

На правах рукописи

Агапов Николай Афанасьевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИСТАНЦИОННОГО ВИЗУАЛЬНОГО
КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНО
И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.11.13 – Методы и приборы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск 2013

Работа выполнена совместно в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Открытом акционерном обществе «Сибирский химический комбинат» (ОАО «СХК»).

Научный консультант

Кулешов Валерий Константинович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Смирнов Геннадий Васильевич,
доктор технических наук, профессор кафедры РЭТЭМ ФГБОУ ВПО «Томский университет систем управления и радиоэлектроники»

Смирнов Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет»

Недавний Олег Иванович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Основания, фундаменты и испытания сооружений» ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 22.10.2013 г. в 15⁰⁰ ч. в ауд. 215 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных 7.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан

_____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е.А. Васендина

Введение

Актуальность темы.

Визуальный измерительный контроль считается весьма эффективным и удобным способом выявления самых различных дефектов. Именно с визуального осмотра обычно начинаются все мероприятия по неразрушающему контролю.

Визуальный и измерительный контроль применяется при монтаже, строительстве, ремонте, реконструкции, а так же в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений. Визуально проверяются полуфабрикаты и готовая продукция, отклонения от форм и геометрические размеры изделий, изъяны материала, обработка поверхности (крупные трещины и коррозионные поражения) и другие дефекты. Качество визуального контроля ограничено возможностями глаза и зависит от удаленности объекта, слабой освещенности, быстрого перемещения изделия и др. Намного расширить пределы естественных возможностей глаза позволяют оптические приборы, которые увеличивают разрешающую способность системы прибор-глаз. Визуальный контроль с применением оптических устройств называется визуально-оптическим. Это наиболее доступный и простой метод для обнаружения поверхностных дефектов изделий. При визуально-оптическом контроле изделия осматриваются в видимом свете с использованием оптических приборов. Этот вид контроля используется на различных стадиях изготовления деталей, в процессе их эксплуатации и ремонта.

Приемником у визуальных приборов является глаз человека. К визуальным приборам относятся обзорные приборы, лупы, микроскопы, эндоскопы и др. В эту же группу входят приборы, с помощью которых измеряются геометрические размеры. Визуальный метод контроля, в частности, доказал свою высочайшую эффективность при контроле качества основного металла, сварных швов, соединений и наплавов – как в процессе подготовки и проведения сварки, так и при исправлении выявленных дефектов.

Одним из основных инструментов визуального контроля являются эндоскопы различной сложности и необходимые принадлежности к ним. Эндоскопы нашли широкое применение для дистанционного визуального контроля технологического оборудования на атомных станциях и радиохимических производствах. Эндоскоп позволяет оценивать техническое состояние внутренних деталей оборудования без его разборки – то есть заглядывать внутрь сосудов, емкостей, полостей, шахт и т.п. через имеющиеся технологические отверстия. При этом определяется наличие поверхностных дефектов. Измеряется степень износа, проверяется правильность взаимного расположения деталей, находятся и извлекаются наружу инородные предметы. Для оценки ресурса объекта контроля также важно, чтобы эндоскоп позволял производить измерение линейных размеров дефектов, отдельных деталей и узлов. Так же важно, что новейшие эндоскопы позволяют документировать полученную информацию в форме видеозаписи, фотоснимков или цифровых

изображений для последующего повторного просмотра, обработки и распечатки на бумаге.

Основным элементом любого визуального прибора, в том числе и эндоскопа, является оптико-механический тракт, формирующий изображение на сетчатке глаза либо на фотоприемнике. Поэтому достоверность результатов контроля напрямую зависит от качества изображения, создаваемого оптикой прибора. Качество изображения, в свою очередь, определяется качеством расчета, то есть методами и алгоритмами расчета, а также качеством изготовления, сборки и юстировки.

Целью работы является:

разработка и реализация оптико-электронных систем дистанционного визуального контроля технологического оборудования объектов использования атомной энергии для выполнения работ в рамках Концепции федеральной целевой программы "Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года" (Распоряжение Правительства РФ от 19.04.2007 N 484-р).

Задачами исследования являются:

- разработка метода и экспериментальное исследование возможности контроля положения главной оптической оси корундовых подпятников типа ПКС (подпятники корундовые сферические);
- разработка метода проведения дистанционных бесконтактных измерений и алгоритмов для расчета линейных размеров объектов контроля по результатам измерений с помощью жесткого линзового эндоскопа;
- разработка алгоритмов расчета кардинальных элементов системы оптических поверхностей второго порядка с осевой симметрией в области реальных лучей;
- системное изложение алгоритмов расчета хода лучей через оптические системы с произвольным расположением в пространстве поверхностей различного вида.

Объектом исследования являются:

- технологическое оборудование объектов использования атомной энергии; проблемы, возникающие при обращении с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, а также проблемы, связанные с выводом из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов;
- оптические системы визуальных приборов неразрушающего контроля.

Методы исследования. В работе использовались:

- векторные и матричные методы расчета и разработки алгоритмов в рамках геометрической оптики;
- методы вычислительной математики для решения уравнений высшего порядка;

- оптические экспериментальные методы.

Научная новизна работы:

- впервые разработан и научно обоснован метод контроля в отраженном свете положения главной оптической оси сферических корундовых подпятников в составе маятников газовых центрифуг всех типов;
- впервые разработаны метод и совокупность алгоритмов для реализации дистанционного визуального измерительного контроля технологического оборудования в условиях затрудненного доступа к нему и/или наличия опасных и вредных производственных факторов с помощью жесткого линзового эндоскопа;
- впервые разработаны и системно изложены алгоритмы расчета кардинальных элементов системы оптических поверхностей второго порядка с осевой симметрией в области реальных лучей.

На защиту выносятся:

- метод и прибор для контроля положения главной оптической оси сферических корундовых подпятников газовых центрифуг без демонтажа маятника;
- оптико-телевизионный прибор визуального контроля (ПВК) на базе радиационностойкого, герметичного, с компенсацией ограничения поля зрения жесткого линзового эндоскопа для дистанционного визуального контроля технологического оборудования в условиях затрудненного доступа и/или наличия вредных производственных факторов;
- метод, совокупность алгоритмов и программное обеспечение для проведения дистанционных бесконтактных измерений линейных размеров;
- измерительный смотровой комплекс на базе ПВК для проведения дистанционного визуального измерительного контроля и бесконтактного измерения линейных размеров дефектов и элементов конструкций;
- совокупность алгоритмов и программное обеспечение для расчета кардинальных элементов центрированных оптических систем в области реальных лучей.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

разработанные и реализованные приборы используются на ядерно и радиационно опасных объектах для дистанционного визуального контроля технологического оборудования и решения задач, возникающих при обращении с РАО, при подготовке к выводу и выводе из эксплуатации реакторов;

- прибор для контроля положения главной оптической оси подпятника корундового сферического установлен на Заводе разделения изотопов ОАО «СХК» и используется для отбраковки маятников с дефектными корундовыми подпятниками;
- смотровые комплексы на базе жесткого линзового эндоскопа в рамках договорных отношений были поставлены на следующие АЭС: Хмель-

ницкую, Калининскую, Ровенскую, Игналинскую, Балаковскую, Смоленскую, Курскую;

- измерительный смотровой комплекс внедрен на Билибинской АЭС;
- оптико-телевизионный прибор визуального контроля, оснащенный хватом-манипулятором, внедрен на Балаковской АЭС;
- приборы ПВК-58 использовались в ОАО «СХК» на Радиохимическом заводе для контроля технологического оборудования; на Реакторном заводе для контроля технологических каналов реакторов, осмотра и контроля «россыпи» на реакторе АДЭ-4, контроля состояния транспортно-технологических емкостей без опорожнения, обследования твэлов типа ДАВ-90 в среде транспортно-технологических емкостей, сопровождения работ по выводу из эксплуатации остановленных ядерных реакторов; для контроля состояния емкостей ОГФУ на ЗРИ; для осмотра цистерн для транспортировки ЖРО на пл. 16; для осмотра технологического оборудования на Сублиматном заводе; смотровые комплексы на базе жесткого линзового эндоскопа в настоящее время используются в ОАО «ОДЦ УГР» для сопровождения работ по выводу из эксплуатации остановленных реакторов; на Билибинской АЭС для осмотра графитовой кладки; на Балаковской АЭС для обращения с радиоактивными отходами;
- программное обеспечение «ОПТИКА» внедрено в учебном процессе в Томском политехническом университете в институте физики высоких технологий.

Достоверность результатов обеспечена адекватным применением математических методов, стандартного оборудования и комплектующих изделий, а также тем, что аналитические результаты базируются на фундаментальных соотношениях, таких, как закон преломления, принцип Ферма, сравниваются с результатами специально проведенных численных экспериментов, подтверждаются экспериментально при эксплуатации готовых приборов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: 2-ая Всесоюзная конференция молодых ученых и специалистов “Теоретическая и прикладная оптика”, Ленинград, 1986; IX Международная научно-практическая конференция, Томск, ТПУ, 25-26 ноября 2004г.; научно-техническая конференция «Сибирь атомная. XXI век», Томск, 9-12 декабря 2008 г.; международная научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», Томск, 10-12 сентября 2008 г.; Международная научная конференция «Становление и развитие научных исследований в высшей школе». Томск, 14-16 сентября 2009 г.

Личный вклад автора. Автору принадлежат идея, расчет, макетирование и экспериментальное исследование оптической схемы прибора для контроля положения оптической оси сферического корундового подпятника; идея, алгоритмы и отладочные программы для измерительного видеомодуля смотрового комплекса ИСК-58; идея использования и расчет клинового компенсатора для устранения ограничения поля зрения (“залунения”) при изгибе

эндоскопа; теория расчета кардинальных элементов оптических систем в области реальных лучей; часть алгоритмов по расчету хода лучей. Автор руководил и принимал участие в разработке конструкторской документации на приборы, в сборке, настройке и юстировке приборов, в отладке программного обеспечения.

Публикации. По теме диссертации имеется 12 публикаций в журналах, входящих в список ВАК, 18 работ в трудах перечисленных выше конференций и научных журналах, 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ, 1 авторское свидетельство, 1 свидетельство на полезную модель, 3 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, имеет 332 страницы машинописного текста, в тексте приведен 101 рисунок. Список литературы включает 121 наименование.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость, приведены результаты и апробация работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена разработке метода и опытного образца прибора для контроля положения оптической оси корундовых подпятников без демонтажа маятников. Для осуществления ряда сложных технологических процессов на промышленных предприятиях используются центрифуги. Один из наиболее ответственных узлов центрифуг - опорная пара, основным элементом которой является подпятник.

