей x' и y' матрицы, в которых зарегистрирован ненулевой фотометрический сигнал; λ – длина волны освещающего лазера.

В компьютер *6* поступает уже готовый цифровой сигнал *ЧКХ*(*N*,*M*) для представления информации и последующей обработки с целью получения значений иных структурных функций в двумерном варианте. При наклоне объектива такое устройство обеспечивает измерение *ЧКХ* для внеосевой точки, в том числе и в сагиттальном сечении.

Можно, конечно, представить и вообще произвольный тест-объект [87], но тогда следует организовать измерения дифференциальным методом путем сравнения спектров, полученных с неким эталонным объективом, *ЧКХ* которого известна, со спектром, сформированным измеряемым объективом.

3.5. Измерение характеристик лазерного излучения

Система характеристик и параметров лазеров и лазерного излучения лазерных приборов установлена ГОСТ 15093–75, ГОСТ 24453–80 и ГОСТ 23778–79, в соответствии с которыми осуществляется контроль изделий лазерной техники на этапе выпуска продукции и при их эксплуатации.

Особенности лазерного света, такие как:

– высокая направленность;

– высокая плотность энергии;

– высокая степень монохроматичности,

отличают лазеры от прочих источников света и накладывают отпечаток на средства измерения соответствующих величин. Среди таковых измерениям подлежат параметры и характеристики:

– энергетические:
  - энергия,
  - мощность,
  - интенсивность,
  - спектральная плотность энергии (мощность),
  - средняя мощность импульса,
  - максимальная мощность импульса;

– энергетические пространственно-временные:
  - диаграмма направленности,
  - диаметр пучка,
  - расходимость,
  - энергетическая расходимость,
  - относительное распределение плотности энергии (мощности),
  - частота повторения импульсов,

– спектральные:
  - длина волны,
  - частота,
  - ширина спектральной линии,
  - степень хроматичности;

- длительность импульсов;

– поляризации:
  - эллиптичность поляризованного лазерного излучения,
  - степень поляризации;

– корреляционные:
  - степень пространственно-временной когерентности,
  - степень пространственной когерентности,
  - степень временной когерентности,
  - время когерентности,
  - длина когерентности.

В практических применениях наиболее часто используются мощность, энергия, длина волны, угловая расходимость, когерентность и поляризация лазерного излучения.

Прямые измерения энергетических характеристик методом непосредственной оценки. В группе энергетических и энергетических пространственно-временных характеристик основным измеряемым параметром является интегральная мощность излучения – *P*. Остальные энергетические характеристики являются производными. Измеряется мощность лазерного излучения с помощью специализированных фотометров (см. раздел 2.3.1), калибровка которых производится в энергетических, а не в фотометрических единицах, т.е. в ваттах. Схема измерения соответствует рис. 2.3.10, *г*. Фотометрическая головка должна учитывать особенности измеряемого лазерного излучения (длину волны, диаметр пучка, номинальное значение мощности, время регистрации сигнала). Проявляется это в следующих моментах:

– конструктивные особенности, предполагающие:
  - выбор физического метода измерений и приемника излучения,
  - устранение влияния внешней засветки и паразитных переотражений;

– взаимное расположение объекта измерений (лазерного пучка) и фотометрической головки с целью:
  - устранения влияния зонной чувствительности приемника излучения,
  - устранения влияния угла падения.

Все методы измерения энергетических параметров сводятся к преобразованию энергии излучения в другой вид энергии, удобный для последующей регистрации. Преобразование производится в два этапа:

– Первичное преобразование лазерного излучения, основанное на различных физических и химических эффектах взаимодействия лазерного излучения с веществом, последнее может находиться в любом агрегатном состоянии. В результате этого взаимодействия происходит преобразование оптической энергии в тепловую (тепловой метод) и в энергию электрического тока (фотоэлектрический и пироэлектрический методы). Реже применяется пондеремоторный метод, основанный на преобразовании энергии лазерного излучения в механическую энергию.

– Вторичное преобразование энергии первичного преобразователя в электрический сигнал, подаваемый на отсчетное или регистрирующее устройство.



Рис. 3.5.1. Фотометрическая головка фотометра лазерного излучения – преобразователь мощности, используется при оценке мощности и энергии лазерного излучения, поступившего на диффузно отражающий экран при трассовых экспериментах. Диапазон измерений каждого преобразователя составляет 50 дБ (300 раз). При этом полный диапазон перекрывает 10 порядков от 10^{-7} до 10^{3} Вт/см^2 в спектральном диапазоне от 0,3 до 11 мкм (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

Вид преобразователя и количество этапов преобразования определяются длиной волны, временем регистрации, номинальной мощностью измеряемого лазерного источника, а также определяемой характеристикой – мощностью или энергией (рис. 3.5.1).

Отсчетное или регистрирующее устройство служит для считывания или регистрации значения измеряемой величины в аналоговой или цифровой форме и выполняется в виде отдельного измерительного блока. В измерительный блок могут быть включены дополнительные устройства, например цепи коррекции дрейфа нуля, температурной и электрической стабилизации и др.

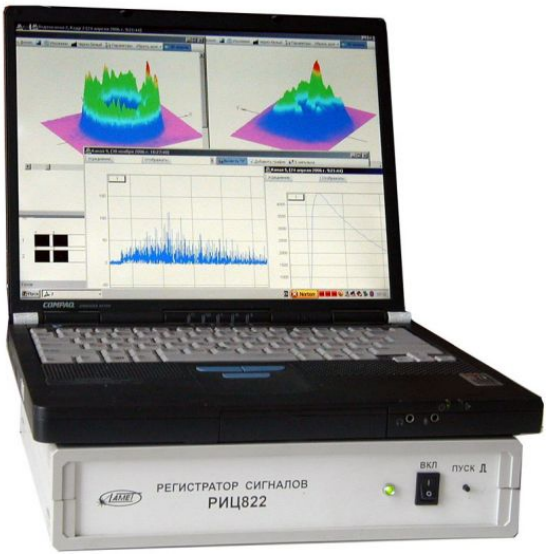


Рис. 3.5.2. Измерительный блок фотометра лазерного излучения – регистратор сигналов РИЦ822. Обеспечивает одновременную регистрацию: 8 сигналов с разрешением до 4 мкс (до 1 млн отсчетов по 16 бит в каждом канале), 2 сигналов с разрешением до 5 нс (до 1 млн отсчетов по 8 бит в каждом канале), 2 видеосигналов от телекамер с регистрацией до 80 полукадров для каждой телекамеры (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

Интегральная мощность излучения P является основным параметром для непрерывных лазеров. Лазерные источники, работаю-

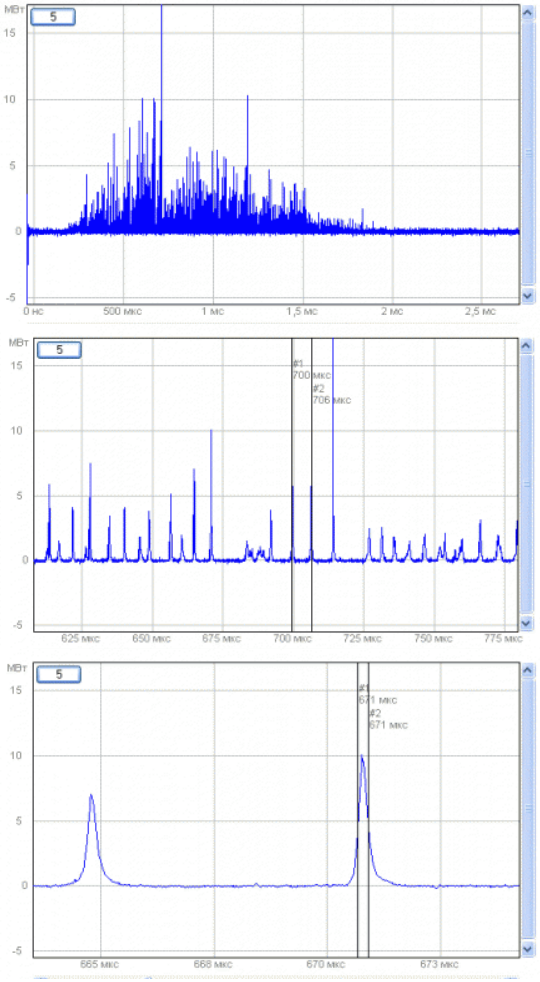
щие в режиме модуляции добротности резонатора и в режиме синхронизации мод, обычно характеризуют значением энергии импульса $W_и$ и дополнительно значением максимальной $P_{и.max}$ или средней $P_{и.ср}$ мощности импульса. Импульсно-периодические источники излучения характеризуют значением средней мощности $P_{ср}$ со временем усреднения, значительно превышающим период следования импульсов. Таким образом, в случае импульсных лазеров речь идет об измерении временных энергетических характеристик. Для этого фотометры для импульсных лазеров должны иметь соответствующее быстродействие фотометрической головки и временную развертку в измерительном блоке. В настоящее время распространены два основных метода измерений мощности импульса источников лазерного излучения:

– ***косвенный метод осциллографирования*** позволяет на экране осциллографа (или импульсного вольтметра) зарегистрировать временную развертку изменения мощности излучения в относительных единицах, как правило, в милливольтах. Для определения измеряемой мощности $P(t)$ необходимо знать характеристику или чувствительность, если характеристика линейна;

– ***прямой метод калиброванной регистрации мощности,*** когда используется аттестованная по абсолютной чувствительности фотометрическая головка и определяется непосредственно мощность падающего на него излучения измерением амплитуды входного сигнала.

Пример 3.5.1. Регистратор сигналов РИЦ822 (рис. 3.5.2) предназначен для измерения мощности излучения и контроля ее изменений в ходе эксперимента. В отличие от осциллографа регистрация и отображение показаний производятся в натуральных единицах (Вт, кВт и т.д.). На рис. 3.5.3, *а* представлены результаты регистрации импульса твердотельного лазера в режиме свободной генерации. В течение импульса сделано 150 тыс. отсчетов мощности. Импульс имеет характерную пичковую структуру. Растяжение изображения (рис. 3.5.3, *б*) позволяет отобразить структуру импульса, в частности, оценить интервал между отдельными пичками. Еще большее растяжение изображения (рис. 3.5.3, *в*) позволяет оценить длительность отдельных пичков (в приведенном примере

длительность пичка с максимальной мощностью 10 МВт составляет 234 нс).



а

б

в

Рис. 3.5.3. Измерение мощности твердотельного лазера в режиме свободной генерации с использованием регистратора РИЦ822 (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

При этом энергия импульса $W_и$ определяется путем численного интегрирования по зарегистрированному сигналу $P(t)$. Однако такое не всегда возможно, и тогда используются интегрирующие фотометрические головки, откалиброванные на измерение энергии лазерного импульса (рис. 3.5.4).



Тип	Спектральный диапазон (мкм)	Длительность импульса (нс)	Температурный диапазон (°С)	Рабочий диапазон
ПЭФ-1	0,4…1,06	1<..<1000	18…28	> 50дБ
ПЭФ-1А	0,4…1,00	1<…<1000	–40…+50	(300 раз)
ПЭФ-2	1,0…2,00	1<...<1000	18…28	в пределах
ПЭФ-2А	1,0…2,00	1<..<1000	–40…+50	полного диа-
ПЭФ-3	2,0…11,0	10^3<…<10^6	18…28	пазона от
ПЭФ-3А	2,0…11,0	10^3<…<10^6	–40…+50	10^{-4} до 10 Дж

Рис. 3.5.4. Фотометрическая головка для измерения энергии лазерного импульса – преобразователь энергии лазерного излучения (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

В первую очередь это относится к коротким мощным импульсам, когда реализация следящего режима затруднена. Отношение зарегистрированной энергии импульса $W_и$ к длительности этого импульса τ позволяет получить $P_{и.ср}$ – среднюю мощность импульса. Если зарегистрировать энергию серии импульсов W и отнести ее к временному интервалу t, в течение которого была выполнена эта регистрация, то можно определить среднее значение мощности $P_{ср}$.

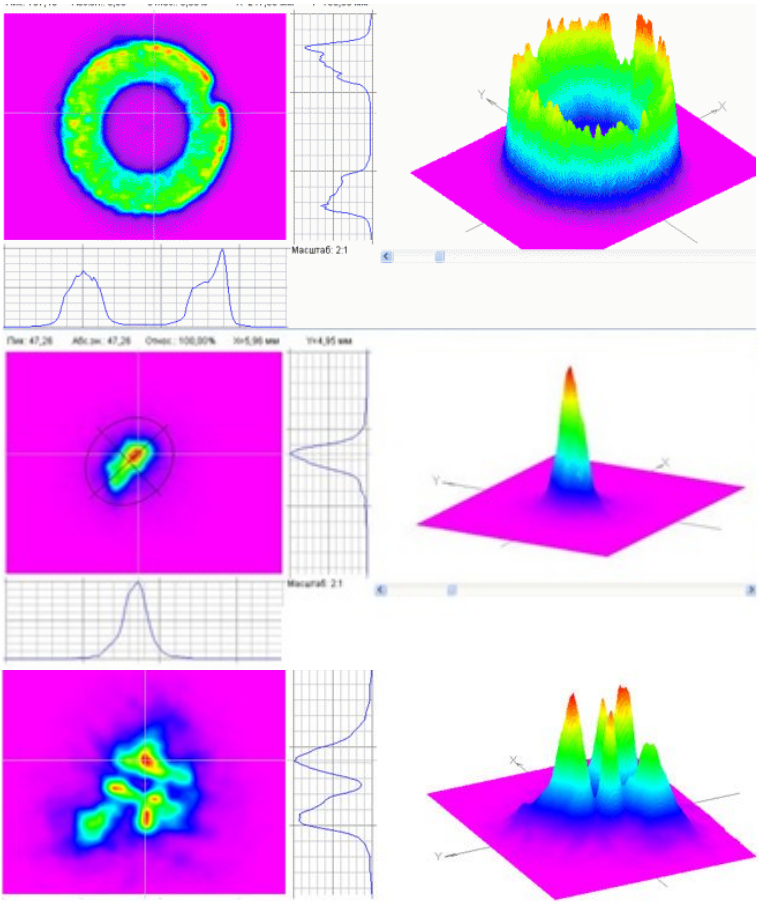
Прямая регистрация распределения интенсивности излучения является необходимым этапом для определения всех пространственно-энергетических параметров пучка, в том числе его сечений, проекций и моментов различных порядков. Параметры пучка, определенные в дальней зоне, характеризуют его расходимость. Энергетические пространственные характеристики лазерного излучения изучаются с помощью фотометрических головок с матричным приемником (рис. 3.5.5).



Рис. 3.5.5. Измерительная камера КИ-2П (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

Характерной чертой подобных измерительных камер является линейность. Динамический диапазон камеры КИ-2П составляет 500 раз (54 дБ), а диапазон измерений интенсивности при 10%-ной погрешности – на порядок меньше – 50 раз (33 дБ). При одновременном измерении одного и того же распределения интенсивности излучения двумя камерами, подключенными к регистратору РИЦ822 и смещенными относительно друг друга по чувствительности на 30 дБ, можно обеспечить общий диапазон измерений порядка 60 дБ, а динамический диапазон – порядка 80 дБ! На рис. 3.5.6 приведены результаты исследований различных распределений интенсивности лазерных источников.

Наиболее полной пространственно-энергетической характеристикой лазерного излучения является диаграмма направленности, т.е. угловое распределение энергии или мощности в лазерном пучке.



а

б

в

Рис. 3.5.6. Распределения интенсивности лазерного излучения по сечению пучка для определения пространственно-энергетических характеристик: *а* – распределение интенсивности в ближней зоне; *б* – распределение интенсивности в дальней зоне; *в* – влияние турбулентной атмосферы на структуру пятна лазерного излучения (URL: http://www.lamet.ru/measurements)

Вблизи излучающей апертуры лазера угловое распределение имеет неустойчивую конфигурацию, поэтому в большинстве случаев практический интерес представляет распределение поля излучения в дальней зоне, когда форма распределения перестает за-

висеть от расстояния и можно говорить о сформировавшейся диаграмме направленности излучения. В качестве приближенной оценки границы дальней зоны принимают расстояние, превышающее:

$$L \geq d^2/\lambda, \tag{3.5.1}$$

где d – диаметр излучающей апертуры лазера; λ – длина волны излучения.

Ширину диаграммы направленности в дальней зоне количественно характеризуют углом расходимости лазерного излучения, который обычно нормируется при выпуске лазеров из производства.

На практике используют два понятия расходимости. В первом случае имеют в виду плоский или телесный угол Q_p или Q_s, определяющий ширину диаграммы направленности в дальней зоне по заданному уровню углового распределения энергии или мощности, отнесенного к его максимальному значению. Чаще всего значение уровня принимается равным 0,5 и $1/e^2$, где e – основание натуральных логарифмов. Приведенное выше определение однозначно характеризует излучение только одномодового лазера, имеющего диаграмму направленности без боковых лепестков, т.е. близкую к гауссовскому распределению. В случае многомодового режима диаграмма излучения имеет многочисленные боковые лепестки, содержащие значительную часть энергии. Поэтому величина расходимости по заданному уровню энергии или мощности, т.е. по существу центрального максимума распределения, не очень показательна, если неизвестно угловое распределение энергии или мощности в этом угле. В таких случаях более удобной характеристикой является энергетическая расходимость лазерного излучения, т.е. плоский или телесный угол, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности излучения.

Лазерное излучение также характеризуют значением диаметра пучка, т.е. диаметра поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности.

Для практического определения расходимости используют три основных метода: метод сечений, метод регистрации диаграммы направленности и метод фокального пятна.

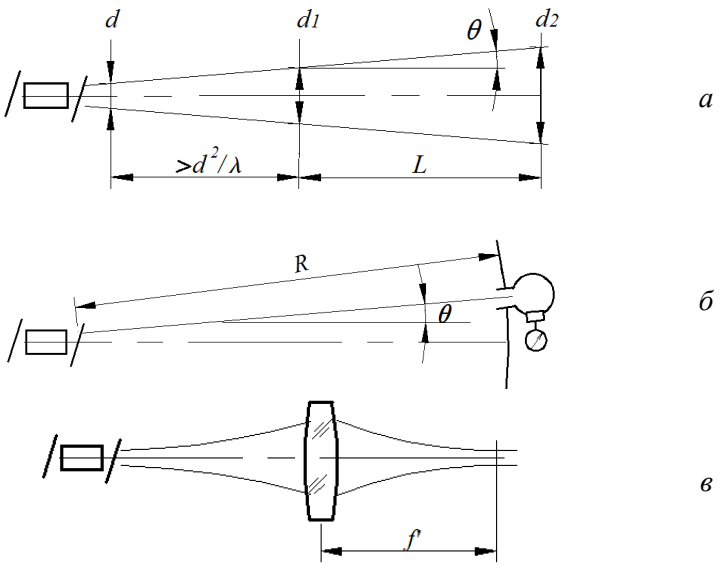


Рис. 3.5.7. Принципиальные схемы трех основных методов измерения расходимости лазерного излучения: *а* – метод сечений; *б* – метод регистрации диаграммы направленности; *в* – метод фокального пятна

Наиболее простым является метод двух сечений (рис. 3.5.7, *а*). Согласно этому методу расходимость (или энергетическая расходимость) пучка излучения определяют путем измерения диаметров пучка d_1 и d_2 в двух поперечных сечениях дальней зоны, отстоящих одно от другого на расстоянии L, и вычисления искомого угла по формуле

$$\theta = \operatorname{arctg} {(d_2 - d_1)}/{2L}. \qquad (3.5.2)$$

Измерения диаметров d_1 и d_2 производятся по одному и тому же критерию – заданному уровню интенсивности либо заданной доле мощности (энергии) и определяются по результатам прямой регистрации распределения интенсивности излучения. Достоинством метода является его простота, однако для обеспечения необходи-

мой точности измерений требуется достаточно большая (до нескольких метров) база между сечениями, что затрудняет использование данного метода в лабораторных условиях.

Метод регистрации диаграммы направленности позволяет получить наиболее полную информацию о пространственном распределении лазерного излучения (рис. 3.5.7, *б*). Для измерения диаграммы направленности можно использовать фотометр лазерного излучения, головка которого расположена в дальней зоне. Перемещая фотоэлемент по дуге окружности радиусом R, регистрируют угловое распределение интенсивности излучения. Зная диаграмму направленности, можно рассчитать энергетическую и угловую расходимость излучения. Измерение диаграммы направленности является сложной и трудоемкой процедурой, поэтому редко применяется в метрологической практике.

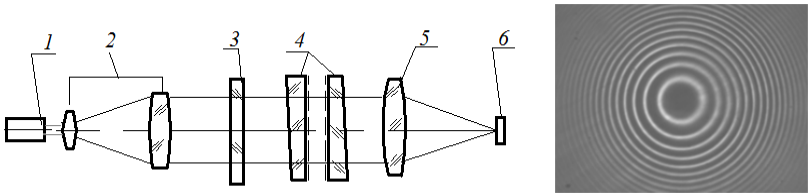
Условия дифракции в дальней зоне можно получить в фокальной плоскости идеальной безаберрационной положительной линзы (рис. 3.5.7, *в*). Для перехода к угловому распределению необходимо линейное распределение в фокальной плоскости разделить на фокусное расстояние линзы, т.е. угол расходимости излучения лазера определяют по формуле

$$\theta = {}^{d}/_{2f'}, \qquad (3.5.3)$$

где d – диаметр пучка в поперечном сечении, зарегистрированном в фокальной плоскости.

При несимметричной диаграмме под ${}^{d}/_{2}$ в формулах (3.5.2), (3.5.3) следует понимать радиальную координату в поперечном сечении, имеющую азимут.

Спектральные характеристики лазерного излучения, такие как длина волны и полуширина линии, измеряются с помощью стандартных спектральных приборов (см. раздел 2.3.5). При этих измерениях следует иметь в виду высокую плотность мощности лазерного излучения и кратковременность воздействия, что может сказаться на диапазоне, работоспособности фотоэлектрической части, времени измерения и регистрации. На рис. 3.5.8 приведена схема определения спектральных параметров лазерного пучка с помощью интерферометра Фабри–Перо.



а *б*

Рис. 3.5.8. Анализ частотной структуры излучения лазера с помощью интерферометра Фабри–Перо: *а* – схема измерений; *б* – интерференционная картина. *1* – исследуемый лазер; *2* – экспандер лазерного излучения; *3* – диффузор; *4* – интерферометр Фабри–Перо; *5* – объектив; *6* – ПЗС-камера

Свет от исследуемого лазера *1* расширяется с помощью экспандера *2* и, пройдя колеблющийся диффузор *3*, попадает в интерферометр Фабри–Перо *4*, где происходит процесс многолучевой интерференции. Диффузор служит для создания пучка слегка расходящихся лучей и разрушения пространственной когерентности лазерного излучения. Интерференционные кольца наблюдаются в фокальной плоскости (рис. 3.5.8, *б*) объектива *5* с фокусным расстоянием f', где установлен матричный приемник излучения.

Измерениям подлежат D_{m-1} и D_m диаметры колец $(m-1)$ и m-го порядков. Необходимо измерить с точностью до пикселя диаметры светлых интерференционных колец. Из (2.3.65) можно получить соотношение для расчета длины волны излучения лазера:

$$\lambda = \frac{d}{4f'^2}\left(D_{m-1,\lambda}^2 - D_{m,\lambda}^2\right), \qquad (3.5.4)$$

где d – база интерферометра; f' – фокусное расстояние объектива *5*.

Соотношение (2.3.69) может быть использовано для оценки погрешности измерений длины волны лазерного излучения.

Поляризационные характеристики лазерного излучения определяются в целях:

– контроля изделий лазерной техники;

– диагностики поляризационно-активных оптических сред.

Как правило, излучение естественных источников представляет собой пример электромагнитных волн со всевозможными равновероятностными ориентациями вектора напряженности электрического поля $\vec{E}(t)$, т.е. с ***нестационарным*** (быстро и случайным образом меняющимся) состоянием поляризации.

В силу специфики процесса генерации в лазерах (основанного на стимулированном излучении активной средой когерентного света) получаемое таким путем излучение должно быть поляризованным, когда направление вектора $\vec{E}(t)$ является стационарным, т.е. меняющимся по детерминированному закону. Однако реальная поляризация определяется:

– особенностями используемой в лазере активной среды – поляризацией ее спонтанного излучения, служащего «затравкой» при возникновении генерации, и величиной коэффициента усиления для элементарных поляризаций;

– конструкцией и особенностями резонатора и внутрирезонаторных поляризационных оптических элементов, создающими преимущественные условия для усиления элементарных поляризаций;

– различными особенностями используемого оптического резонатора, дефектами активной среды или нестационарно поляризующими свойствами среды, расположенной на пути лазерного пучка от генератора излучения до регистрирующего устройства.

В результате действия этих факторов, среди которых как стационарные, так и нестационарные, возможны следующие чистые состояния поляризации лазерного излучения:

– линейная поляризация – характеризуется углом ориентации φ плоскости поляризации к горизонтальной оси – x, перпендикулярной направлению распространения лазерного пучка z;

– круговая поляризация – характеризуется только направлением вращения конца проекции вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ на плоскость xy. Различают право- и левоциркулярно поляризованное излучение, когда колебания взаимно ортогональных проекций E_x и E_y сдвинуты соответственно на $\pm\lambda/4$ (или на угол $\alpha = \pm\pi/2$);

– эллиптическая поляризация – является наиболее общим случаем элементарной поляризации и определяется углом φ, эллиптичностью, характеризующей соотношение ортогональных компонентов E_x и E_y, и знаком направления вращения конца проекции вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ на плоскость *xy*;

– естественная поляризация, характеризующаяся недетерминированным изменением угла $\varphi(t)$ и ортогональных компонентов $E_x(t)$и $E_y(t)$.

Таким образом, реальное лазерное излучение является частично поляризованным и представляет собой сочетание вышеперечисленных видов чистых поляризаций. Для характеристики частично поляризованного света применяются следующие характеристики:

- азимут поляризации φ – угол (со знаком) наклона большой полуоси эллипса поляризации к горизонтальной оси;
- эллиптичность поляризованного лазерного излучения – отношение малой полуоси эллипса – a, по которому поляризовано лазерное излучение к его большой полуоси – b;
- степень поляризации *P* – отношение интенсивности поляризованной составляющей лазерного излучения к полной его интенсивности, включающей в себя составляющую с естественной поляризацией в том числе.

Косвенное определение параметров поляризации лазерного излучения посредством измерения параметров Стокса. Измерительная задача по определению параметров поляризации лазерного излучения легко формализуется и сводится к измерению энергетических характеристик, если для анализа свойств поляризации лазерного света использовать ***параметры Стокса***. В соответствии с ГОСТ Р 50006–92 для измерений параметров Стокса применяется оптическая схема, приведенная на рис. 3.5.9. Энергетические характеристики лазерного луча от источника *1*, прошедшего, в общем случае, нестационарно-поляризующую среду *2*, анализатор *3*, поляризатор *4*, на выходе из среды будут зависеть от состояния поляризации лазерного излучения и взаимной ориентации поляризатора и анализатора. С помощью фотометрической головки *6* фотометра лазерного излучения регистрируются энерге-

тические характеристики (энергия или мощность) частично поляризованного лазерного света при различных положениях поляризатора и анализатора.

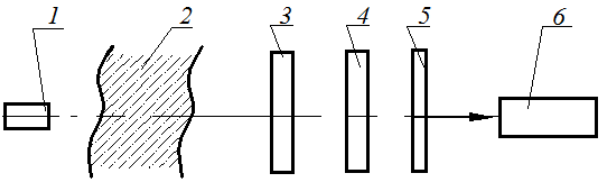


Рис. 3.5.9. Принципиальная оптическая схема установки для измерения параметров Стокса: *1* – лазер; *2* – среда с нестационарно-поляризующими свойствами; *3* – поляризатор в виде фазовой пластинки или поляризационной призмы; *4* – анализатор; *5* – ослабитель (аттенюатор) лазерного излучения; *6* – фотометрическая головка фотометра лазерного излучения

Ослабитель *5* предназначен для согласования мощности (энергии) лазерного излучения и динамического диапазона фотометра. Поляризатор *3*, выполненный в виде фазовой пластинки или поляризационной призмы, предназначен для создания разности фаз между ортогональными компонентами излучения.

Измерения мощности (энергии) излучения выполняют 6 раз, измеряя величины: I_1 – мощность (энергию) излучения в отсутствие поляризационных элементов *4*, *5*; I_2 – мощность (энергию) излучения в отсутствие поляризатора при вертикальной ориентации плоскости пропускания анализатора; I_3 – мощность (энергию) излучения в отсутствие поляризатора при ориентации плоскости пропускания анализатора под углом 45° к горизонтальной оси *x*; I_4 – мощность (энергию) излучения в отсутствие поляризатора при ориентации плоскости пропускания анализатора под углом 135° к горизонтальной оси *x*; I_5 – мощность (энергию) излучения с установленным поляризатором при ориентации плоскости пропускания анализатора под углом 45° к горизонтальной оси *x*; I_6 – мощность (энергию) излучения с установленным поляризатором при ориентации плоскости пропускания анализатора под углом 135° к горизонтальной оси *x*.

Параметры Стокса определяются следующим образом:

– полная мощность (энергия) лазерного излучения, усредненная по времени:

$$W = {(I_1 + I_2)}/{K_0}; \tag{3.5.5}$$

– компонента горизонтальной поляризации вектора Стокса

$$M = {(I_1 - I_2)}/{K_0}; \tag{3.5.6}$$

– компонента поляризации по углом 45° вектора Стокса

$$C = {(I_3 - I_4)}/{K_0}; \tag{3.5.7}$$

– компонента правоциркулярной поляризации вектора Стокса

$$S = {(I_5 - I_6)}/{K_0 K_n}, \tag{3.5.8}$$

где K_0 и K_n – коэффициенты пропускания соответственно ослабителя и фазовой пластины (поляризационной призмы).

Параметры поляризации по параметрам Стокса рассчитываются согласно соотношениям:

– азимут эллиптической поляризации

$$\varphi = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{C}{M}; \tag{3.5.9}$$

– эллиптичность поляризации

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{W-\sqrt{M^2+C^2}}{W+\sqrt{M^2+C^2}}}; \tag{3.5.10}$$

– степень поляризации

$$P = \frac{\sqrt{M^2+C^2+S^2}}{W}. \tag{3.5.11}$$

Когерентные свойства источника света характеризуют скорелированность световых колебаний от него, достигших различ-

ных точек пространства и в различные моменты времени [19]. Проявляются когерентные свойства в способности лазерного излучения создавать стационарную интерференционную картину. Характеризуются когерентные свойства источника электромагнитных колебаний с помощью комплексной степени когерентности (рис. 3.5.10).

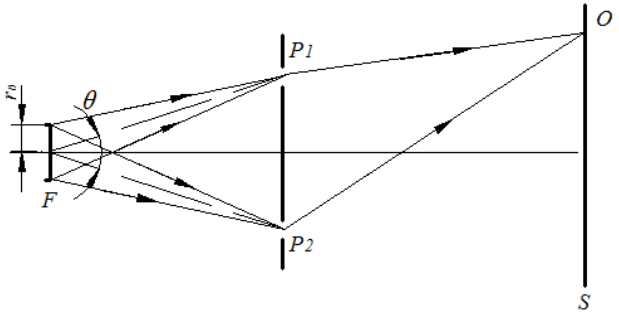


Рис. 3.5.10. К понятию комплексной степени когерентности [19]

Комплексной степенью когерентности источника F называется величина γ [19], определяемая нормированной корреляционной функцией колебаний напряженности электрического поля $E_1(t)$ и $E_2(t)$ в двух точках волнового фронта P_1 и P_2, образованного этим источником:

$$\gamma(\tau) = \frac{\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} E_1\,(t+\tau)E_2^*(t)dt}{\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} E_1\,(t)E_1^*(t)dt\right]^{1/2}\cdot\left[\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} E_2\,(t)E_2^*(t)dt\right]^{1/2}}, \quad (3.5.12)$$

где τ – разность во времени прохождения света в точку Q плоскости наблюдения S из точек P_1 и P_2; T – время регистрации суперпозиции полей в плоскости S; * – означает комплексное сопряжение.

Если на пути волнового фронта от источника F установить экран с отверстиями, открывающими только точки P_1 и P_2, то волновые фронты, порожденные этими точками, будут интерферировать и создавать в плоскости наблюдения интерференционную картину, контраст которой связан с γ соотношением

$$K = \frac{2|\gamma(\tau)|}{\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^{1/2}+\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^{1/2}}, \qquad (3.5.13)$$

где I_1, I_2 – интенсивность света, приходящего в точку Q плоскости наблюдения S из точек P_1 и P_2, которые, вообще говоря, могут быть разнесены как перпендикулярно оптической оси, так и вдоль.

Понятие комплексной степени когерентности достаточно редко применяется для характеристики источников света: она представляет больше теоретический интерес, нежели практический. Гораздо чаще в практике измерений используются производные характеристики – временная и пространственная когерентность.

Под ***временной когерентностью*** понимают способность источника создавать стационарную интерференционную картину от точек P_1 и P_2, разнесенных на расстояние L вдоль оси при усреднении этой картины в течение времени T. Характеризуется временная когерентность ***временем когерентности*** $\tau_н$, связанным с длиной монохроматического волнового цуга, или ***длиной когерентности***, соотношением

$$L = L_н = \tau_н \cdot c, \qquad (3.5.14)$$

где c – скорость света.

Если располагать технической возможностью сверхбыстрой регистрации, то принципиально можно зарегистрировать интерференционную картину от нескоррелированных цугов излучения. Поэтому для измерения временной когерентности время T должно быть много больше времени когерентности.

Измерительное наблюдение длины (времени) когерентности с помощью интерферометра Майкельсона. Схема измерений времени когерентности лазера *1* представлена на рис. 3.5.11. На матовом экране *6* наблюдается интерференция между двумя лучами, формируемыми в предметном и опорном плечах интерферометра Майкельсона. В образовании интерференционной картины принимает участие один и тот же участок волнового фронта, но в различные моменты времени в зависимости от разности хода в плечах. Зеркало *5* предметного плеча имеет возможность продоль-

ного перемещения с измерением координаты x его положения. За длину когерентности принимается расстояние

$$L_н = x_2 - x_1, \qquad (3.5.15)$$

где x_1 и x_2 – координаты зеркала *5* предметного плеча, при которых соответственно начинает и заканчивает наблюдаться интерференционная картина.

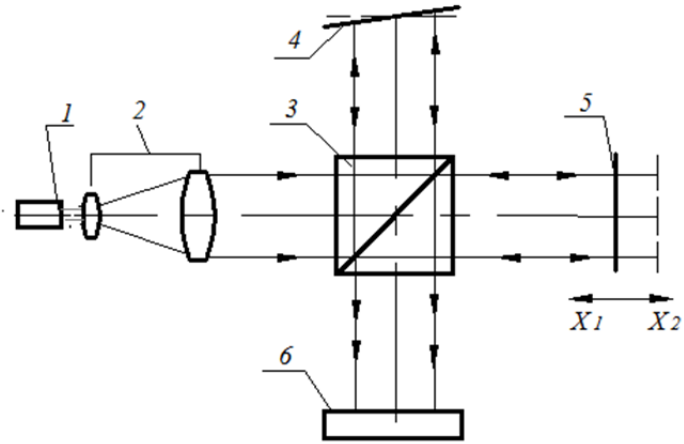


Рис. 3.5.11. Схема измерений длины когерентности в интерферометре Майкельсона: *1* – лазер; *2* – экспандер лазерного излучения; *3* – светоделитель; *4* – опорное зеркало; *5* – подвижное предметное зеркало; *6* – матовое стекло

Под ***пространственной когерентностью источника*** понимается его способность создавать интерференционную картину в плоскости S на оптической оси, т.е. при временном сдвиге $\tau \approx 0$. При этом важнейшее значение имеет ***теорема Ван-Циттерта–Цернике*** [21] о том, что степень когерентности малого частично-когерентного источника размером r_0, освещающего две симметричные, близко расположенные точки P_1 и P_2, расположенные от источника на большом расстоянии, видимые из осевой точки источника под углом θ, равна фурье-образу распределения интенсивности источника.

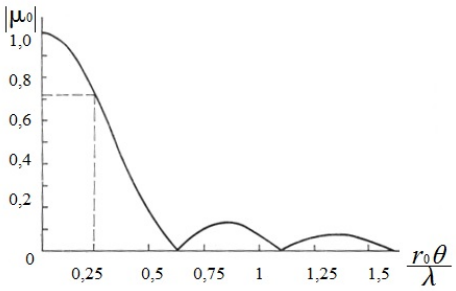


Рис. 3.5.12. Зависимость [19] степени пространственной когерентности от параметра $\frac{r_0\theta}{\lambda}$

Для равномерно светящегося источника степень пространственной когерентности приведена на рис. 3.5.12. Из рис. 3.5.10 вслед за [19] примем за ***радиус когерентности источника*** размером r_0 такой угловой размер $\theta_0/2$ расстояния между точками P_1 и P_2 при котором выполняется соотношение

$$\frac{r_0\theta_0}{\lambda} = 0{,}25. \tag{3.5.16}$$

Соотношение (3.5.16) может быть использовано для теоретического оценивания радиуса когерентности частично когерентного источника света.

При этом для степени пространственной когерентности μ_s из (3.5.13) и рис. 3.5.12 следует

$$K(\theta_0) = \mu_s \approx 1/\sqrt{2}. \tag{3.5.17}$$

При условии $I_1 = I_2$ (3.5.17) это означает, что контраст интерференционной картины в пределах радиуса когерентности не сильно меняется.

