

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Жимулева Елена Сергеевна

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕНЕВЫХ
ПРОЕКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ
ОБЪЕКТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ В ПРОМЫШЛЕННОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**

Специальность 05.11.07 - «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Ю. В. Чугуй

Новосибирск – 2016

Оглавление

Введение	5
ГЛАВА 1 Обзор и анализ оптических теневых проекционных методов и систем измерений геометрических размеров объектов.....	13
1.1 Существующие теневые проекционные методы контроля объектов	13
1.2 Сравнительный анализ характеристик существующих теневых измерителей	21
1.3 Обзор телецентрических объективов.....	22
Выводы по главе 1	30
ГЛАВА 2 Формирование теневого изображения трехмерных объектов телецентрической системой и определение положения их границ.....	32
2.1 Расчет профиля теневого изображения объемного края в частично-когерентном свете.....	32
2.1.1 Формирование теневого изображения тонкого объекта	35
2.1.2 Формирование теневого изображения трехмерного объекта.....	38
2.2 Способы определения положения границ изображения трехмерного объекта.....	41
2.2.1 Способ на основе расчетного порога	42
2.2.2 Способ на основе расчета корректирующей добавки	48
Выводы по главе 2	50
ГЛАВА 3 Проектирование оптических схем телецентрических объективов с улучшенными характеристиками.....	52
3.1 Описание объектов измерения и их контролируемых параметров	52
3.2 Общие требования к разрабатываемым объективам.....	55
3.3 Расчет телецентрических объективов	60
3.3.1 Телецентрический объектив "Кольцо" $0,155^X$	64
3.3.2 Телецентрический объектив "КБК" $0,189^X$	66
3.3.3 Телецентрический объектив "Решетка" $0,097^X$	69
3.4 Анализ влияния остаточных aberrаций и допусков изготовления разработанных объективов	74

3.4.1 Анализ аберраций компонентов объектива	75
3.4.2 Моделирование изменения дисторсии вдоль оптической оси.....	77
3.4.3 Моделирование телецентричности объектива по полю	77
3.4.4 Моделирование телецентричности объектива при смещении объекта вдоль оптической оси	79
3.4.5 Оценка влияния допусков на дисторсию объектива	80
3.4.6 Тепловой анализ объектива.....	81
Выводы по главе 3	83
ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования теневого проекционного канала.....	85
4.1 Используемые компоненты системы	85
4.2 Предварительная юстировка экспериментального стенда.....	95
4.3 Исследования влияния параметров системы контроля на измеряемый размер трехмерного объекта	96
4.3.1 Влияние относительного отверстия объектива на размер изображения объекта.....	97
4.3.2 Влияние диаметра осветителя на размер изображения объекта	98
4.3.3 Влияние толщины объекта на размер его изображения.....	100
4.3.4 Влияние смещения объекта на определение его размера.....	102
4.3.5 Влияние длины волны осветителя на размер изображения объекта.....	106
4.4 Методика определения оптических характеристик объектива.....	109
4.4.1 Определение дисторсии объектива	110
4.4.2 Определение телецентричности объектива	112
4.4.3 Определение ЧКХ и ФРТ объектива.....	119
Выводы по главе 4	120
ГЛАВА 5 Разработка и испытания оптико-электронных систем размерного контроля геометрии изделий.....	123
5.1 Оптико-электронная система размерного контроля керамических колец "Кольцо"	123
5.2 Оптико-электронная система размерного контроля плоской и радиусной плитки из бронекерамики "КБК"	128

5.3 Оптико-электронная система размерного контроля бронероликов "УКБр-1"	133
5.4 Результаты метрологических испытаний систем размерного контроля и их анализ....	137
Выводы по главе 5	140
Заключение	142
Список сокращений и условных обозначений	145
Список литературы.....	146
Приложение А Акт внедрения ЗАО "НЭВЗ-Керамикс"	155

Введение

Актуальность

При изготовлении прецизионных изделий с допусками в сотые доли миллиметра необходим контроль с соответствующей точностью их геометрических параметров: длины, толщины, глубины, диаметра, отклонений от соосности. Для решения этой задачи перспективным является использование бесконтактных систем измерения, которые позволяют избежать механического соприкосновения измерительной части системы с контролируемым изделием. Среди них большой класс составляют измерительные системы, основанные на теневом проекционном методе. Такие системы позволяют измерять размеры изделий в диапазоне от 0,3 до 50 мм с быстродействием в десятки и даже сотни измерений в секунду. При этом погрешность измерений может достигать ~ 10 мкм. Суть метода состоит в освещении контролируемого объекта световым пучком и фотоэлектрической регистрации его теневого изображения в проходящем свете [1].

Среди изделий большой класс составляют трёхмерные объекты постоянной толщины с размерами до 100 мм, а в отдельных случаях – до 250 мм (перемешивающие решётки тепловыделяющих сборок атомных реакторов). При контроле таких объектов в проходящем свете, как правило, используют пороговый метод определения положения границ объекта (например, при некогерентном освещении уровень порога выбирают равным 0,5 от уровня интенсивности при отсутствии объекта). Часто в качестве источников света в теневых системах используют светодиоды, реализующие частично-когерентное освещение. При этом возникает погрешность определения геометрических размеров трёхмерного изделия, обусловленная влиянием параметров системы и изделия (угловых размеров источника и апертурной диафрагмы, толщины объекта и точности его установки в измерительном объеме) на смещение теневой границы его изображения. Для учёта этого влияния необходимо иметь аналитическое описание зависимости интенсивности света теневого изображения трёхмерного объекта от указанных параметров, исходя из которого, выбором соответствующего порога можно минимизировать возникающие погрешности измерений.