Подпятники типа ПКС (подпятники корундовые сферические) используются в приборостроении в качестве подшипников скольжения опорных пар роторов с рабочей частотой вращения порядка 10^4 мин⁻¹. Подпятники изготавливаются из синтезированных монокристаллов корунда, обладающих высокими механическими свойствами, фирмой Sapphire OJSC (г. Нор-Ачин, Армения). Представляют собой (рис. 1) диск диаметром D со сферической рабочей поверхностью кривизны r . Согласно ТУ25.1813.019-98, угол наклона оптической оси кристалла к оси симметрии подпятника должен составлять $\alpha = 60^\circ \pm 10^\circ$. На рисунке 1 показано положение оптической оси OO' относительно оси симметрии подпятника SS' , соответствующее оптимальным механическим свойствам кристалла в направлениях, нормальных к рабочей сферической поверхности подпятника.

Если угол $\alpha < 50^\circ$, то увеличивается вероятность механического разрушения корунда в процессе эксплуатации, что приводит к выходу из строя и самой центрифуги. **Учитывая, что центрифуга представляет собой дорогостоящее изделие, задача контроля положения оптической оси корунда становится очень актуальной.**

Так как анизотропия кристаллов проявляется не только в анизотропии механических свойств, но и оптических, то механические свойства изделий

из монокристаллов синтетического корунда можно контролировать, не проводя механических испытаний разрушающими методами, а контролировать оптические свойства изделий неразрушающими оптическими методами, используя связь анизотропии физических и механических свойств материала (корунда).

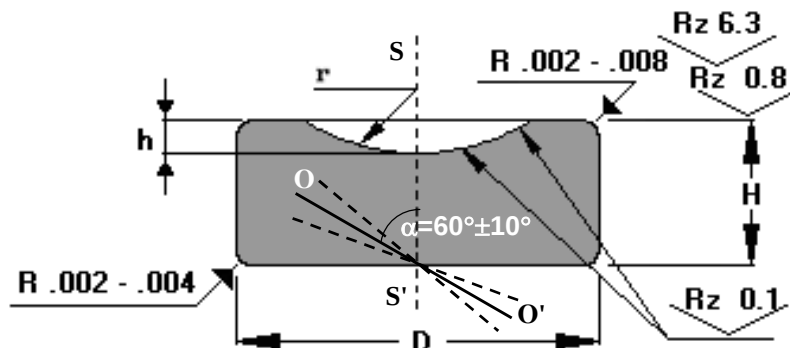


Рис. 1. Схема подпятника типа ПКС.

Известная методика основана на оценке величины угла наклона главной оптической оси кристалла к оси симметрии подпятника по коноскопической фигуре, наблюдаемой на сфере подпятника при исследовании кристаллов на просвет. Коноскопическая картина представляет собой интерференционную картину в сходящемся белом свете, видимую на кристалле, помещенном между скрещенными поляризаторами.

Методика заключается в следующем. Под микроскопом, с увеличением 10...30 крат, устанавливается два поляризационных фильтра со скрещенными под углом 90° плоскостями поляризации. Между поляризационными фильтрами на покровном стекле помещается набор подпятников, уложенных сферой вверх (к объективу микроскопа). При углах ориентации оптической оси от 0° до 50° коноскопическая картина ярко выражена.

Если оптическая ось кристалла совпадает с осью симметрии подпятника, то наблюдается «крест» в центре сферы. В случаях, когда ориентация не является нулевой, то вершина креста смещается к периферии. При вращении подпятника крест перемещается по окружности, причем его ветви остаются параллельными самим себе.

Предлагаемая методика позволяет оператору без специальной подготовки отбраковывать подпятники с углом ориентации главной оптической оси к оси симметрии от 0° до 50° . Подпятники, прошедшие контроль, запрессовываются в металлическую оправу, имеющую форму цилиндра, и устанавливаются в отдельный узел – маятник.

В связи с тем, что на заводе разделения изотопов СХК начали выходить из строя центрифуги и одной из предполагаемых причин этого является разрушение подпятника, возникла необходимость в разработке устройства для контроля положения главной оптической оси ПКС перед установкой маятника в центрифугу без его демонтажа. Это обусловлено тем, что извлечение цилиндра из маятника является крайне нежелательной операцией, так как требует последующей сборки с контролем ряда геометрических параметров. Существующий метод контроля в проходящем свете для этого не годится.

Для контроля положения главной оптической оси корундового подпятника без демонтажа маятника в рамках НИОКР был разработан прибор (рис. 2), в котором реализован метод контроля, основанный на получении коноскопической картины в отраженном свете с использованием автоколлимационной схемы, приведенной на рисунке 3.

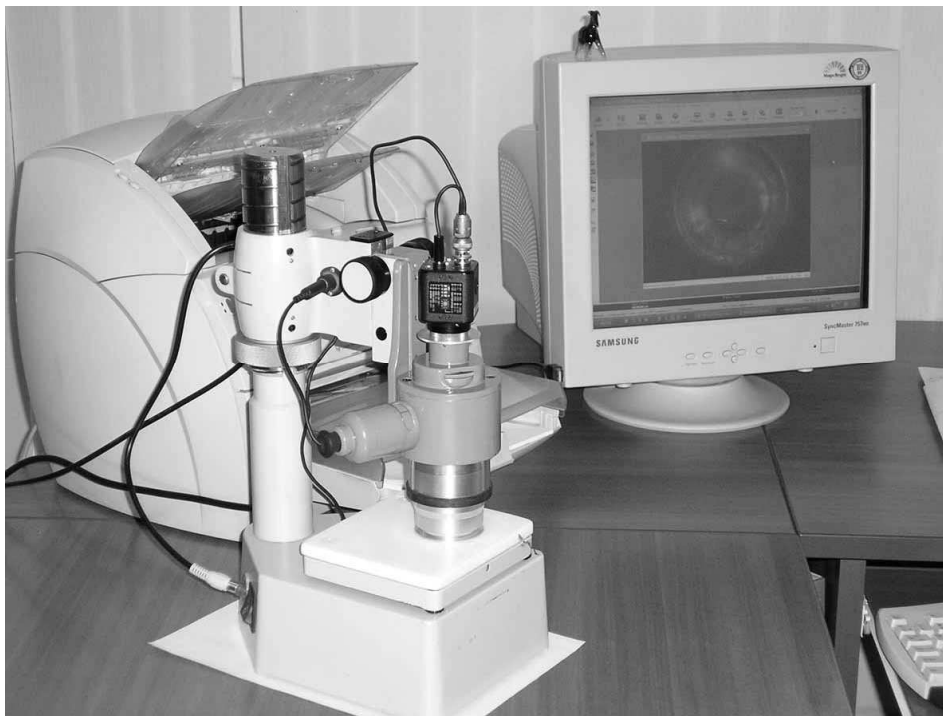


Рис. 2. Общий вид разработанного прибора для контроля положения оптической оси корундовых подпятников в составе изделий

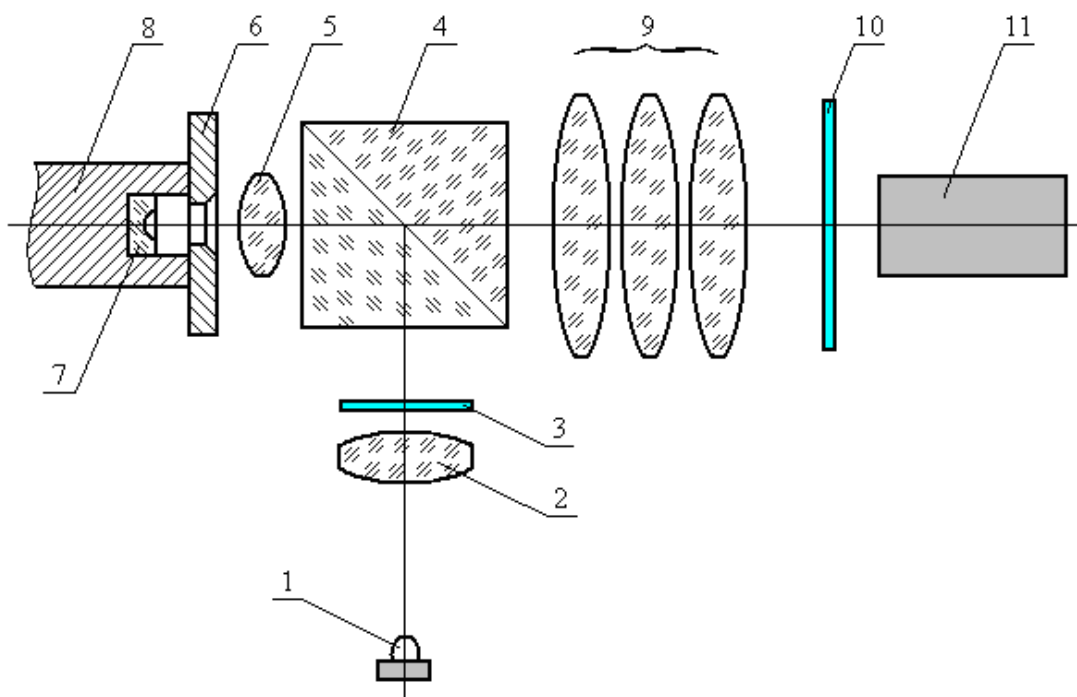


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема прибора для контроля положения главной оптической оси корундов.

Серьезным препятствием при конструировании оптической схемы была диафрагма 6 (рис. 3), являющаяся элементом конструкции маятника, которая

ограничивала поле зрения прибора. Для преодоления этой трудности параметры оптической системы были рассчитаны таким образом, чтобы диафрагма 6 являлась входным зрачком, входной люк совпадал с рабочей сферической поверхностью ПКС, а изображение корунда вписывалось в матрицу камеры 11. Такое построение оптической системы обеспечило получение изображения без ограничения поля зрения.

Для удобства работы предусмотрена возможность установки стандартного окуляра с увеличением $7\times$ вместо камеры 11 для визуального наблюдения. Это бывает полезно в тех случаях, когда коноскопическая картина, воспроизводимая на мониторе, плохо поддается идентификации.

Для отображения картины, получаемой на установке, используется персональный компьютер, оснащенный устройством видеозахвата. Это устройство оцифровывает аналоговый сигнал камеры, а прикладное программное обеспечение (ППО) выводит изображение на экран. ППО имеет возможность выбора источника видеосигнала, его стандарта, разрешения изображения, регулировки яркости, контраста изображения.