Измерительное наблюдение радиуса когерентности с помощью интерферометра Майкельсона. Схема измерений радиуса когерентности полупроводникового лазера *1* представлена на рис. 3.5.13. Пространственная когерентность проявляется при интерференции света от различных участков волнового фронта, поэтому если зеркало предметного плеча интерферометра Майкель-

сона заменить уголковым отражателем *5*, интерференционная картина, которая будет наблюдаться на фотоприемной матрице *6*, будет обусловлена пространственной когерентностью. При этом длины плеч и интенсивности интерферирующих пучков должны быть равны. Измеряя контраст этой картины с помощью фотометра с матричной фотоприемной головкой, определяют значение m'_0 – координату выходного зрачка линзы, для которой $K(m'_0) \approx {}^{1}/_{\sqrt{2}}$. Тогда радиус когерентности определится соотношением

$$\theta_0 = {}^{2m'_0}/_{f'}, \tag{3.5.18}$$

где f' – фокусное расстояние экспандерного объектива.

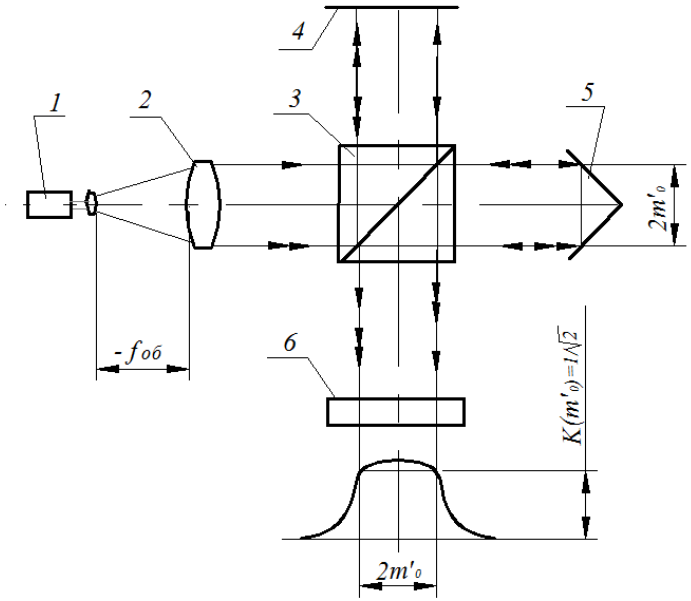


Рис. 3.5.13. Схема измерений радиуса пространственной когерентности полупроводникового лазера в интерферометре Майкельсона:
1 – полупроводниковый лазер; *2* – объектив экспандера; *3* – светоделитель; *4* – опорное зеркало; *5* – уголковый отражатель предметного плеча; *6* – матричный фотоприемник

В заключение отметим, что при измерениях когерентности следует обратить особое внимание на виброзащиту схемы измерений для получения стационарной картины. Как правило, это достигается размещением схемы на оптическом столе (см. раздел 2.3.2), имеющем встроенную систему виброзащиты. Однако в некоторых случаях это может превратиться в серьезную техническую проблему. Так, например, длина когерентности современных метрологических лазеров может достигать десятков метров (см. пример 1.3.3), и для измерений приходится применять многоходовые линии задержки.

ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАУКЕ – ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

В разделе 1.1 дана формулировка понятия «измерительные задачи» и описан формальный подход к их решению. Процесс решения оптических измерительных задач многофакторный, и потому путей решения той или иной задачи по крайней мере несколько. Свобода здесь – в выборе метода измерений. Не претендуя на исключительность, авторы в настоящем разделе приводят некоторые технические решения из собственной практики, иллюстрирующие отдельные положения настоящей книги и придерживаясь принятого формализма. В частности:

– в разделе 4.1 описана оптическая измерительная задача, показывающая, что, несмотря на исключительность человеческого зрения в плане порога чувствительности, современные фотоэлектрические и компьютерные технологии в сочетании с иными принципами измерений могут не просто составить конкуренцию визуальным средствам измерения, но и превзойти их по метрологическим характеристикам;

– в разделе 4.2 описаны оптические сенсоры положения, составляющие основу для построения информационно-измерительных систем контроля геометрии промышленных объектов;

– в разделе 4.3.1 описана оптическая измерительная задача, иллюстрирующая положение о том, что условия эксплуатации зачастую определяют конфигурацию и состав средств измерений;

– в разделе 4.3.2 описана оптическая измерительная задача, в которой оценка точности средства измерений произведена по результатам измерительных наблюдений;

– в разделе 4.3.3 описана оптическая измерительная задача, решение которой:

- имеет прямой выход на диагностику технологического процесса,
- потребовало создания методики метрологической аттестации;

– в разделе 4.4 описана оптическая измерительная задача, в которой предъявляются требования к матричному фотоприемному устройству, а сам по себе процесс измерений является виртуальным.

4.1. Прецизионные измерения радиуса кривизны

Формулировка задачи. Измерения геометрических размеров с помощью автоколлимационного микроскопа достаточно эффективны и традиционны в целях оптического производственного контроля. Соответствующие измерительные задачи рассмотрены в разделах 3.2.2 и 3.4.1. Ограничения этого метода связаны с тем, что он является визуальным, поэтому погрешность измерения, с одной стороны, является личностной, а с другой – ограничена порогом чувствительности продольных наводок (2.1.23). В связи с тенденциями в оптическом приборостроении к повышению точностей изготовления геометрических параметров оптических поверхностей, деталей и систем актуальными являются задачи повышения объективности измерений за счет организации фотоэлектрических измерений и уменьшения погрешности измерений до 0,001%, т.е. в 5–10 меньше, чем это позволяет визуальный метод автоколлимационного микроскопа. Подобная ситуация имеет место также в смежных областях приборостроительных отраслей, как-то: подшипниковая промышленность и гироскопостроение.

Условия измерений – лабораторные стандартные.

Анализ источников ошибок. Погрешность измерения радиуса ΔR по визуальному методу автоколлимационного микроскопа согласно (3.2.23) может быть определена следующим образом:

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2}\ ,$$

где ΔR_1 – погрешность измерения, связанная с неточностью отсчетного устройства; $\Delta R_2(\text{мкм}) = 0{,}4$ мкм $(R_{\text{кд}}/D_{\text{кд}})^2$ – погрешность позиционирования при двукратной продольной наводке согласно (2.1.23); $D_{\text{кд}}$ и $R_{\text{кд}}$ – диаметр и радиус кривизны измеряемой детали.

Оценим величину этих погрешностей, их вклад в погрешность измерений и возможности в улучшении показателей. У погрешности измерения радиуса кривизны автоколлимационным методом две составляющие:

– погрешность, связанная с порогом чувствительности наводок. При $R_{\text{кд}}/D_{\text{кд}} = 1/1$ $\Delta R_2 = 0{,}4$ мкм. Для $R_{\text{кд}} = 10$ мм относительная погрешность, связанная с этой составляющей, составит:

$$\frac{\Delta R_2}{R} \geq 0{,}4 \cdot 10^{-4} - \qquad (4.1.1)$$

погрешность отсчетного устройства.

Для отсчетных устройств высокой точности с погрешностью ≤ 1 мкм самой существенной становится ***ошибка Аббе***, т.е. та составляющая, которая вызвана несовпадением оси измерительного прибора и измеряемой длины (рис. 4.1.1, *а*). Поэтому проблема уменьшения погрешности при измерениях отрезков так или иначе связана с устранением этой составляющей. Радикальным решением этой проблемы является размещение отсчетного устройства на одной оси с измеряемым отрезком (рис. 4.1.2, *б*). В качестве такого отсчетного устройства может быть использован лазерный интерферометрический измеритель перемещений (см. пример 1.3.3), имеющий и техническую возможность установки на оптическую ось, и погрешность отсчетного устройства приемлемой точности $\Delta R_1 \leq 0{,}05-0{,}1$ мкм. Таким образом, минимальная погрешность измерения радиуса кривизны с помощью автоколлимационного микроскопа при устранении ошибки Аббе может быть оценена как:

– в относительном выражении

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{акм}} \approx 0{,}01\ \% = 10^{-4}, \qquad (4.1.2)$$

в абсолютном выражении

$$\Delta R_{\text{акм}}(\text{мкм}) = 0{,}4\ \text{мкм}\ (R_{\text{кд}}/D_{\text{кд}})^2. \qquad (4.1.3$$

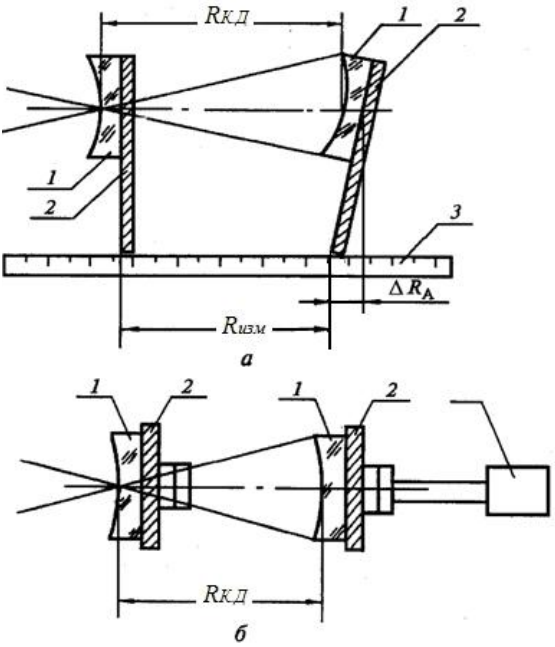
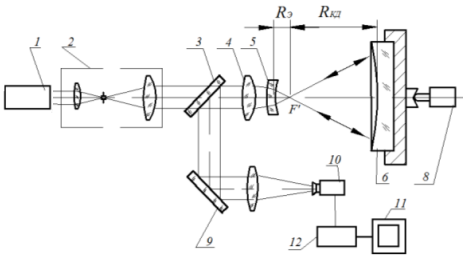
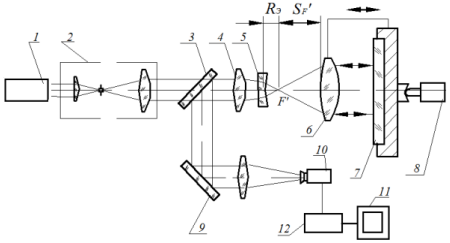


Рис. 4.1.1. Ошибка Аббе при измерении радиуса кривизны:
а – принцип Аббе нарушен; *б* – принцип Аббе соблюден

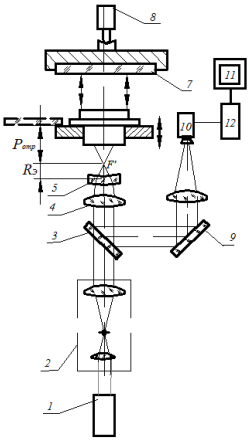
Выбор метода и средств измерений с учетом условий измерений. Одна из возможностей решения этой измерительной задачи связана с широким распространением интерференционных измерений с автоматизированной обработкой интерферограмм. На рис. 4.1.2 представлены схемы измерений радиусов кривизны, фокальных и рабочих отрезков с помощью автоматизированного интерферометра с совмещенными ветвями.



а



б



в

Рис. 4.1.2. Измерение геометрических параметров оптики с помощью интерферометра с совмещенными ветвями: *а* – радиуса кривизны сферической поверхности; *б* – фокального отрезка; *в* – рабочего отрезка объектива. *1* – лазер; *2* – экспандер лазерного пучка; *3* – светоделитель; *4* – освещающий объектив; *5* – апланатический мениск; *6* – контролируемая деталь; 7 – контррефлектор; *8* – лазерный измеритель перемещений; *9* – поворотное зеркало; *10* – видеокамера; *11* – видеоконтрольное устройство; *12* – устройство обработки интерферограмм, $P_{отр}$ – рабочий отрезок объектива

В качестве оптического прибора, с помощью которого производятся продольные наводки, в этом случае применяется интерферометр с совмещенными ветвями с вынесенным фокусом *F'*. Автоколлимационные положения (точечное – в фокусе и конфокальное на расстоянии измеряемого отрезка) измеряемого объекта относительно фокуса *F'* фиксируются по минимальному искривлению полос интерференционной картины. Эта фиксация (продольная наводка) обычно производится визуально, но конструкция цифрового интерферометра предполагает возможность обработки интерферограмм и, следовательно, получения численного критерия этой наводки.

Анализ погрешностей с учетом метода измерений и источников ошибок. Поскольку это устройство претендует на высокие точности измерений, в нем сразу следует устранить ошибку Аббе с помощью лазерного измерителя перемещений, размещенного на оптической оси устройства (см. рис. 4.1.2). Этот лазерный измеритель в режиме учета функций влияния обеспечивает погрешность отсчета 0,01 мкм. В этом случае влиянием отсчетного устройства на погрешность измерений можно пренебречь: $\frac{\Delta R_1}{R} \ll 0{,}001$ %.

Поскольку три схемы, приведенные на рис. 4.1.2, методически мало отличаются, оценим возможности этого метода на примере измерения радиуса кривизны.

Погрешность продольных наводок такого прибора связана с остаточным искривлением полос интерференционной картины, вызванным волновой аберрацией $\Delta W^{\text{ок}}$, которая, в свою очередь, определяется (П.154) величиной остаточной дефокусировки $\Delta L^{\text{ок}}$:

$$\Delta W^{\text{ок}} = \Delta L^{\text{ок}} \cdot 0{,}125 \cdot \left(D_{\text{кд}} / R_{\text{кд}}\right)^2. \qquad (4.1.4)$$

В связи с этим можно предложить четыре варианта наводок при измерении отрезков:

– позиционирование при визуальном контроле наводок по минимальному искривлению полос – ***визуальный интерференционный метод*** (ВИМ);

– визуальная наводка, косвенное определение $\Delta L^{\text{ок}}$ с учетом (4.1.4) по измеренному значению $\Delta W^{\text{ок}}$ из результатов цифровой

обработки интерферограмм, коррекция отрезка на величину $\Delta L^{\text{ок}}$ – ***визуально-цифровой интерференционный коррекционный метод*** (ВЦИК);

– цифровая фиксация положения детали с построением зависимости $\Delta W^{\text{ок}}(L)$, где L – отсчет положения детали, зафиксированный лазерным измерителем перемещений, и фактическая фиксация положения детали в положении $L_{\min}$, при котором имеет место минимальное остаточное искривление полос, оцениваемое величиной $\Delta W^{\text{ок}}_{\min} = \Delta W^{\text{ок}}(L_{\min})$ – ***фотоэлектрический цифровой интерференционный коррекционный метод*** (ФЦИК). При этом $L_{\min}$ определяется по результатам интерполяции (рис. 4.1.3);

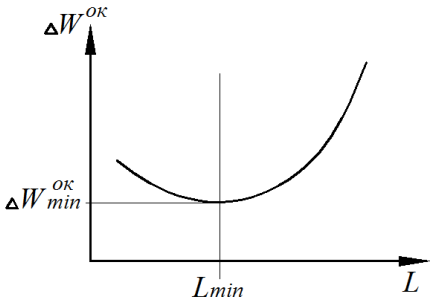


Рис. 4.1.3. Интерполяция положения измеряемой детали по результатам обработки интерферограмм при фотоэлектрическом интерференционном методе

– цифровая фиксация положения детали с построением зависимости $\Delta W^{\text{ок}}(L)$, где L – отсчет положения детали, зафиксированный лазерным измерителем перемещений, и фактическая фиксация положения детали в положении $L_{\min}$, при котором имеет место минимальное остаточное искривление полос, определяемое величиной $\Delta W^{\text{ок}}_{\min} = \Delta W^{\text{ок}}(L_{\min})$, но без использования положения точечной автоколлимации. При этом значение измеряемого радиуса находится цифровым путем как результат обработки интерферограмм для двух и более произвольных положений контролируемой детали – ***фотоэлектрический цифровой интерференционный коррекционный метод без точечной автоколлимации*** (ФЦИК БТА). Это техническое решение описано в [76] и иллюстрируется рис. 4.2.4.

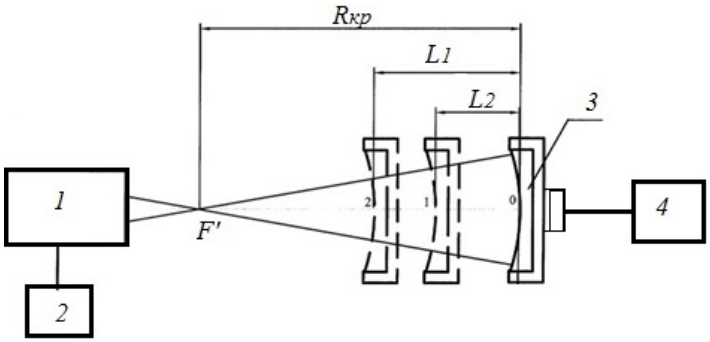


Рис. 4.1.4. Измерение радиуса кривизны в интерферометре с совмещенными ветвями без точечной автоколлимации: *1* – интерферометр с совмещенными ветвями; *2* – устройство обработки интерферограмм; *3* – измеряемая деталь; *4* – устройство измерения перемещений

Радиус кривизны контролируемой поверхности рассчитывают по предлагаемой формуле:

$$R_{\text{кд}} = \frac{N_1\lambda(L_1 - 0{,}25N_1\lambda) - 2N_1^2 - L_1\cos\alpha(N_1\lambda - 2L_1)}{2L_1\cos\alpha - 2L_1Z + N_1\lambda}, \qquad (4.1.5)$$

где λ – рабочая длина волны интерферометра; N_1, N_2 – количество полос в интерференционных картинах, соответствующих положениям 1 и 2 детали;

$$\alpha = \arcsin\sqrt{\frac{\lambda N_2}{L_2}},$$

где λ – рабочая длина волны интерферометра; N_1, N_2 – количество полос в интерференционных картинах, соответствующих положениям 1 и 2 детали; L_1, L_2 – измеренные перемещения, соответствующие положениям 1 и 2 детали (см. рис. 4.1.4).

Оценим возможности этих четырех вариантов с использованием соотношения (4.1.4).

Погрешность визуального интерференционного метода определяется величиной $\Delta W^{\text{ок}}$, которая для визуальной фиксации поло-

жения составляет 0,1 интерференционной полосы. Тогда из формулы (4.1.4) имеем для оценки погрешности измерений ΔR:

$$\Delta R_{\text{ВИМ}} = 2\Delta L^{\text{ок}} = \frac{2 \cdot 0{,}1 \cdot \lambda/2}{0{,}125} \cdot \left(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \right)^2 = \tag{4.1.6}$$

$$= 0{,}96 \text{ мкм } (R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}})^2.$$

Для $R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} = 1/1$ и $R_{\text{кд}} = 10$ мм получим относительную погрешность:

$$(\frac{\Delta R}{R})_{\text{ВИМ}} \approx 0{,}96 \cdot 10^{-4}. \tag{4.1.7}$$

Понятно, что в визуально-цифровом интерференционном корекционном методе величина остаточного искривления может быть определена с помощью устройства обработки интерферограмм с гораздо меньшей погрешностью, нежели для визуальной фиксации. В этом случае значение радиуса кривизны может быть откорректировано на величину $\Delta R^{\text{ок}} = \Delta L^{\text{ок}}$, определенную из формулы (4.1.4). Тогда имеем коррекцию отсчета радиуса на величину систематической ошибки $R_{\text{кд}} = R_{\text{изм}} + \Delta R^{\text{ок}}$. Для качественной коррекции требуется точное знание относительного отверстия эталона или детали $R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}}$, входящего в формулу (4.2.4) в качестве параметра. По оценкам [74] погрешность определения относительного отверстия для высокоточных измерений радиуса должна составлять не менее 0,2%. А это означает, что на диаметр приходится величина $\Delta D_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \leq 0{,}1\%$, что само по себе является существенной проблемой. Для малых деталей реальной является $\Delta D_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \approx 5\ \%$, следовательно, для оценки погрешности метода имеем

$$\Delta R_{\text{ВЦИК}} = \frac{2 \cdot 0{,}1 \lambda / 2 \cdot 2 \cdot \Delta D_{\text{кд}} / D_{\text{кд}}}{0{,}125} \cdot \left(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \right)^2 + \Delta R_{\text{ФЦИК}}. \qquad (4.1.8)$$

Для фотоэлектрического цифрового интерференционного коррекционного метода в формуле (4.1.4) следует принять $\Delta W^{\text{ок}} = \lambda / 100$ – типовую погрешность современных цифровых интерферометров, и тогда имеем

$$\Delta R_{\text{ФЦИК}} = 2\Delta L^{\text{ок}} = \frac{2 \cdot \lambda / 100}{0{,}125} \cdot (R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}})^2 = 0{,}1 \text{ мкм} \cdot \qquad (4.1.9)$$

$$(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}})^2.$$

Для $R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} = 1/1$ и $R_{\text{кд}} = 10$ мм получим

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{ФЦИК}} \approx 0{,}1 \cdot 10^{-4}. \qquad (4.1.10)$$

И тогда из (4.1.8) получим для визуально-цифрового метода

$$\Delta R_{\text{ВЦИК}} = \frac{2 \cdot 0{,}1 \lambda / 2 \cdot 2 \cdot \Delta D_{\text{кд}} / D_{\text{кд}}}{0{,}125} \cdot \left(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \right)^2 + \frac{2 \cdot \lambda / 100}{0{,}125} \cdot \qquad (4.1.11)$$

$$(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}})^2 = 0{,}15 \text{ мкм} \cdot \left(R_{\text{кд}} / D_{\text{кд}} \right)^2,$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{ВЦИК}} \approx 0{,}15 \cdot 10^{-4}. \qquad (4.1.12)$$

Однако следует иметь в виду, что $\Delta W^{\text{ок}} = \lambda / 100$ – не единственное условие выполнения (4.1.10), (4.1.12). Дело в том, что интерферометр с совмещенными ветвями для измерения радиусов кривизны в положении точечной автоколлимации не обладает свойством компенсации остаточной аберрации в отношении

неосесимметричных аберраций. Такие аберрации, как кома, удваиваются для точечного отражения. Поэтому с учетом результатов, обсуждающихся в разделе 2.3.8, следует ввести ограничение на величину остаточной несимметричной аберрации:

$$W_{\text{оа}} \le \frac{\Delta W^{\text{ок}}}{2} \le {}^{\lambda}\!/_{200}. \tag{4.1.13}$$

Для фотоэлектрического цифрового интерференционного коррекционного метода без точечной автоколлимации, поскольку интерферограмма обрабатывается три раза и случайные погрешности суммируются по квадратичному закону, следует принять:

$$\Delta R_{\text{ФЦИК БТА}} = \Delta L^{\text{ок}}\sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}\cdot {}^{\lambda}\!/_{100}}{0{,}125}\cdot\left({}^{R_{\text{кд}}}\!/_{D_{\text{кд}}}\right)^2 = \tag{4.1.14}$$

$$= 0{,}085 \text{ мкм} \times ({}^{R_{\text{кд}}}\!/_{D_{\text{кд}}})^2.$$

Для ${}^{R_{\text{кд}}}\!/_{D_{\text{кд}}} = 1/1$ и $R_{\text{кд}} = 10$ мм получим

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{ФЦИК БТА}} \approx 0{,}85 \cdot 10^{-5}. \tag{4.1.15}$$

Несмотря на то что соотношения (4.1.10) и (4.1.12) близки к (4.1.15) соответственно, тем не менее эта методика существенно выгоднее, чем визуально-цифровой и фотоэлектрический методы, поскольку ограничение на остаточную аберрацию не является жестким и устанавливается на общих основаниях для интерферометров с совмещенными ветвями, т.е. в соответствии с формулой (2.3.60).

Анализ полученных результатов показывает, что при цифровых интерференционных коррекционных методах [75] реально может быть достигнута требуемая точность измерения отрезков. При этом интерференционный метод позиционирования может дать выигрыш по сравнению с визуальными измерениями с помощью автоколлимационного микроскопа.

4.2. Интеллектуальные оптические датчики как средства измерений геометрии промышленных объектов

Задача контроля геометрии объектов актуальна во многих областях науки и техники – промышленности, геодезии, оптике атмосферы и т.д. Например, качество продукции, выпускаемой машиностроительными предприятиями, зависит от качества и количества измерений, с помощью которых контролируются параметры и характеристики выпускаемых изделий.

По данным, приведенным в [2], затраты на контроль в некоторых отраслях превышают 50% от себестоимости продукции. В металлообрабатывающей промышленности затраты на контроль составляют 8–15% затрат производства, причем 70–95% этих затрат приходится на контроль линейных размеров. Трудоемкость контроля деталей составляет до 35% трудоемкости их механической обработки.

Развитие промышленности стимулирует развитие средств измерений. Процесс развития датчиков геометрических размеров можно условно представить в виде 3 этапов.

1-й этап. **Механические средства измерений.** К этим устройствам относятся традиционные штангенинструменты, измерительные скобы, индикаторные головки [24].

К положительным качествам этих устройств относятся простота использования, универсальность. Однако все они требуют контакта с объектом, что приводит к износу исполнительной части. К отрицательным моментам также относятся необходимость остановки динамического объекта для выборочного контроля, трудоемкость считывания информации, сложность автоматизации процесса считывания и, как следствие, невозможность контроля в реальном времени.

К этой же группе устройств следует отнести ручные оптические средства измерений [3. С. 81], которые также осуществляют выборочный контроль, требуют визуальных наводок и достаточно трудоемки.

2-й этап. Появление устройств с цифровым отсчетом. К таковым относятся электроконтактные измерительные голов-

ки, индуктивные преобразователи, фоторастровые датчики перемещений, лазерные интерферометры и т.д. [2]. Эти устройства обеспечивают высокопроизводительные измерения в динамическом режиме, создают возможности для автоматизации процесса измерений. Однако по своей природе они предполагают контакт с объектом или визуальную наводку в измерительных машинах либо контакт с инструментом в станках ЧПУ. Это приводит к износу исполнительной части, зависимости результата измерений от микрогеометрии объекта, необходимости его удержания.

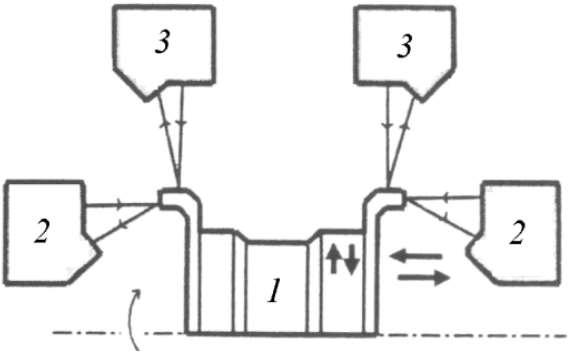
3-й этап. Появление бесконтактных высокопроизводительных сенсоров положения поверхности. ***TQM*** (total quality management, или ***всеобщее руководство качеством***) – подход к руководству организацией, нацеленный на качество, основанный на участии всех ее членов и направленный на достижение долгосрочного успеха путем удовлетворения потребителя и выгоды для всех членов организации и общества. Внедрение в промышленность TQM-технологий стимулирует развитие цифровых средств измерения, не требующих контакта с объектом.

По способу взаимодействия с объектом можно выделить пневматические датчики, емкостные, индуктивные, ультразвуковые, радиолокационные, вихретоковые, оптические [24].

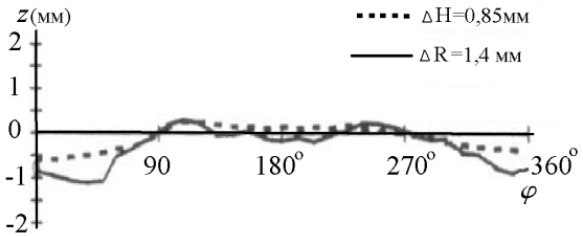
Бесконтактные датчики (в большинстве своем ***сенсоры положения***) легко автоматизируются, не искажают механически форму изделия, могут быть встроены в технологический процесс и при этом, как правило, не требуют жесткого удержания объекта. Эти особенности сенсоров положения создают основу для 100%-ного контроля геометрических размеров продукции таких массовых отраслей, как металлургия, транспорт, кабельная промышленность, в том числе волоконно-оптические кабели, производство строительных конструкций и т.д. (рис. 4.2.1).

Высокопроизводительный мониторинг геометрии изделий позволяет проводить анализ технологического процесса изготовления массовых изделий и своевременную коррекцию технологических параметров. Это способствует повышению качества продукции и увеличению срока службы технологического оборудования.

Пример 4.2.1. В качестве примеров на рис. 4.2.1 и 4.2.2 представлены информационно-измерительные системы на основе интеллектуальных триангуляционных датчиков для различных производственных задач. Системы разработаны КТИ НП (Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН).

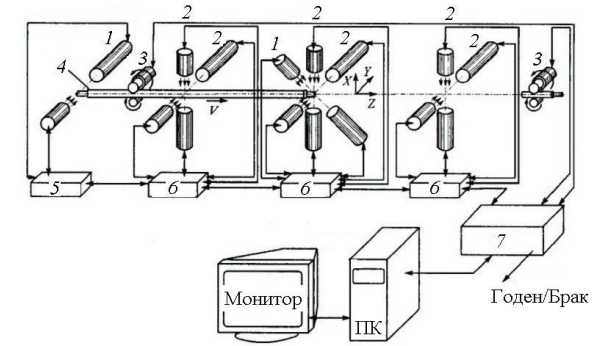


а

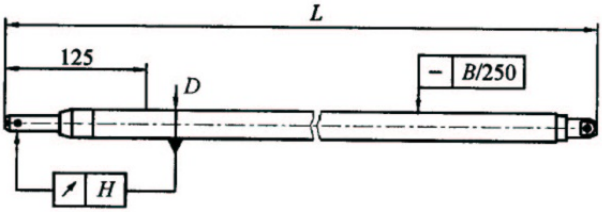


б

Рис. 4.2.1. Система измерения и диагностики колесных пар железнодорожного подвижного состава с помощью триангуляционных датчиков (разработка КТИ научного приборостроения СО РАН): *а* – схема расстановки датчиков для измерения параметров колеса – радиальное биение – ΔR, торцевое биение – ΔH; *б* – представление результатов измерения. *1* – вращающееся колесо; *2* – триангуляционный датчик для измерения торцевого биения; *3* – триангуляционный датчик для измерения радиального биения (URL: http://www.tdiscie.nsc.ru)



а



б



в

Рис. 4.2.2. Информационно-измерительная система измерения размеров ТВЭЛов на основе триангуляционных датчиков (разработка КТИ научного приборостроения СО РАН): *а* – структурная схема системы; *б* – конфигурация тепловыделяющего элемента с указанием размеров, подлежащих измерениям; *в* – рабочее место по проведению измерительных операций. *1* – сенсоры длины ТВЭЛа; *2* – сенсоры датчиков измерения характерных размеров ТВЭЛа; *3* – устройство транспортировки; *4* – измеряемый ТВЭЛ; *5*, *6* – контроллеры датчиков; *7* – устройство сортировки продукции (URL: http://www.tdiscie.nsc.ru)

Среди известных типов бесконтактных датчиков оптические занимают особое место. Их отличительные особенности, такие как:

– большой диапазон измеряемого параметра;

– значительные расстояния между датчиком и объектом;

– высокая надежность;

– универсальность, т.е. возможность различного функционального применения;

– отсутствие воздействия на объект (в смысле взаимодействия поля с веществом),

представляют значительный интерес для разработчиков измерительной техники.

Универсальность оптических датчиков обусловливает их использование в различных областях науки и техники. Так, дальнометрические датчики (дальномеры) используются в геодезии, авиационной и космической технике, в задачах оптики атмосферы. Доплеровские датчики применяются для определения направления и скорости ветра. К фотоэлектрическим датчикам можно отнести различные счетчики аэрозольных частиц, лидарные системы. В настоящем разделе и ниже рассматриваются применения оптических датчиков в задачах промышленного контроля размеров объектов. Вместе с тем рассматриваемые особенности и ограничения могут быть приняты во внимание и при других использованиях датчиков.

По способу выделения информации о положении объекта можно предложить классификацию сенсоров положения, основанных на оптической связи с объектом, изображенную на рис. 4.2.3. Рассмотрим основные особенности каждой группы датчиков.

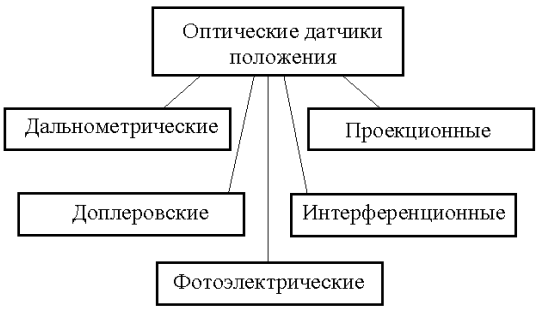


Рис. 4.2.3. Классификация сенсоров положения

Проекционные датчики. В плоскость матричного (или другого координатно-чувствительного) фотоприемника проецируется изображение объекта, которое анализируется с помощью средств вычислительной техники (раздел 4.3.1). Результатом анализа является информация о размерных соотношениях в оптическом изображении. Датчики такого типа уже сами по себе являются измерительной системой – системой технического зрения (СТЗ). В этом их достоинство, но и недостаток одновременно, поскольку имеет место избыточность информации в ущерб разрешающей способности. Помимо этого, с помощью проекционных датчиков затруднительно измерение протяженных объектов, т.е. таких, у которых длина существенно превышает другие размеры.

Кроме непосредственного проецирования изображения объекта, существуют различные технические решения, позволяющие получать трехмерные карты поверхности объекта с применением, например, муаровых карт [73].

Интерференционные датчики. В этих датчиках используется интерференция света, распространяющегося в измерительном и эталонном каналах (см. пример 1.3.3). Результат интерференции зависит от расстояния до объекта. Поскольку стационарная интерференционная картина имеет место, если интерферирующие пучки когерентны, то это накладывает определенные ограничения на использование рассматриваемых датчиков:

– необходимость использования лазерных источников излучения, обеспечивающих высокую временную когерентность;

– необходимость высококачественного отражения от объекта, обеспечивающего высокую пространственную когерентность.

Поэтому при использовании интерференционных датчиков для диагностики производственных объектов на исследуемый объект, как правило, устанавливается дополнительный оптический элемент, например триппель-призма.

Доплеровские датчики используют эффект Доплера, заключающийся в сдвиге несущей частоты электромагнитной волны при отражении от движущегося объекта [38]. Сдвиг частоты связан со скоростью перемещения объекта. Поэтому такие датчики могут

быть использованы для измерения геометрии изменяющихся или движущихся объектов.

Дальнометрические датчики основаны на схеме классического дальномера, когда расстояние между предметом и дальномером измеряется по времени прохождения импульса излучения до объекта и обратно (раздел 4.3.2). Работа такого датчика требует формирования высококачественных сверхкоротких импульсов и их прецизионного измерения. Поэтому такие датчики имеют существенные ограничения по расстоянию до измеряемого объекта, сравнительно низкую точность измерений и высокую стоимость. Существуют дальномеры, построенные по принципу фазового детектирования [38], точность которых достаточно высока. Однако они сложны по устройству и также имеют высокую стоимость.

Фотоэлектрические датчики [48]. Конструкции фотоэлектрических датчиков основаны на измерениях интенсивности оптического излучения и выделении информации о положении объекта по результатам этого измерения. Отличительной особенностью фотоэлектрических датчиков являются простота их схемных решений и возможность достижения высоких точностей измерения (раздел 4.3.3).

Данные о рассмотренных типах оптических сенсоров представлены в табл. 4.2.1. Из анализа этой таблицы ясно, что датчики фотоэлектрического типа могут быть эффективно использованы в системах измерений промышленных объектов, когда расстояние до объекта – порядка одного или несколько метров, требуются высокая точность измерений и высокая надежность датчиков. Поэтому в настоящее время разработчики измерительных систем проявляют интерес преимущественно к датчикам фотоэлектрического типа. Этим обусловлено разнообразие существующих схемных и практических решений.

Сопоставление этих решений по параметрам оцифровки аналоговых сигналов (быстродействие, разрешающая способность и т.д.) особого смысла не имеет, так как при современном уровне развития микроэлектроники эти характеристики можно обеспечить практически одинаковыми для всех датчиков. В этом смысле тенденции в развитии сенсорной техники могут быть сформулированы следующим образом [49]:

Таблица 4.2.1

Свойства оптических датчиков

Тип датчика	Способ выделения информации	Дистанция, мм	Отличительные особенности	Недостатки
Проекционный	Построение оптического изображения на матричном приемнике и последующая обработка	$10 \div 10^4$	Получение информации об объекте в целом	Низкое пространственное разрешение. Затрудненность анализа протяженного объекта. Зависимость нормировочного множителя (и результата измерения) от взаимного положения объекта и приемника
Интерференционный	Интерференция опорного и предметного лазерных пучков и последующая обработка интерференционной картины	$10 \div 10^4$	Высокая помехозащищенность от постороннего оптического излучения	Необходимость виброзащиты, установки оптического элемента на объект. Зависимость результата от внешних условий и, как следствие, необходимость в сопровождении геометрических измерений контролем температуры, влажности, давления. Необходимость использования лазера, следовательно, малый ресурс
Доплеровский	Сдвиг несущей частоты в зависимости от скорости	$10^2 \div 10^4$	Высокая помехозащищенность, в том числе от оптического излучения	Работают только с динамическим объектом. Зависимость результата от внешних условий. Необходимость использования лазера и, как следствие, малый ресурс
Дальнометрический	Изменение времени прохождения импульса до объекта и обратно	$10^2 \div 10^5$	Высокая помехозащищенность, в том числе от оптического излучения	Зависимость результата от внешних условий. Низкая точность измерений (1 мм). Необходимость использования лазера и, как следствие, низкий ресурс
Фотоэлектрический	Измерение интенсивности излучения	$\leq 10^3$	Возможность использования нелазерных источников. Высокая точность измерений. Возможность работы с промышленными объектами	Средние расстояния до объекта

– применение микропроцессоров;

– миниатюризация конструкции;

– построение многосенсорных систем;

– встроенные самопроверка или самокалибровка;

– организация беспроводного взаимодействия датчиков между собой и с центральным процессором;

– идеология ***мягких датчиков*** **(*soft sensors*)**, включающая в себя:

- расширение условий эксплуатации посредством учета функции влияния,
- организацию косвенных измерений комплексного параметра процесса посредством измерения и корректировки влияющих параметров,
- оперативное перепрограммирование функций и идеологии построения.