Одним из основных компонентов теневой проекционной системы, влияющих на точность определения размеров объекта, является объектив, проецирующий теневое изображение объекта на фотоприёмную матрицу. Требуется уменьшить влияние протяжённости изделия вдоль оптической оси и трудностей его позиционирования в измерительном объёме с точностью не менее 1 мм (инвариантность к положению объекта в

большом измерительном объеме) на метрологические характеристики системы. Для этого необходимо обеспечить большую глубину резко изображаемого пространства (более 20 мм) и высокую ортоскопичность изображения (дисторсия менее 0,02 %) при диаметрах объективов 50 – 250 мм. Эти условия можно обеспечить при использовании специализированных объективов – телецентрических в пространстве предметов и изображений.

При проектировании, изготовлении и применении объективов в системах размерного контроля требуется проводить тестирование их оптических характеристик, которое надо осуществлять не только на лабораторном стенде, но и в составе уже собранной измерительной системы. Это даёт возможность избежать ошибок, возникающих при сборке оптического канала системы, а также проводить её калибровку.

В связи с вышесказанным, задача разработки и создания теневого проекционных систем повышенной точности для измерения в проходящем свете геометрических размеров трёхмерных объектов с размерами до 250 мм с погрешностью не более 5 мкм за счёт учёта параметров осветителя, проекционного телецентрического объектива и толщины изделия, а также за счёт уменьшения остаточной нетелецентричности и дисторсии объектива представляется актуальной.

В диссертационной работе указанная задача решена на примере разработки и изготовления систем контроля керамических бронероликов, кольцевых изоляторов и бронепластин, а также проектирования телецентрического объектива для теневого контроля перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов.

Степень разработанности проблемы

Особенности формирования в проходящем когерентном свете изображений трёхмерных объектов постоянной толщины применительно к их размерному контролю исследованы Ю.В. Чугуем. Исследования базируются на разработанной им конструктивной теории дифракционных явлений на трёхмерных телах. Эта теория развита для случая частично-когерентного освещения объектов с использованием светодиодов.

Существующие в мире системы контроля, основанные на теновом проекционном методе (Trioptics, Германия [2]; Micro-Epsilon, США; «Элеконт», Украина; ООО «НПО Редвилл», Томск; Keyence, Япония; «Эрмис+», Томск), имеют погрешность измерений ~10 мкм для изделий размером от 0,3 до 50 мм и, как правило, предназначены для контроля только цилиндрических объектов. При этом они являются дорогостоящими и имеют недоступные для пользователей оптические схемы оптико-электронных блоков. Все

это не позволяет применять их для контроля трёхмерных изделий (в частности, керамических бронероликов, кольцевых изоляторов, плиток размером до 65 мм и перемешивающих решеток размером до 250 мм) с допустимой погрешностью измерений не более 5 мкм. Таким образом, существует потребность в разработке систем контроля с повышенной точностью измерений.

Существующие на рынке импортные телецентрические в пространстве предметов объективы (Thorlabs, США; Рифтэк, Беларусь; Sichuan Splendor Gauge Company, Китай; Blum Novotest, Германия; Opto Engineering, Германия [3]), предназначенные для использования в системах теневого размерного контроля, обладают дисторсией более 0,02 %, являются дорогостоящими, а самое главное, в открытой печати отсутствуют сведения об устройстве их оптических схем (т.е. не известны более подробные оптические характеристики). Отечественное оптико-механическое производство не изготавливает промышленных телецентрических объективов. Большинство телецентрических в пространстве предметов объективов, представленных в патентах, не предназначено для использования в системах размерного контроля. Наиболее близкая оптическая схема объектива [4] обладает малым разрешением по всему полю зрения (число Штреля на оси около 0,8, на краю – 0,43), дисторсией более 0,05% и полем зрения менее 50 мм. Таким образом, использование существующих телецентрических объективов и известных оптических схем в системах размерного контроля керамических изделий не представляется возможным. В связи с этим требуется проектирование новых оптических схем телецентрических объективов и их изготовление.

Существующие методики тестирования оптических характеристик телецентрических объективов (с помощью автоколлиматора, миры с разным периодом полос) предназначены для контроля только одного из параметров: дисторсии, телецентричности или разрешения. Для проверки качества используемых объективов, а также для калибровки всей системы контроля, требуется разработка методики, контролирующей все указанные параметры одновременно.

Связь с государственными программами и НИР

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0086), в рамках бюджетной научно-исследовательской работы КТИ НП СО РАН "Оптико-информационные, лазерные

технологии и системы прецизионного контроля физических и пространственных характеристик 3D макро- и микрообъектов за 2013-2016 гг."

Целью диссертационной работы является разработка, создание и исследование оптико-электронных каналов для теневых проекционных систем геометрического контроля размеров изделий габаритами до 250 мм с повышенной точностью измерения (погрешность не более 5 мкм).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести расчёт и исследовать поведение профиля теневого изображения объёмного края («объёмной полуплоскости») в зависимости от его толщины, угловых размеров осветителя и апертурной диафрагмы телецентрического проекционного объектива применительно к размерному контролю трёхмерных объектов.

2. Исходя из профиля изображения края предложить и исследовать высокоточные способы определения положение его границы с учётом толщины объекта, угловых размеров осветителя и апертурной диафрагмы объектива.