Сравнительное исследование состояния ПКС (рис. 4), проведенное при помощи прибора “Корунд” для определения положения оптической оси и согласно стандартной методике при помощи микроскопа типа МБС, показало,

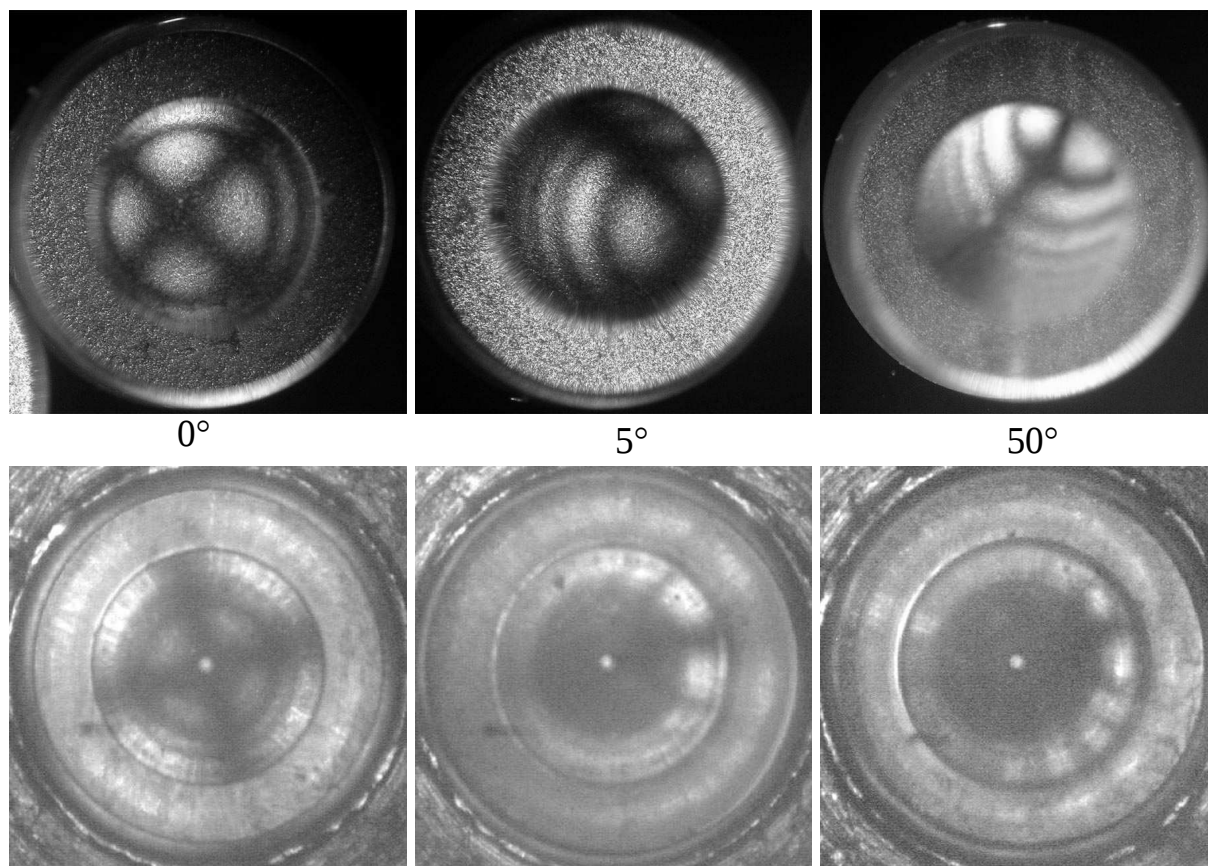


Рис. 4. Сравнение коноскопических картин, полученных в проходящем (верхний ряд) и в отраженном свете (нижний ряд) при различных ориентациях оптической оси корунда относительно оси симметрии подпятника.

что при обследовании подпятников с помощью прибора “Корунд” выявляются и однозначно индицируются почти все дефекты. Исключение составляют дефекты, определенные как «прочие» - грязь на дне оправки, черные неотмываемые риски на площадке и сфере.

Указанные дефекты имеют малую оптическую контрастность даже при исследовании в бинокулярном стереомикроскопе и при исследовании на приборе “Корунд” в поляризованном отраженном свете по этой причине не выявляются.

Глава 2 посвящена разработке оптико-электронной системы для дистанционного визуального контроля и дистанционных бесконтактных измерений линейных размеров дефектов и элементов конструкций. Для дистанционного визуального контроля основного технологического оборудования - трубопроводов, сосудов, емкостей и т.п. - в условиях затрудненного доступа к нему и/или наличия опасных и вредных производственных факторов на предприятиях атомной промышленности применяются линзовые эндоскопы. Типовая оптическая схема эндоскопа показана на рисунке 5. Эта схема послужила прототипом для разработки и изготовления оптико-телевизионного прибора на базе жесткого линзового эндоскопа в двух вариантах: без функции измерения (прибор визуального контроля ПВК-58) и с функцией измерения (измерительный смотровой комплекс ИСК-58). Конструкция и состав эндоскопа не зависят от варианта изготовления прибора.

Эндоскоп собирается из отдельных звеньев: одно формирующее и до 14 рабочих (рис. 6).

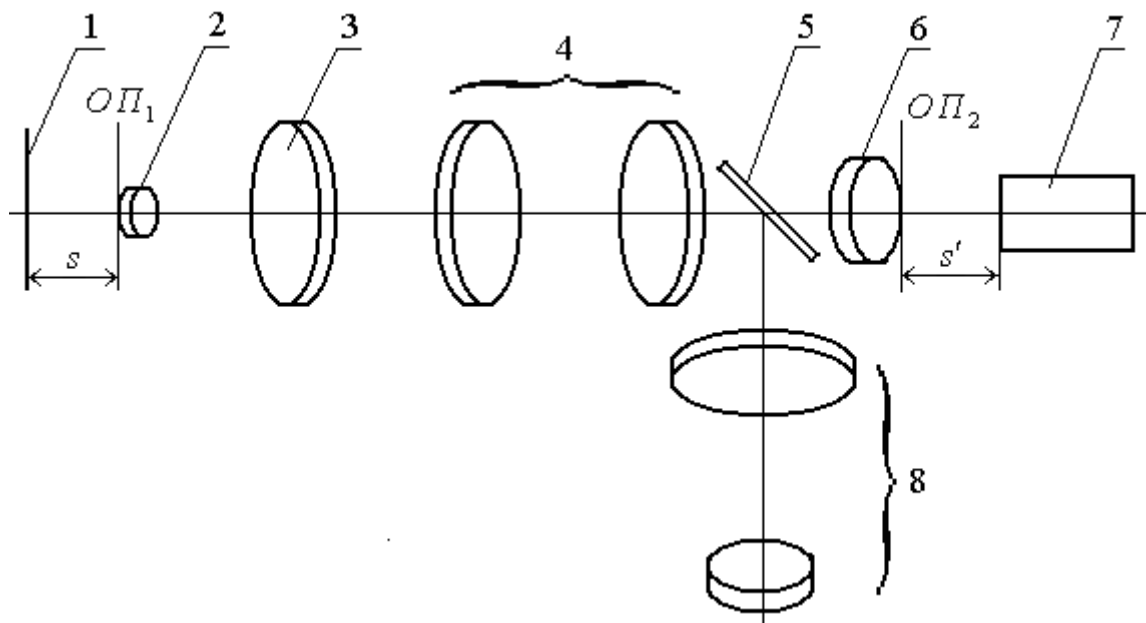


Рис. 5. Принципиальная оптическая схема линзового эндоскопа.

На формирующем звене устанавливаются объектив и оптическая насадка (боковая или торцевая). Звенья стыкуются с помощью резьбовых узлов, обеспечивающих его жесткость и герметичность. Водонепроницаемость разъемных соединений достигается использованием уплотняющих колец из температуро- и радиационностойкой резины.

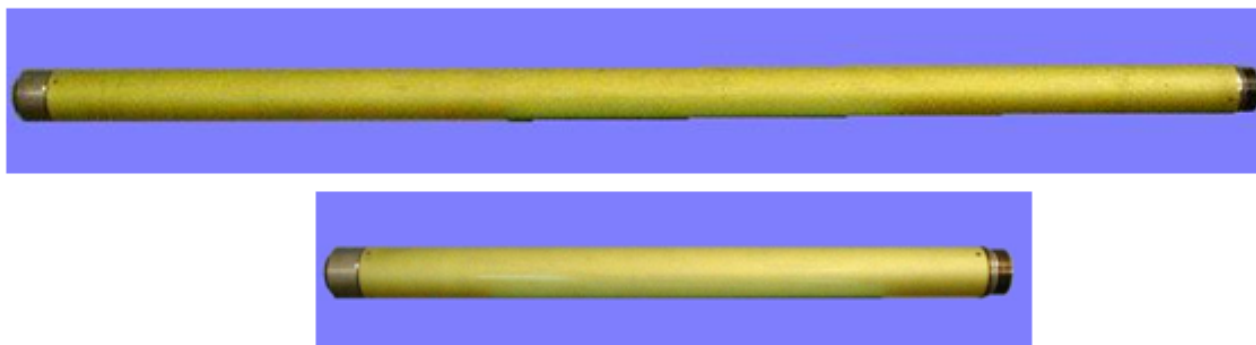


Рис. 6. Рабочее звено (сверху).
Формирующее звено (снизу).

На выходном звене эндоскопа монтируются последовательно Т-образное звено, зрительная труба и видеомодуль. Все элементы электрической цепи эндоскопа расположены внутри звеньев, насадок и видеомодуля. В состав видеомодуля (рис. 7 и 8) входят также и двигатели, обеспечивающие вращение камеры 7 для необходимой ориентации изображения, перемещение объектива 6 для настройки на резкость и управление компенсатором “залунения”.



Рис. 7. Измерительный видеомодуль с телекамерой типа WATEC.
Общий вид.

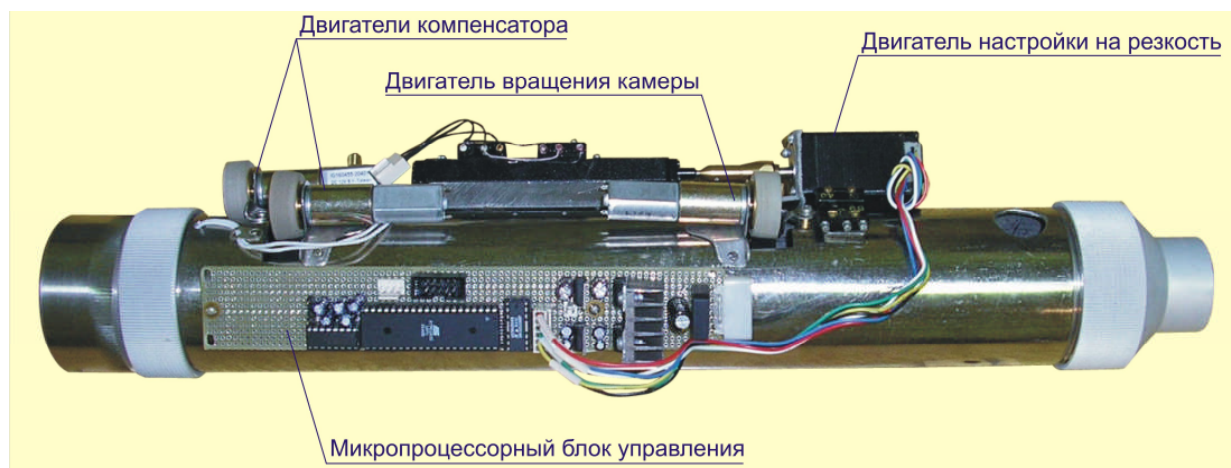


Рис. 8. Видеомодуль измерительный. Конструктивное исполнение.