Датчики, предназначенные для мониторинговых измерений промышленных объектов, эксплуатируются в условиях сильных вибраций, высоких температур, запыленной атмосферы, электромагнитных помех. Поэтому при выборе типа датчика следует исходить из оптимальной адаптации схемного решения к особенностям анализируемого объекта в конкретных условиях измерения. В этой связи конструкция датчика должна быть максимально жесткой, иметь минимум подвижек и юстировок, обеспечивать минимальную длину канала связи между фотоприемником и устройством обработки сигнала.

Исходя из перечисленных условий эксплуатации и особенностей контролируемых объектов, можно сформулировать следующие требования к датчикам.

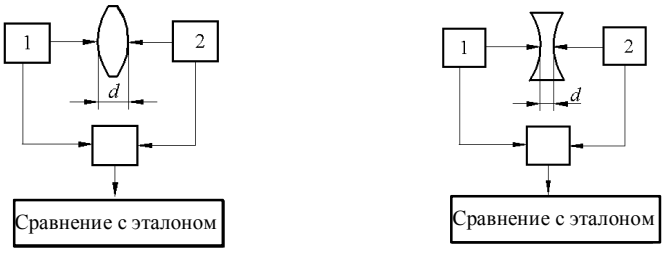
Возможность определения положения как выпуклой, так и вогнутой поверхности. На рис. 4.2.4 приведена обобщенная схема бесконтактного измерения геометрического размера *d*.

С помощью сенсоров *1* и *2* определяются положения соответственно левой и правой поверхностей изделия. Результат отсчетов сравнивается с результатом, полученным ранее для эталонного объекта, и выносится решение о величине *a*.

Физические особенности построения бесконтактных датчиков таковы, что на их основе могут быть построены:

– системы для определения размеров объектов, содержащих выпуклые поверхности. Как правило, это датчик положения границы объекта (ДПГ) (рис. 4.2.4, *а*);

– системы для определения размеров объектов, содержащих вогнутости, – датчик положения поверхности (ДПП) (рис. 4.2.4, *б*). Очевидно, что ДПП может быть использован и для измерения выпуклых объектов.



а *б*

Рис. 4.2.4. Обобщенные схемы бесконтактных измерителей размеров

Масштаб расстояний до объекта. Все бесконтактные датчики предназначены для работы на некотором расстоянии до объекта. Однако направление измерений может быть параллельно (рис. 4.2.5, *а*) или перпендикулярно (рис. 4.2.5, *б*) оси датчика.

В первом случае масштаб расстояний до объекта примерно равен диапазону измеряемого параметра. Датчик такого типа можно считать устройством измерения расстояния, и объект может находиться близко к измерителю. Во втором случае эти величины могут существенно различаться в зависимости от типа датчика и объекта.

Устойчивость к положению предмета. Сенсоры по схеме рис. 4.2.5, *б* устойчивы к смещениям объекта измерений в направлении, перпендикулярном направлению измерений. Эта особенность чрезвычайно важна, например в прокатном производстве, когда фиксировать объект (удерживать его в зоне измерений) очень сложно из-за его большой массы.

Сенсоры положения вогнутой поверхности, очевидно, относятся к схеме рис. 4.2.5, *а*. При этом особое значение имеет вопрос о

связи схемы датчика с измеряемым объектом. Диапазон поперечных перемещений объекта может быть таков, что перехватываемый датчиком сигнал вообще уходит с приемной апертуры.

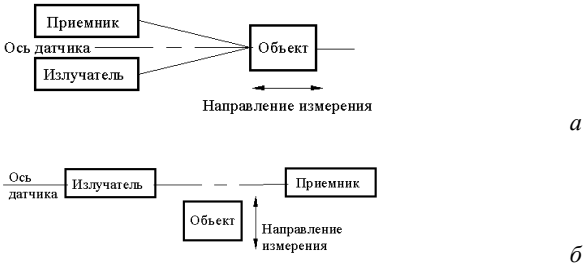


Рис. 4.2.5. Взаимное расположение датчиков и объекта измерений в различных схемах

Еще одним условием устойчивости бесконтактных датчиков является встроенное усреднение (оптическое, аналоговое) по точкам объекта. Тогда результат измерений не будет зависеть от шероховатости и от состояния поверхности объекта. Особая роль этого факта показана, например, в работе [39].

Возможность встроенной самокалибровки. Это очень важное условие для сенсоров, работающих в производственных условиях в течение длительного времени, так как изменения окружающей среды могут изменять внутренний калибр: частоту, длину волны и т.д. Режим встроенной самокалибровки дает возможность выполнять калибровку каждый раз после смены объекта. Например, в фотометрическом ДПГ таковая обеспечивается апертурной диафрагмой.

На рис. 4.2.6 приведена схема классификации фотоэлектрических датчиков положения. По алгоритму обработки информации фотоэлектрические датчики можно разделить на позиционно-чувствительные и фотометрические.

В свою очередь по идеологии построения оптических схем позиционно-чувствительные датчики могут быть координатно-чувствительными, триангуляционными, сканирующими. В них так же, как в фотометрических датчиках, может быть реализована схема измерений ДПП или ДПГ.

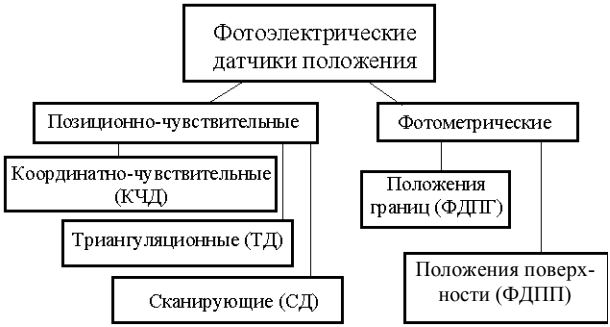


Рис. 4.2.6. Классификация фотоэлектрических датчиков положения

Кратко остановимся на наиболее распространенных схемах перечисленных датчиков и проанализируем для каждого из них выполнение условий, поставленных в предыдущем разделе.

Координатно-чувствительный датчик (КЧД). Классическая схема КЧД приведена, например, в [40].

Датчик включает в себя (рис. 4.2.7): осветитель (светодиод *1* и коллимирующий объектив *2*), проецирующую оптическую систему *3*, фотодиодную линейку (ФДЛ) *4*, устройство управления и обработки *5*, калибровочную диафрагму *6*. В современных датчиках используют ПЗС- или КМОП-линейку или матрицу. Датчик работает следующим образом. Сформированный осветителем квазипараллельный световой пучок освещает контролируемый объект. Проецирующая система, собранная по симметричной схеме (для минимизации дисторсии), формирует в плоскости фотодиодной линейки теневое изображение объекта.

ФДЛ выполняет электронное сканирование этого изображения под управлением устройства управления и обработки. В результате этого измеряется длительность сигнала, которая известным образом связана с геометрическим параметром изделия.

КЧД является датчиком ДПГ-типа, потому предназначен для измерения охватывающих размеров. Для его построения требуется достаточно прецизионная проецирующая система. Очевидно, что соответствующие размеры пикселя линейки (матрицы) определяют разрешение датчика и возможности для встроенного пространственного усреднения.

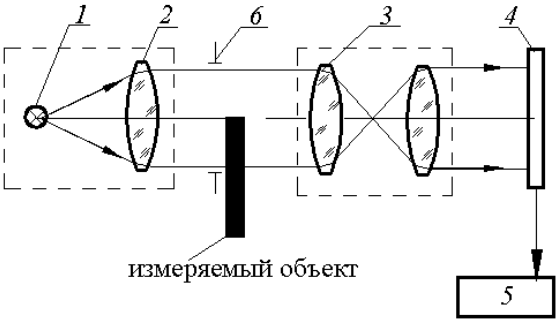


Рис. 4.2.7. Схема координатно-чувствительного фотоэлектрического датчика

Алгоритм обработки теневого изображения предполагает нахождение границы тени по дифракционно-размытому объекту. В качестве параметра в этом алгоритме используется расстояние до объекта. Этот факт свидетельствует о неустойчивости схемы КЧД к положению предмета.

В КЧД может быть реализована самокалибровка с помощью диафрагмы *6*.

***Сканирующий датчик* (*СД*)** [41, 42]. Обобщенная схема СД приведена на рис. 4.2.8, где *1* – источник излучения, *2* – формирующая оптическая система, *3* – сканирующий элемент, *4* – объектив освещающий, *5* – объектив собирающий, *6* – фотоприемник.

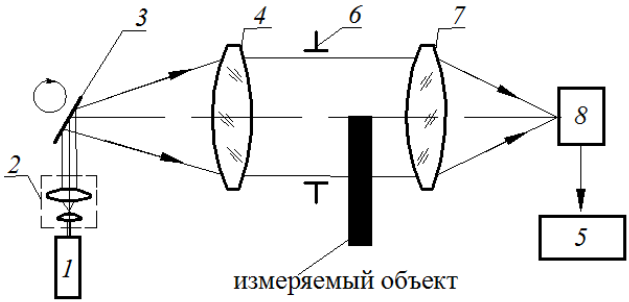


Рис. 4.2.8. Схема сканирующего фотоэлектрического датчика

Область измерения сканируется лазерным пучком, отраженным от сканирующего элемента *3*. Фотоэлектрический сигнал регистрируется с помощью собирающего объектива *5* фотоприемником *6*. По длительности фотоэлектрического сигнала определяют положение границ контролируемого предмета.

СД является датчиком ДПГ-типа. Основные его недостатки:

– наличие прецизионного сканирующего элемента (прецизионность элемента *3* определяет точность измерений);

– наличие прецизионной формирующей оптической системы (нарушение условия таутохронизма лучей известным образом связано с погрешностью измерений).

Самокалибровка выполняется с помощью диафрагмы *7*. Встроенное усреднение может быть реализовано, например, путем использования светодиода с вытянутой излучающей площадкой.

***Триангуляционный датчик* (*ТД*)** [43, 44]. Обобщенная схема ТД показана на рис. 4.2.9. Схема ТД содержит: источник света *1*, формирующую оптическую систему *2*, изображающую оптическую систему *3*, матричный или линейчатый фотоприемник *4*, устройство управления и обработки *5*. Оптическая система *2* формирует изображение источника света *1* на контролируемой поверхности. Оптическая система *3* переносит это изображение в плоскость фотоприемника *4*. При смещении поверхности на величину x изображение смещается на величину a. По априорно известной зависимости $a = a(x, \alpha, \beta)$, полученной, например, при калибровке на жестко заданных параметрах α, β, можно определить величину x – положение предмета относительно какого-то номинального положения.

ТД относится к датчикам ДПП-типа. Поскольку возможности пространственного усреднения у ТД существенно ограничены, ТД неустойчив к смещению объекта в своей плоскости, а следовательно, требует применения средств удержания (проводки) объекта в процессе измерения.

ТД не имеет возможности самокалибровки, поэтому периодически требуется его поверка для фиксирования параметров α, β. И, наконец, датчик жестко связан с объектом, диапазон смещений объекта ограничен длиной линейки *4* (см. рис. 4.2.9) при заданных α, β.

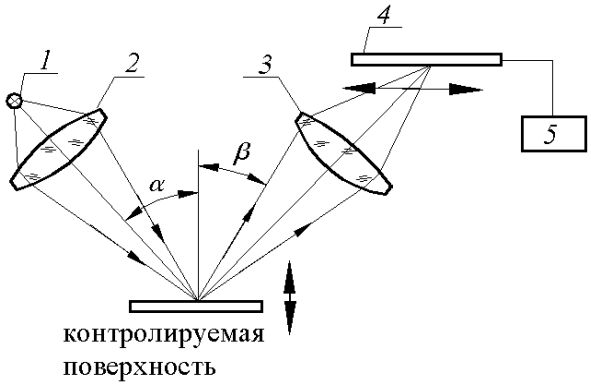


Рис. 4.2.9. Схема триангуляционного фотоэлектрического датчика

Фотометрический датчик положения границы (ФДПГ) [45]. Обобщенная схема ФДПГ приведена на рис. 4.2.10.

Схема содержит: источник света *1*, коллимирующую оптическую систему *2*, фокусирующую оптическую систему *3*, фотоприемник *4*, устройство управления и обработки *5*, калибрующую диафрагму *6*.

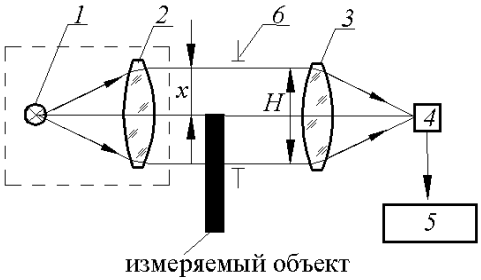


Рис. 4.2.10. Схема фотоэлектрического датчика положения границы

Коллимированный поток излучения фокусируется системой *3* на фотоприемник *4*. Электрический сигнал фиксируется с помощью устройства управления и обработки *5*. Смещение предмета на расстояние *x* относительно края диафрагмы *6* приводит к изменению фототока. При использовании прямоугольной апертуры *6* вы-

сотой H расстояние x от края контролируемого объекта до верхнего края апертурной диафрагмы в плоскости, перпендикулярной направлению распространения оптического излучения, определяется соотношением $x = \frac{H}{J_0} J$, где J_0 – величина фототока без объекта (фототок самокалибровки); J – величина фототока, соответствующего смещению объекта на величину x относительно края диафрагмы *6*.

ФДПГ имеет широкие возможности для регулировки пространственного усреднения путем изменения размера диафрагмы в направлении, перпендикулярном измеряемому размеру *H*.

Встроенная самокалибровка производится в отсутствие объекта перед каждым сеансом измерения.

Высокая энергетика схемы допускает возможность использования недорогих высокоресурсных источников света (фотодиоды, лампы накаливания).

Фотометрический датчик положения поверхности (ФДПП) [46]. Обобщенная схема ФДПП приведена на рис. 4.2.11. ФДПП состоит из источника света *1*, конденсорного объектива *2*, марки *3*, узла развязки осветительной и приемной ветвей *4*, фокусирующего объектива *5*, анализатора изображения *6*, фотоприемника *7*, устройства управления и обработки *8*.

Марка *3*, освещенная с помощью источника света *1* и конденсорного объектива *2*, проецируется объективом *5* на поверхность измеряемого объекта. Отраженный от поверхности объекта световой поток перехватывается приемным объективом *5* и фокусируется им на фотоприемник *7*, предварительно пройдя через анализатор изображения *6*. Электрический сигнал, выработанный фотоприемником и обработанный устройством *7*, содержит сигнал о расфокусировке световой марки, а следовательно, о линейном смещении поверхности объекта.

В качестве анализатора изображения используются диафрагмы, светоделительные призмы, которые могут быть подвижны или неподвижны. Объектив *5* также может быть перемещаемым или неподвижным. В зависимости от этого реализуются два возможных принципа построения таких датчиков:

– адаптивный, когда для определения величины смещения поверхности измеряется величина перемещения анализатора изображения *6* или объектива *5* до достижения максимального фототока (т.е. устранения этой дефокусировки);

– непосредственный, основанный на измерении величины расфокусировки световой марки на поверхности объекта при линейном смещении поверхности из исходного положения по величине фотометрического сигнала. Обработка данных ведется с учетом функции преобразования прибора, измеренной при калибровке и зашитой в память.

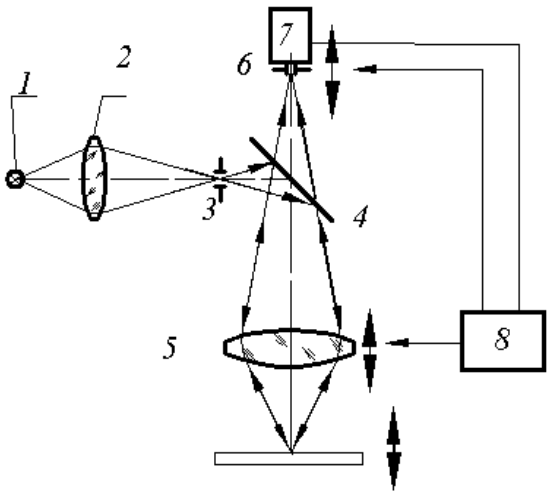


Рис. 4.2.11. Схема фотоэлектрического датчика положения поверхности

ФДПП имеет возможности для регулировки пространственного усреднения путем выбора оптимального размера диафрагмы *3*.

Вопрос о встроенной самокалибровке может быть решен следующим образом. Зависимость фототока $J(x)$ от смещения объекта является аналитически известной и определяется соотношением световой марки, масштабом увеличения оптических систем и анализатором изображения.

Таблица 4.2.2

Фотоэлектрические датчики положения

Виды датчиков	Возможность определения положения вогнутой поверхности	Масштаб расстояния до объекта, мм	Устойчивость к смещению поверхности в направлении, перпендикулярном измеряемому размеру	Отсутствие прецизионных элементов: оптических, механических и т.д.	Возможность работы в жестких условиях эксплуатации (запыленность, перепады температуры)	Независимость от состояния поверхности объекта. Возможность работы с шероховатыми поверхностями (оптическое или аналоговое встроенное усреднение)	Возможность встроенной самокалибровки	Тип излучателя
Координатно-чувствительный датчик теневого сечения	–	$\leq 10^2$	–	–	+	–	+	ФД/лазер
Сканирующий датчик	–	$\leq 10^2$	+	–	+	–	+	Лазер
Триангуляционный датчик	+	$\leq 10^3$	–	+	+	–	–	Лазер
Фотометрический датчик положения границы	–	$\leq 10^3$	+	+	+	+	+	ФД/лазер
Фотометрический датчик положения поверхности	+	$\leq 10^3$	+	+	+	+	+	ФД/лазер

Самокалибровка ФДПП необходима для устранения зависимости фотометрического сигнала от состояния поверхности. С этой целью в конструкции может быть предусмотрен дополнительный фотометрический канал, на который и производится калибровка в реальном времени.

Известно подобное техническое решение ФДПП с использованием волоконно-оптических элементов [47]. Такое устройство позволяет производить измерения одновременно в нескольких местах, включая труднодоступные.

Результаты проведенного анализа в сжатом виде представлены в табл. 4.2.2. Отсюда видно, что фотометрические датчики положения являются перспективными сенсорами для построения систем измерения геометрии промышленных объектов. Актуальной задачей является разработка ФДПП-датчика с неподвижными компонентами оптической схемы.

4.3. Информационно-измерительные системы для металлургической промышленности

Металлургическая промышленность представляет собой пример отрасли, в которой особенности промышленных объектов и условия эксплуатации определяют выбор методов и средства измерений, часто при этом не оставляя альтернативы. Поэтому интересным представляется рассмотреть несколько оптических измерительных задач из этой отрасли по разработке современных систем мониторинга геометрии продукции.

4.3.1. Информационно-измерительная система измерения геометрии непрерывно-литой заготовки на машине непрерывного литья

Непрерывная разливка стали является одним из передовых технологических процессов в металлургическом производстве. Одним

из важнейших технологических параметров является объем выплавляемых слитков. Схема МНЛЗ – машины непрерывного литья заготовок (слитков) представлена на рис. 4.3.1. Расплавленная сталь разливается из стакана *1* самотеком через люк в дне стакана, попадает в кристаллизатор *2*, где охлаждается и переходит в твердую фазу. После кристаллизатора сформированная непрерывно-литая заготовка перемещается по транспортному рольгангу *3* по горизонтали. По ходу движения заготовки установлены ножницы *4* или устройство газовой резки для порезки заготовок требуемой длины.

В состав МНЛЗ входят 4 сталелитейных ручья, т.е. одновременно осуществляется разливка четырех непрерывных заготовок.

Формулировка измерительной задачи. Объект измерений – стальная заготовка – имеет в сечении форму прямоугольника с габаритными размерами 330×300 мм с фасками 15×10 мм (рис. 4.3.2).

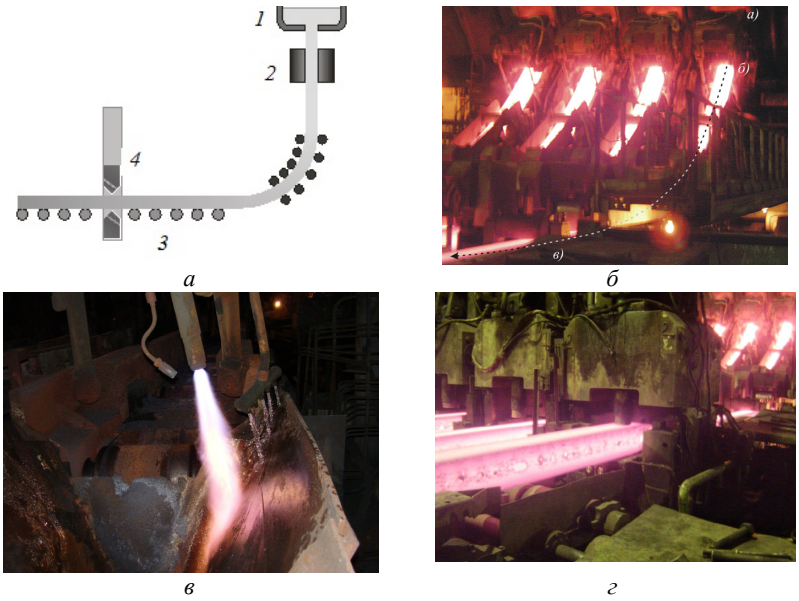


Рис. 4.3.1. Работа МНЛЗ: *а* – схема (*1* – стакан; *2* – кристаллизатор; *3* – транспортный рольганг; *4* – устройство порезки); *б* – ручьи разливки; *в* – газовая резка; *г* – заготовка

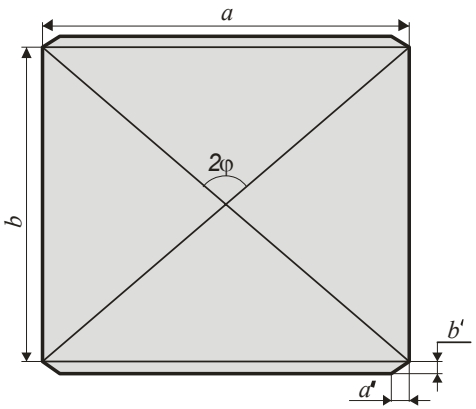


Рис. 4.3.2. Сечение непрерывно-литой заготовки:
a = 330 мм; b = 280 мм; a' = 15 мм; b' = 10 мм

– Технологическими требованиями допускается изменение линейных размеров сторон кристаллизатора на $\Delta a = \Delta b = \pm 0{,}5$ мм.

– Следует отметить, что в отличие от прочих объектов непрерывно-литые высокотемпературные заготовки в силу своих особенностей накладывают ряд дополнительных требований к системе контроля:

- измерение должно уверенно производиться в некоторой области пространства, в пределах которой заготовка может перемещаться вследствие невозможности фиксации;
- измерение должно производиться со значительных удалений от измеряемых параметров;
- измерение должно производиться, несмотря на то что поле зрения оптических датчиков может быть загромождено конструкционными элементами цеха.

– С учетом этих требований система должна выдавать сигнал коррекции длины отрубаемой части в зависимости от фактического сечения. Погрешность измерений объема не должна превышать

$$\frac{\Delta V}{V} = \pm 0{,}1\%, \qquad (4.3.1)$$

что соответствует:

○ погрешности измерения площади сечения

$$\frac{\Delta S}{S} \approx 0{,}084\%, \tag{4.3.2}$$

○ погрешности измерения размеров сечения

$$\Delta a \approx \Delta b = \pm 0{,}13 \text{ мм}, \left(\frac{\Delta a}{a} \approx \frac{\Delta b}{b} \approx 0{,}042\%\right), \tag{4.3.3}$$

○ погрешности измерения длины заготовки

$$\Delta l = \pm 0{,}8 \text{ мм}, \left(\frac{\Delta l}{l} \approx 0{,}016\%\right) \tag{4.3.4}$$

в диапазоне температур T = 900°C±10%.

– Техническими условиями предполагается, что номинальная длина отрубаемой заготовки может изменяться от $L_{\min} = 2{,}7$ м до $L_{\max} = 7$ м.

– Погрешность базирования заготовки в измерительной зоне не превышает ±5 мм в плоскости заготовки (рыскание) и ±3 мм в плоскости, перпендикулярной ей (броски).

– Самокалибровка системы в процессе эксплуатации – обязательна.

– Погрешность выполнения размеров нового кристаллизатора составляет 0,01 мм.

– Размер заготовки определяется размером кристаллизатора. В процессе эксплуатации размер кристаллизатора изменяется. Технологическими требованиями допускается изменение линейных размеров кристаллизатора на ±0,5 мм.

Формулировка условий измерений:

– измерение должно уверено производиться в некоторой области, в пределах которой заготовка может перемещаться вследствие невозможности ее фиксации (т.е. устойчивость к положению объекта);

– измерение должно производиться со значительных удалений от измеряемого объекта из-за высокой температуры объекта: T = 900°C±10%;

– измерение должно производиться, несмотря на то что поле зрения датчиков может быть загромождено конструкционными элементами цеха, и потому размещать датчики приходится так, как это позволяет ситуация, а не так, как того требует схема чистого эксперимента, позволяющая максимально реализовать возможности датчиков;

– измерение должно производиться уверенно, несмотря на то что измеряемый параметр может очень сильно искажаться производственными факторами, такими как окалина, следы охлаждающей жидкости и т.д.

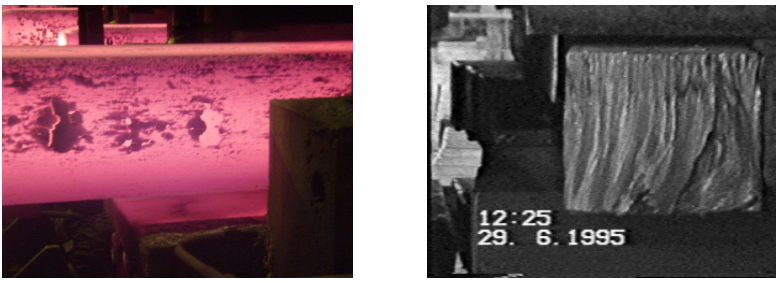
Источники ошибок. На результатах измерения могут сказаться следующие моменты:

– броски и рыскания заготовки в зоне измерения в процессе проката, влияющие на коэффициент увеличения оптической системы датчиков;

– производственные вибрации;

– неопределенность в значениях параметров, входящих в выражения для измеряемой величины при непрямых измерениях (координаты, описывающие положение датчиков);

– технологические (рис. 4.3.3) факторы (заусенцы, окалина);



а *б*

Рис. 4.3.3. Технологические факторы, сказывающиеся на погрешности измерения объема непрерывно-литой заготовки: *а* – окалина и следы охлаждающей жидкости; *б* – заусенцы на торце заготовки

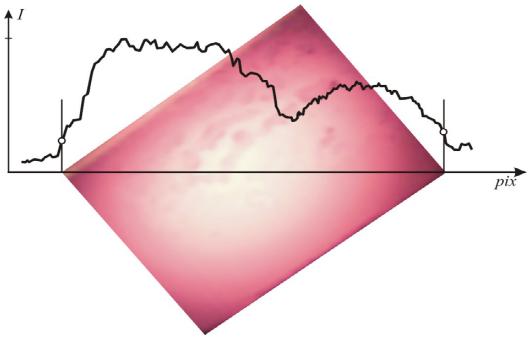


Рис. 4.3.4. Размытие фотометрического профиля на краях, обусловленное дефокусировкой изображения и изменением яркости самосвечения из-за остывания заготовки

– самосветимость (рис. 4.3.4) высокотемпературного объекта, проявляющаяся в:

- дефокусировке изображения объекта оптической системой датчика,
- изменении яркости объекта при приближении к краю объекта, связанном с неравномерностью распределения температур по поверхности горячего объекта,
- катастрофах на фотометрическом профиле, связанных с технологическими факторами (рис. 4.3.3, *а*);

– погрешности, связанные с дискретизацией;

– погрешности, связанные с приближениями, использованными в математической модели.

Метод и средства измерений с учетом условий измерений. Условия измерений однозначно указывают на то, что измерения должны быть косвенными, бесконтактными с использованием интеллектуальных оптических датчиков. Поскольку предполагается работа с крупногабаритными объектами и широким диапазоном изменений расстояний до объекта, для конструкции устройств измерения требуемых величин – анализатора размеров была выбрана схема проекционного датчика (см. раздел 4.2 и рис. 4.3.5) на базе ПЗС-линейки, представляющего собой, по сути дела, специализированную видеокамеру.

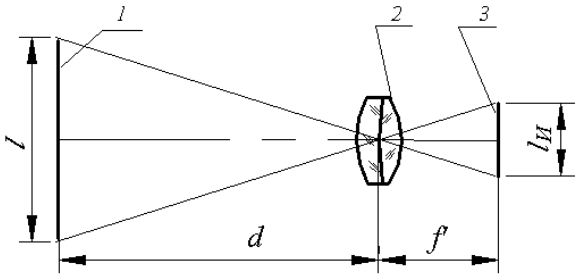


Рис. 4.3.5. Оптическая схема проекционного датчика: *1* – объект измерения; *2* – объектив; *3* – ПЗС-линейка; *d* – расстояние до объектива; *f* '– фокусное расстояние объектива; *l* – размер объекта измерения; $l_и$ – размер изображения

Объектив анализатора строит изображение предмета на ПЗС-линейке анализатора. Измеряемый размер изображения $l_и$ связан с размером предмета *l* коэффициентом линейного увеличения *k*:

$$k = \frac{l}{l_и} = \frac{d}{l_и}. \qquad (4.3.5)$$

Поскольку *d* велико, можно записать:

$$k = \frac{l}{l_и} \approx \frac{d}{f'}. \qquad (4.3.6)$$

Таким образом, для измерения объекта достаточно знать коэффициент увеличения анализатора и размер изображения объекта.

Каждый датчик сечения состоит из двух анализаторов *3*, датчик края – из одного *2* (рис. 4.3.6). Сигналы с анализаторов *2*, *3*, установленных над непрерывно-разливаемой заготовкой, поступают в контроллер *4*, где производится обработка видеосигналов и выработка сигнала на управление гидравлическими ножницами или устройством газовой резки через систему АСУ электросталеплавильного цеха. Анализаторы *3* предназначены для мониторинга размеров, необходимых для определения площади сечения. Камера *2* служит для мониторинга положения конца разливаемой заготовки в пространстве после гидравлических ножниц.

Для того чтобы не мешать технологическим операциям разливки стали, анализаторы удалены от измеряемых объектов. Расстояния от анализаторов до заготовок достигают 10 м и более (рис. 4.3.7).

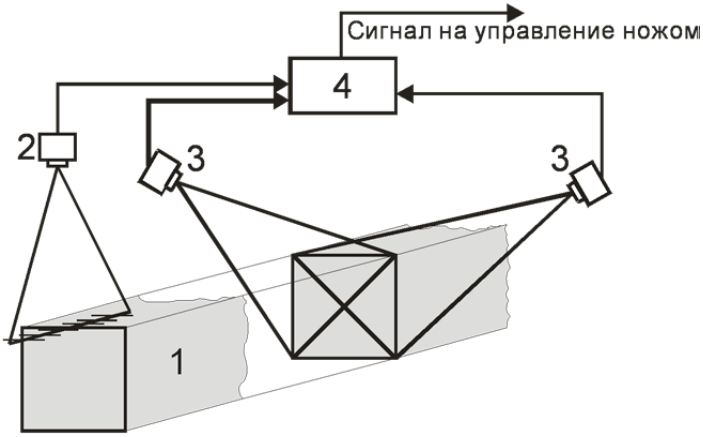


Рис. 4.3.6. Схема измерений объема непрерывно-литой заготовки:
1 – измеряемый объект; *2* – датчик края; *3* – датчик площади сечения

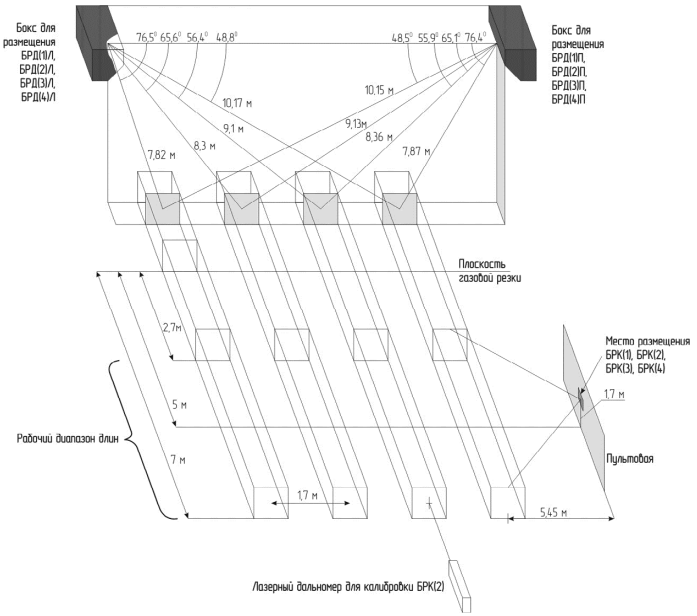


Рис. 4.3.7. План размещения элементов системы измерения геометрии непрерывно-литой заготовки на машине непрерывного литья

Такое расположение помогает также избежать перегрева элементов анализатора и влияния высоких температур на результат измерений. Все анализаторы помещены в герметичные защитные кабины. Это позволяет изолировать аппаратуру от высоких температур и пыльной атмосферы сталеплавильного цеха. На стеклопакеты иллюминаторов кабин непрерывно подается сжатый воздух для очистки стекла от пыли.

Поскольку размеры a и b – соответственно горизонтальная и вертикальная стороны непрерывно-литой заготовки – труднодоступны для измерения из-за особенности условий эксплуатации, то измерение площади построено на использовании размеров диагоналей.

В датчике сечения погрешность измерения размеров сечения заготовки не должна превышать 0,13 мм. Учитывая, что размер диагонали $c \approx 433$ мм, определим требуемое количество пикселей в линейке:

$$N \geq \frac{c}{0{,}13} = \frac{433}{0{,}13} = 3330. \tag{4.3.7}$$

Этим требованиям удовлетворяет линейка ILX-508A (см. табл. 2.3.1), которая содержит 7 926 пикселей размером $\Delta l'_{pix} = 7$ мкм.

Размер поля зрения для анализаторов *3* (диагональных) должен составить $l^{\text{диаг}} = 450$ мм (с учетом возможных смещений заготовки). Для стабильного качества изображения выбросим по 100 пикселей на краях линейки. Таким образом, имеем минимально различимый отрезок диагонали, приходящийся на один пиксель:

$$\Delta l^{\text{диаг}}_{\min} = \frac{l^{\text{диаг}}}{N} = \frac{450}{7926-200} \approx 0{,}058 \text{ мм}, \tag{4.3.8}$$

где N – количество рабочих пикселей линейки.

Размер поля зрения для анализаторов *2* (длины заготовки) должен составить:

$$l^{\text{кр}} = L_{\max} - L_{\min} = 4\,300 \text{ мм}. \tag{4.3.9}$$

Минимально различимый отрезок длины, приходящийся на один пиксель:

$$\Delta l^{\text{кр}}_{\min} = \frac{l^{\text{кр}}}{N} = \frac{4300}{7926-200} \approx 0{,}56 \text{ мм}. \tag{4.3.10}$$

Для полной реализации возможностей линейки для каждого *i*-го анализатора должен быть правильно выбран объектив, обеспечивающий полное заполнение поля изображения. В этом случае главным параметром для подбора объектива является его фокусное расстояние f'_i. Оно должно удовлетворять соотношению

$$f'_i \approx d_i \frac{N \cdot l_{pix}}{l_i}, \tag{4.3.11}$$

где d_i – расстояние от объекта измерений до *i*-го анализатора, согласно схеме на рис. 4.3.7; $l_i = \begin{cases} 450 \text{ мм для датчика сечения,} \\ 4300 \text{ мм для датчика края,} \end{cases}$ – размер поля зрения *i*-го анализатора.

Размеры изображений $l_{и1}$ и $l_{и2}$, определяемые анализаторами датчика сечения, позволяют рассчитать площадь сечения по формуле

$$S = l_{и1} \cdot l_{и2} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\sin 2\varphi}{2} + \\ +2 \cdot \left(\sqrt{l_{и1} \cdot l_{и2} \cdot k_1 \cdot k_2} \sin\varphi - a'\right) \cdot b', \tag{4.3.12}$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты увеличения соответствующих анализаторов, зависящие от параметров, определяющих положение камер относительно соответствующего сечения. Поскольку на самом деле выплавляемая заготовка всегда имеет прямоугольное сечение и размеры диагоналей все время равны между собой, использование двух анализаторов для измерения площади сечения позволяет реализовать принцип совместных измерений (см. раздел 1.1) и повысить устойчивость результата измерений к производственным факторам. Например, небольшие горизонтальные смещения заготовки в поле зрения камер приводят к уменьшению размера изображения одной диагонали и увеличению размера изображения другой, следовательно, можно ожидать, что соотношение (4.3.12) более устойчиво к смещению заготовки, чем традиционная формула вычисления площади прямоугольника.

Пренебрегая зависимостью угла 2φ и размера добавки к площади $2\left(\sqrt{l_{и1} \cdot l_{и2} \cdot k_1 \cdot k_2} \sin\varphi - a'\right) \cdot b'$, связанной с малыми трапециями от измеряемых размеров, запишем (4.3.12) в виде

$$S \approx l_{и1} \cdot l_{и2} \cdot k_S + S_0, \qquad (4.3.13)$$

где k_S и S_0 – константы, зависящие от параметров, определяющих положение камер относительно сечения заготовки.

Система датчиков положения края заготовки (датчиков длины) позволяет отрезать заготовки той длины, которая требуется для обеспечения номинального объема. При этом сигнал на исполнительное устройство выдается контроллером в тот момент, когда координата x' в плоскости фотоприемной линейки достигнет величины $x'_{кр}$, связанной с требуемым размером заготовки L соотношением

$$x'_{кр} = k_L \cdot L + L_0, \qquad (4.3.14)$$

где k_L и L_0 – константы, зависящие от параметров, определяющих положение камер относительно края заготовки. Причем k_L является константой только для данной длины L, при смене отрубаемой длины значение этого коэффициента тоже меняется, т.е. на самом деле

$$k_L = k_L(L). \qquad (4.3.15)$$

Соотношения (4.3.14), (4.3.15) показывают, что в этом случае имеем нелинейную функцию преобразования.