3. Спроектировать и изготовить в рамках импортозамещения ряд телецентрических в пространстве предметов объективов для систем размерного контроля керамических кольцевых изоляторов, бронеплиток и перемешивающих решёток, обладающих улучшенными оптическими характеристиками, по сравнению с известными объективами, увеличенными полем зрения (до 250 мм) и разрешением (до 100 линий/мм), сниженными уровнями дисторсии (менее 0,02%), нетелецентричности (менее 0,01) и астигматизма (менее 0,1 мм).

4. Разработать методику тестирования оптических характеристик телецентрических объективов для оценки качества их изготовления и последующего применения в системах размерного контроля трёхмерных изделий в условиях промышленного производства.

5. Экспериментально исследовать влияние на формирование изображения трёхмерных объектов угловых размеров и длины волны источника света, относительного отверстия телецентрического объектива, толщины объекта и его положения в измерительном объёме.

6. Разработать оптико-электронные каналы для теневых проекционных систем размерного контроля кольцевых изоляторов, бронероликов, бронепластин.

Методы исследований

Для решения указанных задач в ходе работы были использованы компьютерное проектирование оптических систем, математическое моделирование, физический эксперимент и макетирование.

Научная новизна:

1. Впервые получено выражение, описывающее профиль теневого изображения объёмного края в проходящем частично-когерентном свете в зависимости от угловых размеров источника света и апертурной диафрагмы проекционной системы, а также от толщины объекта.

2. Впервые предложены способы определения с высокой точностью пороговым методом положения границ объёмного края, исходя из профиля его изображения на основе полученной аналитической зависимости величины порога от толщины объекта, угловых размеров источника света и апертурной диафрагмы проекционной системы.

3. Предложена методика расчета телецентрических объективов для теневых проекционных систем, которая позволяет улучшить оптические характеристики объектива: увеличить поле зрения (до 250 мм), снизить дисторсию (менее 0,02 %) и увеличить телецентричность (не менее 0,01°).

4. Разработана методика контроля оптических характеристик объективов, основанная на регистрации двух теневых изображений точечной миры, смещенной вдоль оптической оси. Она позволяет определять одновременно такие характеристики, как дисторсию поля на рабочем расстоянии, изменение дисторсии вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, частотно-контрастную характеристику объектива в различных областях по полю. Данная методика, в отличие от известных, может быть применена для калибровки оптико-электронных каналов в промышленных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты теоретических исследований поведения профиля теневого изображения типичного элемента трёхмерного объекта – объёмного края – в зависимости от толщины объекта, угловых размеров источника света и апертурной диафрагмы проекционного объектива.

2. Способы определения с высокой точностью положения границы изображения трёхмерного объекта в виде объёмного края пороговым методом, первый из которых основан

на выборе расчётного порога, учитывающего толщину объекта и параметры теневой проекционной системы, а второй – на использовании стандартного порога с внесением корректирующей поправки, зависящей от толщины объекта и параметров проекционной системы.

3. Оптические схемы телецентрических объективов, обладающие улучшенными, по сравнению с существующими, характеристиками: уменьшенной дисторсией (менее 0,02 %), увеличенным полем зрения (до 250 мм) и телецентричностью (не менее $0,01^\circ$), а также методика их расчёта.

4. Методика одновременного определения оптических характеристик телецентрических объективов (дисторсии, телецентричности, разрешения, увеличения, частотно-контрастной характеристики) на стадии их разработки и применения в промышленных условиях.

Личный вклад. В диссертации представлены результаты, полученные лично автором или при его непосредственном участии. Автором предложены способы определения положения границ объекта, основанные на пороговом методе, с учётом параметров теневых проекционных систем контроля и толщины объекта; спроектирован ряд телецентрических в пространстве предметов объективов; разработана методика контроля оптических параметров телецентрических объективов для измерительных систем. Автор непосредственно участвовал в разработке, создании и внедрении в промышленность измерительных систем.

Практическая значимость работы

Физико-технические решения, разработанные при создании оптико-электронного канала теневой проекционной системы, включая способы определения положения границ объекта, методику расчета телецентрических объективов, а также методику калибровки оптико-электронного канала в промышленных условиях, составляют новый арсенал технических и измерительных средств для инженерных применений в области проектирования систем размерного контроля.

На основе физико-технических решений:

- спроектированы и изготовлены телецентрические объективы (оптические элементы изготовлены АО «Швабе – Оборона и Защита», сборка и юстировка осуществлялась в КТИ НП СО РАН), предназначенные для применения в системах теневого проекционного размерного контроля (подана заявка на патент).

• созданы оптико-электронные системы для решения актуальной задачи размерного контроля: трёхмерных объектов керамической промышленности кольцевых изоляторов, керамических бронеплиток и бронероликов. В течение 3 - 6 лет они успешно эксплуатируются на предприятии ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» (подтверждено Актом о внедрении).

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях «Measurement 2011» (Братислава, Словакия), «Correlation Optics-2013» (Черновцы, Украина), Международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь-2011» и «ГЕО-Сибирь-2016» (Новосибирск). Работа отмечена дипломом лауреата на Всероссийском конкурсе «Наукоёмкие инновационные проекты молодых ученых – 2012». Результаты исследований представлены в научных отчетах Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы».

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, среди них 3 статьи в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ; 4 статьи в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus и Web of Science; 4 публикации в сборниках трудов и материалов Международных и Российских конференций; подана 1 заявка на патент РФ.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы из 102 наименований, содержит 154 страницы основного текста, 88 рисунков, 14 таблиц, 1 приложение.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – проф., д.т.н. Ю.В. Чугую за постоянное внимание, содействие и ценные обсуждения. Автор пользуется случаем выразить глубокую признательность к.т.н. П.С. Завьялову за необходимые консультации по тематике работы, помощь в оптических расчетах и полезные советы, а также к.т.н. Л.В. Финогенову, Ю.А. Лемешко за поддержку на всех этапах

выполнения работы. Автор благодарен А.В. Белобородову за разработку программного обеспечения, использованного в работе, и полезные замечания, а также всем сотрудникам лаборатории № 1-1 КТИ НИ СО РАН.