Компенсатор “залунения” в приборе ПВК-58 выполнен в двух вариантах. В первом варианте компенсатор, состоящий из двух оптических клиньев, размещен в видеомодуле перед объективом 6 и управляется дистанционно.

Во втором варианте компенсатор выполнен в виде отдельного узла (рис. 9) и устанавливается между Т-образным звеном (рис. 10) и зрительной трубой (рис. 11). В этом случае настройка клиньев компенсатора производится от руки. Оптика эндоскопа изготовлена из специального радиационностойкого оптического стекла.



Рис. 9. Компенсатор.



Рис. 10. Т-образное звено.



Рис. 11. Зрительная труба.

Прибор оснащен комплектом из четырех сменных объективов 2 с разными фокусными расстояниями – 20, 40, 70 и 130 мм (рис. 12-15) – и двумя оптическими насадками – боковой и торцевой (рис. 16-17). Насадки выполняют функции осветителей и защитных окон. Блок питания и управления прибора обеспечивает дистанционное управление напряжением ламп подсветки, вращением камеры, настройкой резкости изображения и встроенным компенсатором “залунения”. Общая схема сборки прибора показана на рисунке 18.

Одна из основных задач визуального и измерительного контроля – это измерение линейных размеров обнаруженных дефектов, а также измерение геометрических размеров элементов и узлов конструкций, расположенных внутри исследуемых объектов. Существующие методы измерения – теневые, триангуляции, сканирующие системы, фотограмметрические и другие – мало пригодны или совсем непригодны для использования их в эндоскопических системах.



Рис. 12. Объектив Д-58/20.



Рис. 13. Объектив Д-58/40.

В связи с этим была разработана и изготовлена оптикоэлектронная система (видеомодуль), позволяющая производить измерение геометрических размеров объектов контроля как сама по себе, так и совместно с эндоскопом или любой другой оптической системой, сопряженной с видеомодулем.



Рис. 14. Объектив Д-58/70.



Рис. 15. Объектив Д-58/130.

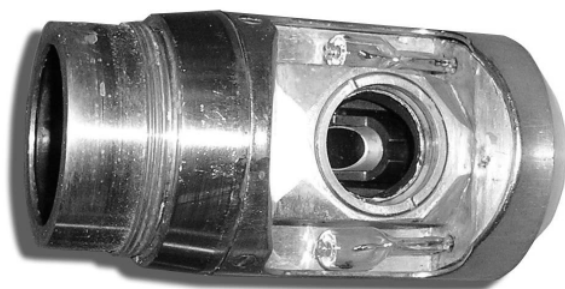


Рис. 16. Насадка НОБ-63.



Рис. 17. Насадка НОТ-63.

Эндоскоп ПВК-58, сопряженный с измерительным видеомодулем, называется измерительным смотровым комплексом (ИСК). В основу алгоритма заложено матричное описание оптической системы в параксиальном прибли-

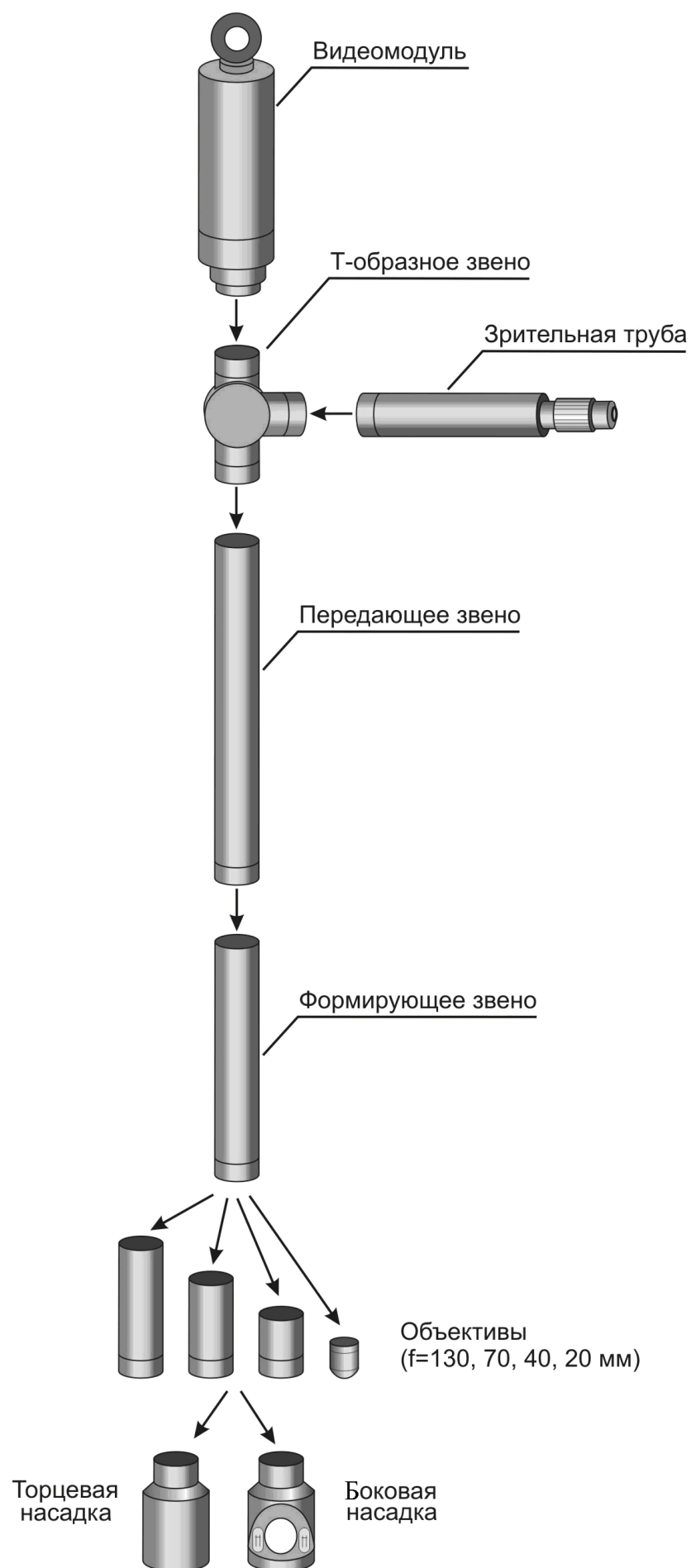


Рис. 18. Общая схема сборки прибора ПКВ-58.

жении. Основная идея заключается в следующем. Как известно, все основные свойства оптической системы описываются матрицей M преобразования лучей между опорными плоскостями $ОП_1$ и $ОП_2$ (рис. 5):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix},$$

матричные элементы которой вычисляются по конструктивным параметрам оптической системы, каковыми являются радиусы кривизны оптических поверхностей, расстояния между вершинами поверхностей и показатели преломления стекол. Зная матрицу M , можно рассчитать положение сопряженных плоскостей, которыми в нашем случае являются поверхность объекта контроля 1 и ПЗС-матрица камеры 7:

$$s = \frac{B + s' \cdot D}{A + s' \cdot C}, \quad (1)$$

где s - расстояние от объекта контроля 1 до опорной плоскости $ОП_1$, s' - расстояние от опорной плоскости $ОП_2$ до ПЗС-матрицы камеры 7.

Оператор визуально, по изображению на экране монитора, настраивается на резкость, управляя приводом, который осуществляет перемещение объектива 6 относительно ПЗС-матрицы. Величина перемещения Δz измеряется, что позволяет определить расстояние s' :

$$s' = s'_{F'} + \Delta z,$$

где $s'_{F'}$ - задний фокальный отрезок оптической системы, который вычисляется по формуле:

$$s'_{F'} = -\frac{A}{C}.$$

Расстояние s до объекта контроля 1 рассчитывается по формуле (1). Далее оператор курсором отмечает на изображении две точки, расстояние между которыми необходимо измерить, а программное обеспечение выполняет расчет реального расстояния x' между указанными точками на ПЗС-матрице. Зная s' и x' , можно рассчитать линейное увеличение α оптической системы и реальное расстояние x между указанными точками на объекте контроля 1:

$$\alpha = A + s' \cdot C, \quad x = \frac{x'}{\alpha}.$$

Очевидно, что измерение геометрических размеров и расстояния до объекта контроля производится с определенной погрешностью, обусловленной действием нескольких факторов. Перечислим эти факторы:

1. погрешность, обусловленная точностью измерения фокусного расстояния объектива 6;
2. погрешность, обусловленная точностью измерения расстояния между выбранными точками изображения на ПЗС-матрице камеры 7;
3. погрешность, обусловленная точностью измерения величины перемещения объектива 6;

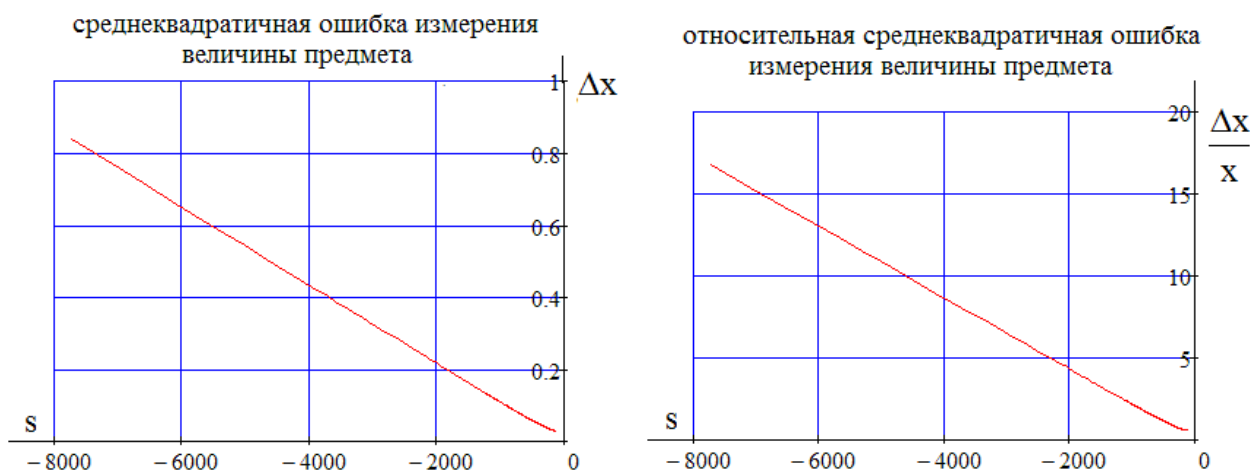
4. погрешность, обусловленная глубиной изображаемого пространства;
5. погрешности, обусловленные точностью изготовления деталей (в том числе и оптических) и точностью сборки узлов и прибора в целом;
6. погрешности, обусловленные aberrациями оптической системы, формирующей изображение на матрице камеры.