Для успешной работы системы должны быть определены параметры, связывающие измеряемые и искомые величины, а именно величины k_S , S_0, k_L, L_0 для каждого ручья. Находить их аналитически нет смысла, поскольку на таких больших габаритах трудно ожидать высокой точности измерения параметров, от которых они зависят. Поэтому наиболее целесообразно определять их посредством калибровки.

Встроенная калибровка, как того требуют условия измерительной задачи, реализуется следующим образом:

– датчик сечения калибруется в начале разливки при смене кристаллизатора, поскольку новый кристаллизатор имеет погрешность изготовления гораздо меньшую, чем того требуется от результатов измерения, а износ кристаллизатора очень медленный;

– датчик длины калибруется по показаниям лазерного дальномера DIMETIX FLS (см. рис. 2.2.8), расположенного в свободной

зоне ручья перед отрубаемым краем заготовки. С его помощью строится передаточная функция датчика.

Важнейшее значение для успешного решения данной измерительной задачи имеет алгоритм обработки фотометрического профиля, полученного с помощью анализаторов размеров. Данная задача не является в этом плане стандартной, поскольку самосветимость заготовки создает особенности, которые сказываются на результате измерений. Следовательно, координата края не определяется уверенно. Поэтому алгоритм обработки должен иметь такие опции, которые позволяют преодолеть эти нежелательные особенности. Экспериментальным путем было установлено, что решить эту задачу можно с помощью следующего алгоритма:

– предварительная обработка фотометрического сигнала, включающая в себя:

○ определение рабочей области, в которой достоверно находятся края заготовки. Техническими требованиями задан допустимый диапазон рыскания заготовки ±5 мм, следовательно, область достоверного положения края заготовки занимает 10 мм. Таким образом, из сигнала на ПЗС-линейке следует отбросить участки, выходящие из области достоверного положения края,

○ проверку сигнала на пригодность к измерению, т.е. фотометрируемая область должна быть свободной от катастроф; если сигнал не пригоден к измерению (рис. 4.3.8), следует дождаться лучшего фотометрического профиля (в пределах измеряемой длины всегда можно найти профиль, пригодный к измерению),

○ нормировку фотометрического сигнала на динамический диапазон (рис. 4.3.9) в соответствии с формулой

$$I_{i\ \text{норм}} = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}, \qquad (4.3.16)$$

где I_i – значение яркости в текущем пикселе, $I_{\min}$ и $I_{\max}$ – минимальное и максимальное значения фотометрического сигнала соответственно,

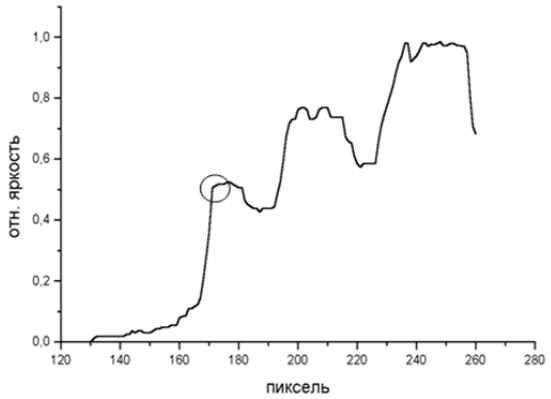


Рис. 4.3.8. Фотометрический профиль, не пригодный для обработки, поскольку содержит катастрофы

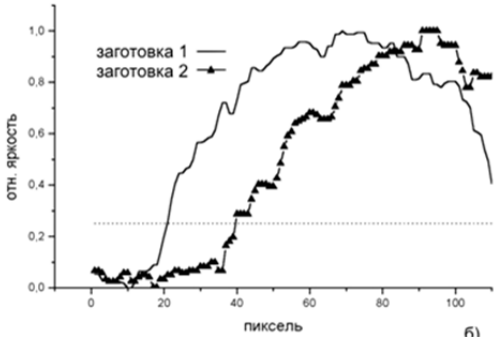


Рис. 4.3.9. Фотометрические сигналы, соответствующие разным заготовкам после нормировки на динамический диапазон сигнала

○ медианную фильтрацию для сглаживания сигнала, что приводит к подавлению одиночных выбросов и впадин (рис. 4.3.10);

– определение интервала вероятного нахождения края заготовки посредством применения нелинейного оператора Лапласа к интервалу гарантированного нахождения края, что позволяет с погрешностью в 1 пиксель определить координату края (рис. 4.3.11);

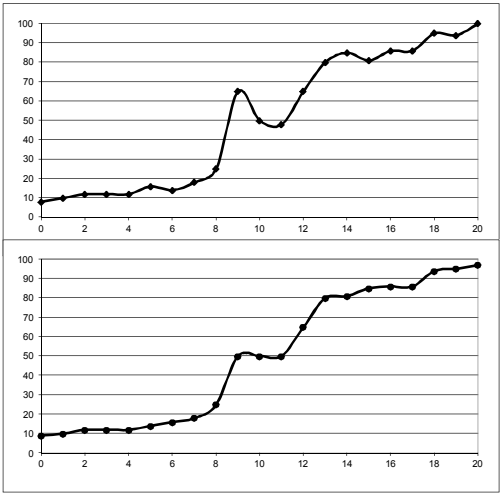


Рис. 4.3.10. Применение медианного фильтра к фотометрическому сигналу

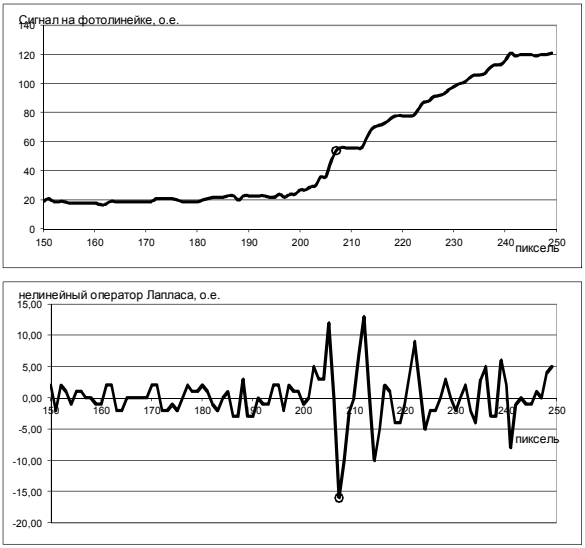


Рис. 4.3.11. Выделение края заготовки при помощи нелинейного оператора Лапласа

– уточнение положения края заготовки до 0,1 пикселя с использованием эвристических моделей (рис. 4.3.12) функции освещенности (ФО) и функции рассеяния линии (ФР):

- определение области существования ФО и ФР,
- интерполяция по методу наименьших квадратов ФО и ФР в их областях существования с использованием их эвристических зависимостей,
- экстраполяция интерполяционных полиномов за пределы области определения,
- определение координат края заготовки по координате точки пересечения интерполяционных полиномов.

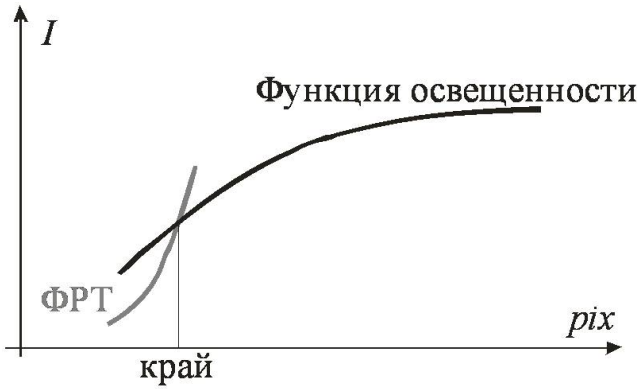


Рис. 4.3.12. Уточнение положения края заготовки с использованием экстраполяции эвристических моделей функции рассеяния и функции освещенности

Анализ погрешностей с учетом метода измерений и источников ошибок. Влияние бросков, рыскания заготовки и производственные вибрации в зоне измерения в процессе проката влияют на взаимное положение датчиков и заготовки (рис. 4.3.13). Посредством математического моделирования можно исследовать величину погрешности, возникающей в результате воздействия этих факторов на коэффициент увеличения оптической системы датчиков.

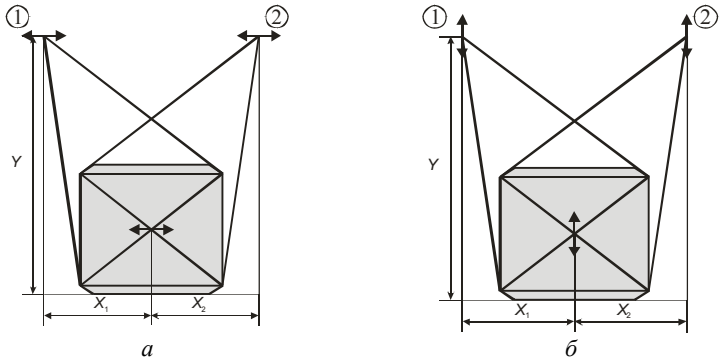


Рис. 4.3.13. Производственные факторы (условия измерений) и их воздействие на результат измерений: *а* – рыскание заготовки и горизонтальные вибрации; *б* – броски и вертикальные вибрации

Результаты моделирования представлены в виде таблицы влияния параметров (табл. 4.3.1). Значение погрешности, соответствующее граничному значению производственного фактора, выделено жирным шрифтом.

Таблица 4.3.1

Производственные факторы и их влияние на результат измерения геометрических размеров непрерывно-литой заготовки

Вид датчика	Обозначение погрешности, %	Вид фактора	Амплитудные значения изменения положения заготовки, мм			
			±1	±3	±4	±5
Датчик сечения	$\sigma_S^{г}$	Рыскания и горизонтальные вибрации	0,004	0,012	0,016	**0,020**
	$\sigma_S^{в}$	Броски и вертикальные вибрации	0,02	**0,06**	0,081	0,101
Датчик длины	$\sigma_L^{г}$	Рыскания и горизонтальные вибрации	0	0	0	**0**
	$\sigma_L^{в}$	Броски и вертикальные вибрации	0,0005	**0,0016**	0,0021	0,0026

Задача борьбы с технологическими факторами возложена на алгоритм обработки, описанный в предыдущем разделе. Поэтому оценка алгоритмической погрешности работы датчиков включает в себя и эти технологические факторы: заусенцы, окалина, самосветимость высокотемпературного объекта. Ранее было показано, что алгоритм обработки позволяет определять положение края с погрешностью до 0,1 пикселя. Отсюда можно записать для относительных погрешностей:

– для датчика сечения из (4.3.13)

$$\sigma_S^{\text{ал}} = 2\frac{2\cdot 0{,}1\cdot \Delta l_{\min}^{\text{диаг}}}{\text{c}} = \frac{0{,}4\cdot 0{,}058}{433} = 0{,}006\%, \tag{4.3.17}$$

– для датчика длины из (4.3.14)

$$\sigma_L^{\text{ал}} = \frac{0{,}1\cdot \Delta l_{\min}^{\text{кр}}}{L_{\min}} = \frac{0{,}1\cdot 0{,}56}{2700} = 0{,}004\%. \tag{4.3.18}$$

Минимально различимые отрезки, связанные с дискретизацией, были оценены ранее при выборе фотоприемной линейки. Однако алгоритм обработки позволяет получить разрешение менее 1 пикселя фотоприемной линейки. Поэтому следует считать, что погрешность, связанная с дискретизацией, входит в алгоримическую.

Значения параметров, входящих в выражения для измеряемой величины при непрямых измерениях (координаты, описывающие положение датчиков относительно измеряемой заготовки), устраняются калибровкой, реализуя тем самым комплексные измерения (см. раздел 1.1). Однако для удобства калибровки вместо точных аналитических зависимостей для нахождения искомой величины по измеряемой используются приближенные соотношения (4.3.13). Погрешности, связанные с приближениями, использованными в математической модели, были исследованы посредством математического моделирования:

– погрешность датчика сечения, связанная с изменением угла 2φ между диагоналями при износе кристаллизатора в пределах $\Delta a = \Delta b = 0{,}5$ мм, составляет величину

$$\sigma_S^{\varphi} = \frac{\Delta S^{\varphi}}{S} = 0{,}004\%; \tag{4.3.19}$$

– погрешность датчика сечения, связанная с изменением констант k_S и S_0 при износе кристаллизатора в пределах $\Delta a = \Delta b = 0{,}5$ мм, составляет величину

$$\sigma_S^k = \frac{\Delta S^k}{S} = 0{,}0025\%. \tag{4.3.20}$$

Все проанализированные здесь составляющие погрешностей являются независимыми, поэтому просуммируем их в соответствии с правилами суммирования независимых составляющих (1.2.5) и получим оценки суммарных относительных погрешностей при измерении:

– площади сечения

$$\sigma_S = \sqrt{\left(\sigma_S^{г\,2}\right) + \left(\sigma_S^{в\,2}\right) + \left(\sigma_S^{ал\,2}\right) + \left(\sigma_S^{\varphi\,2}\right) + \left(\sigma_S^{k\,2}\right)} = \\ = 0{,}064\%; \tag{4.3.21}$$

– длины заготовки

$$\sigma_L = \sqrt{\left(\sigma_L^{г\,2}\right) + \left(\sigma_L^{в\,2}\right) + \left(\sigma_L^{ал\,2}\right)} = 0{,}0043\%. \tag{4.3.22}$$

Сравнивая (4.3.21) и (4.3.22) с (4.3.2) и (4.3.4) соответственно, делаем вывод о том, что разработанные средства и методы измерения удовлетворяют условию измерительной задачи.

4.3.2. Информационно-измерительная система порезки рельсов мерной длины

Информационно-измерительная система порезки рельсов мерной длины предназначена для измерения длины рельса в процессе его обработки на пиле Вагнера в рельсобалочном цехе металлургического комбината. Целью разработки данного устройства является метрологическое обеспечение процесса изготовления рельсов мерной длины.

Формулировка задачи. Монтаж и эксплуатация системы не должны оказывать влияния на существующий технологический процесс обработки рельсов.

– Перечень номинальных длин рельсов:

5912 ± 4 мм; 6027 ± 4 мм; 6246 ± 4 мм; 6555 ± 4 мм;

7025 ± 4 мм; 7069 ± 4 мм; 7260 ± 4 мм; 7330 ± 4 мм;

8625 ± 4 мм; 8340 ± 4 мм; 8355 ± 4 мм; 9121 ± 4 мм;

9183 ± 4 мм; 10539 ± 4 мм; 10790 ± 4 мм;

12500 ± 4 мм; 13000 ± 4 мм; 18000 ± 4 мм;

24000 ± 4 мм; 24800 ± 4 мм; 24920 ± 4 мм;

11770 ± 6 мм; 11823 ± 6 мм; 12500 ± 6 мм; 13000 ± 6 мм;

18679 ± 6 мм; 18770 ± 6 мм; 19599 ± 6 мм; 22925 ± 6 мм;

25000 ± 4 мм и др.

– Система должна обеспечить остановку рельса с помощью транспортного рольганга и выдавать команду на рез, так что после ее отработки получается рельс мерной длины. Погрешность выполнения порезки задается равной ±3 мм.

– Для выполнения этой задачи в системе должны быть предусмотрены программируемые режимы:

- установка позиции 1 реза,
- установка позиции 2 реза,
- установка скоростей прогона, транспортировки и доводки проката,
- выбор одного из режимов реза,
- динамическое отображение текущего положения рельса и его скорости,
- отображение текущего состояния станка, приводов, датчика положения.

Условия измерений:

– Температура в помещении РБЦ в течение года может изменяться в пределах от –30°С до +60°С.

– Скорость транспортировки рельса – 1 м/с.

– Подающий рольганг управляется с помощью электродвигателей АРМ 7430 в количестве 23 шт.

– Питание рольганговых двигателей 20 Гц, 220 В, ток в цепи – 11 А.

– Система удержания рельса гарантирует величину бросков и рысканий в пределах ±15 мм.

Источники ошибок:

– Броски, рыскания рельса в процессе транспортировки.

– Износ транспортных валков и, как следствие, проскальзывание рельса в процессе его транспортировки.

– Условия эксплуатации: температура, паразитные засветки, шероховатость поверхности.

Выбор метода и средств измерений с учетом условий измерений. В силу особенностей цеха и условий эксплуатации решить эту задачу можно только с помощью прямых мониторинговых измерений координат положения торца транспортируемого рельса. В качестве средства измерений использован лазерный дальномер DIMETIX FLS (см. рис. 2.2.12), который предназначен для работы как с шероховатой поверхностью, так и с объектами с высокой отражающей способностью, поскольку в нем имеется автоматическая подстройка на фотометрический уровень сигнала. Прибор имеет все необходимые возможности для работы в системе:

– ***режим трекинга*** для обеспечения мониторингового слежения за координатой торца рельса;

– коррекцию измеряемой дистанции с учетом фактической температуры;

– необходимые интерфейсные протоколы;

– необходимые размеры пятна на всей дистанции измерения.

Последнее является очень важным моментом, поскольку малый диаметр пятна не обеспечивает требуемого усреднения по шероховатости поверхности головки катания. В то же время большое пятно может соскользнуть с нее из-за рысканий и бросков рельса в процессе транспортировки. Оптимальный размер пятна – 10–15 мм исходя из формы головки катания и возможностей системы удержания.

Система позиционирования и порезки (рис. 4.3.14) состоит из модуля центрального контроллера, лазерного датчика текущего положения (DIMETIX FLS), модуля индикации-управления и четырех частотных приводов. Для передачи информации между модулями системы используется последовательный канал связи.

Оператор набирает на клавиатуре консоли требуемые параметры порезки, в том числе и отрезаемую длину, и запускает режим

автоматической порезки с пульта управления и индикации. С этого момента система работает в автоматическом режиме (рис. 4.3.15).

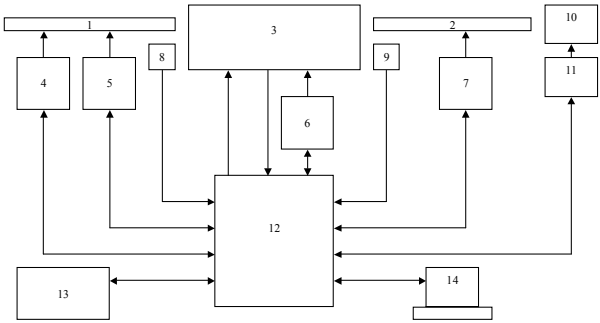


Рис. 4.3.14. Конфигурация системы позиционирования и обеспечения порезки рельса мерной длины: *1* – подающий рольганг; *2* – приемный рольганг; *3* – пила Вагнера; *4*, *5* – частотные приводы подающего рольганга; *6* – частотный привод дополнительного ролика пилы Вагнера; *7* – частотный привод приемного рольганга; *8*, 9 – роликовый фотоимпульсный датчик установки первого реза; *10* – лазерный дальномер; *11* – контроллер лазерного дальномера; *12* – контроллер системы; *13* – пульт управления и индикации для отладки и диагностики системы; *14* – консоль оператора для настройки и программирования параметров системы

Первым включаются привода подающего рольганга, и рельс подается на позицию первого реза. Лазерный дальномер располагается в специальной кабине в конце приемного рольганга, и расстояние от него до рельса на подающем рольганге настолько большое, что возможности DIMETIX FLS недостаточны для уверенного измерения расстояния. Ситуация усугубляется тем, что рельсы, расположенные на подающем рольганге, имеют необработанные торцы. Поэтому для вывода рельса в позицию первого реза используется система определения положения рельса первого уровня, состоящая из измерительных роликов с фотоимпульсными датчиками. Первый из них расположен перед пилой Вагнера, второй – после. По достижении головной части рельса первого ролика (первый фотоимпульсный инкрементный датчик начинает отсчет) привод подающего рольганга начинает отрабатывать режим торможения. По результатам формируется команда остановки пода-

ющего рольганга. Рельс останавливается, когда начинает работать инкрементный датчик второго ролика. В момент остановки положение рельса фиксируется специальным удерживающим устройством и подается команда на включение пилы, которая производит первый рез. Факт появления обрези в бункере свидетельствует об окончании операции, и диск пилы отводится вверх. В этот момент включается лазерный дальномер.

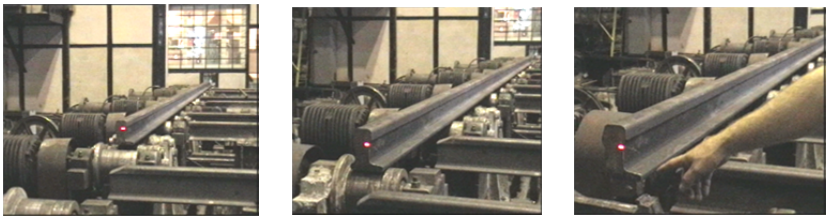


Рис. 4.3.15. Работа лазерного дальномера в системе порезки рельсов мерной длины. Рука указывает на отметку, у которой остановился рельс. Видно смещение пятна дальномера по головке рельса вследствие его изгиба

На стадии наладки оборудования дальномер юстируется таким образом, что его луч находится на головке рельса все время, когда он транспортируется приемным рольгангом. Система удержания рельса, являющаяся неотъемлемым атрибутом приемного рольганга, настраивается так, что траектории транспортировки рельса всегда проходят по одному и тому же пути. Это обеспечивает соблюдение принципа Аббе. Поэтому когда включается лазерный дальномер в первый раз, он гарантированно попадает на головку рельса и измеряет расстояние до нее. Это расстояние уже измеряется уверенно ввиду высокого качества реза пилы Вагнера, и этот отсчет принимается за 0-пункт. То есть с этого момента дальномер в режиме трекинга постоянно измеряет положение головки от этого положения. После установки 0-пункта удерживающее устройство пилы освобождает рельс, приводы подающего и приемного рольгангов включают маршевый режим транспортировки рельса, рельс вводится в зону удержания и транспортируется с максимальной постоянной скоростью до зоны торможения. Начало зоны торможения определяется при настройках

системы и является уставкой, которая хранится в памяти контроллера системы. Поэтому как только дальномер определил, что рельс достиг зоны торможения, отключаются приводы подающего рольганга и включается совместный режим работы дальномера и привода приемного рольганга.

Этот режим заключается в том, что совместной работой дальномера и привода приемного рольганга обеспечивается уравнение движения рельса таким образом, что, несмотря на возможные проскальзывания или локальные ускорения, рельс выводится в нужную точку приемного рольганга и останавливается на расстоянии заданного мерного реза от 0-пункта. Причем движение рельса на ответственном финальном участке этой траектории должно быть таким, что момент остановки должен быть определен экстраполяцией уравнения движения. В момент остановки привод включает режим удержания двигателей постоянным током от случайно неконтролируемого вращения роликов, а на пиле включается удерживающее устройство, жестко фиксирующее рельс. После этого отключается лазерный дальномер и включается пила Вагнера, производится второй рез, после чего рельс мерной длины транспортируется на инспекторские стеллажи. Система приводится в режим готовности к приему следующего рельса.

Все действия системы производятся при участии центрального процессора, расположенного в консоли оператора. При отладке системы оптимизируются режимы ее работы, как-то:

– маршевая скорость перемещения рельса по рольгангу;

– положение зоны торможения;

– режим экстраполяции положения рельса в области ответственного участка;

– что делать, если возникла нештатная ситуация, например, дальномер потерял рельс,

– и т.д.

и программируются с пульта управления и индикации.

Анализ погрешностей с учетом метода измерений и источников ошибок. Рельс, порезанный описанной системой, может оказаться не той длины, которая предписана оператором при наборе на консоли. Причин этого несоответствия много:

– погрешность работы дальномера;

– зависимость времени измерения от расстояния до объекта и его скорости;

– внезапные проскальзывания рельса на приводных роликах рольганга в силу его непрямолинейности или эллиптичности роликов;

– непредсказуемое поведение рельса во время ответственной доводки

– и т.д.,

и разобраться в их взаимодействии достаточно сложно и тем более сложно установить аналитически погрешность работы устройства. Потому этот вопрос решается только экспериментально. Особенностью этой измерительной задачи является то, что произвести обработку данных по традиционному сценарию не представляется возможным, поскольку фактически после того, как рельс отрезан, задача становится детерминированной и повторить эксперимент нельзя. То есть мы имеем дело только с одним измерительным наблюдением по отношению к отдельно взятому рельсу. Поэтому, имея перед собой выборку порезанных рельсов и измерив их фактические размеры, можно лишь сказать, выходят эти размеры или не выходят за границы, предписанные условиями измерительной задачи, т.е. ±3 мм.

Пример 4.3.1. В процессе отладки системы была порезана партия рельсов в автоматическом режиме с использованием описанной системы. Рельсы резались разной длины, в разное время, при разной температуре, т.е. выборка является представительной. После порезки их фактические размеры были определены на инспекторских стеллажах с помощью рулетки измерительной 2-го класса точности. Результаты представлены в табл. 4.3.2.

Вывод, который можно сделать на основании сопоставления данных таблицы, заключается в том, что погрешность порезки в данной партии не выходит за предписанные границы.

Однако если речь идет о средстве измерения, а именно с таковым мы имеем дело, то необходимо указать, какова погрешность этого средства измерения и с какой доверительной вероятностью она определена, т.е. произвести оценку точности метода и средства

измерений. Для этого обработаем результаты табл. 4.3.2 по алгоритму, представленному в разделе 1.1, а именно:

– рассчитаем среднее значение погрешности по формуле

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}(x_i - x_0) = -0{,}25 \text{ мм};$$

– вычислим среднеквадратичную ошибку среднего

$$s_{x_{\text{ср}}} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12}\left((x_i - x_0) - x_{\text{ср}}\right)^2}{12 \cdot 11}} = \pm 0{,}7 \text{ мм};$$

– примем уровень доверительной вероятности $\text{p}_{\text{д}} = 0{,}99$, получим для 12 измерений из табл. 1.2.4 коэффициент Стьюдента, равный $t(p_{\text{д}}, n) \approx 3$, и определим, что доверительный интервал, в который с доверительной вероятностью 99% попадают правильно порезанные рельсы, составляет $\Delta x_{\text{д}} = \pm 2{,}1$ мм.

Таблица 4.3.2

Представительная выборка порезанных рельсов

Номер рельса	**Порезанная длина x_i, мм**	**Измеренная длина x_0, мм**	**Погрешность порезки $\Delta x = x_i - x_0$, мм**
1	12500	12502	–2
2	12060	12063	–3
3	11825	11824	+1
4	4255	4253	+2
5	8450	8447	+3
6	10895	10893	+2
7	11220	11222	–2
8	6550	6547	+3
9	9420	9423	–3
10	12900	12899	+1
11	5500	5503	–3
12	8120	8119	+1

Это и есть оценка погрешности работы системы с доверительной вероятностью 99%. Поскольку $\Delta x_{\text{д}} < 3$ мм, качество измерений удовлетворяет условиям данной измерительной задачи.

Можно рассуждать несколько иначе. Если среднеквадратичная ошибка среднего составляет $s_{x_{\text{ср}}} = \pm 0{,}7$ мм, то за границы доверительного интервала можно принять $\Delta x_{\text{д}} = 3$ мм. Тогда по значе-

нию коэффициента Стьюдента $t(p_д, n) = 4{,}3$ можно определить вероятность правильно порезанных рельсов. Из табл. 4.3.2 она для данного устройства составляет $p_д = 0{,}999$, т.е. бракованным может быть каждый тысячный рельс!!!

4.3.3. Информационно-измерительная система измерения прямолинейности рельсов в потоке

Информационно-измерительная система измерения прямолинейности рельсов в потоке предназначена для измерения регулярных отклонений формы поверхности головки катания от прямолинейной, сформировавшихся под действием технологических факторов.

Формулировка задачи. При этом следует отделить указанные ошибки от искривлений, связанных со случайными деформациями рельса в процессе его транспортировки на транспортном рольганге рельсобалочного цеха:

– Монтаж и эксплуатация системы не должны оказывать влияния на существующий технологический процесс рельсобалочного цеха.

– Непрямолинейность головки катания рельсов может составлять 0,3–5 мм.

– Устройство должно быть бесконтактным, иметь встроенную калибровку.

– Сигнал, характеризующий регулярные отклонения от прямолинейности, не должен зависеть от производственных факторов и таких технологических факторов, как окалина и шероховатость.

– Погрешность измерения – не более ±150 мкм.

Условия измерений:

– Диапазон температур ±35°С.

– Высокая запыленность.

– Транспортный рольганг с нерегулярно включающимися из-за эллиптичности роликами.

– Расстояние между роликами рольганга 0,75 м.

– Скорость транспортировки рельсов 0,5–2 м/с.
– Длина рельса 75 м.
– Броски рельсов в зоне удержания ±10 мм.
– Рыскание рельса в зоне удержания ±10 мм.

Источники ошибок:

– Погрешности датчиков.
– Влияние запыленности.
– Влияние вибраций и звуковых колебаний.
– Влияние машин и механизмов РБЦ.
– Броски рельсов в процессе транспортировки.
– Рыскания рельсов в процессе транспортировки.
– Погрешности алгоритма обработки данных.

Выбор метода и средств измерений с учетом условий измерений. Для построения данной системы следует выбрать базовый метод (см. раздел 3.3.6), поскольку рельс является достаточно протяженным объектом (согласно условиям его длина составляет 75 м). На такой большой длине, несмотря на высокий момент инерции, этот объект является достаточно гибким. С точки зрения измерительной задачи эта гибкость проявляется в том, что при нерегулярном включении роликов рольганга ввиду их выработки и эллиптичности рельс изгибается случайным образом, и на поверхности головки катания возникает ошибка формы поверхности, имеющая нерегулярный характер. Эти деформации могут быть настолько значительны, что на их фоне регулярная ошибка формы поверхности будет незаметной. Пространственная частота нерегулярной ошибки определяется расстоянием между роликами 0,75 м. Для ее фильтрации согласно соотношению (3.3.43) следует выбрать размер измерительной базы $b = 2 \cdot 0{,}75 = 1{,}5$ м. Для трехдатчиковой системы со средним расположением датчика такой выбор базы позволит отделить регулярные ошибки от искривлений, связанных со случайными деформациями рельса в процессе его транспортировки на транспортном рольганге рельсобалочного цеха.

В качестве сенсоров положения поверхности выберем фотометрические датчики положения границы (см. рис. 4.2.10), так как их схема обеспечивает устойчивость измерительного сигнала к положению объекта вдоль направления измерений (рысканию рельса).

Влияние бросков устраняется за счет того, что измеряемым сигналом является линейная комбинация сигналов трех датчиков. Поскольку система фиксации рельса в зоне измерения обеспечивает его удержание в пределах ±10 мм, то за размер поля датчика следует принять 25 мм. Такая идеология построения системы позволяет реализовать бесконтактные оптические косвенные измерения отклонений от прямолинейности.

Функциональная схема устройства [78] для контроля прямолинейности поверхности катания рельса при прохождении его по рольгангу в положении лежа на подошве приведена на рис. 4.3.16.

Устройство состоит из следующих составных частей: измеряемого рельса *1*, расположенного с возможностью поступательного движения на рольганге *2*, и трех источников оптического излучения – I, II, III. Валки рольганга выполняют роль опор, а источники I и III установлены на расстоянии $L_1 + L_2 = b = 1{,}5$ м друг от друга.

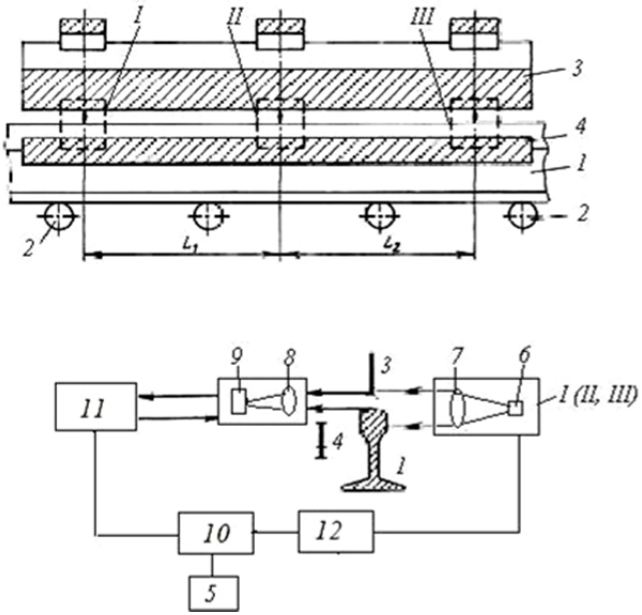


Рис. 4.3.16. Принципиальная схема устройства контроля прямолинейности рельсов

Каждый источник оптически и электрически связан с одним приемником, который содержит в своем составе аналого-цифровой преобразователь *11* для оцифровки фотометрического сигнала фотодиода приемника и локальный контроллер *10* для сбора и предварительной обработки информации, полученной с АЦП, и управления платой излучателя. Верхний *3* и нижний *4* ножи, предназначены для ограничения светового потока, проходящего от источника оптического излучения к приемнику. Таким образом формируется эталонный фотометрический сигнал. Ножи представляют собой линейки с прямолинейным скошенным краем и образуют калиброванный просвет, равный 35 мм, одинаковый для всех датчиков. Этот просвет является встроенным внутренним эталоном (калибром) системы и подлежит периодической поверке. Операционный блок осуществляет сбор информации со всех приемников и выдает результат измерений для формирования протокола измерений в центральный процессор. Устройство работает следующим образом. Перед измерением каждого нового рельса по команде операционного блока *5* осуществляется автоматическая калибровка каждого приемника. Процедура калибровки выглядит следующим образом. Световой поток от каждого источника I, II, III в отсутствие рельса *1* ограничен верхним *3* и нижним *4* ножами. Расстояние между ними выбрано $Y_0 = 25$ мм. Световой поток от источников I, II, III, соответствующий калибрующему зазору, попадая в приемники I, II, III, преобразуется фотодиодами приемников *9* в фототок, а затем с помощью встроенных в них АЦП – в цифровой код. Путем совместной работы АЦП и локального контроллера, встроенного в каждый приемник, оптимизируется режим излучения светодиода *6* в каждом источнике посредством управления питанием *12* под максимальную емкость АЦП и вырабатывается цифровой сигнал $N_0(i)$, где $i = 1, 2, 3$ – номер приемника светового излучения. Собранная и предварительно обработанная информация передается в операционный блок *5*, где вычисляется масштабный коэффициент $Y_0/N_0(i)$. Наличие такой самокалибровки гарантирует выдачу приемником светового излучения текущей ординаты контролируемого рельса с одинаковой погрешностью в каждом приемнике. Это дает возможность скомпенсировать до необходимого уровня влияние внешних факторов, например запыленности, на работу каждого приемника.

При появлении контролируемого рельса *1* в измерительной зоне световой поток, ограниченный с одной стороны верхним ножом *3*, а с другой – движущимся рельсом *1*, оцифровывается каждой группой приемников I, II, III и передается в операционный блок *5*. По полученным отсчетам $N(i)$ рассчитываются ординаты поверхности катания рельса $Y(i) = N(i)\ Y_0/N_0(i)$, которые используются в качестве исходной информации для расчета отклонений от прямолинейности поверхности, который производит операционный блок *5*, по формуле

$$Y(l) = \frac{Y(1)+Y(3)}{2} - Y(2), \qquad (4.3.23)$$

где l – координата на поверхности рельса, формируемая в центральном процессоре системы по внутреннему времени системы, начинающем течь с момента попадания рельса в поле зрения первого датчика и заканчивающегося с момента выхода из последнего.

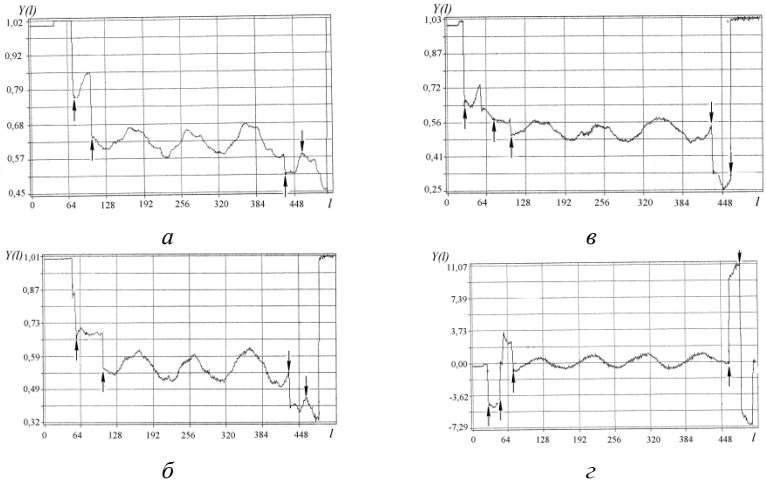


Рис. 4.3.17. Фотометрические сигналы датчиков информационно-измерительной системы измерения прямолинейности рельсов в потоке: *а* – сигнал первого датчика, отчетливо видны значительные броски амплитудой до 5,2 мм; *б* – сигнал второго датчика, отчетливо видны значительные броски амплитудой до 4,1 мм; *в* – сигнал третьего датчика, отчетливо видны значительные броски амплитудой до 5,9 мм; *г* – суммарный сигнал непрямолинейности, сформированный после операционного блока. Стрелкой отмечены броски

Собственно здесь, в операционном блоке, и реализуется базовый метод.

Эффективность трехдатчиковой схемы в части устойчивости к производственным факторам иллюстрируется протоколами реальных измерений, представленными на рис. 4.3.17.

Из анализа этих графиков следует, что пространственная частота волнистости составляет 0,22 мм$^{-1}$, что соответствует условию оптимальной передачи пространственных частот (3.3.45) измерительной базой размером $b = 2 \cdot 0{,}75 = 1{,}5$ м.