ГЛАВА 1 Обзор и анализ оптических теневых проекционных методов и систем измерений геометрических размеров объектов

В настоящем разделе проведён анализ оптических теневых методов измерения геометрических размеров объектов в проходящем свете: теневого проекционного в параллельном пучке, в рассеянном излучении, расходящемся пучке, теневого сканирующего, метода на основе оптического оконтуривания изображений измеряемых объектов. Особое внимание уделено теневым проекционным методам. Приводятся принцип действия, основные технические характеристики и функциональные возможности измерительных систем, основанных на указанном методе. Показано, что при использовании в измерительной системе телецентрических объективов удастся в несколько раз понизить её погрешность измерений. Дан обзор существующих патентов и имеющихся на рынке объективов такого типа.

1.1 Существующие теневые проекционные методы контроля объектов

Методы бесконтактного контроля базируются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта (оптический, акустический, магнитный, вихретоковый, проникающими веществами, радиоволновый, радиационный, тепловой, электрический и другие).

Оптические методы контроля [5-8] основаны на анализе взаимодействия электромагнитного поля светового излучения с контролируемым объектом. При этом оптические методы обладают большей устойчивостью к вариациям электрических и магнитных свойств материалов и потенциально способны обеспечить высокую точность (погрешность менее 1 мкм) и быстроедействие, что является неоспоримым преимуществом при применении их в промышленности [9].

Для измерения геометрических параметров изделий в России и за рубежом производятся оптико-электронные измерители, принцип действия которых основан на различных методах: теневых проекционных, теневых сканирующих, триангуляционных, телевизионных, интерференционных, дифракционных, корреляционных, метод структурного освещения.

Важное место среди оптико-электронных систем контроля занимают теневые измерители. Область их применения широка [10]: центрифугирование, микроскопия, изучение конвективных потоков при теплообмене [11, 12], анализ гидродинамических явлений [13], контроль качества оптического стекла [14], исследование кристаллов различных минералов. В основу теневых измерителей положено проецирование светового потока на объект, результатом которого является анализируемая теневая картина объекта. Теневой подход лежит в основе многих методов контроля объекта. Так, метод Фуко и различные его модификации [15-18], метод Ронки-Мобсби [19, 20], метод Ричи [21] применяются для бесконтактного оптического контроля полированных поверхностей изделий, качества оптических элементов [22]; метод Фуко-Теплера (шлирен-метод) [13] – для обнаружения оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах; теневой фоновый метод [23], метод светящейся точки, прямотеневой метод [24] используются для диагностики конвективных потоков при теплообмене и исследований течений; метод фазового контраста [25] – для изучения прозрачных объектов. Для определения геометрических размеров изделий применяются теневые проекционные и сканирующие методы.

Остановимся на теневых проекционных методах, используемых наиболее часто в измерительной практике.

Теневой проекционный метод в параллельном пучке. На рисунке 1.1 представлена схема измерителя на базе теневого проекционного метода [26]. Измеритель включает в себя оптический и электронный блоки. Электронный блок осуществляет управление работой осветителя, считывание информации с фотоприемника и её последующую аппаратно-цифровую обработку с целью определения размеров объекта. Оптический блок состоит из осветителя (источник излучения $ИС$ и коллимирующий объектив O_1), фотоприёмного модуля – телескопической проецирующей оптической системы (объективы O_2, O_3 , и диафрагма D) и фотоприемной матрицы (Φ). Согласно этому методу, освещение контролируемого объекта осуществляется параллельным пучком света.