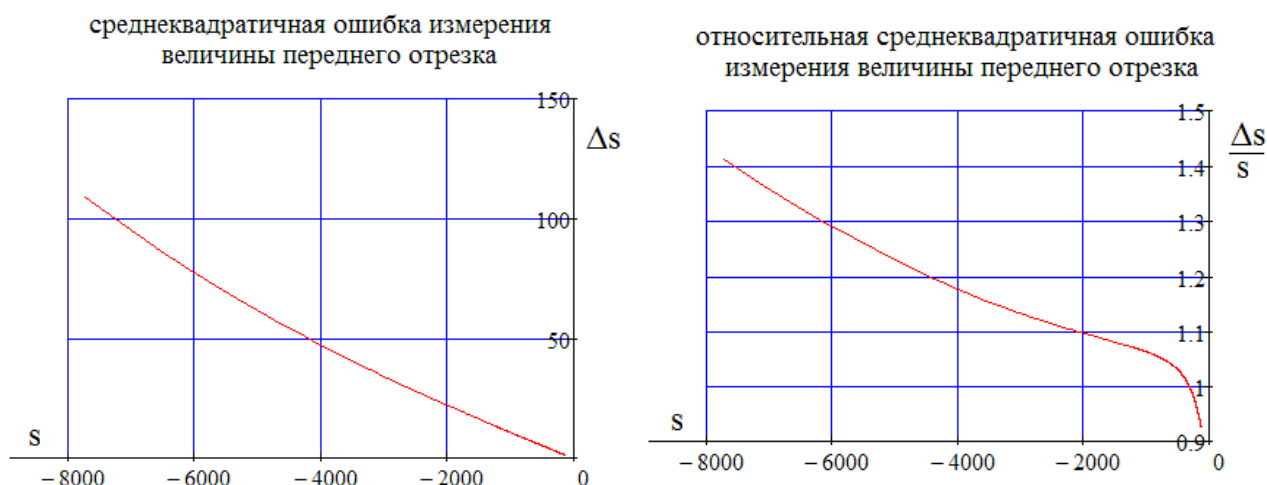
Наибольший интерес представляют собой факторы, сформулированные в п.п. 1–4. Для того, чтобы произвести измерения, необходимо знать все конструктивные параметры оптической системы эндоскопа с видеомодулем. В нашем приборе известны все параметры, кроме конструктивных параметров объектива видеомодуля. Поэтому объектив видеомодуля в математической модели оптической системы эндоскопа представляется главными плоскостями, для чего производятся измерения толщины объектива по оси, фокусного расстояния и фокальных отрезков. Для измерительной системы, состоящей только из видеомодуля, среднеквадратичные погрешности Δx и Δs измерения соответственно величины предмета и расстояния до предмета рассчитываются, как показано в работе, по формулам:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} \cdot \Delta x'\right)^2 + \left(\frac{x'}{\beta \cdot z'} \cdot \Delta z'\right)^2 + \left(\frac{x'}{z'} \cdot \Delta f'\right)^2},$$

$$\Delta s = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta^2} \cdot \Delta z'\right)^2 + \left(\frac{2}{\beta} \cdot \Delta f'\right)^2 + (\Delta s_F)^2},$$

где $\Delta f'$ - средняя квадратичная погрешность измерения фокусного расстояния; $\Delta x'$ - средняя квадратичная погрешность измерения величины изображения на ПЗС-матрице; $\Delta z'$ - средняя квадратичная погрешность измерения величины перемещения объектива видеомодуля; Δs_F - средняя квадратичная погрешность измерения переднего фокального отрезка; β - линейное увеличение объектива. В видеомодуле измерительного смотрового комплекса ИСК-58 используется проекционный объектив с фокусным расстоянием $f' = 92$ мм. Ниже приведены результаты расчета погрешностей измерения.

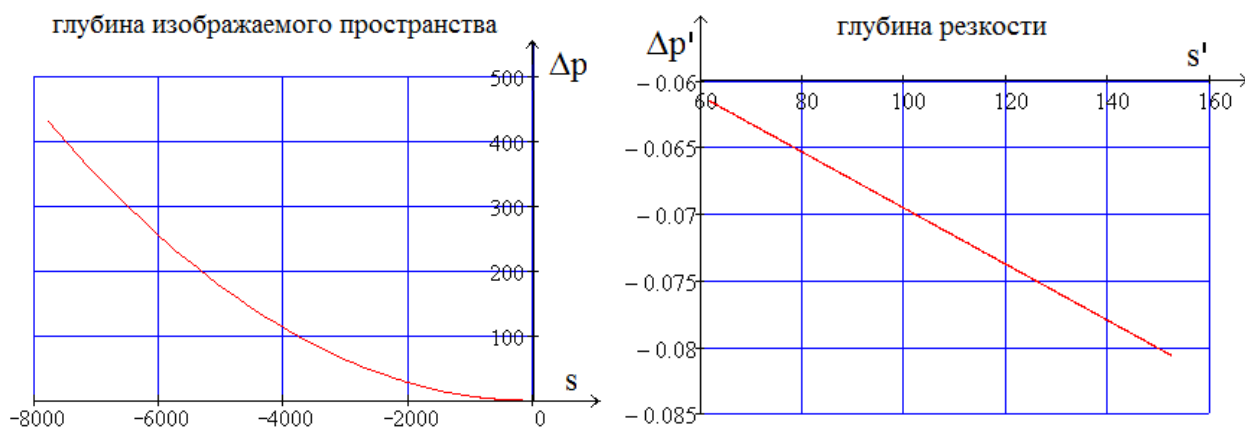




Погрешность $\Delta z'$ в измерении величины z' будет определяться не только методикой измерений и конструктивными особенностями системы, но и таким принципиальным явлением, как глубина изображаемого пространства: изображение на экране монитора будет казаться оператору резким в пределах глубины $\Delta p'$ резкости, зависящей от расстояния δ' между сенсорами матрицы. Расчет глубины Δp изображаемого пространства производится по известным формулам:

$$\delta = -\frac{\delta'}{\beta}, \quad p_1 = \frac{D_{3p.}}{D_{3p.} + \delta} \cdot p, \quad p_2 = \frac{D_{3p.}}{D_{3p.} - \delta} \cdot p, \quad \Delta p = p_1 - p_2,$$

где $D_{3p.}$ - диаметр входного зрачка объектива.



Третья глава посвящена разработке алгоритмов расчета хода лучей через оптические поверхности различного типа, произвольным образом расположенных в пространстве. Разработка ведется с использованием векторно-матричного метода, предложенного и развитого М. Герцбергером в монографии «Современная геометрическая оптика». В данной главе автор стремился системно изложить как известные, так и самостоятельно разработанные по методу Гецбергера алгоритмы в готовом для использования виде, то есть в виде сводки формул, расположенных в порядке их вычисления.

1. На первом этапе вводятся некоторые уточнения в закон преломления в векторной форме:

$$\vec{s}' = \vec{s} + \Gamma \cdot \vec{o}, \quad \Gamma = \varepsilon' \cdot \sqrt{n'^2 - n^2 + (\vec{o} \cdot \vec{s})^2} - (\vec{o} \cdot \vec{s}), \quad (2)$$

где $\vec{s}$ - направляющий вектор падающего луча, $\vec{s}'$ - направляющий вектор преломленного луча, $\vec{o}$ - единичный вектор нормали к точке падения.

Формулы (1) отличаются от формул, полученных Герцбергером, наличием множителя ε' . Здесь $\varepsilon' = \text{sign}(\vec{s} \cdot \vec{o})$ при преломлении. Для зеркально-линзовых систем, в которых направление луча меняется после каждого отражения, это принципиальное отличие.

2. В общем виде и с некоторыми уточнениями излагается метод Герцбергера по расчету хода лучей через систему оптических поверхностей, обладающих осевой симметрией и описываемых уравнением вида

$$F(u^*, z) = 0, \quad (3)$$

где $2 \cdot u^* = x^{*2} + y^{*2}$. В расчетах Герцбергера промежуточная величина q' для преломления вычисляется без учета знака сагиттального радиуса кривизны r_s , то есть $q' = \sqrt{q'^2}$. Показано, что правильная формула для расчета величины q' выглядит следующим образом:

$$q' = \text{sign}(r_s) \cdot \sqrt{q'^2}.$$

Это уточнение особенно принципиально при расчете хода лучей через поверхности высшего порядка с радиусом кривизны при вершине, равным бесконечности.

3. Приведены выводы и алгоритмы расчета хода лучей, разработанные Герцбергером, через поверхности второго порядка, обладающие осевой симметрией и описываемые уравнением вида:

$$F(u^*, z) = z + \frac{1}{2} \cdot b \cdot c \cdot z^2 - b \cdot u^* = 0, \quad (4)$$

через поверхности высшего порядка:

$$F(u^*, z) = z - \sum_{i=1}^n c_i \cdot u^{*i} = 0, \quad (5)$$

через круговой цилиндр с образующей, параллельной оси ou :

$$F = z - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (z^2 + x^{*2}) = 0 \quad (6)$$

и оси oz :

$$F = z - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (z^2 + y^{*2}) = 0. \quad (7)$$

4. По методу Герцбергера автором разработаны алгоритмы расчета хода лучей через следующие поверхности:

- **Поверхности вращения высшего порядка:**

$$F(z, u^*) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot z^i - 2 \cdot u^* = 0. \quad (8)$$

Уравнение (8) используются для описания поверхностей с плоской вершиной.

- **Поверхности второго порядка, не обладающей осевой симметрией:**

$$F(x^*, y^*, z) = 2 \cdot z + c \cdot z^2 - a \cdot x^{*2} - b \cdot y^{*2} = 0, \quad (9)$$

где a и b - кривизны поверхности в меридиональном и сагиттальном сечениях соответственно.

Поверхности (9) используются при математическом моделировании для расчета допусков на астигматические ошибки изготовления.

- **Конические поверхности, не обладающие осевой симметрией и описываемые уравнением вида:**

$$F(x^*, y^*, z) = z^2 - A \cdot x^{*2} - B \cdot y^{*2} = 0. \quad (10)$$

Алгоритм расчета хода лучей написан с учетом того, какая часть конуса работает: левая или правая, при отражении - внешняя поверхность или внутренняя (рис. 19). Конические поверхности используются при проектировании и изготовлении аксиконов. Аксиконы применяют для компенсации сферической аберрации; для создания систем, не требующих фокусировки при изменении положения предмета; для получения заданного распределения освещенности в плоскости изображения.