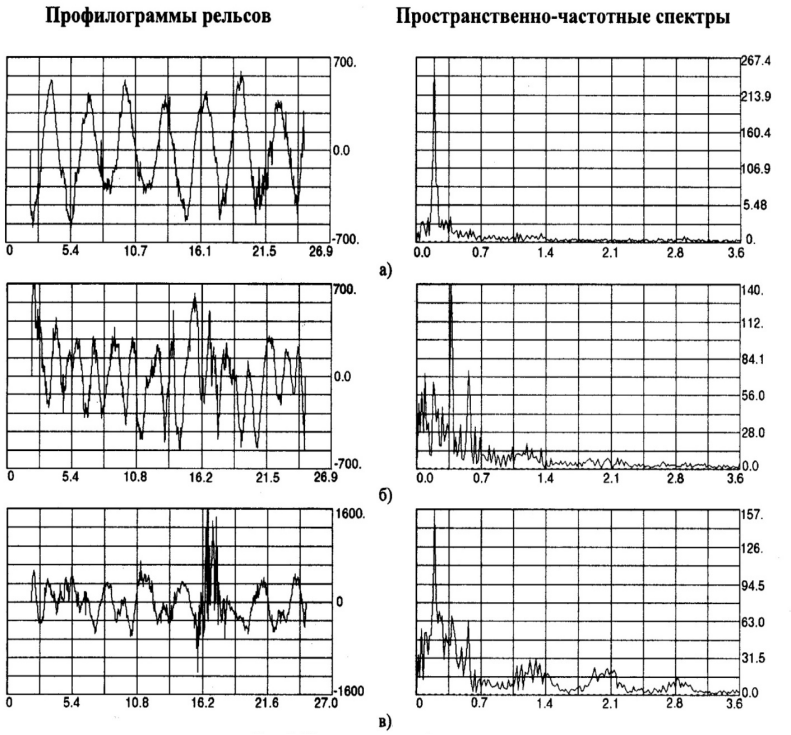


Рис. 4.3.18. Характерные профилограммы рельсов и соответствующие спектры: *а* – почти чистый сигнал волнистости; *б* – переправленный рельс; *в* – рельс с сильной шероховатостью

Дальнейшая обработка [77] полученных профилей связана с устранением влияния технологических факторов на результат измерений, таких как шероховатость поверхности, окалина и др. В разделе 3.3.5 описан формальный метод фурье-преобразования для разделения ошибок формы поверхностей по причинам их происхождения. В этом случае амплитуда соответствующих гармоник может быть принята за характеристику поверхности, усредненную по апертуре. На рис. 4.3.18 представлены профилограммы нескольких рельсов, имеющих характерные особенности, и их пространственно-частотные спектры.

Обработка результатов по большому количеству рельсов позволила выделить частоты, характерные для различных технологических факторов. Эти результаты приведены в табл. 4.3.3.

Таблица 4.3.3

Технологические факторы и пространственные частоты на профилограммах рельсов

Характерные особенности профиля рельса	**Волнистость**	**Высокочастотная волнистость (переправленный рельс)**	**Наклон оси симметрии (скрученность)**	**Шероховатость**
Пространственная частота	0,22 мм$^{-1}$	0,44 мм$^{-1}$	0,08 мм$^{-1}$	1,1–1,4 мм$^{-1}$, 1,8–2,3 мм$^{-1}$
Технологический фактор	Ролеправильная машина	Несколько проходов через ролеправильную машину	Прокат	Окалина, задиры поверхности

Данные таблицы показывают, что частоты достаточно хорошо разделены по положению в спектре, следовательно, значения соответствующих амплитуд гармоник могут быть использованы для оценки характерных отклонений от прямолинейности, например волнистости. Такая характеристика обладает устойчивостью к технологическим факторам, что иллюстрируют данные, приведенные в табл. 4.3.4.

Анализ погрешностей с учетом условий эксплуатации. В предыдущем разделе было показано, что такие источники по-

грешностей, как производственные технологические факторы, за счет выбранного метода измерений в данном техническом решении средства измерений устранены. Сюда относятся: запыленность помещения, броски и рыскания рельсов в пределах возможностей устройства удержания, нерегулярность расположения опор, влияние звуковых колебаний и производственных вибраций, окалина и задиры поверхности. Несмотря на все эти достоинства, в силу того, что измерения являются косвенными и совместными, погрешность системы должна быть оценена методом сравнения результатов, полученных иным альтернативным методом.

Таблица 4.3.4

Результаты математической и физической обработки сильно шероховатой поверхности головки катания (рис. 4.3.18, *в*)

Вид обработки рельса	**Амплитуда непрямолинейности, оцененная по $Y(l)$, мкм**	**Амплитуда волнистости, определнная по спектру, мкм**	**Спектр мощности шероховатости, %**
Без обработки	900	157	62,5
С использованием оконной математической фильтрации	800	158	40
С использованием математической фильтрации на высоких частотах	700	159	6,51
С механической обработкой металлическими щетками	700	157	55,95
С механической обработкой металлическими щетками 2 раза	500	158	51,9

В практике рельсобалочного цеха принят прямой метод аттестации рельсов на волнистость на инспекторских стеллажах. В этом случае волнистость определяется путём накладывания стальной 1 500 мм линейки и определения минимальных и максимальных отклонений с помощью концевой меры-щупа. Рисунок 4.3.19 показывает, что результат таких альтернативных измере-

ний не может быть принят в качестве аттестационного показателя, поскольку сильно зависит от шероховатости поверхности.

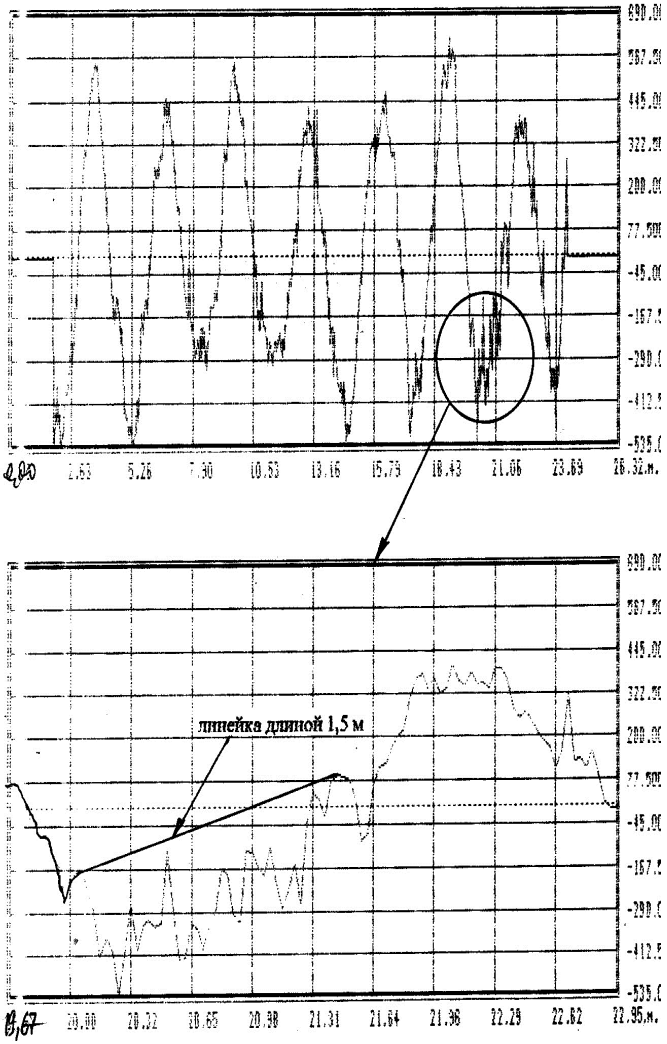


Рис. 4.3.19. Аттестация шероховатого рельса с помощью 1 500 мм линейки

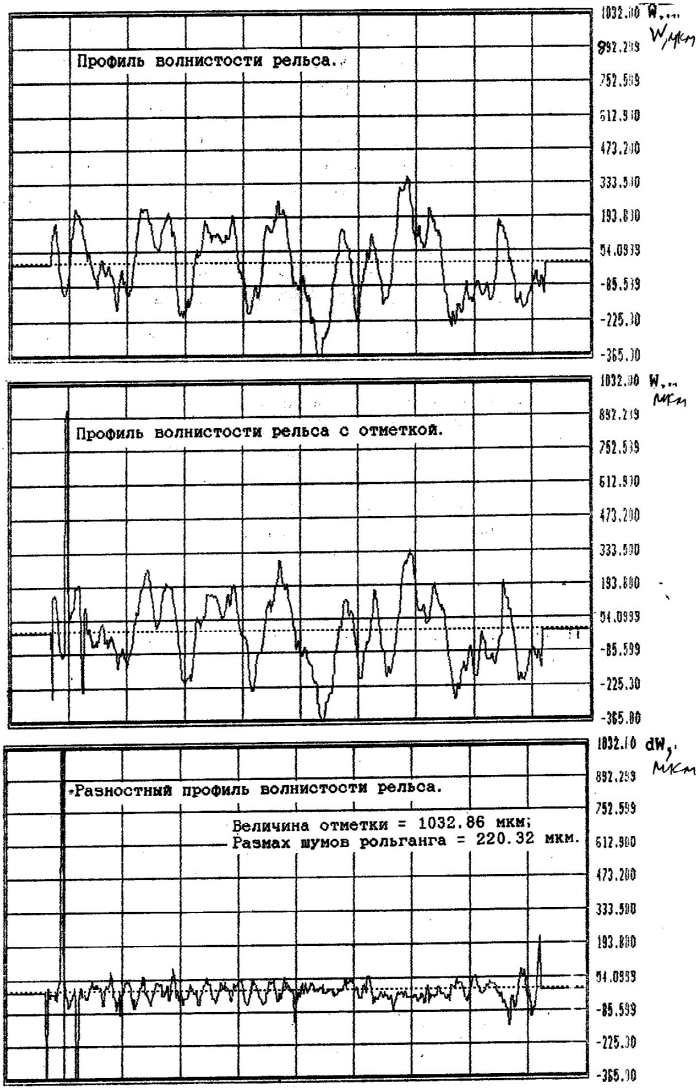


Рис. 4.3.20. Результаты аттестации системы
на достоверность и повторяемость данных измерений

Поэтому была разработана собственная методика аттестации системы с помощью калиброванной меры толщиной 1 мм, наклеиваемой на поверхность головки катания рельса. Результаты этой аттестации приведены на рис. 4.3.20. Анализ этих графиков показывает, что погрешность измерения размеров не превосходит 35 мкм, повторяемость профилей (шумы рольганга) ±110 мкм, что удовлетворяет условиям задачи.

4.4. Голографическая (информационно-измерительная) система для измерения содержания планктона в среде обитания

Формулировка задачи. Голографическая (информационно-измерительная) система для измерения содержания и определения видового состава планктона в среде обитания предназначена для обследования акватории с надводного судна-носителя на предмет оценки кормовой базы промысловых рыб посредством регистрации данных и архивирования, а также составления карт с нанесением на них изолиний плотности распределения мезопланктона.

Функционально система разработана для сбора информации об исследуемом планктоне, ее предварительной обработки, сохранения в устройстве записи информации и / или передачи данных на основное зондирующее (несущее, базовое) устройство или непосредственно на персональный компьютер (ПК). Предполагается возможность работы системы в режимах: буя, буксировки, вертикального зондирования и / или в составе судовой проточной измерительной системы.

При этом:

– диапазон измерения размеров частиц планктона, мм 0,125–15
– диапазон частоты отсчетов, Гц 20–80
– размер объема среды, в котором производят измерения, л/с 2,5–10
– глубина, м 0–2000
– измерениям подлежат:

○ распределение частиц по размерам,

○ содержание частиц в единице объема (концентрация биомассы в 1 л воды),

○ видовой состав.

Условия измерений обусловлены естественной средой пребывания планктона, при этом:

– предполагается обеспечить процесс невозмущающих измерений параметров частиц;

– необходимо учесть различную плотность и загрязненность воды в разных местах измерений (различных горизонтах);

– необходимо принять во внимание температуру воды, и воздуха в районе измерений, т.е. обеспечить диапазон измерений при внешней температуре –10...+40°С.

Данная информационно-измерительная система должна быть применима для работы в условиях эксплуатации морских судов, в связи с этим возникают следующие ограничения условий измерения:

– массогабаритные характеристики составных частей комплекса должны быть минимальны;

– получаемые результаты автоматически или по выбору оператора должны передаваться в интегрированную систему НИС (научно-исследовательское судно) для дальнейшей обработки и архивирования;

– напряжение питания средств измерений постоянное – 12 В от батарей аккумуляторов;

– необходимость интегрирования (механическое крепление и программно-аппаратное сопряжение) погружаемого устройства с наиболее распространенными в отрасли зондирующими (СТД-зонд с кассетой батометров) и буксируемыми океанологическими комплексами, соединение с которыми обеспечивается через глубоководные герметичные разъемы.

Возможные источники ошибок:

– Влияние светового излучения на живой биологический объект измерений, что может привести к нарушению естественного пространственного распределения планктона (координаты, концентрация).

– Непостоянство оптических характеристик среды обитания объекта измерений: прозрачность, показатель преломления.

– Небольшая величина измеряемого объема, не обеспечивающая представительность результатов измерения за одну экспозицию.

– Необходимость использования коротких экспозиций, так как движение планктона в процессе экспозиции может привести к размытию восстановленных впоследствии голографических изображений частиц.

Выбор метода и средств измерений с учетом условий измерений. Для реализации прямого невозмущающего измерения использован голографический метод регистрации с последующим просмотром восстановленного изображения. Вариант технической реализации этого метода показан на рис. 4.4.1.

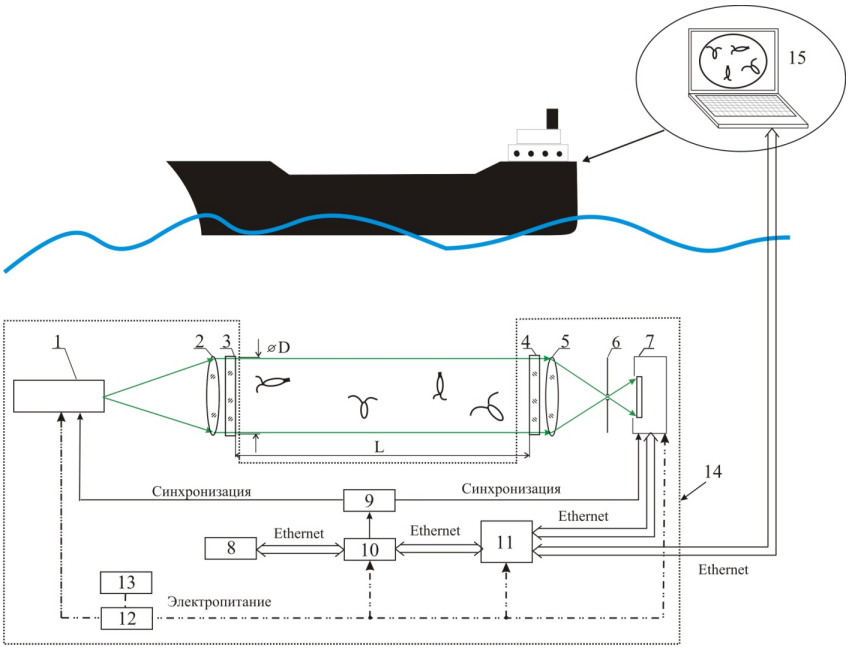


Рис. 4.4.1. Схема голографической информационно-измерительной системы реального времени для измерения содержания планктона в воде

Запись голограмм водного объема производится с помощью погружаемого устройства *14* (ПУ), которое предназначено для регистрации информации об исследуемом планктоне в виде цифровой осевой голограммы Габора, ее предварительной обработки, сохранения в устройстве записи информации и / или передачи данных на основное зондирующее устройство, в которое интегрировано ПУ (например, СТД-зонд), и / или непосредственно на бортовой компьютер (БК) НИС *15* (рис. 4.4.1).

Основными структурными элементами погружного устройства являются: лазерный излучатель *1*; матричное фотоприемное устройство *7*; центральное процессорное устройство *10* (ЦП); постоянное запоминающее устройство *8* (ПЗУ); блок синхронизации *9*, блок интерфейсов *11* (БИ); блок питания *12* (БП); аккумуляторная батарея *13* (АБ). Все эти структурные элементы скомпонованы в герметичном погружаемом корпусе *14*. Диафрагма *6* может устанавливаться как пространственный фильтр с целью повышения контраста слабоконтрастных изображений планктонных частиц. При необходимости эта диафрагма может использоваться и для организации телецентрического хода лучей при проведении оптических измерений размеров методом теневого изображения.

В качестве источника света, освещающего исследуемый объем воды с планктоном, выбран импульсный полупроводниковый лазер МЛ126-0660-050 (производства компании LT&T, регулируемая мощность до 50 мВт, $\lambda = 0{,}66$ мкм). Пучок лазерного излучения, сформированный линзой *2*, просвечивает исследуемый объем с взвешенными в нем частицами. Рассеянное на частицах излучение (предметная волна) и излучение, прошедшее среду без рассеяния на частицах (опорная волна), формируют интерференционную картину, распределение интенсивности которой регистрируется на светочувствительной матрице камеры *7* (рис. 4.4.1). Объем среды, голограмма которого регистрируется за один импульс лазера (измерительный объем), определяется диаметром полевой диафрагмы $D = 22{,}5$ мм (диаметр оправы объектива *5*) и расстоянием между иллюминаторами *3* и *4* погружного устройства. В рассматриваемом ПУ это расстояние составляло $L = 294$ мм. Для схемы, представленной на рис. 4.4.1, объем составляет

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L = 0{,}12 \text{ л}. \qquad (4.4.1)$$

В качестве фотоприемного устройства *7* используется монохромная смарт-камера VRmD3FC-42M-COB компании VRmagic, выполненная на базе CMOS светочувствительной матрицы 2 048×2 048 пикселей с размером пикселя 5,5×5,5 мкм. Разрядность камеры 14 бит, минимальная экспозиция – 6 мкс, максимальная частота срабатывания камеры составляет 21 кадр в секунду в режиме цветности Mono8.

Камера регистрирует в плоскости светочувствительной матрицы и передаёт в ЦПУ распределение интенсивности лазерного излучения, структура которого представляет собой результат интерференции опорной и предметной волн. Пример такой «тонкой» структуры распределения интенсивности в теневом изображении круглой непрозрачной частицы приведен на рис. 4.4.2. С точки зрения голографии такая структура и представляет собой осевую голограмму частицы.

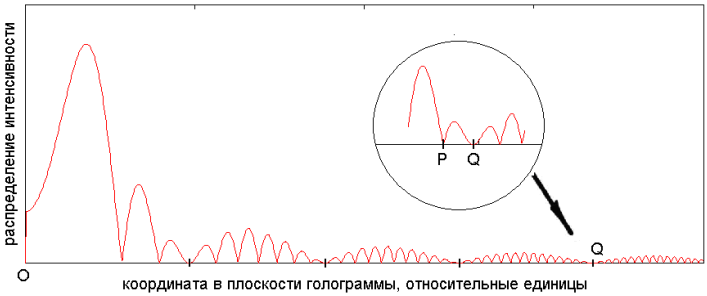


Рис. 4.4.2. Тонкая структура теневого изображения частицы (распределение интенсивности в осевой голограмме частицы) [79]

Записанная матрицей интерференционная картина представляет собой цифровую голограмму Габора (осевая схема), если разрешения матрицы, ее размеров и разрядности (уровней серого) достаточно для того, чтобы зарегистрировать неискаженную тонкую структуру этого распределения интенсивности. В работе [79] показано, что для сферической частицы размером *d*, расположенной на

расстоянии z от плоскости регистрации, это реализуется, когда выполняются следующие соотношения:

– для размера пикселя матрицы

$$r \le {}^{d}/_{10}, \tag{4.4.2}$$

где d – размер частицы;

– для размера матрицы

$$R_0 \ge R_{\min} = \frac{2\lambda z}{d}. \tag{4.4.3}$$

Здесь λ – длина волны освещающего света; z обозначает расстояние от ПЗС-матрицы до частицы или до ее оптического изображения, построенного объективом *5*; $2R_{\min}$ – минимальный необходимый размер матрицы.

При реализации осевой схемы голографирования без объектива *5* (рис. 4.4.1), т.е. при реализации классической схемы Габора, использование этих оценок указывает, что голограмма будет уверенно зарегистрирована на используемой матрице, если размер частицы не более 55 мкм и расположена она на расстоянии 234,6 мм. То есть рассматриваемое ПУ позволяет зарегистрировать голограмму для всех частиц размером более 55 мкм, попадающих в измерительный объем.

Оптическая система состоит из иллюминаторов, обрезающего светофильтра (например, из стекла КС 13) для ликвидации паразитной засветки в видимой области светового спектра и объектива *5*.

Объектив *5*, расположенный перед камерой, служит для согласования размеров светочувствительной матрицы и размеров поперечного сечения регистрируемого объема. Помимо этого, в заднем фокусе этого объектива может быть установлен пространственный фильтр (диафрагма *6*) с целью повышения контраста слабоконтрастных изображений планктонных частиц. При необходимости эта диафрагма может использоваться и для организации телецентрического хода лучей при проведении оптических измерений размеров методом теневого изображения.

При регистрации традиционной цифровой голограммы по схеме Габора диафрагма *6* должна быть выведена из оптической схемы. Оценим возможности регистрации для этого случая.

Из формулы Ньютона для идеальной линзы (П.12)

$$x' = -\frac{f'^2}{x}.$$

Тогда для объектива с фокусным расстоянием $f' = 35$ мм, который используется в данной реализации ПУ, для частицы, расположенной на расстоянии x ≈ -10 мм от объектива, получим

$$x' \approx 122{,}5 \text{ мм}. \tag{4.4.4}$$

Для матрицы смарт-камеры VRmD3FC-42M-COB имеем:

– размер частицы, тонкая структура теневой картины (голограмма Габора) которой может быть уверенно зарегистрирована, как и в предыдущей оценке:

$$d \geq 10 \cdot 5{,}5 = 55 \text{ мкм}; \tag{4.4.5}$$

– минимальный полуразмер матрицы, достаточный для регистрации голограммы Габора этой частицы, при условии расположения ее изображения на расстоянии $z \approx x' = 122$ мм от матрицы, составляет около 3 мм, что существенно меньше половины размера используемой матрицы.

$$R_0 = 5{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 1024 = 5{,}6 \text{ мм} \geq R_{\min} = \\ = \frac{2 \cdot 0{,}660 \cdot 10^{-6} \cdot 122 \text{ мм}}{55 \cdot 10^{-6}} \approx 3 \text{ мм}. \tag{4.4.6}$$

ЦПУ *10* (см. рис. 4.4.1) представляет собой основное вычислительное устройство всей системы ПУ и выполняет функции управления режимами работы, блоком синхронизации *9* лазера и камеры, передаёт данные в ПЗУ, а также осуществляет первичную обработку кадров, поступающих с камеры в режиме реального времени. В качестве ЦПУ использован малогабаритный компьютер модели PICO821 компании Axiomtek.

В ПЗУ записываются зарегистрированные голограммы, инициализационные данные, история перемещений (навигационный трек), а также история состояний устройства.

БИ обеспечивает коммутацию и электрическую совместимость внутренних интерфейсов с внешними информационными и элек-

трическими интерфейсами различных погружаемых аппаратов, в составе которых работает ПУ.

БП обеспечивает электропитание всех узлов и блоков от АБ.

Голограммы просвеченного объема, зарегистрированные камерой, могут быть записаны в ПЗУ или непосредственно передаваться по волоконно-оптической линии связи на компьютер, расположенный на НИС (научно-исследовательское судно) по последовательному высокоскоростному интерфейсу [80]. В стационарных условиях на борту НИС они обрабатываются: с каждой зарегистрированной голограммы восстанавливаются изображения всех частиц, определяются их размеры и взаимное расположение, производится статистическая обработка и интерпретация результатов исследований.

Для цифровой обработки голограмм и голографических изображений объема среды с частицами используется специальное ***метрологически обеспеченное*** программное обеспечение, основанное на известных алгоритмах восстановления цифровых голограмм, описанных в [79, 81]. Под этим понимается, что именно данное программное обеспечение выполняет функцию измерений. По сути, это «двухэтапный» эквивалент цифрового измерительного микроскопа, с помощью которого слой за слоем просматривается объем, зафиксированный на голограмме Габора (рис. 4.4.3). Посредством поперечных наводок этого «микроскопа» осуществляется измерение поперечных размеров (размеров поперечных сечений) исследуемых частиц, посредством продольных и поперечных наводок – их положение (координаты) в зафиксированном объеме.

Отметим, что указанные измерения в «цифровом объеме» проводятся в условных единицах, метрический эквивалент которых зависит от увеличения оптической схемы. Для того чтобы размеру единицы «цифрового объема» поставить в соответствие метрическую единицу, необходимо откалибровать поле зрения этого микроскопа в различных сечениях исследуемого объема с помощью специальных эталонов, расставленных в исследуемом объеме до начала измерительного эксперимента. В качестве этих эталонов используются встроенные калибры размеров частиц (см. раздел 3.4.3).

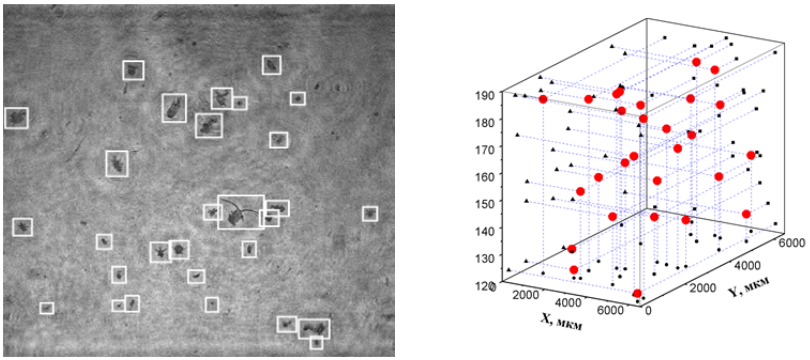
Встроенным калибром самого исследуемого объема является объем, просвечиваемый одним импульсом лазера, определяемый геометрией погружного устройства, а именно:

– диаметром входного зрачка объектива *5* (см. рис. 4.4.1);

– расстоянием между иллюминаторами.

На рис. 4.4.3 приведены два варианта представления измеренных данных. На рис. 4.3.3, *а* показано двумерное (на одной плоскости одновременно) отображение сфокусированных (резких) изображений планктонных частиц, располагавшихся в объеме на этапе записи голограммы. Такое отображение предложено для оперативной автоматизированной обработки информации, восстанавливаемой с голограммы, для этого разработаны специализированные методики и программное обеспечение [83].

На рис. 4.4.3, *б* распределение этих планктонных частиц в объеме показано традиционным способом.



а *б*

Рис. 4.4.3. Варианты представления информации о планктонных частицах, извлеченной с одной голограммы Габора объема, зафиксированной импульсом лазера: *а* – двумерное отображение резких голографических изображений всех частиц; *б* – распределение планктонных частиц в объеме после цифрового восстановления их резких изображений («продольных и поперечных наводок цифрового микроскопа»)

На рис. 4.4.4 показаны диаграммы, обеспечивающие синхронную работу смарт-камеры, регистрирующей голограмму, и лазера, просвечивающего регистрируемый объем. В зависимости от сте-

пени заселенности вод акватории планктоном предусмотрены два режима записи голограмм: одиночных и наложенных.

На рис. 4.4.4, *а* представлены временные диаграммы генерации лазерного излучения Рл(t) и срабатывания затвора камеры Рк(t) в режиме записи одиночных голограмм.

На рис. 4.4.4, *б* представлены временные диаграммы генерации лазерного излучения Рл(t) и срабатывания затвора камеры Рк(t) в режиме записи наложенных голограмм.

В режиме записи одиночных голограмм (см. рис. 4.4.4, *а*) частота срабатывания камеры составляет $F_к$ = 20 Гц, длительность экспозиции камеры $t_к$ = 10 мкс, частота повторения импульсов лазера $F_л$ = 1 кГц, длительность импульса лазера $t_л$ = 5 мкс.

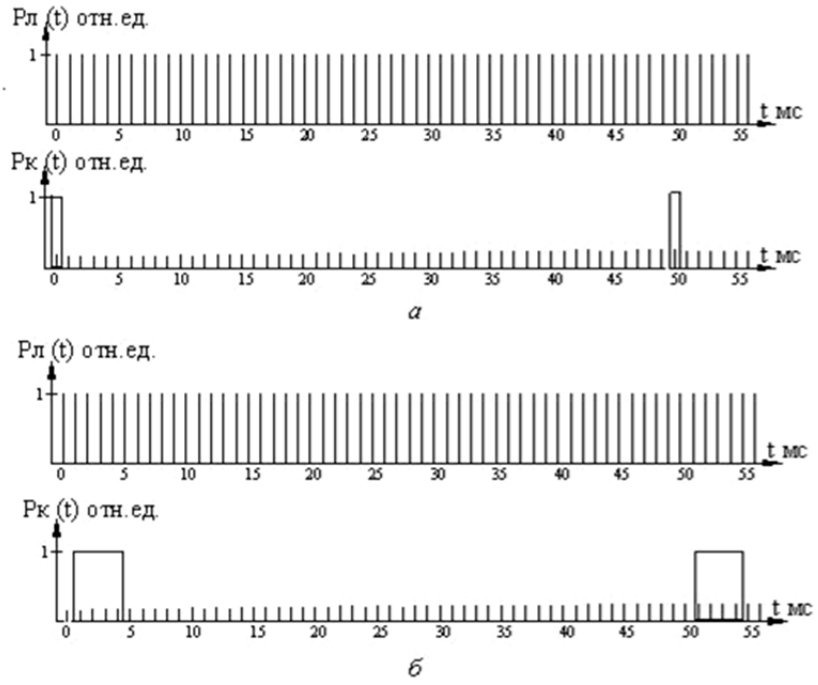


Рис. 4.4.4. Режимы синхронизации лазера и электронного затвора смарт-камеры для обеспечения регистрации одиночных (*а*) и наложенных голограмм (*б*)

При этом затвор камеры и сигнал, управляющий импульсом лазера, синхронизированы таким образом, что на одно время экспозиции камеры приходится один импульс лазера. С учетом оптической схемы регистрации за одну экспозицию камеры регистрируются частицы в объеме около 0,12 л, а за одну секунду – 2,5 л.

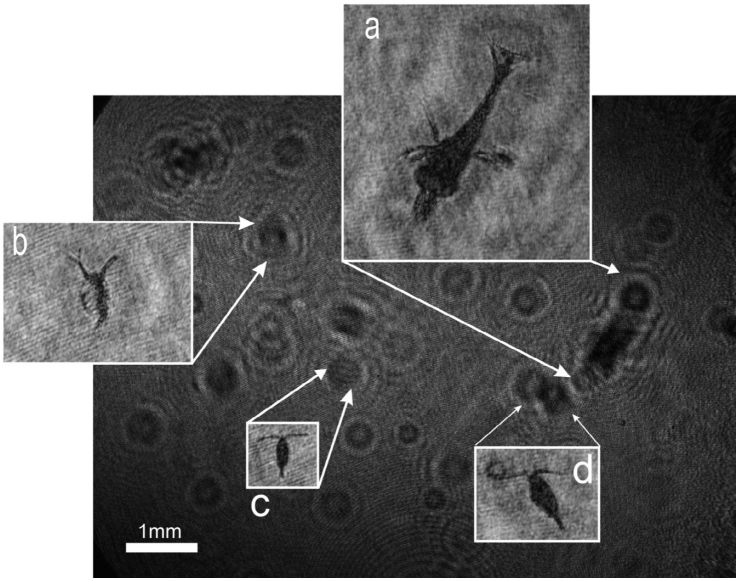


Рис. 4.4.5. Теневое изображение водного объема, содержащего планктонные частицы, зарегистрированное как голограмма Габора с помощью одного импульса лазера, и изображения планктонных особей, восстановленные цифровым путем с этой голограммы в различных сечениях водного объема: *a* – длина 1 270 мкм, толщина 327 мкм, положение (расстояние от плоскости регистрации) $L = 57$ мм; *b* – длина 633 мкм, толщина 187 мкм, толщина усиков 40 мкм, положение $L = 142$ мм; *c* – длина 275 мкм, толщина 77 мкм, толщина усиков 15 мкм, положение $L = 198$ мм; *d* – длина 434 мкм, толщина 155 мкм, толщина усиков 20 мкм, положение $L = 257$ мм

В режиме записи наложенных голограмм (рис. 4.4.4, *б*) частота срабатывания камеры составляет $F_к = 20$ Гц, длительность экспозиции камеры $t_к = 4$ мс, частота повторения импульсов лазера $F_л = 1$ кГц, длительность импульса лазера $t_л = 5$ мкс. При этом за-

твор камеры и сигнал, запускающий лазер, синхронизированы таким образом, что на одно время экспозиции камеры приходится 4 импульса лазера. В этом случае за одну экспозицию камеры регистрируются частицы в объеме около 0,5 л, а за одну секунду – около 10 л.

Изображения, восстановленные численно с цифровой голограммы, позволяют уверенно определять видовое разнообразие планктона, измерять размеры особей и их расположение, что невозможно сделать, располагая только теневым изображением объема (рис. 4.4.5).

Анализ погрешностей с учетом метода измерений и источников ошибок. Голографический способ регистрации исследуемого объема позволяет минимизировать влияние светового излучения на ансамбль измеряемых планктонных частиц.



Рис. 4.4.6. Погружное устройство для регистрации голограмм, снаряженное с СТД-зондом на борту НИС «Ашамба». Черное море, Геленджик, 2012 г.

При голографировании планктона в водной среде при помощи погружаемой камеры необходимо учитывать тот факт, что записывается голограмма не самой частицы, а ее изображения в оптиче-

ской системе «вода – стекло иллюминатора – воздух» – так называемый **«wall-effect»**. Способ учета этого эффекта на этапе восстановления голографических изображений частиц показан в [84, 85].

Достаточный объем выборки (т.е. репрезентативное для статистической обработки количество голографируемых частиц) обеспечивается за счет выбора полевой диафрагмы, объектива камеры и регистрации наложенных голограмм.

Короткая длительность лазерного импульса позволяет регистрировать голограммы объема, обеспечивающие восстановление четких, не размытых изображений движущихся планктонных частиц.

Погрешность измерения размеров частиц с помощью описанного устройства составляет $\Delta l < 2$ мкм. Эта оценка получена в лабораторных экспериментах на модельных частицах. Погрешность измерения объема может быть определена из соотношения (4.4.1) путем логарифмического дифференцирования:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + 2\frac{\Delta D}{D} = \frac{0{,}5}{294} + \frac{2 \cdot 0{,}5}{22{,}5} \approx 4{,}3\%. \qquad (4.4.7)$$

Тогда относительная погрешность определения концентрации частиц в единице объема составит

$$\frac{\Delta \mathrm{c}}{\mathrm{c}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{2\ \text{мкм}}{50\ \text{мкм}} + \frac{4{,}3}{100} \approx 8{,}3\%, \qquad (4.4.8)$$

где c, Δc – концентрация частиц и погрешность ее измерения; l и Δl – средний размер частицы и погрешность его измерения; V и ΔV – величина исследуемого объема и погрешность, с которой он исполнен при проектировании устройства и изготовлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Половцев И.Г., Симонова Г.В.* Оптическое приборостроение : учеб. пособие / под ред. И.В. Самохвалова. Томск : Томский государственный университет, 2004. 400 с.
2. *Технический* контроль в машиностроении : справочник проектировщика / под общ. ред. В.Н. Чупырина, А.Д. Никифорова. М. : Машиностроение, 1987. 512 с.
3. *Марков Н.Н., Ганевский Г.М.* Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов : учебник. М. : Машиностроение, 1993. 416 с.
4. *Васильев Л.А.* Теневые методы. М. : Наука, 1968.
5. *Кирилловский В.К.* Оптические измерения : учеб. пособие. Ч. 1–7. СПб. : ГИТМО, 2003–2009.
6. *Оптические* измерения / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин и др. : учеб. пособие. М. : Университетская книга ; Логос, 2008. 416 с.
7. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения / под ред. Д.Т. Пуряева. М. : Высшая школа, 1981.
8. *Гордов А.Н., Лукьянов Г.Н., Парфенов В.Г., Потягайло А.Ю., Шарков А.В.* Основы метрологии : учеб. пособие. Л. : ЛИТМО, 1983.
9. *Князев Б.А., Черкасский В.С.* Начала обработки экспериментальных данных. Электронный учебник и программа обработки данных для начинающих : учеб. пособие. Новосибирск, 1996. 93 с.
10. *Калайда В.Т.* Планирование эксперимента. Методы обработки результатов эксперимента и основы математической теории планирования эксперимента : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского университета, 1997. 93 с.
11. *Основные* термины в области метрологии : словарь-справочник / М.Ф. Юдин и др. ; под ред. Ю.В. Тарбеева. М. : Изд-во стандартов, 1989. 113 с.
12. *Лазерный* интерферометр LSP30-3D. Руководство по эксплуатации. Вроцлав, 2011. URL: www.lasertex.eu
13. *Еськова Л.М.* Оптические измерения : учеб. пособие. Л. : ЛИТМО, 1984.
14. *Иванова Т.А., Кирилловский В.К.* Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. : Машиностроение, 1984.