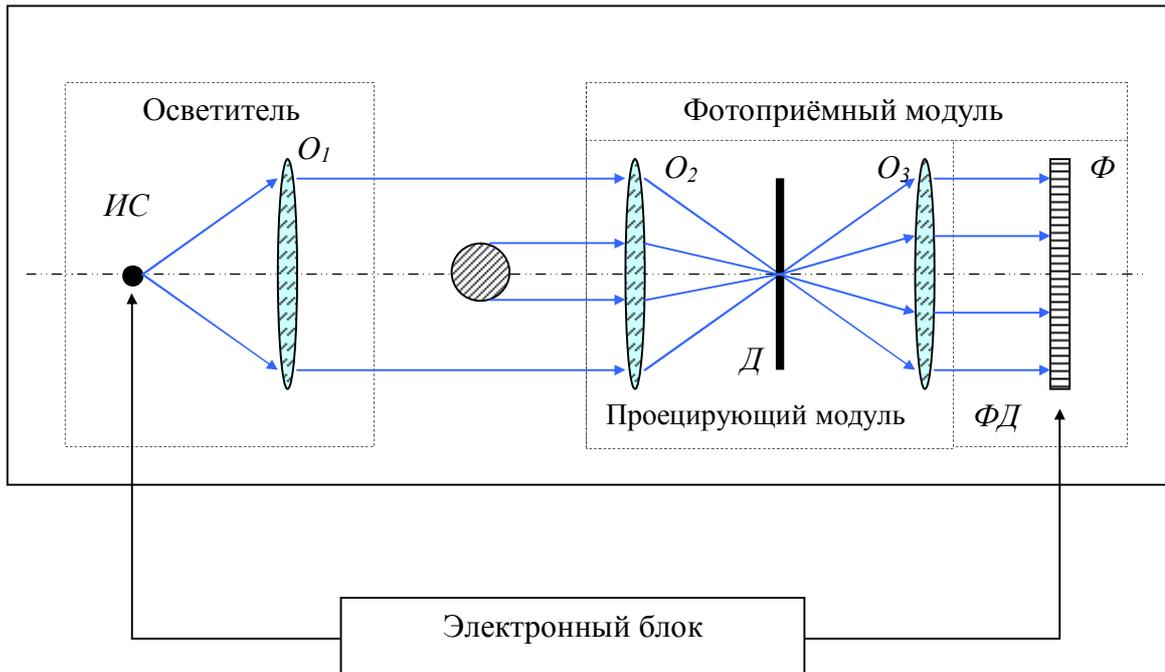


Рисунок 1.1 – Схема теневой проекционной системы при параллельном освещении

Параллельный пучок света, формируемый осветителем, освещает измеряемый объект. Проецирующая система формирует в плоскости фотоприемника теневое изображение объекта. Фотоприемник Φ выполняет электронное сканирование теневого изображения по строкам. В процессе этого сканирования осуществляется предобработка сигнала – компенсация темновых токов, коррекция неравномерной чувствительности элементов фотоприемной матрицы Φ , сглаживание сигнала, световая коррекция. Отсчеты скорректированного сигнала, соответствующего элементам фотоприемника Φ , записываются в буфере ОЗУ. Используя эти отсчеты, в соответствии с ниже описанным алгоритмом, определяется размер объекта в каждом сечении. Проводится усреднение значений по всем сечениям объекта.

Алгоритм определения геометрических параметров объекта предусматривает нахождение координат его краёв и последующее вычисление по ним требуемых параметров. Например, диаметр D и координата оси X_c цилиндра (рисунок 1.2) связаны с координатами его краёв x_1 и x_2 соотношениями:

$$D = x_2 - x_1; \quad X_c = \frac{x_2 + x_1}{2}.$$

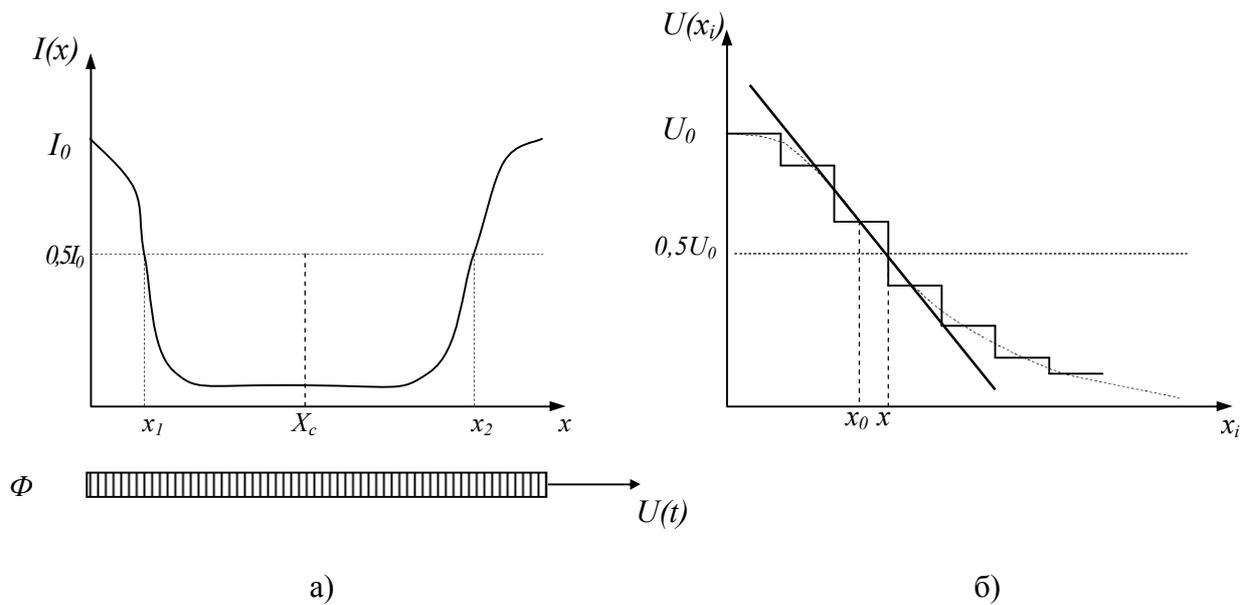


Рисунок 1.2 – Определение координаты края измеряемого объекта: а) изображение двух краев, б) одного края

Таким образом, основной задачей является точное определение координаты края. От решения этой задачи во многом зависят точностные характеристики метода. Каждый из отсчётов сигнала с фотоприемной матрицы Φ соответствует светочувствительному элементу строки матрицы с известным номером i и, следовательно, с известной координатой x_i его центра в пространстве. Сравнивая значения этих отсчётов I_i с порогом $I(0)$ (например, по уровню 0,5 от уровня входной интенсивности I_0), можно легко определить координату края x с точностью до элемента разрешения фотоприемной матрицы Φ , который равен шагу Δx между её элементами (рисунок 1.2, а). Часто в системах применяется линейная аппроксимация края с использованием метода наименьших квадратов (рисунок 1.2, б). В действительности распределение интенсивности света в области края является линейным только в некоторой окрестности точки перегиба. Однако при контроле трехмерных объектов точность определения порога $I(0)$ и точность определения положения края зависят от толщины измеряемого изделия. Увеличить точность измерений можно за счет учета объемности измеряемых изделий, что показано в настоящей работе.