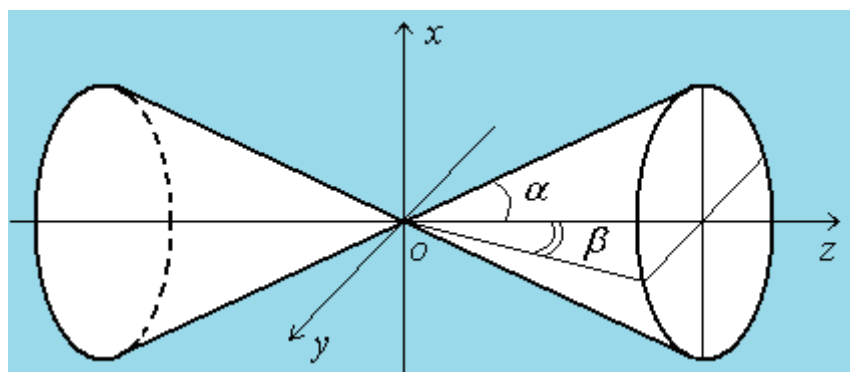


Рис. 19. Коническая поверхность.

- **Поверхности второго порядка с зональной ошибкой.**

При изготовлении оптических поверхностей закономерно возникают ошибки формы поверхности: либо несовпадение радиуса кривизны и эксцентриситета с теоретическими значениями, либо местные (зональные) ошибки. Наиболее характерные зональные ошибки выражаются в том, что либо край поверхности приподнят, либо он завален; либо приподнят центральный участок поверхности, либо он углублен; либо скомбинированы различным образом ошибки края и центрального участка; либо, наконец, ошибка имеет место на какой-нибудь промежуточной между краем и центром зоне. Для того, чтобы оценить влияние зональной ошибки какой-либо поверхности оптической системы на качество изображения, создаваемое всей системой в целом, необходимо смоделировать ошибку и произвести расчет хода лучей. Существуют методы, которые позволяют моделировать реальные ошибки изготовления, в том числе и зональные, путем полиномиальной аппроксимации поверхности

по результатам измерений. На стадии проектирования для моделирования целесообразно использовать аналитическую функцию, адекватно описывающую зональную ошибку. Для этой цели была использована функция, которая описывается уравнением:

$$z = \frac{A}{2} \cdot \left[1 + \cos \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (\rho - \rho_0) \right], \quad (11)$$

где:

A - амплитуда ошибки,

T - период,

ρ_0 - смещение функции (11) от начала координат,

$$\rho = \sqrt{2 \cdot u^*}.$$

В качестве поверхности, на которой моделировалась зональная ошибка, выбрана для простоты поверхность второго порядка с осевой симметрией:

$$2 \cdot u^* = x^{*2} + y^{*2} = 2 \cdot r \cdot z + c \cdot z^2. \quad (12)$$

Тогда с использованием (11) уравнение (12) поверхности, на которую наложена зональная ошибка, можно представить в виде:

$$F(z, u^*) = z + \frac{r - \text{sign}(r) \cdot \sqrt{r^2 + 2 \cdot c \cdot u^*}}{c} - \frac{A}{2} \cdot \left[1 + \cos \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (\rho - \rho_0) \right] = 0, \quad c \neq 0; \quad (13)$$

$$F(z, u^*) = z - \frac{u^*}{r} - \frac{A}{2} \cdot \left[1 + \cos \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (\rho - \rho_0) \right] = 0, \quad c = 0, \quad (14)$$

ρ_n - нижняя граница зоны; ρ_e - верхняя граница зоны; ρ_0 - центр зоны. $A=0$ вне интервала $\rho_n \leq \rho \leq \rho_e$ (рис. 20). Для моделирования одной зональной ошибки полагаем $\rho_e - \rho_n = T$ и $\rho_n \geq 0$. Для моделирования бугра или ямы в центре задаем $\rho_0 = 0$.

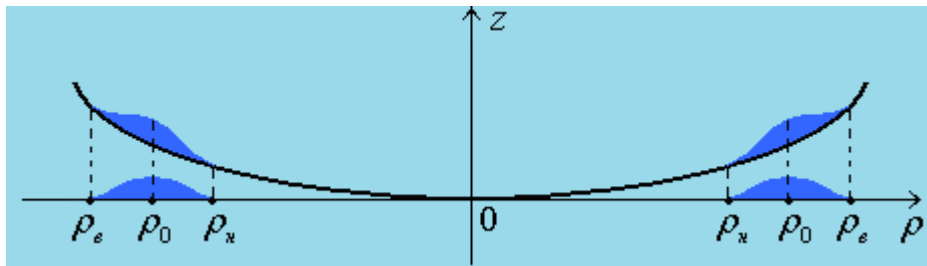


Рис. 20. Зональная ошибка на поверхности вращения второго порядка.

- **Тороидальные поверхности второго порядка, не обладающие осевой симметрией.**

Такие поверхности можно получить вращением кривой второго порядка, описываемой уравнением вида:

$$x^{*2} = 2 \cdot r_m \cdot z + c \cdot z^2, \quad (15)$$

вокруг оси o_0x_0 , проходящей через точку o_0 перпендикулярно плоскости uoz (рис. 21). В результате кривая (14) опишет в пространстве поверхность,

называемую тороидальной. Уравнение этой поверхности можно представить в виде:

$$F(x^*, y^*, z) = 2 \cdot r_m \cdot \left[r_s - \varepsilon_s \cdot \sqrt{y^{*2} + (r_s - z)^2} \right] + c \cdot \left[r_s - \varepsilon_s \cdot \sqrt{y^{*2} + (r_s - z)^2} \right]^2 - x^{*2} = 0, \quad (16)$$

где r_m - меридиональный радиус кривизны при вершине;

r_s - сагиттальный радиус кривизны при вершине.

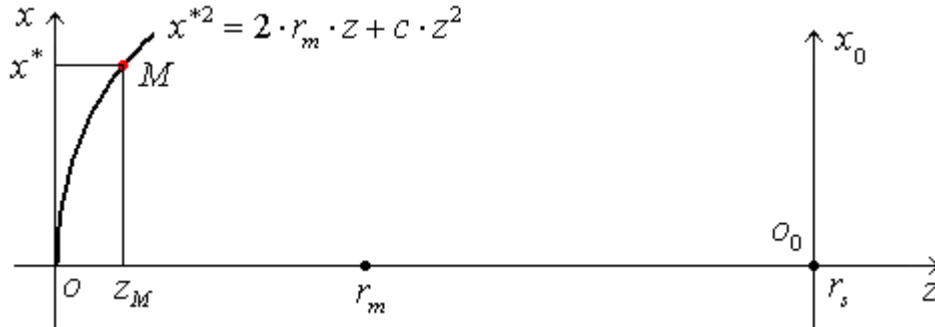


Рис. 21. К выводу уравнения тороидальной поверхности.

- **Однополостная поверхность второго порядка с осевой симметрией.**

Такую поверхность можно получить вращением вокруг оси oz (рис. 22) кривой второго порядка вида:

$$z^2 = 2 \cdot r \cdot (x - x_0) + c \cdot (x - x_0)^2. \quad (17)$$

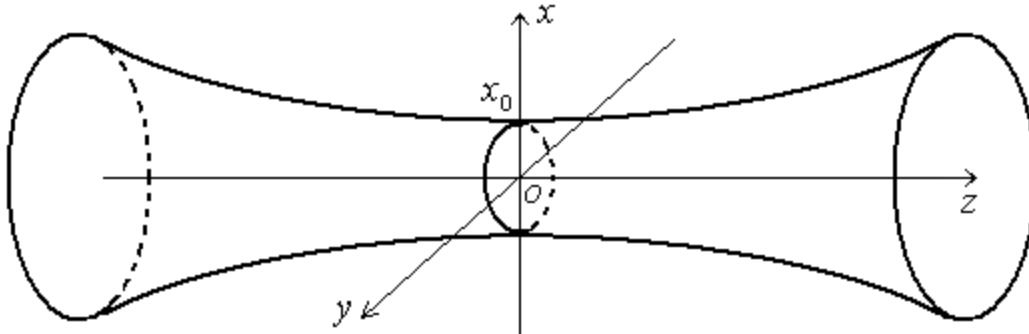


Рис. 22. Однополостная поверхность с осевой симметрией.

Тогда уравнение поверхности можно представить в виде:

$$F(x^*, y^*, z) = z^2 - 2 \cdot r \cdot \left(\sqrt{x^{*2} + y^{*2}} - x_0 \right) - c \cdot \left(\sqrt{x^{*2} + y^{*2}} - x_0 \right)^2 = 0. \quad (18)$$

В данной работе алгоритм представлен в векторной форме, может быть использован для расчета оксикона, образующей которого является линия второго порядка.

5. Для расчета хода лучей, отраженных плоской дифракционной решеткой, был использован известный закон дифракции плоской волны на плоской отражательной решетке в общем виде, то есть для случая, когда падающий луч не лежит в меридиональной плоскости:

$$\sin \alpha + \sin \beta = \frac{k \cdot \lambda}{d \cdot \cos \gamma}, \quad (19)$$

где k - порядок дифракции; λ - длина волны излучения; d - период решетки; α , β , γ - углы, задающие направление падающего и отраженного лучей. Этот алгоритм необходим при расчете спектральных приборов

Рассмотренные выше алгоритмы предназначены для расчета хода лучей через центрированные оптические системы. Однако, **во-первых**, существует класс зеркальных, призмённых, зеркально-призмённых и зеркально-линзовых систем с изломанными оптическими осями, которые в целом можно охарактеризовать как системы с произвольным расположением поверхностей в пространстве. Сюда же можно отнести спектральные приборы, оптические шарниры, системы сканирования лучей в пространстве (для решения задач навигации), системы со сканированием поля зрения (для увеличения площади обзора при достаточно малом мгновенном угле поля зрения). **Во-вторых**, при изготовлении оптических систем неизбежна децентрировка, вызванная как неточностью при изготовлении отдельных деталей, так и нестрогой сборкой, в результате чего центры отдельных деталей не ложатся точно на одну прямую (оптическую ось), а оказываются смещёнными относительно нее.

Наличие децентрировок в оптической системе приводит к искажению оптического изображения. Поэтому, еще на стадии проектирования необходимо оценить влияние децентрировок каждой поверхности и рассчитать их допустимые величины. При строгом подходе к оценке качества изображения необходимо произвести точный расчет хода пучка лучей через децентрированную систему. Для этой цели в работе приведены алгоритмы расчета хода лучей через систему поверхностей, произвольным образом расположенных в пространстве.

На основе описанных в **главе 3** алгоритмов был разработан пакет прикладных программ «ОПТИКА», который успешно используется в учебном процессе на кафедре лазерной и световой техники Томского политехнического университета.