15. *Лившиц З.М.* Оптические измерения : учеб. пособие. Л. : ЛИТМО, 1985.
16. *Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф.* Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л. : Лениздат, 1987.
17. *Еськова Л.М.* Основы метрологии и оптические измерения : методические указания. СПб. : СПб ГИТМО (ТУ), 1999.
18. *Лившиц З.М.* Оптические измерения и исследования оптических систем : методические указания. Л. : ЛИТМО, 1986.
19. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М. : Мир, 1973. 698 с.
20. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л. : Машиностроение, 1989. 221 с.
21. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М. : Наука, 1970.
22. *Франсон М.* Оптика спеклов / пер. с фр. под ред. Ю.И. Островского. М. : Мир, 1980. 171 с.
23. *Контрольно-измерительные* инструменты и приборы в машиностроении : справочник / В.Г. Кострицкий, А.И. Кузьмин. Киев : Техніка, 1986. 135 с.
24. *Точность* и производственный контроль в машиностроении : справочник / И.И. Баладонкина, А.К. Кутай, Б.М. Сорочкин, Б.А. Тайц ; под общ. ред. А.К. Кутая, Б.М. Сорочкина. Л. : Машиностроение, 1983. 368 с.
25. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения : учебник для вузов по специальностям «оптико-электронные приборы» и «технология оптического приборостроения» / под общ. ред. Д.Т. Пуряева. М. : Машиностроение, 1987. 264 с.
26. *Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П.* Теория оптических систем : учеб. пособие для втузов. М. : Машиностроение, 1973. 488 с.
27. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. Л. : Машиностоение, 1966. 574 с.
28. *Справочник* конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов, М.Я. Кругер и др. ; под общ. ред. В.А. Панова. 3-е изд., перераб. и доп. 742 с.
29. *Воронцов Л.Н., Корндорф С.Ф.* Приборы автоматического контроля в машиностроении : учеб. пособие для вузов по специальности «приборы точной механики». М. : Машиностроение, 1988. 280 с.
30. *Оптический* производственный контроль / под ред. Д. Малакары ; пер. с англ. Е.В. Мазуровой и др. ; под ред. А.Н. Соснова. М. : Машиностроение, 1985. 400 с.

31. *Distance* Laser Sensor // Technikal Reference Manual.V2/04. URL: www/dimetix/com
32. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2004. 679 с.
33. *Белл Р.Дж.* Введение в фурье-спектроскопию / пер. с англ. М., 1975.
34. *Гуревич М.М.* Фотометрия (теория, методы и приборы). 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
35. *Максутов Д.Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики. 2-е изд. М. : Наука, 1984. 272 с.
36. *Edlen B.* The refractive Index of Air // Metrologia. 1966. № 2. P. 71–80.
37. *Бубис И.Я., Вейденбах В.А., Духопел И.И. и др.* Справочник технолога-оптика. Л. : Машиностроение, 1983.
38. *Лазерные* измерительные системы / А.С. Батраков, М.М. Бутусов, Г.П. Гречка и др. ; под ред. Д.П. Лукьянова. М. : Радио и связь, 1981. 456 с.
39. *Волков Е.В., Плотников С.В.* Исследование влияния ширины зондирующего пучка на погрешность измерения триангуляционных систем // Автометрия. 1997. № 2. С. 19.
40. *Богомолов Е.Н., Василец Н.В., Кривенков Б.Е. и др.* Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» // Автометрия. 1989. № 5.
41. *Тарасов В.В., Бурмистров Ю.Н.* Датчики для контроля параметров технологических процессов // Юбилейная научно-практическая конференция «Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления» («Датчик–98») / под ред. В.Н. Азарова. М. : МГИЭМ, 1998. Т. 1. С. 145–147.
42. *Тарасов В.В., Володин С.А.* Метод контроля геометрических объектов сложной формы // Робототехника и автоматизация производственных процессов : тезисы докладов Всесоюзной конференции. Барнаул, 1983. Ч. IV. С. 8–9.
43. *Dorsch R., Hausler G., Herrmann J.* Lazer triangulation:fundamental uncertainty in distance muasurement // Appl. Opt. 1994. № 33. P. 1306.
44. *Плотников С.В.* Сравнение методов отработки сигналов в триангуляционных измерительных системах // Автометрия. 1995. № 6. С. 58.
45. *Абрамочкин А.И., Половцев И.Г. и др.* Фотометрический датчик положения. Датчик–95. Барнаул, 1995.
46. *Жилкин А.М., Васильев В.Д.* Бесконтактные оптико-электронные преобразователи положения // ОМП. 1978. № 6. С. 58.

47. *Бусурин В.Н., Носов Ю.Р.* Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М. : Энергоатомиздат, 1990. С. 41.
48. *Демин В.В., Половцев И.Г.* Фотоэлектрические датчики в задачах промышленного контроля геометрии объектов // Датчики и системы. 2001. № 8.
49. *Трэнклер Х.-Р.* Современное состояние сенсорной техники // Датчики и системы. 2001. № 11.
50. *Лысенко О.* Промышленные энкодеры компании Sick // Электронные компоненты. 2005. № 4. С. 1–6.
51. *Габидулин М.А.* Фотоэлектрические цифровые преобразователи перемещений пространственного кодирования // Искусственный интеллект. 2008. № 3. С. 272–281.
52. *Половцев И.Г., Симонова Г.В.* О влиянии остаточных аберраций прибора на качество контроля оптических деталей // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2, № 5.
53. *Половцев И.Г., Симонова Г.В.* О влиянии остаточных аберраций интерферометра на качество интерференционных измерений // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3, № 6.
54. *Половцев И.Г., Максимов В.Г.* Влияние остаточных аберраций на погрешность интерферометра с совмещенными ветвями // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 8.
55. *Половцев И.Г., Максимов В.Г.* Влияние положения плоскости наблюдения на погрешность интерферометра с совмещенными ветвями // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 4.
56. *Сысоев Е.В., Голубев И.В.* Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515.
57. *Булатов М.И., Калинкин И.П.* Практическое руководство по фотоколориметрическим и спектрофотометрическим методам анализа. 2-е изд. Л., 1968.
58. *Ландсберг Г.С.* Оптика. 4-е изд. М., 1957.
59. *Панов И.Н.* Анализ событий на рефлектограмме // Сети и системы связи. 2005. № 14.
60. *Листвин А.В., Листвин В.Н.* Рефлектометрия оптических волокон. М. : ЛЕСАР арт, 2005.
61. *Половцев И.Г., Чудинов С.А.* Оптические измерения формы поверхности большой апертуры по методу переналожений // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 159.

62. *Демин В.В., Максимов В.Г., Половцев И.Г.* Фильтрующие свойства измерительной базы в задачах профилометрии // Автометрия. 2000. № 6. С. 74.
63. *Демин В.В., Максимов В.Г., Половцев И.Г.* Особенности описания базовых измерительных систем профилометрии // Датчики и системы. 2001. № 3. С. 12.
64. *Бычков Р.М., Коронкевич В.П., Чугуй Ю.В.* Измерение параметров резьбы методами когерентной оптики // ОМП. 1977. № 11. С. 50.
65. *Кириллов Н.С., Половцев И.Г.* Оптимизация системы Шмидта компенсационным способом // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 9, № 5. С. 751.
66. *Бобров С.Т., Грейсух Г.Н., Туркевич Ю.Г.* Оптика дифракционных элементов и систем. Л. : Машиностроение, 1986. 223 с.
67. *Половцев И.Г.* О погрешностях контроля оптических деталей по методу Ронки // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2, № 4. С. 376.
68. *Витриченко Э.А., Лукин В.П., Пушной Л.А., Тартаковский В.А.* Проблемы оптического контроля. Новосибирск : Наука, 1990. 351 с.
69. *Шульман М.Я.* Измерение передаточных функций оптических систем. М. : Машиностроение, 1980. 206 с.
70. *Кудряшов А.В., Половцев И.Г., Самаркин В.В.* Исследование панкратической системы с корректором на основе биморфного пьезоэлемента // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1, № 2. С. 108.
71. *Русинов М.М.* Вычислительная оптика : справочник. Л. : Машиностроение, 1979. 488 с.
72. *Родионов С.А.* Основы оптики : конспект лекций. СПб. : СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 167 с.
73. *Хорн Б.К.П.* Зрение роботов : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 487 с., ил.
74. *Lars A.* Selberg / Radius measurement by interferometry // Optical Engineering. 1992. V. 31, No. 9. P. 1961.
75. *Половцев И.Г.* Высокоточные измерения радиусов кривизны оптических поверхностей // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 166.
76. *Половцев И.Г., Симонова Г.В.* Интерференционный способ измерения радиуса кривизны. Патент № 2267744. Опубл. 10.01.2006.
77. *Половцев И.Г., Чудинов С.А., Шараев А.И.* Опыт эксплуатации системы «Оптикон-КПР» в РБЦ КМК // Вестник ВНИИЖТ. 2000. № 7.
78. *Абрамочкан А.И., Королев В.Е., Половцев И.Г., Трынкин А.Р., Черепнев С.М., Чудинов С.А., Шараев А.И.* Устройство для контроля прямолинейности поверхности. Патент № 2133012. Опубл. 10.07. 1999.

79. *Демин В.В., Ольшуков А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г.* Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1089–1095.
80. *Оленин А.Л., Парамонов А.А.* Разработка многоканального гидрологооптико-химического комплекса для океанологических исследований на подвижных измерительных платформах // Материалы X Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». Ч. III. М., 2007. С. 154–160.
81. *Schnars U., Jueptner W.* Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin : Sprinder, 2005. 164 s.
82. *Короленко П.В.* Оптика когерентного излучения. М. : МГУ, 1997. 222 с.
83. *Дёмин В.В., Каменев Д.В.* Двумерное представление цифрового голографического изображения объема среды с частицами как способ отображения и обработки информации о частицах // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 7. С. 58–65.
84. *Демин В.В., Степанов С.Г.* Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11, № 7. С. 671–676.
85. *Демин В.В., Ольшуков А.С.* Цифровое голографическое видео для исследования биологических частиц // Оптический журнал. 2012. Т. 79, № 6. С. 42–46.
86. *Агапов Н.А., Половцев И.Г.* Теневой прибор. А.С. № 1421995 от 08.05.1988.
87. *Бушмелев Н.И., Половцев И.Г.* Способ оценки качества микроизображений. А.С. № 1256565 от 08.05.1986.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. Нормативно-техническая документация по измерениям вообще и оптическим в частности

ГОСТ 8.275–2007	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 12,0 мкм
ГОСТ 8.107–76	Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Обработка результатов наблюдений
ГОСТ 8.385–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования
ГОСТ 8.588–2006	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений оптической плотности материалов
ГОСТ 8.051–81	Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм
ГОСТ Р 8.568–97	Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения
ГОСТ Р 8.563–96	Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений
ГОСТ 8.009–84	Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
ГОСТ 8.566–99	Государственная система обеспечения единства измерений. Межгосударственная система данных о физических константах и свойствах веществ и материалов. Основные положения

ГОСТ Р 8.736–2011	Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения
ГОСТ Р 8.614–2005	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения
ГОСТ 8.197–2005	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн от 0,04 до 0,25 мкм
ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений
ГОСТ Р ИСО 5725–3–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений
ГОСТ Р ИСО 5725–4–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений
ГОСТ Р ИСО 5725–5–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений
ГОСТ Р ИСО 5725–6–2002	Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике
ГОСТ 8.420–2002	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности
ГОСТ 8.106–2001	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений энергетической яркости и силы излучения тепловых источников с температурой от 220 до 1360 К

ГОСТ Р 8.596–2002:	Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения
ГОСТ 8.552–2001	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений потока излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн от 0,03 до 0,40 мкм
ГОСТ 8.061–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение
ГОСТ 8.417–2002	Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин
ГОСТ 8.565–99:	Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов
ГОСТ Р 8.000–2000	Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения
ГОСТ 8.525–85	Государственная система обеспечения единства измерений. Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения
ГОСТ 8.372–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения
ГОСТ 8.401–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования
ГОСТ 8.395–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования
ГОСТ 24026–80	Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения
ГОСТ 8.057–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны единиц физических величин. Основные положения
ГОСТ 8.310–90	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения

ГОСТ 8.503–84	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от 24 до 75 000 м
ГОСТ 8.381–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей
ГОСТ 8.256–77	Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения
ГОСТ Р 8.643–2008	Государственная система обеспечения единства измерений. Рефлектометры экстремального ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 10–30 нм. Методика поверки
ГОСТ 1.25–76	Государственная система стандартизации. Метрологическое обеспечение. Основные положения
ГОСТ 16263–70:	Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения
ГОСТ 8.001–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Организация и порядок проведения государственных испытаний средств измерений
ГОСТ 8.010–90	Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений
ГОСТ 8.326–89	Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая аттестация средств измерений
ГОСТ 8.099–73	Государственная система обеспечения единства измерений. Нутромеры индикаторные с ценой деления 0,01 мм. Методы и средства поверки
ГОСТ 8.163–75	Государственная система обеспечения единства измерений. Штангенглубиномеры. Методы и средства поверки
ГОСТ 8.164–75	Государственная система обеспечения единства измерений. Штангенрейсмасы. Методы и средства поверки
ГОСТ 8.165–75	Государственная система обеспечения единства измерений. Линейки синусные. Методы и средства поверки
ГОСТ 8.315–91	Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы. Основные положения, порядок разработки, аттестации, утверждения, регистрации и применения

ГОСТ 8.335–78	Государственная система обеспечения единства измерений. Меры твердости образцовые. Методы и средства поверки
ГОСТ 8.383–80	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственные испытания средств измерений. Основные положения
ГОСТ 8.417–81	Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин
ГОСТ 8.437–81	Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения
ГОСТ 8.438–81	Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информационно-измерительные. Поверка. Общие положения
ГОСТ 8.513–84	Государственная система обеспечения единства измерений. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения
ГОСТ 8.548–86	Государственная система обеспечения единства измерений. Индикаторы часового типа С ценой деления 0,01 мм. Методика поверки
ГОСТ Р 8.651–2009	Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы контактные (щуповые) для измерения шероховатости поверхности. Методика калибровки
ГОСТ Р 8.652–2009	Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы контактные (щуповые) для измерений шероховатости поверхности. Метрологические характеристики фазокорректированных фильтров
ГОСТ Р 8.654–2009	Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения
ГОСТ Р 8.657–2009	Государственная система обеспечения единства измерений. Спектрофотометры инфракрасные. Методика поверки
ГОСТ Р 8.563–2000	Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений
РД 50–98–86	Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм

ГОСТ Р 52931–2008	Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия
ГОСТ 5405–75	Оптиметры. Технические условия.
ГОСТ 2923–75	Пластины плоские стеклянные для интерференционных измерений. Технические условия
ГОСТ 14968–69	Микроскопы универсальные, измерительные. Технические условия
ГОСТ 8074–82	Микроскопы инструментальные. Технические условия
ГОСТ 19795–82	Проекторы измерительные. Технические условия
ГОСТ 577–68	Индикаторы часового типа. Технические условия
ГОСТ 18833–73	Головки измерительные рычажно-зубчатые. Технические условия
ГОСТ 28798–90	Головки измерительные пружинные. Технические условия
ГОСТ 14712–79	Головки измерительные пружинные малогабаритные с нормальным и уменьшенным усилием. Технические условия
ГОСТ 14711–69	Головки измерительные рычажно-пружинные (миникаторы). Технические условия
ГОСТ 12069–90	Меры длины штриховые брусковые. Технические условия
ГОСТ 7502–98	Рулетки измерительные металлические. Технические условия
ГОСТ 427–75	Линейки измерительные металлические. Технические условия
ГОСТ 7513–56	Объект-микрометры. Технические условия
ГОСТ 166–89	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 162–90	Штангенглубиномеры. Технические условия
ГОСТ 164–90	Штангенрейсмасы. Технические условия
ГОСТ 6507–90	Микрометры гладкие. Технические условия
ГОСТ 4381–87	Микрометры рычажные. Технические условия
ГОСТ 7470– 92	Глубиномеры микрометрические. Технические условия
ГОСТ 11098–75	Скобы рычажные. Технические условия
ГОСТ 5378–88	Угломеры с нониусом. Технические условия
ГОСТ 11197–73	Угломеры оптические. Технические условия
ГОСТ 14028–68	Длиномеры. Технические условия

ГОСТ 28869–90	Материалы оптические. Методы измерений показателя преломления
ГОСТ 3520–92	Материалы оптические. Методы определения показателей ослабления
ГОСТ 3518–80	Материалы оптические. Метод определения оптической однородности на коллиматорной установке
ГОСТ 3519–91	Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления
ГОСТ 3521–81	Материалы оптические. Методы определения бессвильности
ГОСТ 3522–81	Материалы оптические. Методы определения пузырности
ГОСТ 23136–93	Материалы оптические. Параметры
ГОСТ 1807–75	Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений
ГОСТ 25142–82	Шероховатость поверхности. Термины и определения
ГОСТ 2789–73	Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
ГОСТ 11141–84	Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля
ГОСТ 23700–79	Объективы съемочные. Методы измерения поперечной аберрации
ГОСТ 24453–80	Измерения параметров и характеристик лазерного излучения. Термины, определения и буквенные обозначения величин
ГОСТ 24286–88	Фотометрия импульсная. Термины и определения
ГОСТ 23778–79	Измерения оптические поляризационные. Термины и определения

П.2. Глоссарий по геометрической оптике

П.2.1. Термины и обозначения

П.2.1.1. Лучи

Параксиальный луч – луч, проходящий под малым углом к оптической оси.

Главный луч – луч пучка лучей, идущий из крайней точки предмета через центры входного зрачка, апертурной диафрагмы, выходного зрачка и приходящий на край изображения.

Действительный луч – реальный луч, прохождение которым реальной оптической системы предсказано на основании формул реальной оптической системы.

Нулевой луч – непараксиальный луч, преломление которого на криволинейной поверхности происходит в плоскости, касательной к вершине этой поверхности. Прохождение реальной оптической системы таким лучом рассчитывается на основании формул идеальной оптической системы.

П.2.1.2. Пучки

Гомоцентрический (стигматический) пучок – пучок лучей, в котором лучи выходят из одной точки или соединяются в одной точке.

Астигматический пучок лучей – пучок лучей, который образует изображение какой-либо точки предмета в виде двух отрезков, скрещивающихся под прямым углом.

Осевой пучок лучей – пучок лучей, в котором главный луч совпадает с оптической осью.

Наклонный пучок лучей – пучок лучей, главный луч которого лежит в меридиональной плоскости, но не совпадает с оптической осью.

Узкий пучок лучей – пучок лучей, лучи которого проходят под малым углом к главному лучу пучка.

Косой пучок лучей – пучок лучей, для которого не существует меридиональной плоскости, т.е. все лучи этого пучка скрещиваются (никогда не пересекаются) с оптической осью.

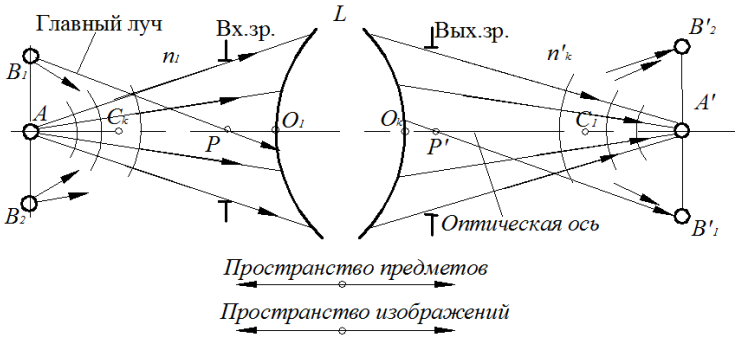


Рис. П.1. Термины геометрической оптики

П.2.1.3. Плоскости

Меридиональная плоскость – плоскость, которая содержит рассматриваемый луч и оптическую ось.

Сагиттальная плоскость – плоскость, которая содержит рассматриваемый луч и перпендикулярна меридиональной.

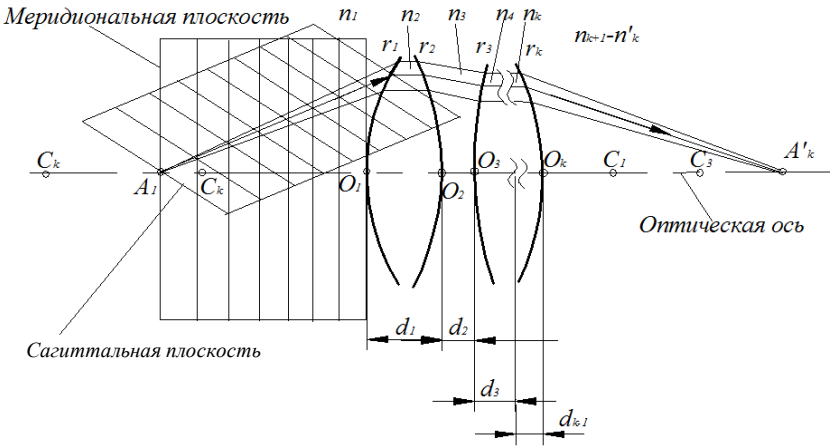


Рис. П.2. Меридиональная и сагиттальная плоскости

П.2.1.4. Оптические системы

Идеальная оптическая система – оптическая система, в которой верны формулы параксиальной оптики для любых лучей.

Реальная оптическая система – оптическая система, в которой не делается никаких предположений относительно малых углов между лучом и осью, а ход луча рассчитывается с помощью закона Снеллиуса–Декарта или алгоритма расчета реального луча (САПР), основой которого является этот закон.

П.2.1.5. Поверхности

Сферическая поверхность – поверхность вращения, образованная вращением дуги окружности вокруг оси симметрии, проходящей через центр кривизны. Представляет собой сегмент шара.

Плоская поверхность – сферическая поверхность бесконечно большого радиуса.

Асферическая поверхность – поверхность вращения, образованная вращением дуги кривой второго и высшего порядков вокруг оси симметрии, проходящей через параксиальный центр кривизны.

Планоидная поверхность – асферическая поверхность с бесконечно большим параксиальным радиусом кривизны.

Торическая поверхность – имеет различные кривизны в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Коническая поверхность – образуется вращением прямой, проходящей через неподвижную точку (вершину конической поверхности).

Коноидная поверхность – образуется вращением криволинейной образующей, проходящей через неподвижную точку (вершину коноидной поверхности).

П.2.1.6. Общепринятые обозначения

Фокусное расстояние – расстояние от главной плоскости до фокуса: в пространстве предметов f, в пространстве изображений f'.

Положение точки относительно вершины первой / последней поверхности: в пространстве предметов (от первой поверхности) S, в пространстве изображений (от последней поверхности) S'.

Положение точки относительно главной точки передней / задней: в пространстве предметов (от передней) a, в пространстве изображений (от задней) a'.

Положение точки относительно фокуса (переднего / заднего) в пространстве предметов (от переднего фокуса) x, в пространстве изображений (от заднего фокуса) x'. Часто эти (или иные горизонтальные) отрезки обозначаются z и z'.

Длина луча – расстояние от преломляющей поверхности до источника в пространстве предметов t, расстояние от преломляющей поверхности до изображения точечного источника в пространстве изображений t'.

Показатель преломления среды – до i-й поверхности n_i, после преломления – на i-й поверхности n'_i.

Оптический промежуток d_i – расстояние от (i–1)-й поверхности до i-й.

Высота луча – высота точки от оптической оси, в которой луч пересекает i-ю поверхность h_i.

Радиус кривизны i-й поверхности r_i.

Размер предмета – y.

Размер изображения – y'.

Угол падения – угол между нормалью к поверхности и лучом, падающим на эту поверхность ε.

Угол преломления – угол между нормалью к поверхности и лучом, преломленным этой поверхностью ε'.

Угол между нормалью к поверхности и оптической осью φ.

Угол между произвольным лучом и осью α, σ, u, δ и т.д.

Апертурный угол в пространстве предметов (σ_A) – угол между оптической осью и лучом, выходящим из осевой точки предмета и идущим на край входного зрачка.

Апертурный угол в пространстве изображений (σ'_A) – угол между оптической осью и лучом, проходящим через осевую точку изображения и край выходного зрачка.

Полевой угол – угол между главным лучом, идущим от внеосевой точки предмета, и осью: в пространстве предметов ω, в пространстве изображений ω'.

Входной зрачок *P*.

Выходной зрачок *P'*.

П.2.2. Построение хода лучей в оптических системах

Кардинальные точки оптической системы: *H, H′, F, F′, K, K′*.

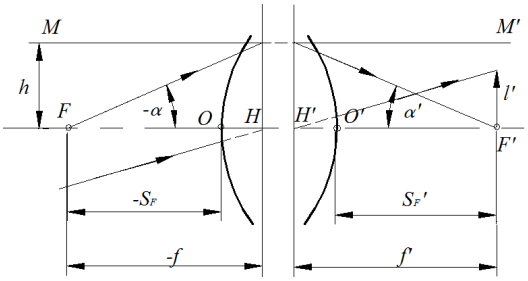


Рис. П.3. Кардинальные точки оптической системы

H, H' – ***главные точки***, в них линейное увеличение $\beta = +1$.

K, K′ – ***узловые точки*** (рис. П.4), в них угловое увеличение $\gamma = +1$. Если ОС находится в однородной среде, то узловые точки совпадают с главными.

Передний фокус *F* – точка в пространстве предметов, изображаемая оптической системой в бесконечности.

Задний фокус *F'* – точка в пространстве изображений, в которой оптическая система строит изображение предмета, находящегося в бесконечности.

При $n_1 \neq n_{p+1}$ получим $x_k^{'} = f$, $x_k = f^{'}$.

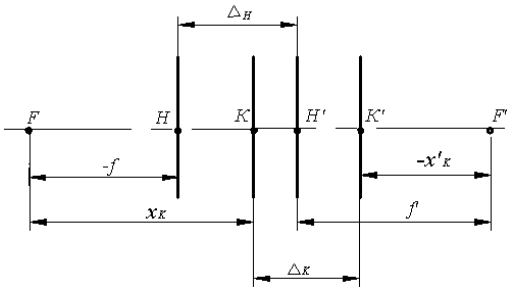
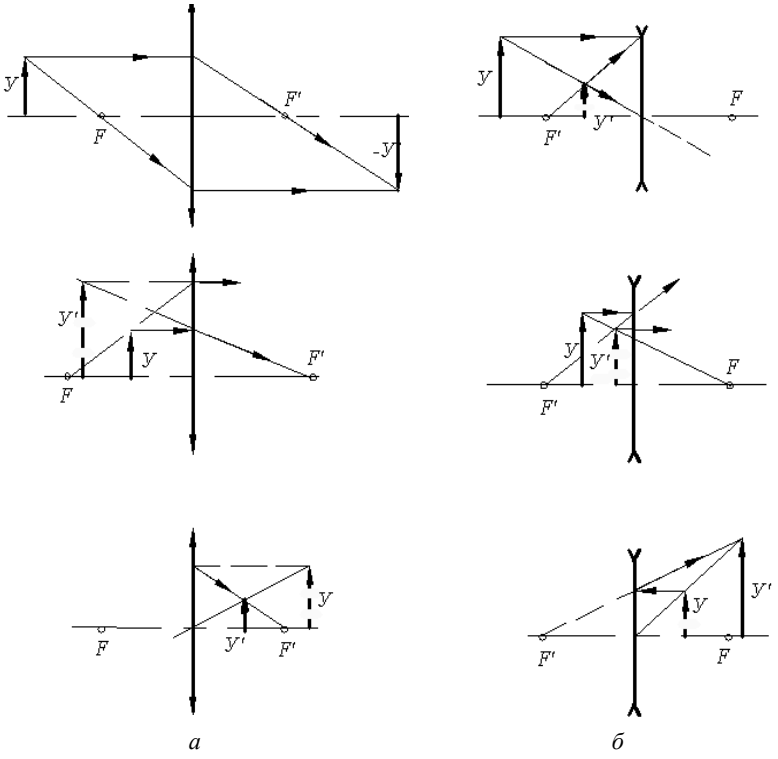


Рис. П.4. Узловые точки оптической системы



а *б*

Рис. П.5. Построение изображений
в положительной (*а*) и отрицательной (*б*) оптических системах

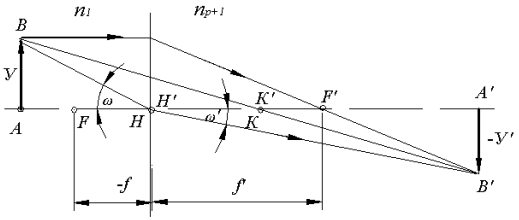


Рис. П.6. Построение изображения отрезка, перпендикулярного оптической оси, когда линза находится на границе различных оптических сред

П.2.3. Оптические инварианты

Для границы двух сред ***оптический инвариант***, или закон Снеллиуса–Декарта

$$n \times \sin \varepsilon = n' \times \sin \varepsilon'. \qquad (П.1)$$

Для преломляющих поверхностей ***инвариант преломления Аббе*** для действительного луча

$$n \cdot \frac{r-s}{t \cdot r} = n' \cdot \frac{r-s'}{t' \cdot r}. \qquad (П.2)$$

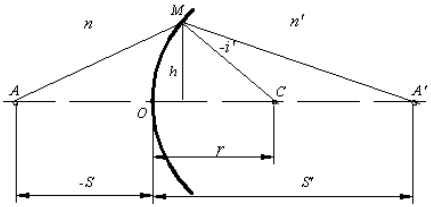


Рис. П.7. Обозначения отрезков к инвариантам Аббе

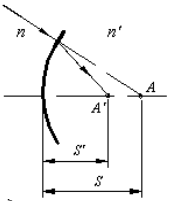
Для малых углов $s = t$, $s' = t'$ имеет место ***нуль инвариант Аббе***

$$n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right) = n'\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'}\right). \qquad (П.3)$$

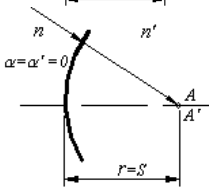
Апланатические точки для преломляющих поверхностей:

1-го рода, при $s = r + \frac{n'}{n} \cdot r$,

$s' = r + \frac{n}{n'} \cdot r$



2-го рода, при $s = s' = r$



3-го рода, при $s = s' = 0$

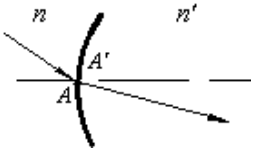
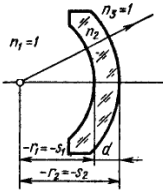
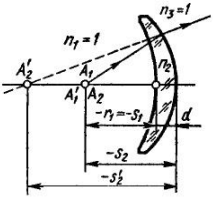


Рис. П.8. Апланатические точки для сферических поверхностей

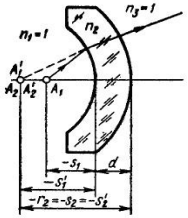
Апланатические линзы (мениски):



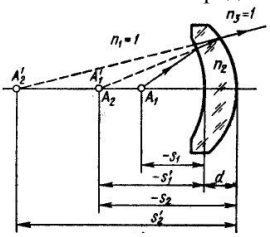
Линза 2-го + 2-го рода



Линза 2-го + 1-го рода



Линза 1-го + 2-го рода



Линза 1-го + 1-го рода

Рис. П.9. Апланатические линзы

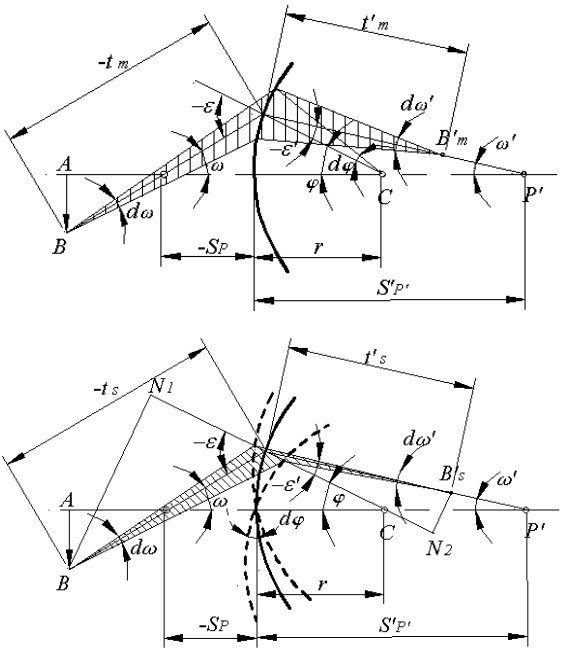
Для больших углов к оптической оси, но узких пучков имеет место астигматизм и справедливы формулы:

формула Юнга–Аббе в меридиональной плоскости

$$\frac{n'\cdot\cos^2\varepsilon'}{t'_m}-\frac{n\cdot\cos^2\varepsilon}{t_m}=\frac{n'\cdot\cos\varepsilon'-n\cdot\cos\varepsilon}{r_m}, \qquad (П.4)$$

формула Юнга–Аббе в сагиттальной плоскости

$$\frac{n'}{t'_s}-\frac{n}{t_s}=\frac{n'\cdot\cos\varepsilon'-n\cdot\cos\varepsilon}{r_s}. \qquad (П.5)$$



а

б

Рис. П.10. Преломление узкого (элементарного) наклонного пучка лучей: *а* – в меридиональной плоскости; *б* – в сагиттальной плоскости

Или то же самое в инвариантной форме:

инвариант Гюльстранда для сагиттальной плоскости

$$n \cdot \left(\frac{\cos\varepsilon}{r_s} - \frac{1}{t_s}\right) = n' \cdot \left(\frac{\cos\varepsilon'}{r_s} - \frac{1}{t'_s}\right), \qquad (П.6)$$

инвариант Гюльстранда для меридиональной плоскости

$$n \cdot \cos\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{r_m} - \frac{\cos\varepsilon}{t_m}\right) = n' \cdot \cos\varepsilon' \cdot \left(\frac{1}{r_m} - \frac{\cos\varepsilon'}{t'_m}\right). \qquad (П.7)$$

Без астигматизма $t'_m = t'_s$ на плоской поверхности, при $r_m = \infty$:

1. $\sin\varepsilon = 0$ – нормальное падение.
2. $t = t' = \infty$ – параллельный пучок лучей.
3. $n \cdot t = n' \cdot t'$.

Для оптических систем:

инвариант Лагранжа–Гельмгольца 2-го рода для параксиальной области

$$n \cdot y \cdot \mathrm{tg}\sigma = n' \cdot y' \cdot \mathrm{tg}\sigma', \qquad (П.8)$$

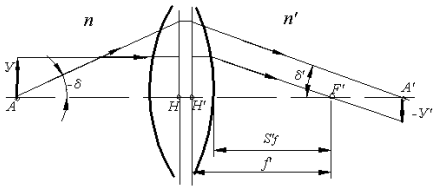


Рис. П.11. Обозначения углов и отрезков к инвариантам Лагранжа–Гельмгольца и условию синусов Аббе

инвариант Лагранжа–Гельмгольца 1-го рода для параксиальной области

$$f \cdot y \cdot \mathrm{tg}\sigma = -f' \cdot y' \cdot \mathrm{tg}\sigma'. \qquad (П.9)$$

При $y = \Delta y,\ y' = \Delta y'$ – малая область:

условие синусов Аббе образования безаберрационного изображения

$$n \cdot \Delta y \cdot \sin\sigma = n' \cdot \Delta y' \cdot \sin\sigma'. \qquad (П.10)$$

Закон преобразования яркости световой трубки при преломлении, или ***инвариант Штраубеля***:

$$L'_k \Big/ n'_k = \tau \cdot L_0 \Big/ n_0, \qquad \text{(П.11)}$$

где L_0 – яркость световой трубки на входе в оптическую систему; L'_k – яркость световой трубки после прохождения k поверхностей оптической системы; τ – коэффициент пропускания оптической системы.

П.2.4. Идеальная оптическая система

Правило знаков:

• ***Положительное направление распространения света – слева направо***.

• ***Знаки отрезков, углов:***

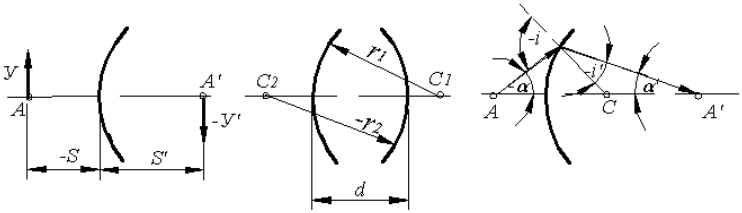


Рис. П.12. Знаки отрезков и углов

• ***Показатель преломления***: при отражении луча от поверхности показатель преломления меняет знак, и величина d – расстояние от отражающей поверхности до поверхности, на которую попадает отраженный луч.