Теневой проекционный метод при освещении рассеянным излучением. Метод основан на измерении многоэлементным линейным фотоприемником поперечного размера теневого изображения объекта, получаемого с помощью объектива при освещении рассеянным излучением [27, 28]. Для создания высокой контрастности изображения используется подсветка измеряемого объекта линейкой светодиодов. Оптическая схема прибора

представлена на рисунке 1.3. Двухкоординатное измерение диаметра обеспечивается наличием в приборе двух одинаковых измерительных каналов, оптические оси которых взаимно перпендикулярны. Существенно, что при перемещении объекта в рабочей зоне размеры его изображений, проецируемых на многоэлементные приёмники, изменяются. Чтобы отследить эти изменения требуется двухкоординатное измерение для корректировки измеренного геометрического размера изделия в зависимости от его положения [29, 30].

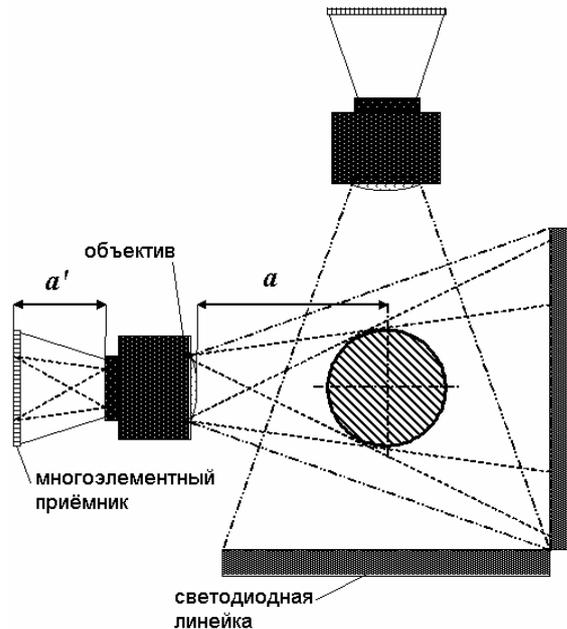


Рисунок 1.3 – Оптическая схема теневого измерителя при освещении объекта рассеянным излучением

Системы на основе данного метода являются двухкоординатными и позволяют измерять объекты больших диаметров (до 200 мм), что является их достоинством. Однако для приборов такого типа следует использовать высококачественные, исправленные от aberrаций объективы, что значительно удорожает стоимость системы. Кроме того, изменения при перемещении объекта перпендикулярно оптической оси должны исправляться программно, что требует сложных алгоритмов программной обработки и уменьшает точность системы.

Теневой проекционный метод в расходящемся пучке. На рисунке 1.4 представлена схема измерителя в расходящемся световом потоке. Точечный источник излучения (полупроводниковый лазер) светит непосредственно на фотоприёмник. В схеме не используется преобразующая оптика, теневое изображение объекта с увеличением формируется с помощью расходящегося пучка. При перемещении измеряемого объекта

размер его тени также меняется, эти перемещения отслеживаются по идентичному перпендикулярно установленному каналу.

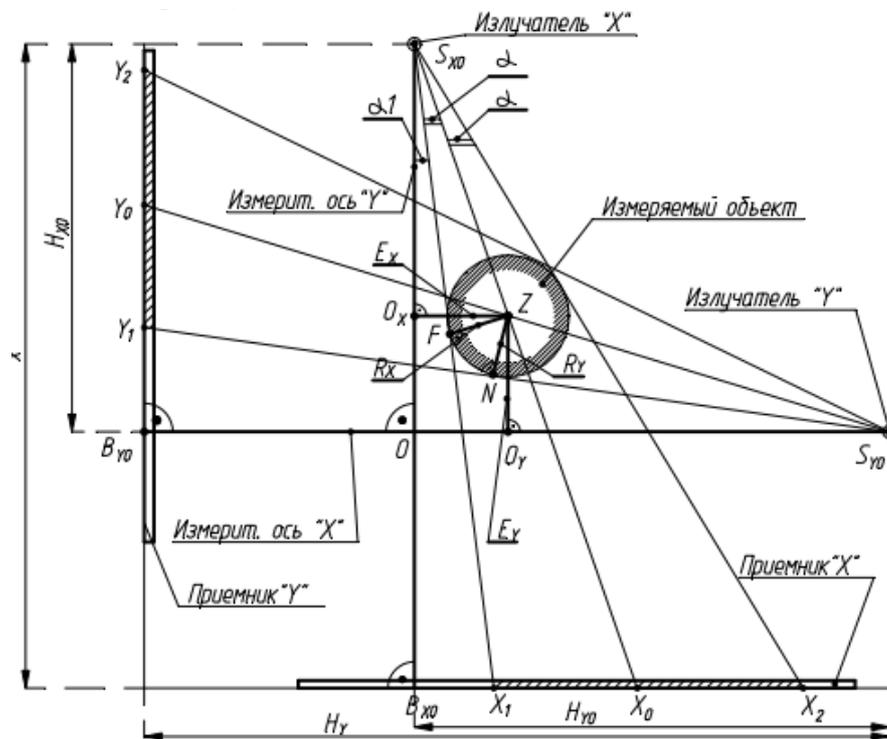


Рисунок 1.4 – Теневой метод в расходящемся пучке

Бесконтактные двухкоординатных измерители изделий, использующие теневой метод измерения в расходящемся световом потоке, обладают целым рядом неоспоримых преимуществ, связанных с отсутствием в них элементов линзовой и зеркальной оптики. В частности, достижимая точность измерения таких приборов составляет доли микрометра и ограничена только дифракционными эффектами на границах тени. Однако при работе в расходящемся световом потоке имеет место изменение размеров тени измеряемого объекта при его перемещениях в зоне контроля, что приводит к понижению точности определения размера объекта по его тени по сравнению со случаем освещения объекта параллельным пучком. Для учета положения объекта требуется использование сложных соотношений для расчета истинного размера объекта [31].