Четвертая глава посвящена разработке теории расчета главных и узловых поверхностей оптических систем в области реальных лучей. В параксиальной области все свойства оптической системы описываются с помощью кардинальных элементов и главных (или узловых) плоскостей и достаточно хорошо изучены. Изображение оптических систем в виде главных плоскостей используется при графическом построении хода луча и расчете хода луча через оптическую систему в параксиальной области, при габаритных расчетах. Вопрос о главных и узловых поверхностях и вообще о кардинальных элементах реальных оптических систем в литературе обсуждался гораздо меньше. Исходя из общих соображений, можно утверждать, что главные и узловые поверхности будут представлять собой именно поверхности некоторого порядка m , а не плоскости, и не обязательно с осевой симметрией. Например, в книге “Прикладная оптика” (М.И. Апенко, А.С. Дубовик. Прикладная оптика. М.: “Наука”, 1971, 392 стр.) на странице 118 сказано:

“Для выполнения условия синусов необходимо, чтобы

$$\frac{h_1}{\sin u'_k} = \bar{f}' = f' = \text{const}.$$

Это приводит к тому, что геометрическим местом точек пересечения падающих лучей с лучами, вышедшими из системы, будет не плоскость, как это было показано в теории идеальной системы, а сферическая поверхность (главная сфера) радиуса f' с центром в фокусе параллельных лучей”.

Поскольку вопрос о главных и узловых поверхностях реальных оптических систем изучен достаточно мало, то представляется интересным разработать общие методы расчета положения и формы главных и узловых поверхностей, а также изучить свойства кардинальных элементов.

На основе формул по расчету хода луча разработан метод расчета главных и узловых поверхностей для любой центрированной системы оптических поверхностей второго порядка с осевой симметрией.

Для **одной** оптической поверхности получена матрица преломления (отражения) реального луча между двумя опорными плоскостями $ОП_p$ и $ОП_{p'}$, проведенными через точку падения луча на поверхность, которая имеет точно такой же вид, что и матрица преобразования лучей преломляющей (отражающей) поверхностью в параксиальной области:

$$R^* = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi^* & 1 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Величина φ^* имеет размерность и смысл оптической силы. Легко проверить, что в параксиальном приближении

$$\varphi^* = b \cdot \zeta \cdot \bar{\psi} \approx \varepsilon \cdot \varphi, \quad (21)$$

где $\varepsilon = \text{sign}(\zeta)$, $\varphi = \frac{n' - n}{r}$ для преломляющей поверхности и $\varphi = -\frac{2 \cdot n}{r}$ - для отражающей поверхности.

Очевидно, что в общем случае оптическая сила φ^* в каждой точке поверхности является функцией параметров $\vec{P}$ и $\vec{S}$ падающего луча. В связи с этим величину $\varepsilon \cdot \varphi^*$ можно назвать лучевой оптической силой поверхности.

Показано, что точка падения луча на поверхность сопряжена сама с собой с увеличением, равным единице. А отсюда следует, что **главной поверхностью преломляющей (отражающей) поверхности является сама поверхность.**

Для того, чтобы рассчитать главные поверхности **системы из k оптических поверхностей**, вычислим матрицу преобразования луча между опорными плоскостями $ОП_1$ и $ОП_k$, проходящими через точки падения луча соответственно на первую поверхность и на последнюю:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_k^* & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_{k-1}^* \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_{k-1}^* & 1 \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{pmatrix} 1 & l_1^* \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_1^* & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где

$$l_i^* = \frac{d_i - z_i + z_{i+1}}{\zeta_i'}, \quad i = 1, 2 \dots k-1. \quad (23)$$

Далее находим матрицу $\tilde{L}$ преобразования параметров $\tilde{A}$, $\tilde{S}$ луча между опорными плоскостями $\widetilde{OP}$ и $\widetilde{OP}'$, расположенными соответственно в пространстве предметов и изображений. Положение опорных плоскостей $\widetilde{OP}$ и $\widetilde{OP}'$ задано расстояниями s и s' . Тогда:

$$\tilde{L} = \begin{pmatrix} 1 & l^{*'} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -l^* \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & \tilde{D} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где

$$l^* = \frac{s - z_1}{\zeta}, \quad l^{*'} = \frac{s' - z_k}{\zeta'}, \quad (25)$$

$$\tilde{A} = A + l^{*'} \cdot C, \quad \tilde{B} = -l^* \cdot (A + l^{*'} \cdot C) + B + l^{*'} \cdot D, \quad (26)$$

$$\tilde{C} = C = -\varphi^*, \quad \tilde{D} = D - l^* \cdot C, \quad (27)$$

φ^* - оптическая сила системы по отношению к конкретному лучу (лучевая оптическая сила системы).

Для сопряженных точек сечения $\tilde{B} = 0$, тогда из (26) следует:

$$l^{*'} = -\frac{B - l^* \cdot A}{D - l^* \cdot C}. \quad (28)$$

Выражение (28) имеет точно такой же вид, что и формула для сопряженных отрезков в области параксиальных лучей.

Для сопряженных точек сечения, расположенных на главных плоскостях, линейное увеличение равно единице, то есть $\tilde{A} = A + l^{*'} \cdot C = 1$, откуда с учетом (26) следует:

$$l_p^* = -\frac{1-D}{C}, \quad s_p^* = \zeta \cdot l_p^*, \quad s_p = s_p^* + z_1, \quad \vec{A}_p = \vec{A}_1^* + l_p^* \cdot \vec{S} \quad (29)$$

$$l_{p'}^{*'} = \frac{1-A}{C}, \quad s_{p'}^{*'} = \zeta' \cdot l_{p'}^{*'}, \quad s_{p'} = s_{p'}^{*'} + z_k, \quad \vec{A}_{p'} = \vec{A}_k^* + l_{p'}^{*'} \cdot \vec{S}'. \quad (30)$$

Выражения (29) и (30) однозначно определяют положение сопряженных точек на главных поверхностях.

Впервые показано, что для **одной** преломляющей (отражающей) поверхности положение узловых точек, сопряженных с увеличением, равным $\frac{\varepsilon \cdot n}{\varepsilon' \cdot n'}$,

рассчитывается по формулам:

$$s_N = z + \frac{\varepsilon' \cdot n' - \varepsilon \cdot n}{\varphi^*} \cdot \frac{\zeta}{\varepsilon \cdot n}, \quad l_N = \frac{s_N}{\zeta}, \quad \vec{A}_N = \vec{A} + l_N \cdot \vec{S}, \quad (31)$$

$$s_{N'} = z + \frac{\varepsilon' \cdot n' - \varepsilon \cdot n}{\varphi^*} \cdot \frac{\zeta'}{\varepsilon' \cdot n'}, \quad l_{N'} = \frac{s_{N'}}{\zeta'}, \quad \vec{A}_{N'} = \vec{A} + l_{N'} \cdot \vec{S}' = \frac{\varepsilon \cdot n}{\varepsilon' \cdot n'} \cdot \vec{A}_N. \quad (32)$$

Для системы из k оптических поверхностей, полагая в (26)

$$\tilde{A} = A + l_{N'}^{*'} \cdot C = \frac{n}{\varepsilon' \cdot n'} \text{ и } \tilde{B} = 0, \quad (33)$$

находим:

$$l_N^* = -\frac{\frac{\varepsilon' \cdot n'}{C} - D}{C}, \quad s_N^* = \zeta \cdot l_N^*, \quad s_N = s_N^* + z_1, \quad \vec{A}_N = \vec{A}_1^* + l_N^* \cdot \vec{S}; \quad (34)$$

$$l_{N'}^{*'} = \frac{\frac{n}{C} - A}{\varepsilon' \cdot n'}, \quad s_{N'}^{*'} = \zeta' \cdot l_{N'}^{*'}, \quad s_{N'}' = s_{N'}^{*'} + z_k, \quad \vec{A}_{N'}' = \vec{A}_k^* + l_{N'}^{*'} \cdot \vec{S}'; \quad (35)$$

Формулы (34) и (35) однозначно определяют положение сопряженных с увеличением $\tilde{A}$, определяемым выражением (32), точек на узловых поверхностях.

Впервые показано, что фокусные расстояния реальной оптической системы рассчитываются по формулам:

$$f = \frac{\zeta}{C}, \quad f' = -\frac{\zeta'}{C}. \quad (36)$$

В параксиальном приближении выражения (36) переходят в известные формулы для расчета переднего и заднего фокусных расстояний:

$$f = -\frac{n}{\varphi}, \quad f' = \frac{\varepsilon' \cdot n'}{\varphi}. \quad (37)$$

Впервые показано, что фокальные отрезки реальной оптической системы рассчитываются по формулам:

$$s_F^* = \zeta \cdot \frac{D}{C}, \quad s_{F'}^{*'} = -\zeta' \cdot \frac{A}{C}. \quad (38)$$

В параксиальном приближении выражения (38) переходят в известные формулы для расчета фокальных отрезков:

$$s_F = -n \cdot \frac{D}{\varphi}, \quad s_{F'}' = \varepsilon' \cdot n' \cdot \frac{A}{\varphi}. \quad (39)$$

Впервые показано, что для сопряженных точек сечения, расположенных на реальном луче, выполняется формула Ньютона:

$$z \cdot z' = f \cdot f'. \quad (40)$$

Показано, что для не сопряженных точек сечения векторный инвариант имеет вид:

$$\left[\vec{A}' \times \vec{S}' \right] = \det \tilde{L} \cdot \left[\vec{A} \times \vec{S} \right]. \quad (41)$$

В качестве проверки теории была решена обратная задача: на основе формул по расчету хода луча и полученных результатов показано, что для декартовых точек всех анаберрационных поверхностей вращения второго порядка – апланатических преломляющих сфер, отражающих (параболоид, эллипсоид, гиперболоид) и преломляющих (эллипсоид, гиперболоид) поверхностей – справедлив принцип Ферма.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Предложен и экспериментально проверен метод контроля в отраженном свете по коноскопической картине положения главной оптической оси сферических корундовых подпятников без демонтажа маятника.

2. Разработан и реализован прибор для контроля в отраженном свете положения главной оптической оси сферических корундовых подпятников в составе маятников газовых центрифуг.

3. Разработан и реализован на базе жесткого линзового радиационно стойкого герметичного эндоскопа оптико-телевизионный прибор (ПВК) для дистанционного визуального контроля технологического оборудования на ядерно и радиационно опасных объектах – трубопроводов, сосудов, емкостей и т.п. – в условиях затрудненного доступа к нему и/или наличия опасных и вредных производственных факторов.

4. В ПВК с помощью клинового компенсатора реализована возможность устранения ограничения поля зрения при изгибе эндоскопа, реализованы возможности просмотра изображения в реальном времени на мониторе ПК и записи видеоряда.

5. Предложен и экспериментально проверен метод измерения в монокулярном режиме с помощью эндоскопа линейных размеров дефектов и геометрических размеров элементов и узлов конструкций, расположенных внутри исследуемых объектов.

6. Разработан и изготовлен для эндоскопа измерительный видеомодуль с дистанционно управляемыми компенсатором и объективом, с приводом вращения телекамеры для ориентирования изображения на мониторе.