Формула Ньютона:

$$xx' = ff'. \qquad \text{(П.12)}$$

Формула отрезков:

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1. \qquad \text{(П.13)}$$

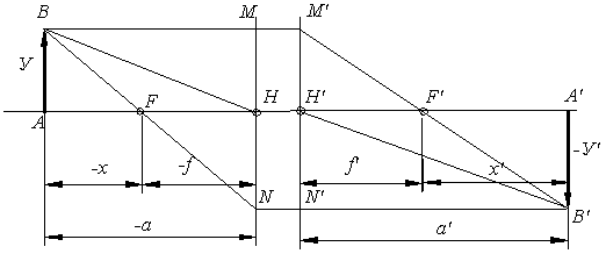


Рис. П.13. К формуле Ньютона

Если система в однородной среде, $f = -f'$, и тогда имеем

$$xx' = -f'^2, \qquad \text{(П.14)}$$

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}. \qquad \text{(П.15)}$$

Расчет нулевого луча через оптическую систему:

формула углов для нулевого луча:

$$\operatorname{tg}\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}}\operatorname{tg}\alpha_k + h_k\frac{n_{k+1} - n_k}{n_{k+1}\cdot r_k}, \qquad \text{(П.16)}$$

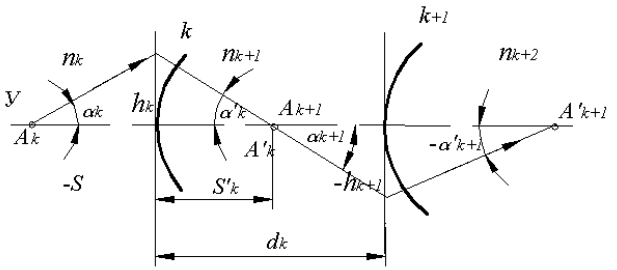


Рис. П.14. Ход нулевого луча

формула высот для нулевого луча:

$$h_{k+1} = h_k - \operatorname{tg}\alpha_{k+1}\cdot d_k. \qquad \text{(П.17)}$$

Для толстой линзы имеют место:

заднее фокусное расстояние:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{n_3} \cdot \left(\frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \right) - \frac{(n_2 - n_1) \cdot (n_3 - n_2)}{n_2 \cdot n_3 \cdot r_1 \cdot r_2} d; \qquad (П.18)$$

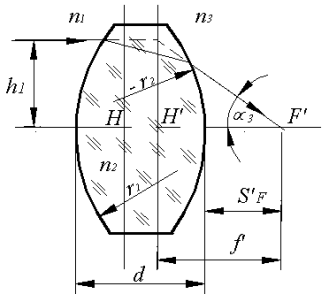


Рис. П.15. К формуле толстой линзы

переднее фокусное расстояние:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{n_1} \cdot \left(\frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) + \frac{(n_1 - n_2) \cdot (n_2 - n_3)}{n_1 \cdot n_2 \cdot r_1 \cdot r_2} d, \qquad (П.19)$$

оптическая сила линзы:

$$\Phi = \frac{n_3}{f'} = -\frac{n_1}{f}. \qquad (П.20)$$

Если линза в воздухе, то

$$\Phi = \frac{1}{f'}. \qquad (П.21)$$

Единица оптической силы – ***диоптрия*** (дптр) – равна оптической силе линзы с фокусным расстоянием 1 м в воздухе. Оптическая сила линзы, дптр:

$$\Phi = \frac{1000}{f'(\text{мм})}. \qquad (П.22)$$

Заднее вершинное расстояние:

$$s'_F = \frac{h_2}{\alpha_3} = f'\left(1 - \frac{n_2 - n_1}{n_2 r_1} d\right). \quad \text{(П.23)}$$

Переднее вершинное расстояние:

$$s_f = -f' \frac{n_1}{n_3}\left(1 + \frac{n_2 - n_3}{n_2 r_2}\right) d. \quad \text{(П.24)}$$

Поскольку

$$s'_{H'} = s'_{F'} - f', s_H = s_F - f,$$

имеем

$$s'_{H'} = -f' \frac{n_2 - n_1}{n_2 r_1} d, \quad \text{(П.25)}$$

$$s_H = -f' \frac{n_1}{n_3} \frac{n_2 - n_3}{n_2 r_2} d. \quad \text{(П.26)}$$

Если $d \approx 0$ (линза тонкая и находится в воздухе), то

$$\frac{1}{f'_{\text{тонк. л}}} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \quad \text{(П.27)}$$

Для двухкомпонентных систем:

$$\frac{1}{f'_{\text{экв}}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - d \cdot \frac{1}{f'_1 \cdot f'_2}. \quad \text{(П.28)}$$

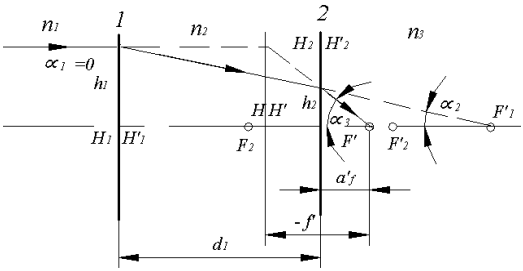


Рис. П.16. Система из двух компонентов

Если Δ – оптический интервал, то $d = f_{1'} - f'_2 + \Delta$, и тогда имеем

$$f'_{экв} = -\frac{f'_2 \cdot f'_1}{\Delta}. \qquad (П.29)$$

Если в терминах оптических сил, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2 d_1}{n_2}. \qquad (П.30)$$

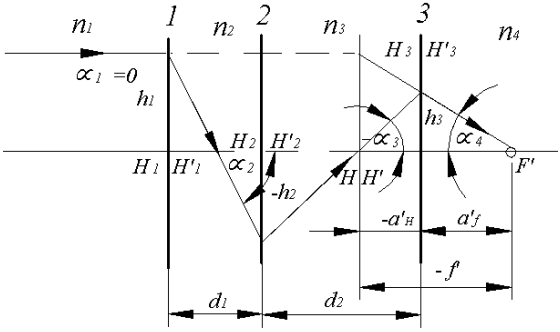


Рис. П.17. Система из трех компонентов

Для трехкомпонентных систем:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \frac{\Phi_1 d_1}{n_2}(\Phi_2 + \Phi_3) - \frac{\Phi_3 d_2}{n_3}\left(\Phi_1 + \right. \qquad (П.31)$$
$$\left. + \Phi_2 - \frac{\Phi_1 \Phi_2 d_1}{n_2}\right).$$

П.2.5. Увеличения в оптических системах

Линейное увеличение оптической системы:

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}. \qquad (П.32)$$

Угловое увеличение оптической системы:

$$\gamma = \frac{\mathrm{tg}\alpha'_p}{\mathrm{tg}\alpha_1}. \qquad (П.33)$$

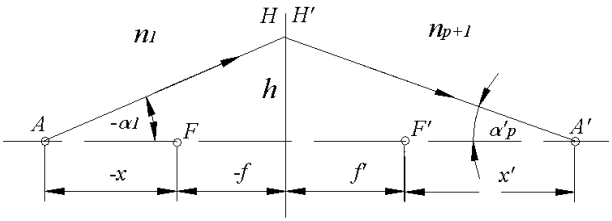


Рис. П.18. К формуле углового увеличения

Связь углового и линейного увеличения:

$$\gamma = -\frac{f}{f'}\beta = \frac{n_1}{n_{p+1}}\frac{1}{\beta}. \qquad (П.34)$$

Продольное увеличение:

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x}. \qquad (П.35)$$

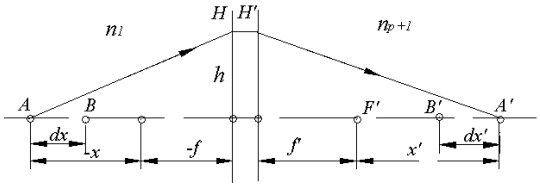


Рис. П.19. К формуле продольного увеличения

Связь с линейным увеличением:

$$\alpha = \frac{n_{p+1}}{n_1}\beta^2, \qquad (П.36)$$

или

$$\alpha\gamma = \beta. \qquad (П.37)$$

Видимое увеличение:

$$\Gamma = \frac{\mathrm{tg}\gamma'}{\mathrm{tg}\gamma}. \qquad (П.38)$$

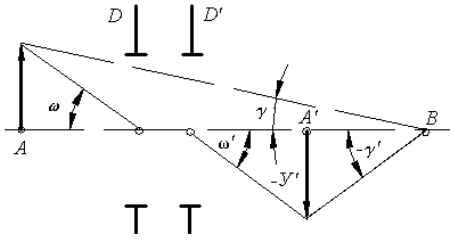


Рис. П.20. К формуле видимого увеличения

П.2.6. Фотометрия в геометрической оптике

П.2.6.1. Входной зрачок и апертурная диафрагма

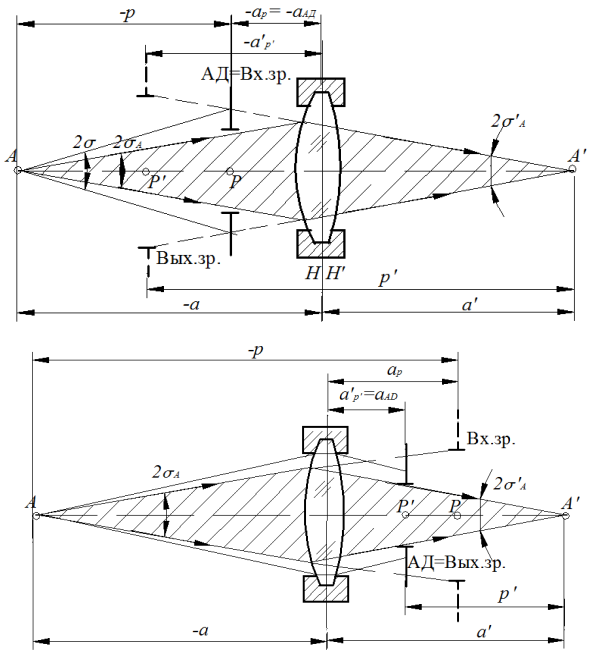


Рис. П.21. Апертурная диафрагма и зрачки оптической системы: *а* – диафрагма P_1P_2 расположена впереди компонента; *б* – диафрагма $P'_1P'_2$ расположена позади компонента

Положение выходного зрачка для системы в однородной среде:

$$a'_{p'} = a_p \cdot f'/\left(f^{'} + a_p\right). \quad \text{(П.39)}$$

Линейное увеличение в зрачках:

$$\beta_{0p} = a'_{p'}/a_p = D'_p/D_{a\partial} = D'_p/D_p. \quad \text{(П.40)}$$

Апертурная диафрагма – та диафрагма, изображение которой видно под наименьшим углом из осевой точки предмета.

Апертурный угол:

– в пространстве предметов – σ_A;

– в пространстве изображений – $\sigma'_{A'}$,

$$\mathrm{tg}\sigma'_{A'} = \gamma \mathrm{tg}\sigma_A = n_1 \frac{\mathrm{tg}\sigma_A}{n_3 \beta_0}. \quad \text{(П.41)}$$

Для апертурных углов имеем:

$$\mathrm{tg}\sigma_A = \frac{D}{2p} = \frac{D}{2(a_1 - a_p)}, \quad \text{(П.42)}$$

$$\mathrm{tg}\sigma'_{A'} = \frac{D'}{2p'} = \frac{D'}{2(a'_1 - a'_p)}. \quad \text{(П.43)}$$

Относительное отверстие:

$$D/f' = 1/K. \quad \text{(П.44)}$$

Диафрагменное число:

$$K = f'/D. \quad \text{(П.45)}$$

Числовая апертура:

– в пространстве предметов:

$$A = n_1 \cdot |\sin \sigma_A|; \quad \text{(П.46)}$$

– в пространстве изображений:

$$A' = n'_k \cdot |\sin \sigma'_{A'}|. \quad \text{(П.47)}$$

П.2.6.2. Поле зрения, полевая диафрагма

Линейное поле:

– зрения – максимальный размер предмета, который может изобразить оптическая система;

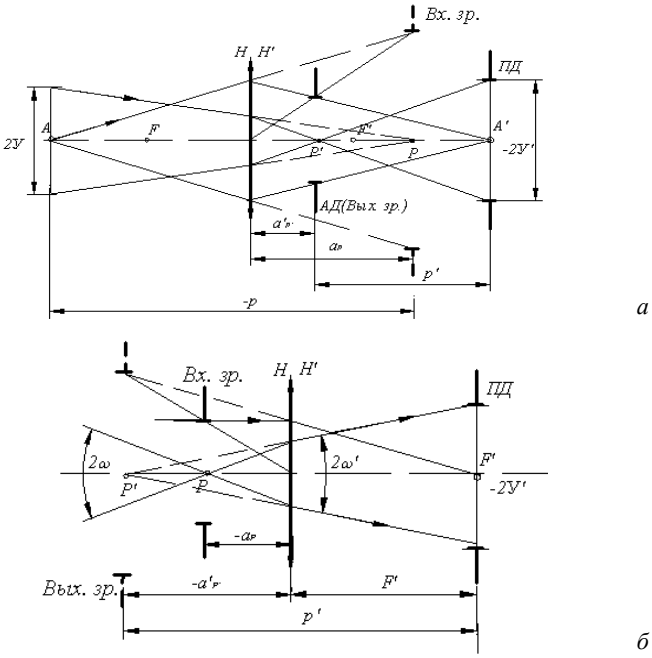


Рис. П.22. Линейное 2y' (*а*) и угловое поле 2ω (*б*) системы

– изображения – наибольший размер изображения.

Связь поля зрения и изображения задается формулой

$$2y' = \beta_0 \cdot 2y. \qquad \text{(П.48)}$$

Полевая диафрагма – диафрагма, расположенная в плоскости предмета или в одной из плоскостей, с ней сопряженных.

Угловое поле оптической системы:

– в пространстве предметов 2ω – угол, под которым видно поле зрения из центра входного зрачка;

– в пространстве изображений $2\omega'$ – угол, под которым видно поле изображения из центра выходного зрачка.

Очевидно, что

$$\gamma_{0P} = \operatorname{tg}\omega'/\operatorname{tg}\omega. \qquad (П.49)$$

Связь линейного и углового поля:

$$y' = -p' \cdot \operatorname{tg}\omega'. \qquad (П.50)$$

При положении предмета в бесконечности принимают

$$y' = -f' \cdot \operatorname{tg}\omega'. \qquad (П.51)$$

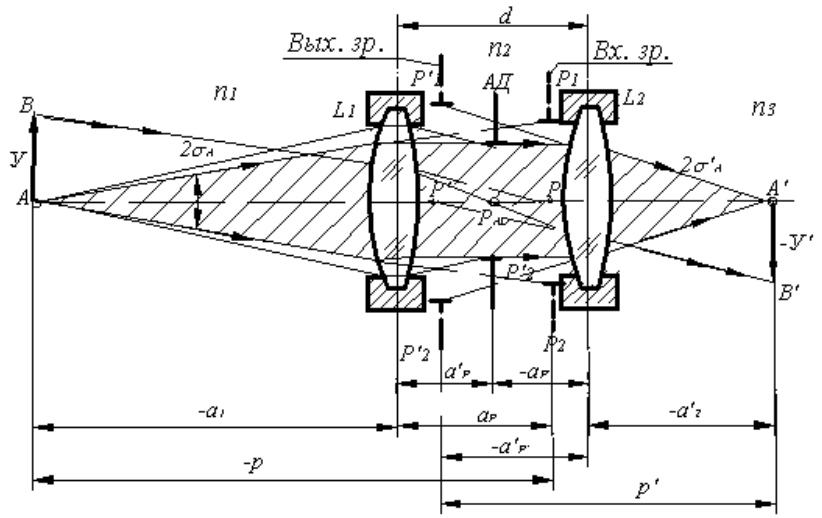


Рис. П.23. Ограничение пучков лучей в оптической системе из двух компонентов

Виньетирование

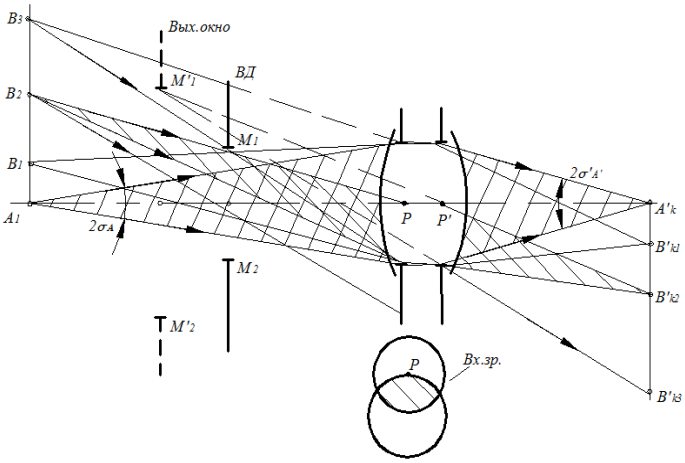


Рис. П.24. Виньетирование внеосевых пучков лучей:
ВД – виньетирующая диафрагма – входное окно

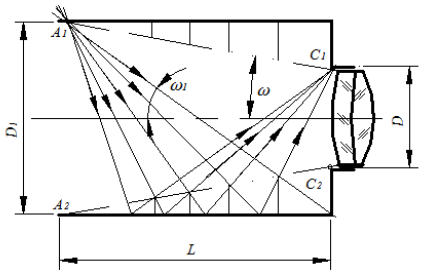


Рис. П.25. Цилиндрическая бленда с диафрагмами

Виньетирование учитывается с помощью коэффициента виньетирования $k_{\text{в}}$.

П.2.6.3. Световая трубка

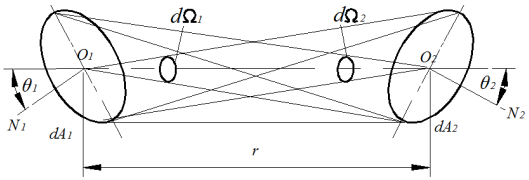


Рис. П.26. Элементарная световая трубка

Энергия световой трубки (световой поток, распространяющийся в ней):

$$d^2\Phi = \frac{L \cdot dA_1 \cdot dA_2 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{r^2}, \qquad (П.52)$$

где L – яркость световой трубки.

Формула Ламберта–Бугера–Бера – определяет ослабление параллельного монохроматического пучка света длиной волны λ, интенсивностью (яркость световой трубки на входе в среду) I_0 при проходе через поглощающую среду толщиной l:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = e^{-k_\lambda l}, \qquad (П.53)$$

где τ – коэффициент пропускания; k_λ – показатель спектрального поглощения, характеризующий свойства вещества среды.

Закон преобразования яркости световой трубки при преломлении (инвариант Штраубеля):

$$L'_k \Big/ n'_k = \tau \cdot L_0 \Big/ n_0. \qquad (П.54)$$

Световой поток:

– перехватываемый оптической системой:

$$d\Phi_0 = \pi L_0 dA \sin^2\sigma_a, \qquad (П.55)$$

– прошедший оптическую систему:

$$d\Phi'_0 = \pi\tau L_0 \left({}^{n'_k}/_{n_1} \right)^2 dA' \sin^2 \sigma'_{a'}. \qquad (П.56)$$

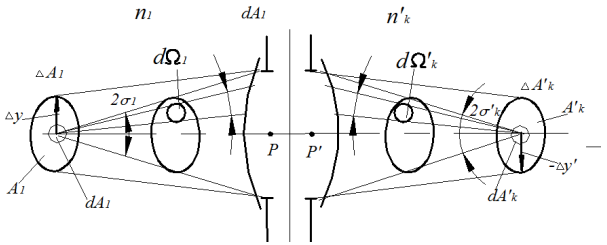


Рис. П.27. Оптическая система – световая трубка конечных размеров

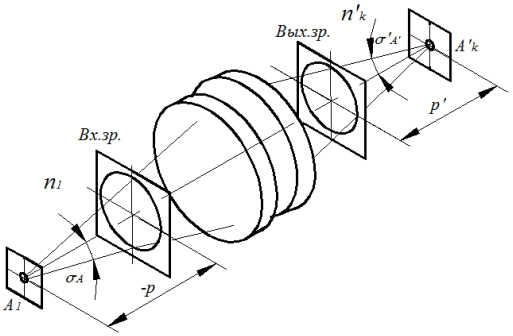


Рис. П.28. Световой поток, прошедший через оптическую систему

Освещенность изображения на оси:

$$E'_0 = \pi\tau L_0 \left({}^{n'_k}/_{n_1} \right)^2 \sin^2 \sigma'_{a'}. \qquad (П.57)$$

Или, что то же самое:

$$E'_0 = \pi\tau L_0 \left({}^{n'_k}/_{n_1} \right)^2 \left({}^{D}/_{f'} \right)^2 \beta_{op}^2 \Big/ 4\left(\beta_{op} - \beta_0\right)^2, \qquad (П.58)$$

где β_0 и β_{op} – линейное увеличение оптической системы и увеличение в её зрачках.

Геометрическая светосила:

$$H_{\text{г}} = \left(D/f'\right)^2. \tag{П.59}$$

Физическая светосила:

$$H_{\text{ф}} = \tau H_{\text{г}} = \tau\left(D/f'\right)^2. \tag{П.60}$$

Для системы в однородной среде:

$$E'_0 = \pi\tau L_0 \left(D/f'\right)^2 \beta_{op}^2 \Big/ 4\left(\beta_{op} - \beta_0\right)^2. \tag{П.61}$$

Для предмета в бесконечности:

$$E'^{\infty}_0 = 0{,}25\pi\tau L_0 \left(D/f'\right)^2. \tag{П.62}$$

При положении предмета на двойном фокусном расстоянии:

$$E'_0 = \pi\tau L_0 \left(D/f'\right)^2 \beta_{op}^2 \Big/ 4\left(\beta_{op} + 1\right)^2. \tag{П.63}$$

При увеличении в зрачках, равном 1:

$$E'^{\infty}_0 = 0{,}0625\pi\tau L_0 \left(D/f'\right)^2. \tag{П.64}$$

Изображение на большом расстоянии (формула Чиколева–Манжена) – для прожекторов:

$$E'_0 = \tau L_0 \, A'_{p'} \Big/ p'^2. \tag{П.65}$$

Освещенность изображения вне оси:

$$E'_\omega = E'_0 \cdot k_{\text{в}} \cdot \cos^4 \omega, \tag{П.66}$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент виньетирования.

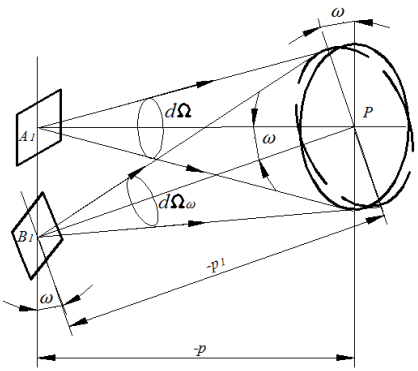


Рис. П.29. Пучки лучей, выходящие из осевой и внеосевой элементарных площадок

П.2.6.4. Потери излучения в оптических системах. Формулы Френеля

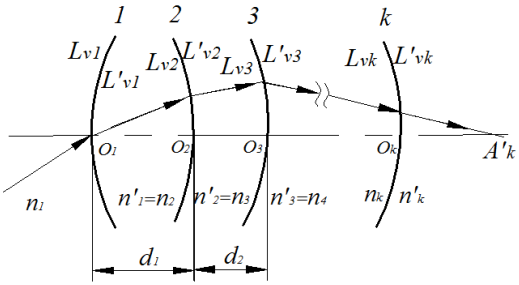


Рис. П.30. К определению яркости пучка лучей, прошедшего k поверхностей

Яркость пучка лучей после прохождения оптической системы из k поверхностей:

$$L_\nu = L_\nu \cdot \left({}^{n'_k}/_{n_1} \right)^2 \cdot \prod_{\nu=1}^{k}(1-\rho_\nu) \cdot \prod_{\nu=1}^{k-1} \tau_\nu^{d_\nu}, \qquad \text{(П.67)}$$

где ρ_ν – коэффициент отражения на ν-й границе раздела сред; τ_i – коэффициент пропускания в ν-й среде; d_ν – длина хода в ν-й среде, выраженная в сантиметрах.

Коэффициент отражения от полированных поверхностей может быть вычислен по ***формуле Френеля***:

$$\rho = 0{,}5\left[\frac{\sin^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin^2(\varepsilon + \varepsilon')} + \frac{\mathrm{tg}^2(\varepsilon - \varepsilon')}{\mathrm{tg}^2(\varepsilon + \varepsilon')}\right]. \quad (П.68)$$

Или для ***нормального падения***:

$$\rho = (n-1)^2/(n+1)^2. \quad (П.69)$$

Для кроновых поверхностей в воздухе коэффициент отражения принимается равным 4%, для флинтовых – 7%.

Коэффициент пропускания объектива, без учета поглощения, состоящего из k – кроновых поверхностей и n – флинтовых:

$$T \approx 0{,}96^k \cdot 0{,}93^n. \quad (П.70)$$

П.2.7. Характеристики оптических систем

Дифракционно-ограниченные системы – оптические системы, изображающие свойства которых определяются дифракцией.

Аберрационно-ограниченные системы – оптические системы, изображающие свойства которых определяются преимущественно аберрациями.

Для оценки величины аберраций используются следующие понятия:

– ***число Штреля*** – отношение интенсивности в центре функции рассеяния точки данной оптической системы по отношению к интенсивности в центре функции рассеяния идеальной оптической системы S;

– ***среднеквадратичное отклонение*** волновой аберрации волнового фронта, сформированного оптической системой $W_{\text{скв}}$;

– ***амплитуда волновой аберрации*** волнового фронта, сформированного оптической системой $W_{\max}$.

Вопрос об аберрационной или дифракционной ограниченности системы решается с помощью ***критериев***:

– ***Штреля*** – для несимметричных и знакопеременных волновых фронтов;

– ***Марешаля*** – для волновых фронтов с осциллирующей ошибкой;

– ***Рэлея*** – для волновых фронтов с общей ошибкой:

$$S \geq 0{,}8,\ W_{\text{скв}} \leq {}^{\lambda}/_{14},\ \ W_{max} \leq {}^{\lambda}/_{4}. \qquad \text{(П.71)}$$

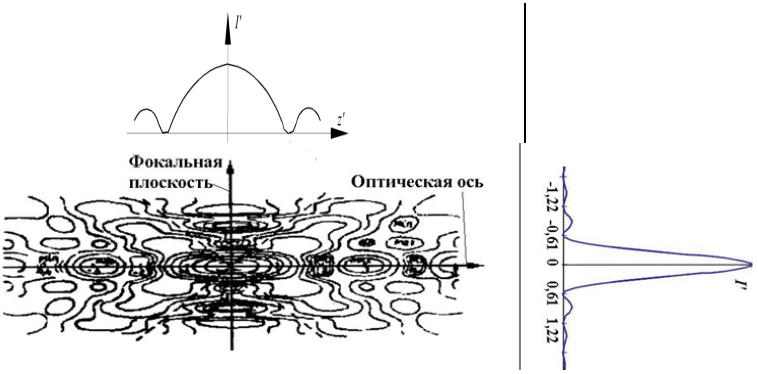
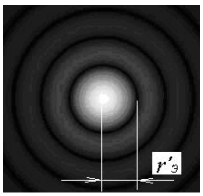


Рис. П.31. Распределение энергии в каустике фокального пятна

Для пространства изображений имеем:

– ***поперечный размер диска Эйри***



$$r'_{\text{э}} = 0{,}61\,{}^{\lambda}/_{A'} \approx \frac{1{,}22\lambda}{D'_{p'}} f'; \qquad \text{(П.72)}$$

– ***продольный размер диска Эйри***

$$\rho'_{\text{э}} = 2\,{}^{\lambda n'}/_{A'^2}. \qquad \text{(П.73)}$$

Разрешающая способность, или разрешение – способность оптических систем разрешать две близко расположенные точки.

Разрешение по Рэлею для дифракционно-ограниченных систем:

$$\varepsilon' = \delta_R = r'_{\text{э}}. \qquad \text{(П.74)}$$

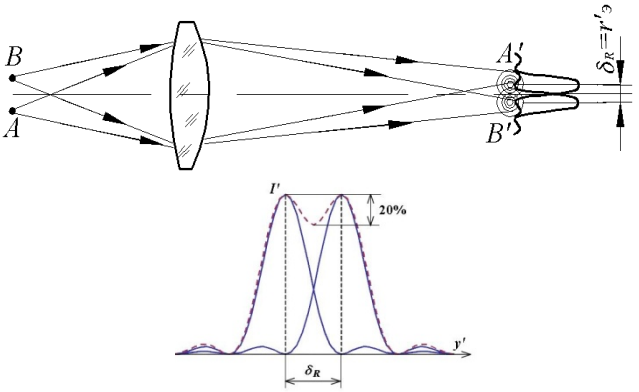


Рис. П.32. Разрешение по Рэлею

Для аберрационно-ограниченных систем разрешающая способность определяется:

– эмпирически с помощью наблюдения специальных ***мир***;

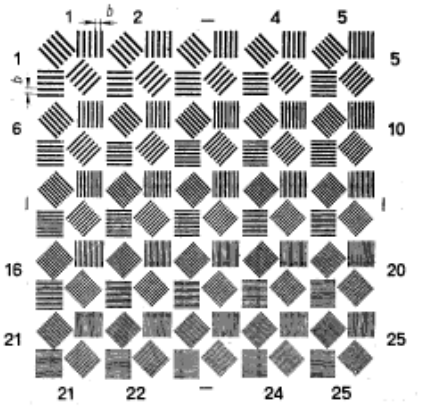


Рис. П.33. Штриховая мира Фуко абсолютного контраста для определения разрешающей способности

– теоретически посредством изучения ***передаточных характеристик*** (ЧКХ) и понятия порогового контраста:

$$K' = {E'_{\max} - E'_{\min}}/{E'_{\max} + E'_{\min}}. \quad (П.75)$$

Для визуальных систем значение порогового контраста 0,2%.

Глубина изображаемого пространства – протяженность предмета в пространстве предметов, соответствующая разрешению оптической системы в пространстве изображений.

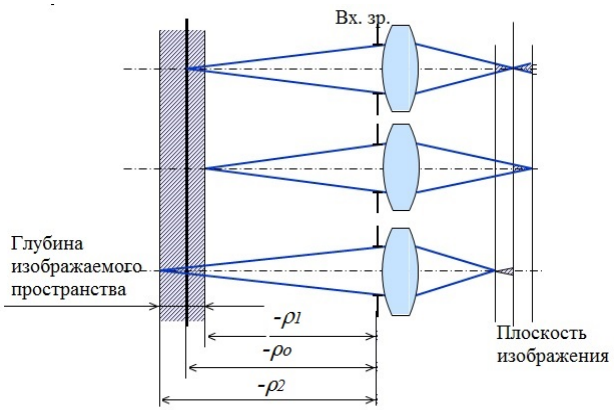


Рис. П.34. Глубина изображаемого пространства

Передний план:

$$p_1 = \frac{D_p \cdot p \cdot \beta}{\beta \cdot D_p + \delta'}, \quad (П.76)$$

задний план:

$$p_2 = \frac{D_p \cdot p \cdot \beta}{\beta \cdot D_p - \delta'}, \quad (П.77)$$

глубина резко изображаемого пространства:

$$\Delta z = p_2 - p_1 \approx \frac{2\delta' \cdot p}{D_p}, \quad (П.78)$$

где δ' и δ – ***размер кружка нерезкости*** в пространстве изображений и пространстве предметов соответственно.

При $\bar{A} = \frac{D_p}{f'}$ имеем для глубины:

$$\Delta z = \frac{2\delta' \cdot p}{\overline{A} \cdot f'}. \qquad (П.79)$$

Гиперфокальное расстояние при $p_2 = \infty$:

$$p_1 = \frac{\overline{A} \cdot f'^2}{\delta'}. \qquad (П.80)$$

Глубина резкости – протяженность изображения предмета в пространстве изображений, соответствующая разрешению оптической системы.

$$\Delta' = {y' \cdot p'}/{D'}. \qquad (П.81)$$

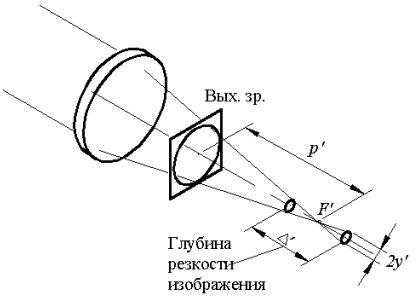


Рис. П.35. Глубина резкости изображения

При регистрации фотоэлектрической или фотографической размер пятна нерезкости принимается равным

$$2\delta'_{\text{р.с}} = {1}/{N},$$

где N' – разрешающая способность регистрирующей среды.

При регистрации глазом

$$\Delta' \cong 2p'\psi_{\text{гл}}\,{250}/{D'}. \qquad (П.82)$$

П.2.7.1. Глаз

С точки зрения геометрической оптики глаз может быть представлен в виде оптической схемы, приведенной на рис. П.36, параметры схемы приведены в табл. П.1.

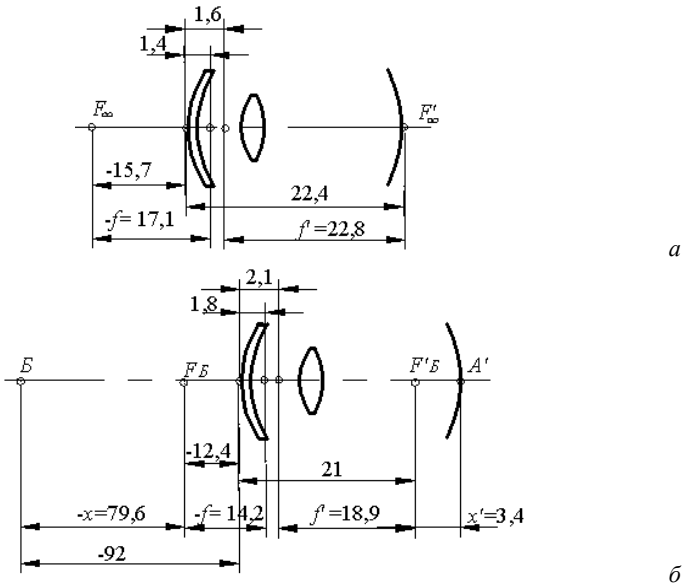


Рис. П.36. Оптическая схема глаза: *а* – аккомодированного на бесконечность; *б* – при максимальной аккомодации на ближнюю точку [26]

Оптическая система с такими параметрами, установленными на основании усреднения по результатам измерений, произведенным с реальными людьми, называется ***схематическим глазом по Гюльстранду***.

Точка, которую видит глаз без напряжения аккомодации (фокусное расстояние максимальное), называется ***дальней точкой ясного зрения***. Дальняя точка располагается на расстоянии $L_д$ от первой поверхности роговицы.

Точка, которую видит глаз с максимальным напряжением аккомодации (фокусное расстояние минимально), называется ***ближ-***

ней точкой ясного зрения. Ближняя точка располагается на расстоянии $L_{бл} = -92$ мм от первой поверхности роговицы.

Точка, при аккомодации на которую глаз имеет наилучшую разрешающую способность, называется точкой наилучшего зрения. Она расположена на расстоянии $L_{л} = -250$ мм от первой поверхности роговицы.

Таблица П.1

Параметры оптической схемы глаза по Гюльстранду

Наименование параметра	Значение параметра	
	В состоянии покоя	**При наибольшем напряжении**
Показатели преломления:		
роговицы	1,376	
водянистой влаги и стекловидного тела	1,336	
хрусталика	1,386	
Расстояние, мм, от вершины роговицы до:		
задней поверхности роговицы	0,5	0,5
передней поверхности хрусталика	3,6	3,2
задней поверхности хрусталика	7,2	7,2
Радиусы поверхности, мм:		
передней роговицы	7,7	7,7
задней роговицы	6,8	6,8
передней хрусталика	10	5,33
задней хрусталика	–6	–5,33
Оптическая сила глаза, дптр	58,64	70,57
Расстояние от вершины роговицы, мм, до:		
передней главной точки	1,348	1,772
задней главной точки	1,002	2,086
передней узловой точки	7,078	6,533
задней узловой точки	7,332	6,847
переднего фокуса	–15,707	–12,397
заднего фокуса	24,387	21,016
входного зрачка	3,047	2,668
выходного зрачка	3,067	3,212
Переднее фокусное расстояние, мм	–17,055	–14,169
Заднее фокусное расстояние, мм	22,785	18,930
Увеличение в зрачках	0,909	0,941

Зрачок глаза – апертурная диафрагма.

Разрешающая способность глаза определяется размером колбочки и принимается равной 1’, что совпадает со значением

$$\psi_{гл} = 1{,}22\,{}^{\lambda}\!/_{D_{гл}}, \qquad (П.83)$$

соответствующим условию дифракционной ограниченности для зрачка $D_{гл} = 2$ мм.

Поле глаза:

– в сторону виска 92–100 град;

– в сторону носа 60–65 град;

– по вертикали вверх 60 град;

– по вертикали вниз 70 град.

Зоны видения (поле зрения):

– центральная (желтое пятно) – 6–8 град;

– ясного видения – 30 град (горизонталь), 22 град (вертикаль);

– периферического зрения – 150 град (горизонталь), 125 град (вертикаль).

П.2.7.2. Лупа

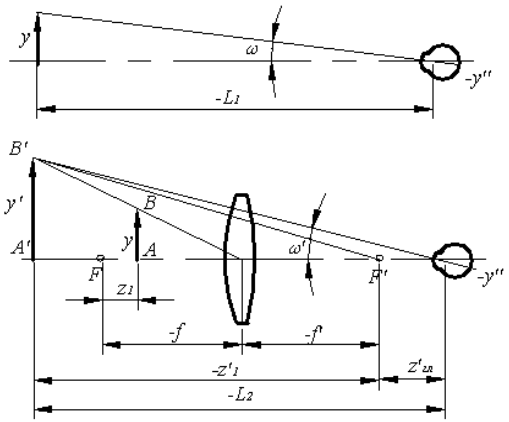


Рис. П.37. Изображение предмета, формируемое глазом:
а – невооруженным; *б* – с применением лупы

Видимое увеличение лупы для $L_1 = 250$ мм принимается равным

$$\Gamma_{\text{л}} = {}^{250}\!/_{f'_{\text{л}}}. \qquad \text{(П.84)}$$

Разрешающая способность лупы при работе с глазом для $L_2 = 250$ мм

$$\delta = {}^{L\psi_{\text{гл}}}\!/_{\Gamma_{\text{л}}} = {}^{0{,}0727}\!/_{\Gamma_{\text{л}}}. \qquad \text{(П.85)}$$

Глубина пространства, изображаемого лупой:

$$\Delta z = \frac{400}{\Gamma_{\text{л}} \times \rho'}, \qquad \text{(П.86)}$$

где $\rho = 3$ мм, – радиус зрачка в условиях сумеречного зрения.

Выходным зрачком в системе лупа–глаз является зрачок глаза. Он же играет роль апертурной диафрагмы.

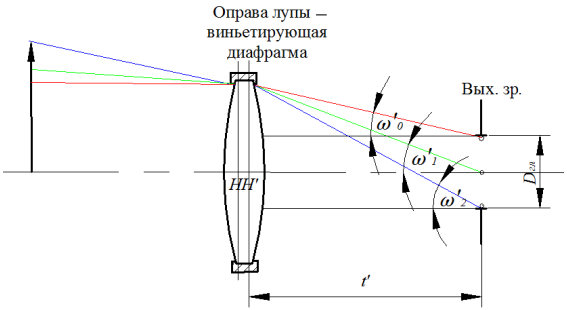


Рис. П.38. Ограничение пучков в лупе

Поле зрения лупы ограничивается ее оправой, угловой размер поля определяется лучом, проходящим из края оправы через край выходного зрачка (красный на рис. П.38) и принимается равным

$$\text{tg}\omega'_0 = \frac{D_{\text{л}} - D_{\text{гл}}}{2t'} \approx {}^{D_{\text{л}}}\!/_{2s'_{p'}}. \qquad \text{(П.87)}$$

В силу того, что такое ограничение не является резким, по большому счету оправа лупы является виньетирующей диафрагмой, а не диафрагмой поля зрения.