Сканирующий лазерный метод. Лазерные сканирующие методы [32] основаны на формировании теневого изображения объекта с размером D путем сканирования его узким лазерным пучком света с помощью дефлектора и регистрации прошедшего светового потока одноэлементным фотоприемником. Геометрические параметры оцениваются исходя из анализа длительности регистрируемых сигналов с выхода фотоприёмника, которые пропорциональны размерам контролируемого объекта. Принципиальная блок-схема

измерителя, основанного на лазерном сканирующем методе, приведена на рисунке 1.5. Данные системы обладают высокими точностными характеристиками (минимальная погрешность ± 2 мкм), однако требуют частой калибровки и критичны к вибрациям, что вызывает определённые трудности при их использовании в промышленных условиях. Более того, у измерительных систем данного класса присутствует динамическая погрешность, определяемая временем регистрации измерительной информации. Данная ошибка возрастает при увеличении скоростей движения контролируемых объектов. Существенно, что лазерные сканирующие измерители требуют применения высококачественной дорогостоящей оптики.

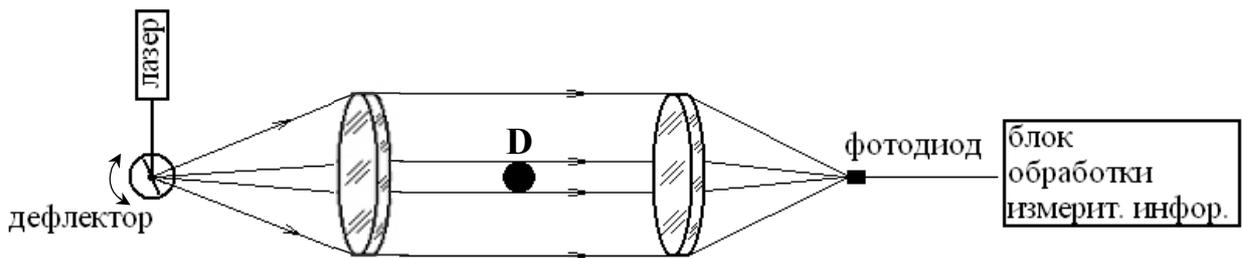


Рисунок 1.5 – Блок-схема теневой сканирующей измерительной системы

Метод на основе оптического оконтуривания изображения объекта. Метод оптического оконтуривания [33] позволяет находить форму изделий при достаточно легкой обработке теневого изображения с помощью ПО. В этом случае путем оптической высокочастотной пространственной фильтрации выделяются границы измеряемого объекта. При таком подходе нахождение края объекта сводится к определению максимума (для первой производной от сигнала) или минимума (для второй производной) функции, полученной на отфильтрованном изображении объекта. На рисунке 1.6 показана оптическая схема, реализующая метод оптического оконтуривания [34, 35].

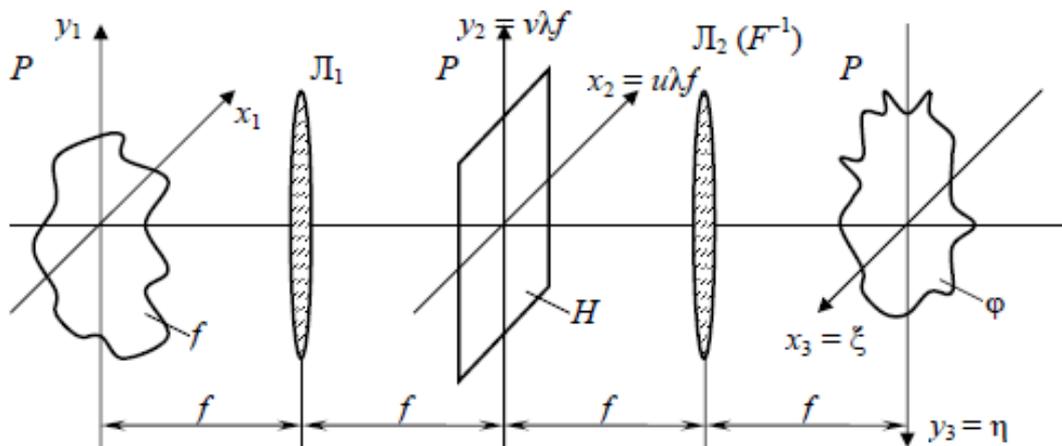


Рисунок 1.6 – Схема пространственной оптической фильтрации

Простейший пространственный фильтр для обработки изображений содержит две линзы с совмещенными задней (для первой линзы L_1) и передней (для второй линзы L_2) фокальными плоскостями, и фильтр-транспарант, расположенный в плоскости совмещения P (рисунок 1.6).

Для операции оконтуривания в плоскости апертурной диафрагмы устанавливается фильтр высоких частот с функцией пропускания вида:

$$H(u, v) = (1 - e^{-p(u^2+v^2)}),$$

где $H(u, v)$ – функция пропускания фильтра, (u, v) – пространственные координаты.

Пример одномерной амплитудной функции пропускания пространственного фильтра высоких частот показан на рисунке 1.7, а; входной сигнал приведен на рисунке 1.7, б; отфильтрованное изображение показано на рисунке 1.7, в. В этом случае на фотоприемной матрице отображаются области наибольшего изменения амплитуды входного изображения.