7. Произведена оценка погрешностей измерения линейных размеров и дальности до объекта контроля с помощью измерительного видеомодуля.

8. Обобщены и системно изложены алгоритмы по расчету хода лучей через систему оптических поверхностей различного вида (12 видов поверхностей), произвольным образом расположенных в пространстве.

9. Разработаны теория и алгоритмы расчета кардинальных элементов систем оптических поверхностей второго порядка с осевой симметрией.

- Показано, что для преломляющих (отражающих) поверхностей главные поверхности (передняя и задняя) совпадают с самой преломляющей (отражающей) поверхностью.
- Для преломляющих (отражающих) поверхностей получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать узловые (переднюю и заднюю) поверхности.
- Разработаны матричные методы преобразования параметров реального луча, по форме полностью идентичные преобразованиям параметров параксиального луча.
- Показано, что для сопряженных точек сечения каждого реального луча выполняется формула Ньютона.
- Получены выражения для расчета лучевых кардинальных элементов, по форме совпадающие с аналогичными выражениями в параксиальной области.

- На основе разработанного метода получена математическая формулировка принципа Ферма для всех известных в оптике анаберационных поверхностей второго порядка.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

а) входящие в список журналов, рекомендованных ВАК:

1. Агапов Н.А. Вычисление профиля поверхности по показаниям сферометра. // ОМП, 1985, №7, с. 49-51.
2. Агапов Н.А. Двухзеркальная сканирующая система. // ОМП, 1986, №6, стр. 11-13.
3. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевкус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Оптико-электронная система для дистанционного измерения линейных размеров. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета. 2008, том 312, №2, с. 318–323.
4. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевкус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Устройство для контроля положения оптической оси корундовых подпятников. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета. 2008, том 312, №2, с. 323–326.
5. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевкус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Контроль коррозионного состояния транспортно-технологических емкостей. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета. 2008, том 312, №2, с. 327–329.
6. Агапов Н.А. К вопросу о главных поверхностях оптических систем. Ред. журн. "Изв. вузов. Физика". - Томск, 2010. - Деп. в ВИНТИ 20.12.2010, Рег. № 707-В2010, 24 стр.
7. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Матричное описание свойств оптических систем в области реальных лучей. Часть 1. // Естественные и технические науки, 2013, №1, с. 199-207.
8. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Матричное описание свойств оптических систем в области реальных лучей. Часть 2. // Естественные и технические науки, 2013, №1, с. 208-216.
9. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Матричное описание свойств оптических систем в области реальных лучей. Часть 3. // Естественные и технические науки, 2013, №1, с. 217-224.
10. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Матричное описание свойств оптических систем в области реальных лучей. Часть 4. // Естественные и технические науки, 2013, №1, с. 225-232.
11. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Расчет хода луча через однополостную поверхность с осевой симметрией. // Вестник Московского университета МВД России, 2013, №2, с. 223-225.

12. Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Расчет хода лучей через конические поверхности второго порядка, не обладающие осевой симметрией. // Образование. Наука. Научные кадры, 2013, №1, с. 123-133.

б) работы в трудах конференций и научных журналах:

1. Агапов Н.А. Матричные методы в расчете оптических систем. //Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Сборник статей. / Издательская лаборатория ИОА ТФ СОАН СССР, 1980, с. 140–146.
2. Агапов Н.А. Расчет отсекателей в менисковых телескопах. // Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Сборник статей. / Издательская лаборатория ИОА ТФ СОАН СССР, 1980, с. 160–164.
3. Агапов Н.А., Глинский А.Л. Расчет зеркального объектива с углом поля зрения 180^0 . // Сборник тезисов докладов 2 Всесоюзной конференции молодых ученых и специалистов “Теоретическая и прикладная оптика”. / Ленинград, 1986, с. 300.
4. Агапов Н.А., Половцев И.Г. Технологический контроль оптических поверхностей. // Сборник статей. Томск. / Издательская лаборатория ИОА ТФ СОАН СССР, 1987, с. 128-137.
5. Агапов Н.А., Ашихмин В.Н., Богданов В.Ф. и др. // Практикум по автоматизации проектирования оптико-механических приборов. Под общей редакцией В.В.Малинина. / М.: Машиностроение, 1989, с. 24–36.
6. Трофимов А.И., Балдин В.Д., Григорьев М.В. // Диагностика и ремонт конструкций активной зоны энергетических ядерных реакторов РБМК – 1000. Под редакцией А.И. Трофимова. М.: / Энергоатомиздат, 2003, с. 201–205.
7. Бояринов О.В., Чигорко А.Б., Агапов Н.А., Перелыгин А.В., Барабанов Н.А., Мевус В.В., Чигорко А.А., Ерофеев С.Ю. // Дистанционный визуальный контроль в атомной промышленности. Сборник научных трудов. - Вып. 13. Физико-математические и технические науки, Сургут. Изд. СурГУ, 2003, с. 8-22.
8. Бояринов О.В., Агапов Н.А., Мевус В.В. Задачи и средства дистанционного визуального контроля в атомной промышленности. // Качество - стратегия XXI века: Материалы IX Международной научно-практической конференции - Томск, ТПУ, 25-26 ноября 2004 г. - Томск: Изд. ТПУ, 2004, с. 243-245.
9. Агапов Н.А., Бояринов О.В., Чигорко А.Б. // Дистанционный визуальный контроль в атомной промышленности. Сборник научных трудов. / Сургут. Изд. СурГУ, 2005, том 1, с. 50–53.
10. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Оптикоэлектронная система для дистанционного измерения линейных размеров. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета, 2008, №2, том 312, с. 318-323.

11. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевеус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Устройство для контроля положения оптической оси корундов подпятников. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета, 2008, №2, том 312, с. 323-326.
12. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Мевеус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Контроль коррозионного состояния транспортно-технологических емкостей. // Известия Томского политехнического университета. / Изд-во Томского политехнического университета, 2008, №2, том 312, с. 327-329.
13. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Бояринов О.В., Карпенко В.И., Кулешов В.К. Фортуна С.В., Южаков Д.Г. // Устройство для контроля положения оптической оси корундовых подпятников. Труды научно-технической конференции «Сибирь атомная. XXI век». Томск, 9–12 декабря 2008 г., с. 134–138.
14. Агапов Н.А., Мевеус В.В., Гладков А.В., Бояринов О.В., Царик В.Г., Кулешов В.К. Смотровые системы для дистанционного визуального контроля оболочек тепловыделяющих элементов в среде транспортно-технологических емкостей. // Международная научная конференция «Становление и развитие научных исследований в высшей школе». Сборник трудов. Томск, 14-16 сентября 2009 г. Том 2, с. 29–34.
15. Агапов Н.А., Мевеус В.В., Бояринов О.В., Кулешов В.К. Смотровые системы для дистанционного визуального контроля состояния транспортно-технологических емкостей без опорожнения. // Международная научная конференция «Становление и развитие научных исследований в высшей школе». Сборник трудов. Томск, 14-16 сентября 2009 г. Том 2, с. 35-38.
16. Агапов Н.А., Бразовский В.В., Баранов В.А., Бразовская Н.В. О некоторых свойствах апланатических точек преломляющих сфер. // ЭФТЖ, 2012, т. 7, с. 26-28.
17. Агапов Н.А., Бразовский В.В., Баранов В.А., Бразовская Н.В. Математическое моделирование свойств декартовых преломляющих поверхностей. // ЭФТЖ, 2012, т. 7, с. 29-31.
18. Агапов Н.А., Бразовский В.В., Баранов В.А., Бразовская Н.В. Математическое моделирование некоторых свойств декартовых отражающих поверхностей. // ЭФТЖ, 2012, т. 7, с. 32-36.

в) научные отчеты:

1. Агапов Н.А., Суханов В.Б., Мазуров В.К. и др. Разработка лазера на красителях с распределенной обратной связью ЛЖК-12 с когерентной импульсной накачкой. // Отчет о НИР/СКБ НП «ОПТИКА» СО АН СССР, г. Томск, № гос. рег. 01.84.0081446. 1985 г., с. 36-69, 83-123.
2. Агапов Н.А., Даничкин С.А., Цхай Э.Б. Разработка и изготовление элементов станции лазерного зондирования. // Отчет о НИР/СКБ НП «ОПТИКА» СО АН СССР, / г. Томск, № гос. рег. 01.85.0048725, 1988 г., с. 15-21.

3. Исследование дисперсного состава аэрозольных частиц в динамических процессах методом компьютерной голографии для выбора фильтрующих материалов [Текст]: научно-технический отчет по НИР «Проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом в процессе вывода из эксплуатации объектов реакторного производства» № гр Ф40732 для служебного пользования, единственный экземпляр, 21стр. / ОАО «Сибирский химический комбинат» рук. Кулешов В.К.; исп. Бояринов О.В., Агапов Н.А., Мевкус В.В., Бразовский В.В., Баранов В.А. / Северск, 2010. с. 17-18.

г) свидетельства:

1. Агапов Н.А., Половцев И.Г. Авторское свидетельство №1421995 (СССР). Теневой прибор. Приоритет 16.12.85 № 4026841/25-28. Бюллетень МКИ G 01 В 11/24, 07.09.1988, № 33.
2. Агапов Н.А., Самуйленкова Т.Н. Свидетельство на полезную модель №2421. Абажур. Приоритет 10.04.95. Заявка № 95105389/20. Бюллетень МКИ 6 F 21 V 1/06, 1/16, 16.07.1996, №7.
3. Агапов Н.А., Лялин Ю.В., Калошина Х.С. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ ППП «ОПТИКА» № 960502, заявка № 960412. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.96.
4. Агапов Н.А., Лялин Ю.В., Калошина Х.С. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ ППП «КОНТРОЛЬ», заявка № 960411. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.96.

д) патенты на изобретения:

1. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Бояринов О.В., Кулешов В.К., Мевкус В.В., Самуйленкова Т.Н., Сеелев И.Н., Фортуна С.В., Южаков Д.Г. Оптико-электронное устройство для контроля положения оптической оси корундовых сферических подпятников в составе маятников газовых центрифуг. Патент на изобретение №2473072, 20.01.2013, Бюл. №2.
2. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Бояринов О.В., Кулешов В.К., Мевкус В.В., Самуйленкова Т.Н., Сеелев И.Н., Михенин Г.Н., Южаков Д.Г. Оптико-телевизионное устройство для дистанционного визуального контроля и измерения линейных размеров. Патент на изобретение №2480799, 27.04.2013, Бюл. №12.
3. Агапов Н.А., Агапов Д.Н., Бояринов О.В., Кулешов В.К., Мевкус В.В., Самуйленкова Т.Н., Сеелев И.Н., Михенин Г.Н., Южаков Д.Г. Оптико-телевизионное устройство для дистанционного визуального контроля. Патент на изобретение №2483337, 27.05.2013, Бюл. №15.