Линейное поле

$$y_0 = 2f'_{\text{л}}\text{tg}\omega'_0 = \frac{500tg\omega'_0}{\Gamma_{\text{л}}}'. \qquad \text{(П.88)}$$

П.2.7.3. Микроскоп

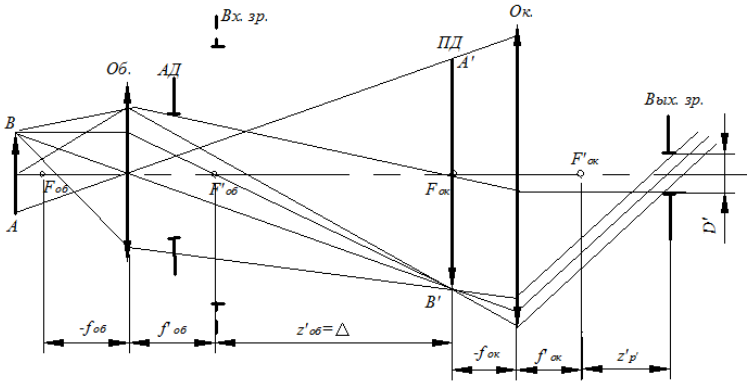


Рис. П.39. Ход лучей в микроскопе

Заднее фокусное расстояние

$$f' = -f'_{\text{об}}f'_{\text{ок}}/_{\Delta}. \qquad \text{(П.89)}$$

Переднее фокусное расстояние

$$f = f_{\text{об}}f_{\text{ок}}/_{\Delta}. \qquad \text{(П.90)}$$

Оптическая длина тубуса:

– $\Delta = 160$ мм для диоптрической осветительной системой;

– $\Delta = 190$ мм для зеркальной осветительной системы.

Положение фокусов

$$z_F = {f_{об} f'_{об}}/{\Delta}, \quad z'_{F'} = {f_{ок} f'_{ок}}/{\Delta}. \tag{П.91}$$

Видимое увеличение микроскопа

$$\Gamma_м = \beta_{об} \Gamma_{ок}. \tag{П.92}$$

Или, что то же самое:

$$\breve{\Gamma} = {-250\Delta}/{f'_{об} f'_{ок}} = {250}/{f'}. \tag{П.93}$$

Числовая апертура:

$$A = n' \sin \sigma'_A \tag{П.94}$$

определяет светотехнику микроскопа.

Для увеличения числовой апертуры используется иммерсионная жидкость (рис. П.40).

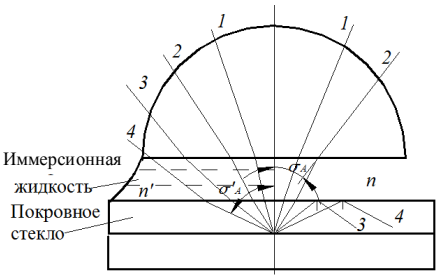


Рис. П.40. Апертурный угол объектива в воздухе и в иммерсионной жидкости

Входной зрачок и апертурная диафрагма – оправа объектива (если нет специальной апертурной диафрагмы), выходной зрачок объектива – входной зрачок окуляра, выходной зрачок микроскопа – изображение выходного зрачка объектива, даваемое окуляром.

Положение выходного зрачка:

$$z'_{P'} = {f'^2_{ок}}/{\Delta}. \tag{П.95}$$

Диаметр выходного зрачка:

$$D' = -500A/\Gamma_{\text{м}}. \quad \text{(П.96)}$$

Наилучшая энергетика микроскопа (максимальная субъективная яркость изображения на сетчатке), когда диаметр выходного зрачка равен диаметру зрачка глаза. В этом случае имеем ***нормальное увеличение микроскопа***. Для нормального увеличения справедливо:

$$\Gamma_{\text{м}}^{\text{н}} = -500A/D_{\text{гл}}. \quad \text{(П.97)}$$

Полевая диафрагма устанавливается в передней фокальной плоскости окуляра и совмещена с измерительной сеткой.

Линейное поле микроскопа:

$$2y = D_{\text{ПД}}/\beta_{\text{об}}. \quad \text{(П.98)}$$

Глубина изображения:

– ***аккомодационная глубина***:

$$\Delta z_a = 250/\Gamma_{\text{м}}^{\,2}; \quad \text{(П.99)}$$

– ***геометрическая глубина***:

$$\Delta z_{\text{г}} = 250\pi\psi_{\text{гл}}/\Gamma_{\text{м}}A; \quad \text{(П.100)}$$

– ***волновая глубина***:

$$\Delta z_{\text{в}} = \lambda/2A^2; \quad \text{(П.101)}$$

– ***полная глубина***:

$$\Delta z = \Delta z_{\text{в}} + \Delta z_{\text{г}} + \Delta z_{\text{а}}. \quad \text{(П.102)}$$

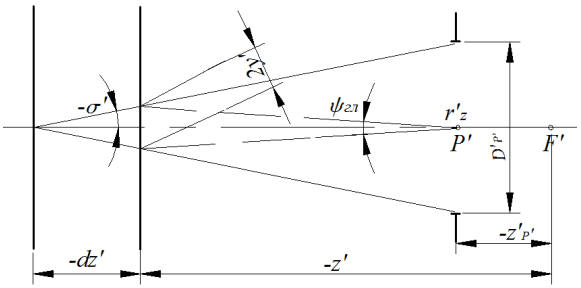


Рис. П.41. Глубина изображения в микроскопе

П.2.7.4. Зрительная труба

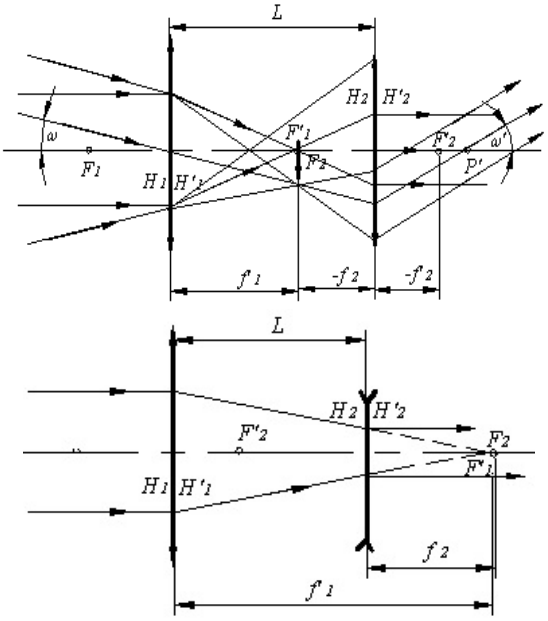


Рис. П.42. Ход лучей в зрительной трубе: *а* – Кеплера, *б* – Галилея

Оптический интервал – $\Delta = 0$ – система афокальная, следовательно:

$$-f = f' = {-f'_1 f'_2}/{\Delta} = \infty;\ a_F = a'_{F'} = \infty; \tag{П.103}$$

$$a_H = a'_{H'} = \infty.$$

Линейное увеличение:

$$\beta_0 = {-f'_2}/{f'_1}. \tag{П.104}$$

Продольное увеличение:

$$\alpha_0 = \left({f'_2}/{f'_1}\right)^2. \tag{П.105}$$

Угловое увеличение:

$$\gamma_0 = {-f'_1}/{f'_2}. \tag{П.106}$$

Видимое увеличение, увеличение в зрачках:

$$\Gamma_т = {\mathrm{tg}\omega'}/{\mathrm{tg}\omega} = \beta_p = {-f'_1}/{f'_2}. \tag{П.107}$$

Выходной зрачок:

$$D'_{p'} = 2\rho. \tag{П.108}$$

Положение выходного зрачка относительно окуляра:

$$S'_{p'} = 10 \div 12 \text{ мм}. \tag{П.109}$$

Угловое поле:

$$\mathrm{tg}\omega_{\max} = {\mathrm{tg}\omega'}/{\Gamma_т}, \tag{П.110}$$

где ω' – угловое поле окуляра.

Глубина изображаемого пространства с учетом аккомодации глаза:

$$x_{об} = \Gamma^2 \times L_л, \qquad (П.111)$$

где $L_л = -250$ мм.

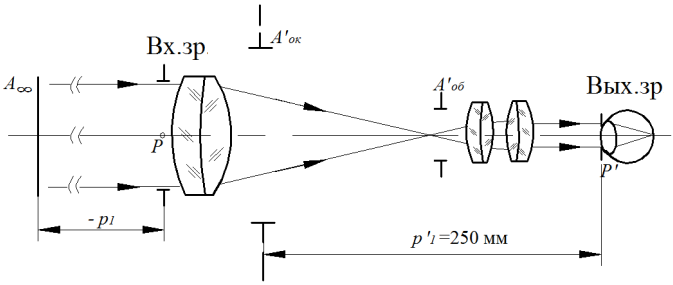


Рис. П.43. Глубина резко изображаемого пространства для телескопической системы

Угловое разрешение дифракционно-ограниченной телескопической системы зависит от диаметра входного зрачка. Для длины волны λ = 0,5 мкм эта зависимость в миллиметрах описывается формулой

$$\psi = {}^{120''}/_{D}. \qquad (П.112)$$

П.2.7.5. Объектив

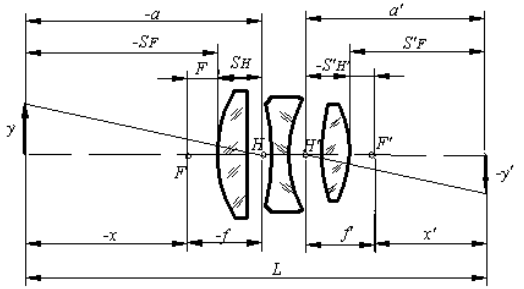


Рис. П.44. Геометрические параметры реальной оптической схемы объектива

Для удаленного предмета принимается:

$$x' \approx {-f'^2}/{a},\ \beta_0 \approx {f'}/{a}. \qquad (П.113)$$

Относительное отверстие объектива ${D}/{f'}$ определяет освещенность изображения.

Для точки на оси имеем:

$$E' = {{\pi}/{4}\, L\tau \left({D}/{f'}\right)^2 \beta_p^2}\Big/{(\beta_p - \beta_0)^2}. \qquad (П.114)$$

Для удаленного предмета ($s = \infty, z = 0, \beta_0 = 0$):

$$E'_{s\to\infty} = {\pi}/{4}\, L\tau \left({D}/{f'}\right)^2. \qquad (П.115)$$

Для симметричного репродукционного объектива:

$$E'_{\text{реп}} = {{\pi}/{4}\, L\tau \left({D}/{f'}\right)^2}\Big/{(1 - \beta_0)^2}. \qquad (П.116)$$

Геометрическая светосила $\left({D}/{f'}\right)^2$, определяющая освещенность, записывается обычно в виде

$$\left({D}/{f'}\right)^2 = \left({1}/{K}\right)^2, \qquad (П.117)$$

где K – диафрагменное число.

Физическая светосила:

$$\tau\left({D}/{f'}\right)^2 = \left({1}/{K_{\text{физ}}}\right)^2. \qquad (П.118)$$

Внутри объектива находится ***ирисовая апертурная диафрагма***, позволяющая изменять освещенность изображения на оси.

Принятая шкала:

$1/K$	1:1	1:1,4	1:2	1:2,8	1:4	1:5,6	1:8	1:11	1:16	1:22	1:32
Обозначения	1	1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32

Поле фотообъектива:

– в пространстве изображений:

$$2\omega' = 2\text{arctg}\, {}^{l}/_{2f'}; \qquad \text{(П.119)}$$

– в пространстве предметов:

$$\text{tg}\omega = {}^{\text{tg}\omega'}/_{\gamma_p}, \qquad \text{(П.120)}$$

где

$$\gamma_p = 1 + {}^{a_p}/_{f'}. \qquad \text{(П.121)}$$

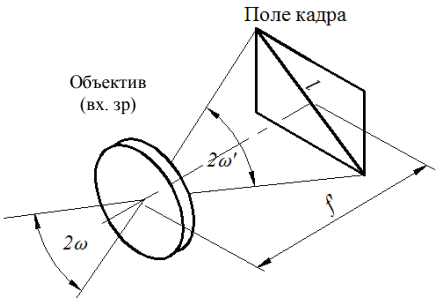


Рис. П.45. Связь углового поля с размером кадра

Входной зрачок – изображение апертурной диафрагмы, построенное в пространстве предметов частью объектива, расположенной перед апертурной диафрагмой.

Выходной зрачок – изображение апертурной диафрагмы, построенное в пространстве изображений частью объектива, расположенной после апертурной диафрагмы.

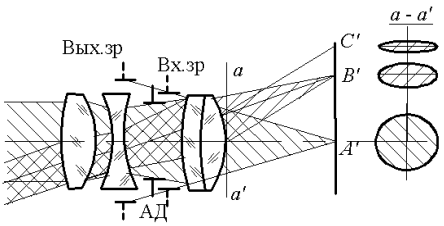


Рис. П.46. Ограничение пучков лучей в фотообъективе

Для внеосевых точек обязателен учет виньетирования:

$$E'_{\omega} = k_{\omega} E'_0 \cos^4 \omega. \qquad (П.122)$$

Для объективов с нормальным полем (45–60 град) коэффициент виньетирования допускается не более k_{ω} =25–30%.

Глубина резкости

$$\Delta' = {}^{2p'\psi_{гл}250}/_{D'}. \qquad (П.123)$$

Если изображение предмета расположенного в бесконечности, рассматривается глазом с расстояния 250 мм с угловым разрешением 1', то

$$\Delta' \approx {}^{f'}/_{7D'}. \qquad (П.124)$$

Если изображение фотографируется, то при $\beta_p = 1$

$$\Delta'_1 = {}^{K}/_{N}. \qquad (П.125)$$

П.2.8. Хроматизм

Хроматизм положения определяется:

$$\Delta s'_{\lambda_1\lambda_2} = s'_{\lambda_1} - s'_{\lambda_2}. \qquad (П.126)$$

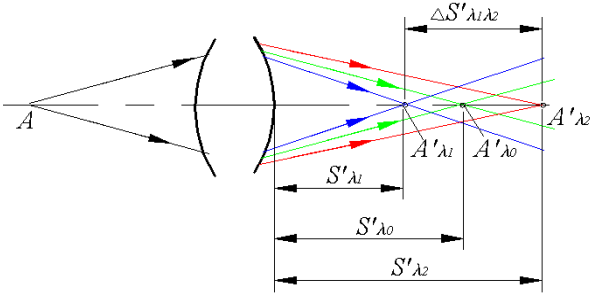


Рис. П.47. Хроматизм положения

Хроматизм увеличения определяется:

$$\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} = y'_{\lambda_1} - y'_{\lambda_2}. \qquad (П.127)$$

Или

$$\Delta\beta_0 = \beta_{0\lambda 1} - \beta_{0\lambda 2}. \qquad (П.128)$$

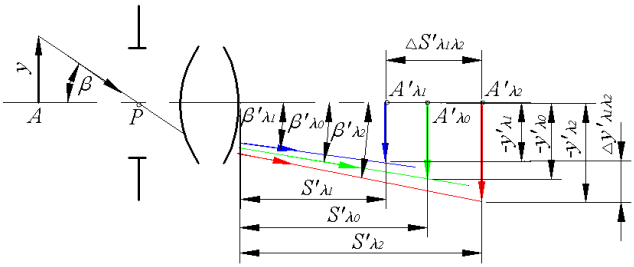


Рис. П.48. Хроматизм увеличения: $\Delta y'_{\lambda_{F'},\lambda_{C'}}$

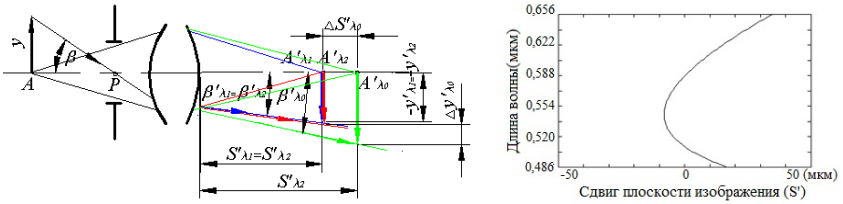


Рис. П.49. Вторичный спектр положения $\Delta s'_{\lambda_e,\lambda_C}$,
и вторичный спектр увеличения $\Delta y'_{\lambda_e,\lambda_C}$,

Хроматизм определяется дисперсией оптических материалов. Для характеристики дисперсии используется коэффициент дисперсии, который для видимого диапазона называется ***числом Аббе:***

$$\nu_e = {(n_e - 1)}\Big/{(n_{F'} - n_{C'})}, \qquad (П.129)$$

где n_e, $n_{F'}$, $n_{C'}$ – показатели преломления для λ_e, $\lambda_{F'}$, $\lambda_{C'}$; $\lambda_{F'} = 479{,}99$ нм, $\lambda_{C'} = 643{,}85$ нм, соответственно F' и C' линии кадмия, представляющие собой коротковолновую и длинноволновую границы видимого диапазона. $\lambda_e = 546{,}073$ нм, e – линия ртути, являющаяся серединой видимого диапазона.

Условие коррекции хроматизма положения для двухлинзового объектива с оптической силой Φ_Σ:

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_\Sigma \times \nu_2}{\nu_2 - \nu_1}, \; \Phi_1 = -\frac{\Phi_\Sigma \times \nu_1}{\nu_2 - \nu_1}. \qquad (П.130)$$

Вторичный спектр положения для двухлинзового объектива принимается равным

$$\Delta s'_{\lambda_F \lambda_{C'}} \approx {f'_\Sigma}\Big/{2500}. \qquad (П.131)$$

П.2.9. Аберрации 3-го порядка по Зайделю

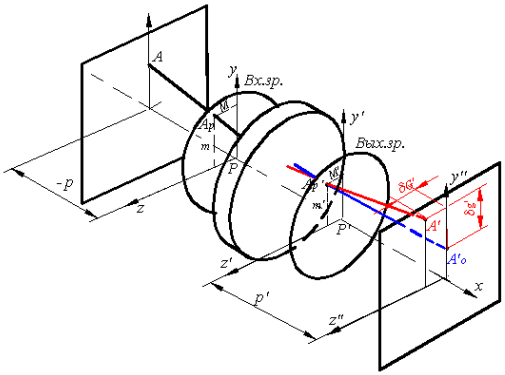


Рис. П.50. Меридиональная $\delta g'$ и сагиттальная $\delta G'$ составляющие поперечной аберрации луча в плоскости изображения

По Зайделю:

$$\delta g' = Am(m^2 + M^2) + Bl(M^2 + 3m^2) + l^2 m(3C + \quad \text{(П.132)}$$
$$+D) + El^3,$$

$$\delta G' = Am(m^2 + M^2) + 2Blm + l^2 M(C + D), \quad \text{(П.133)}$$

где

A – коэффициент сферической аберрации;
B – коэффициент аберрации кома;
C – коэффициент астигматизма;
D – коэффициент аберрации кривизна поля;
E – коэффициент дисторсии.

При дефокусировке Δ':

$$\delta g'_{\Delta'} = \delta g' - \frac{\Delta' \beta_p}{a} m\,, \quad \text{(П.134)}$$

$$\delta G'_{\Delta'} = \delta G' - \frac{\Delta' \beta_p}{a} M. \quad \text{(П.135)}$$

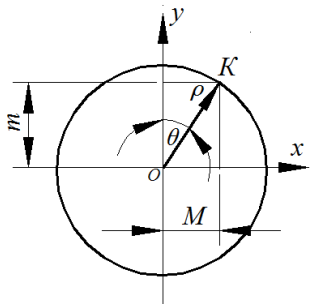


Рис. П.51. Нормированные (на краю зрачка $\sqrt{m^2 + M^2} = 1$) координаты внемеридионального луча, проходящего через точку *K* в плоскости входного зрачка

Сферическая аберрация – аберрация широкого осевого пучка лучей

$$\delta g' = A\rho^3. \quad \text{(П.136)}$$

Кома – аберрация широкого наклонного пучка лучей

$$g' = Bl\rho^2(\cos 2\theta + 2), \quad \text{(П.137)}$$

$$\delta G' = Bl\rho^2 \sin 2\theta. \quad \text{(П.138)}$$

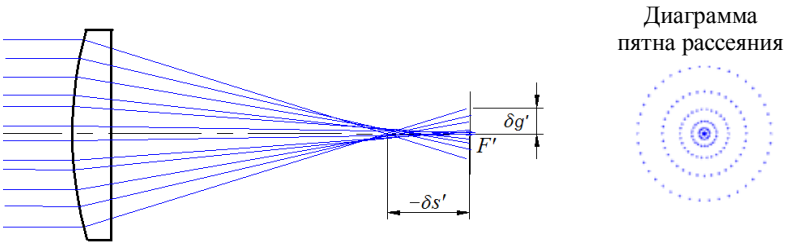


Рис. П.52. Схема образования фокального пятна при сферической аберрации, где *H, H'* – главные плоскости; *F'* – задний фокус; *f'* – заднее фокусное расстояние; $\delta s'$ – продольная сферическая аберрация; $\delta g'$ – поперечная сферическая аберрация

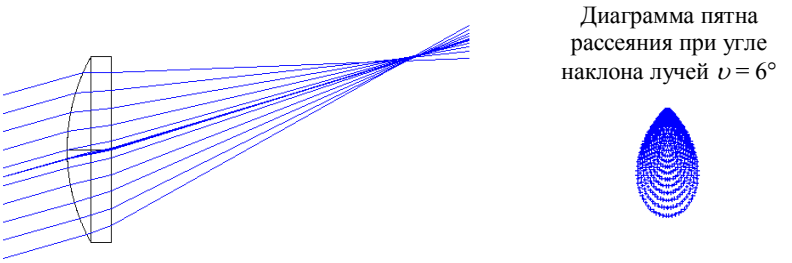


Рис. П.53. Схема образования фокального пятна при коме

Астигматизм – аберрация узкого наклонного пучка лучей

$$\delta g' = 3Cl^2\rho\cos\theta, \quad \text{(П.139)}$$

$$\delta G' = Cl^2\rho\sin\theta. \quad \text{(П.140)}$$

Кривизна поля – аберрация широкого наклонного пучка лучей, возникающая в результате астигматизма

$$\delta g' = Dl^2 m, \quad \text{(П.141)}$$

$$\delta G' = Dl^2 M. \quad \text{(П.142)}$$

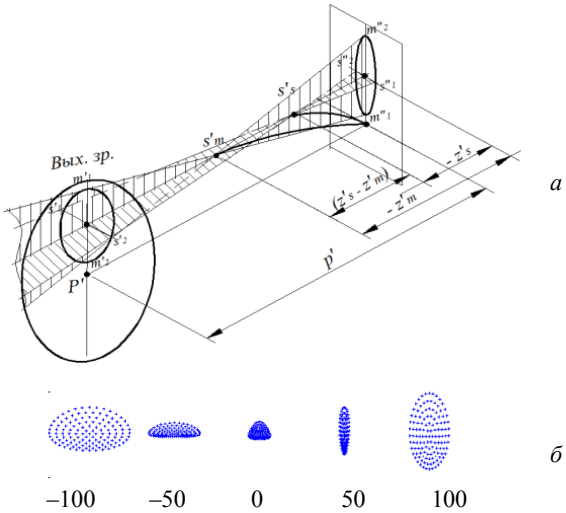


Рис. П.54. Схема образования фокального пятна при астигматизме

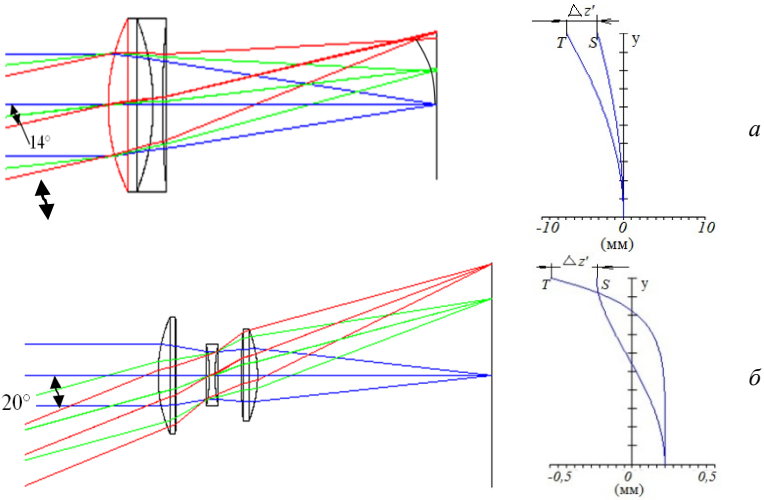


Рис. П.55. Схема образования изображения при кривизне поля:
а – объектив без коррекции кривизны поля изображения; *б* – объектив с коррекцией кривизны поля изображения;
Δ*z*’ – астигматизм на краю поля изображения

С дефокусировкой Δ'

$$\delta g'_{\Delta'} = \left(Dl^2 - \frac{\Delta'\beta_p}{a}\right)\rho\sin\theta, \tag{П.143}$$

$$\delta G'_{\Delta'} = \left(Dl^2 - \frac{\Delta'\beta_p}{a}\right)\rho\cos\theta. \tag{П.144}$$

При

$$\Delta' = \frac{Dl^2 a}{\beta_p}, \tag{П.145}$$

где a – расстояние от входного зрачка до предмета, аберрация кривизны обращается в 0.

Дисторсия – аберрация главных лучей

$$\delta g' = El^3, \tag{П.146}$$
$$\delta G' = 0.$$

Геометрические аберрации связаны с волновой – *W(m',M')*:

$$\delta g' = R \cdot \frac{dW(m',M')}{dm'}, \tag{П.147}$$

$$\delta G' = R \cdot \frac{dW(m',M')}{dM'}, \tag{П.148}$$

$$W = \frac{1}{R} \cdot \int \delta g' dm' + \delta G' dM'. \tag{П.149}$$

Связь продольной и поперечной аберраций для симметричных аберраций и малых углов ($\sin\sigma'_{A'} = \mathrm{tg}\sigma'_{A'}$):

$$\Delta s' = \frac{\delta g'}{\rho \sin \sigma'_{A'}}. \tag{П.150}$$

Волновая аберрация может быть представлена в виде ряда:

$$W(\rho,\theta) = W_{00} + W_{20}\rho^2 + W_{11}\rho\cos\theta + W_{40}\rho^4 + \tag{П.151}$$
$$+W_{31}\rho^3\cos\theta + W_{22}\rho^2\cos\theta + W_{60}\rho^6.$$

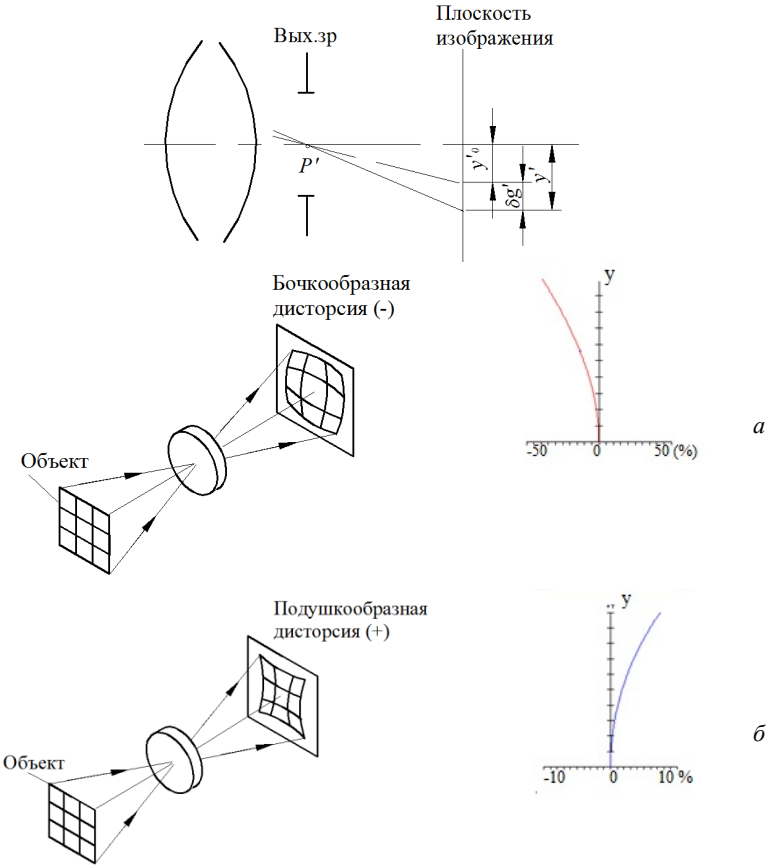


Рис. П.56. Схема образования изображения при дисторсии

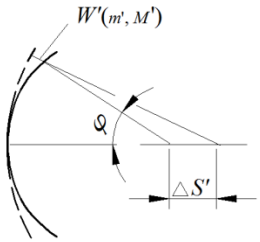


Рис. П.57. Геометрические и волновые аберрации оптической системы

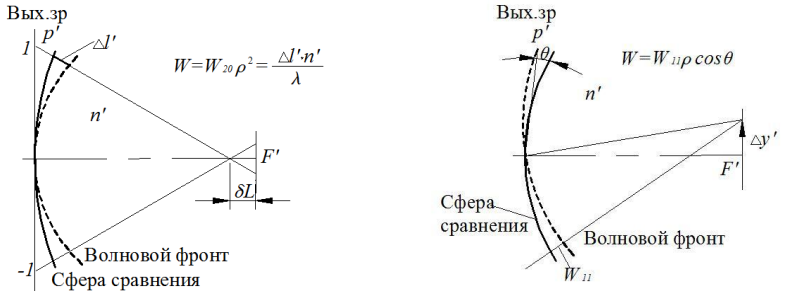


Рис. П.58. Волновая аберрация при: *а* – дефокусировке; *б* – наклоне волнового фронта

Коэффициенты этого ряда соответствуют аберрациям Зайделя:

Дефокусировка:

$$W = W_{20}\rho^2, \tag{П.152}$$

$$\delta L = {2W_{20}}\Big/{\sin^2\sigma'_A}, \tag{П.153}$$

$$W_{20} = 0{,}5\delta L\sin^2\sigma'_A. \tag{П.154}$$

Сферическая аберрация:

$$W_{40} = 0{,}25\delta s\cdot\sin^2\sigma'_A. \tag{П.155}$$

Кома третьего порядка:

$$\delta g' = W_{30}\rho^2\,(2+\cos2\theta)\Big/{\sin\sigma'_A}, \tag{П.156}$$

$$\delta G' = W_{30}\rho^2\,(\sin2\theta)\Big/{\sin\sigma'_A}. \tag{П.157}$$

Астигматизм и кривизна третьего порядка:

$$W = W_{22}\rho^2\cos^2\theta + W_{20}\rho^2, \tag{П.158}$$

$$\delta g' = 2\rho(W_{22}+W_{20})\,\cos\theta\Big/{\sin^2\sigma'_A}, \tag{П.159}$$

$$\delta G' = 2\rho W_{20}\,\sin\theta\Big/{\sin^2\sigma'_A}. \tag{П.160}$$

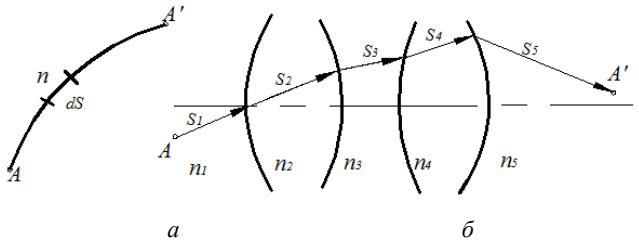
Поперечное смешение:

$$W_{11} = \Delta y' \cdot \sin\sigma'_A. \qquad \text{(П.161)}$$

Для расчета допусков ***(продольные и поперечные наводки)*** принимается ***(дефокусировка и поперечное смещение)***:

$$W(\rho, \theta) \leq 0{,}1 \text{ мкм}. \qquad \text{(П.162)}$$

П.2.10. Оптическая длина пути. Принцип Ферма



а *б*

Рис. П.59. Оптическая длина пути от точки *A* до точки *A'*: *а* – в неоднородной среде; *б* – в однородной среде

Оптическая длина пути от точки A до A':

$$L = \int_A^{A'} n\, ds. \qquad \text{(П.163)}$$

Время на прохождение этого пути:

$$t = {}^{L}/_{c}, \qquad \text{(П.164)}$$

где c – скорость света.

Принцип Ферма: свет проходит расстояние между двумя точками по тому пути, время на прохождение которого минимально.

Отсюда

$$\delta L = \delta \int_A^{A'} n\, ds \to 0. \qquad \text{(П.165)}$$

Стационарность оптического пути: для двух фиксированных волновых поверхностей оптическая длина пути для всех лу-

чей, идущих между этими поверхностями, постоянна независимо от направления.

Оптическая длина (длина пути, оптический путь в среде):

$$L = nl. \tag{П.166}$$

l – геометрический путь.

Фаза:

$$\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi n \cdot l}{\lambda}. \tag{П.167}$$

Разность (набег) фаз по отношению к воздуху:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \Delta L}{\lambda} = \frac{2\pi (n-1) \cdot l}{\lambda}. \tag{П.168}$$

Стрелка прогиба:

$$\Delta = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}} \approx {D^2}/{8R}. \tag{П.169}$$

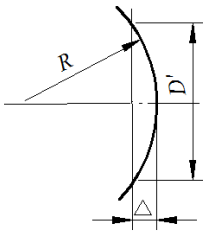


Рис. П.60. К понятию стрелки прогиба

П.2.11. Положения геометрической оптики, которые нужно просто знать

– Свет распространяется между двумя точками по кратчайшему пути: по прямой между точками в однородной изотропной среде.

– Закон Снеллиуса–Декарта.

– Формула Ньютона.

– Излом оптической оси (призмы и зеркала) следует выполнять в параллельных пучках.

– Без астигматизма $t'_m = t'_s$ на плоской поверхности при $r_m = \infty$:

- $\sin\varepsilon = 0$ – нормальное падение;
- $t = t' = \infty$ –параллельный пучок лучей;
- $n \cdot t = n' \cdot t'$.

– Идеальная оптическая система осуществима только в параксиальной области реальных оптических систем.

– Микроскоп – это лупа с большим увеличением.

– Предмет в бесконечности наблюдается с помощью телескопической системы, на конечном расстоянии – микроскопом.

– Измерительные сетки следует ставить в плоскости изображения.

– Для излома оптической оси предпочтительно использовать двугранные углы, например, выполненные в виде призм.

– Значение волновой аберрации не изменяется по мере распространения волновой поверхности.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 7
1.1. Терминология 7
1.2. Погрешности измерений 26
1.3. Метрологические характеристики средств измерений 41

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 53
2.1. Особенности оптических измерений 53
2.1.1. Функциональная схема прибора для оптических измерений 54
2.1.2. Оптические измерительные изображения 65
2.1.3. Передаточные характеристики оптических систем 78
2.1.4. Оптические измерительные наводки 83
2.2. Мерительный инструмент 94
2.2.1. Меры 94
2.2.2. Отсчетные устройства 96
2.2.3. Инструмент для измерения длин 109
2.2.4. Измерительные скобы 120
2.2.5. Угломеры 122
2.3. Типовые приборы для оптических измерений 123
2.3.1. Фотоприемные устройства 123
2.3.2. Оптические скамьи и столы 152
2.3.3. Телескопические приборы 154
2.3.4. Микроскопы 175
2.3.5. Спектральные приборы 190
2.3.6. Длиномеры 210
2.3.7. Оптические измерительные приборы для диагностики, основанные на измерении светового потока 214
2.3.8. Интерферометры 236

ГЛАВА 3. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ 263
3.1. Измерение оптических характеристик оптических материалов 263
3.2. Измерение геометрических размеров оптических деталей 275
3.2.1. Методы измерения габаритных размеров оптических деталей 276
3.2.2. Методы измерения радиусов кривизны исполнительных поверхностей 284
3.2.3. Методы измерения фокусных расстояний и фокальных отрезков 291
3.2.4. Методы измерения углов клиньев и призм, пирамидальности 297
3.3. Методы и устройства для контроля геометрии оптических поверхностей 305
3.3.1. Теневые методы контроля формы поверхности 313
3.3.2. Интерференционные методы контроля формы поверхности 332
3.3.3. Контроль формы асферических поверхностей 342
3.3.4. Методы измерения шероховатости 346
3.3.5. Контактные методы измерения волнистости 349
3.3.6. Метод переналожений в задачах контроля формы поверхности 354
3.4. Методы измерений характеристик оптических систем 364
3.4.1. Методы измерений геометрических характеристик оптических систем 365
3.4.2. Методы измерений светотехнических характеристик оптических систем 377
3.4.3. Методы измерений характеристик качества изображения оптических систем 385
3.5. Измерение характеристик лазерного излучения 409

ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАУКЕ – ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ РАЗРАБОТКИ 432
4.1. Прецизионные измерения радиуса кривизны 433
4.2. Интеллектуальные оптические датчики как средства измерений геометрии промышленных объектов 442
4.3. Информационно-измерительные системы для металлургической промышленности 441
4.3.1. Информационно-измерительная система измерения геометрии непрерывно-литой заготовки на машине непрерывного литья 461
4.3.2. Информационно-измерительная система порезки рельсов мерной длины 478
4.3.3. Информационно-измерительная система измерения прямолинейности рельсов в потоке 485
4.4. Голографическая (информационно-измерительная) система для измерения содержания планктона в среде обитания 496

Литература 509

ПРИЛОЖЕНИЯ 515
П1. Нормативно-техническая документация по измерениям вообще и оптическим в частности 515
П.2. Глоссарий по геометрической оптике 522

Учебное издание

Виктор Валентинович Демин
Игорь Георгиевич Половцев
Галина Владимировна Симонова

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор К.Г. Шилько
Компьютерная верстка А.И. Лелоюр
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Подписано к печати 22.12.2014 г. Формат $60\times84^{1}/_{16}$.
Бумага для офисной техники. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 33,7.
Тираж 300 экз. Заказ № 648.

Отпечатано на оборудовании
Издательского Дома
Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
Тел. 8+(382-2)–53-15-28
Сайт: http://publish.tsu.ru
E-mail: rio.tsu@mail.ru

ISBN 978-5-94621-436-0