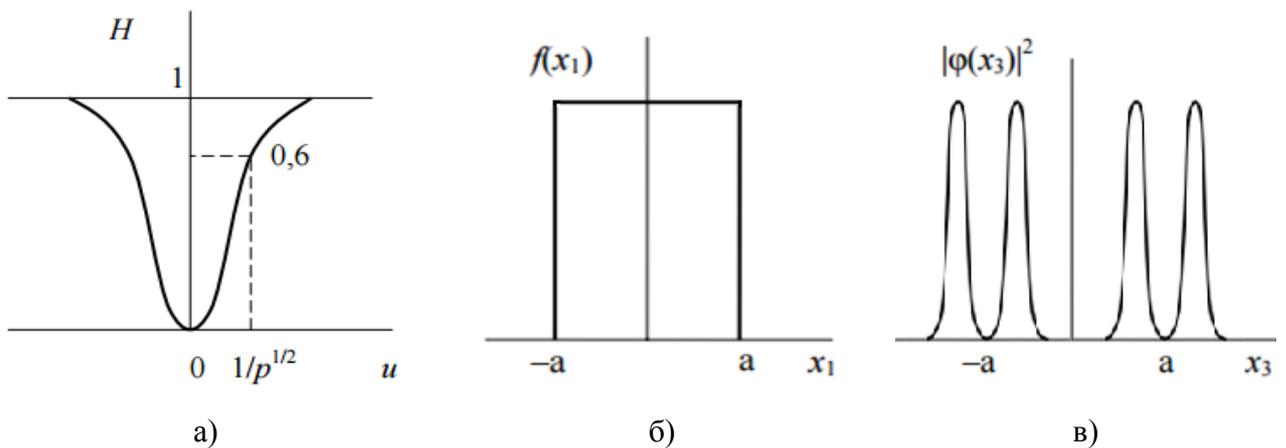


Рисунок 1.7 – Оконтуривание изображения одномерного сигнала: а) пример одномерной амплитудной функции пропускания пространственного фильтра высоких частот; б) входной сигнал; в) выходное отфильтрованное изображение

Недостатком представленного метода является необходимость использования специального фильтра, к изготовлению и позиционированию которого предъявляются жесткие требования. Кроме того, использование фильтра понижает энергетическую эффективность оптической системы за счёт потери большей части энергии. Применение же электронного оконтуривания сигнала теневого изображения объекта требует усложнения программной обработки за счет использования большого объема вычислений.

1.2 Сравнительный анализ характеристик существующих теневых измерителей

В России и за рубежом существует много производителей теневых измерителей и телецентрических систем: Рифтэк, Беларусь; Sichuan Splendor Gauge Company, Китай; Blum Novotest, Германия; Thorlabs, США; Opto Engineering, Германия и другие. В таблице 1.1 представлены основные технические характеристики некоторых измерителей данного класса [36-40].

Таблица 1.1 – Технические характеристики теневых проекционных систем

Марка	Производитель	Диапазон, мм	Погрешность, мкм	Габариты, мм
ИД-30П	«Элеконт», Украина	0,3 – 30	$\pm (10 - 20)$	366x64x137
Сенсор	КТИ НП СО РАН, Новосибирск	0,5 – 20	± 5	380x95x56
LDM-50	ООО "НПО Редвилл", Томск	0,5 – 50	± 10	373x281x62
IM-6225	Keyence, Япония	0,1 – 60	± 5	340x72x26
Цикада – 2.71	«Эрмис+», Томск	0,3 – 10	± 20	80x250x150

Недостатком представленных систем является то, что в основном они предназначены для контроля цилиндрических объектов – проводов и кабелей. Применение их для измерения размеров объектов другой формы (например, для геометрического контроля перемешивающих решеток диаметром 250 мм) не представляется возможным. Кроме того, следует учесть, что погрешности измерений систем указаны при точной (точнее 2 мм) установке изделия в измерительном объеме. При смещении изделия наблюдается существенная дополнительная погрешность (в некоторых системах до 100 мкм). Учет положения изделия при расчете его истинного размера требует использования сложных соотношений и алгоритмов. В имеющихся измерителях не учитывается объемность объектов, что приводит к возникновению дополнительной погрешности измерений. Системы обладают небольшим диапазоном измерений (до 60 мм) и высокой стоимостью. Важным недостатком является то, что оптические схемы многих коммерческих измерителей скрыты от потребителя.

Среди источников погрешностей теневых проекционных измерителей следует отметить следующие: aberrации оптической системы, неточность фокусировки на грань изделия, способ освещения объекта (степень его когерентности [41]), размер и относительное расположение объекта измерений и оптических элементов [42]. Использование теневых проекционных систем с параллельным освещающим пучком и телецентрическим объективом позволяет повышать точность определения геометрических размеров объектов до единиц микрометров. Важным преимуществом таких систем является устойчивость к вибрациям, а также низкие требования к точности позиционирования изделия в измерительном объеме (глубина фокусировки до ± 150 мм), что позволяет использовать их в условиях промышленного производства.

1.3 Обзор телецентрических объективов

Одним из основных компонентов теневой проекционной оптической системы, определяющим точность измерений, является объектив, проецирующий теневое изображение объекта на фотоприёмную матрицу [43]. Из-за протяженности измеряемого изделия вдоль оптической оси и невозможности его точного позиционирования, к оптической проецирующей системе предъявляются требования большой глубины фокусирующего пространства (более 100 мм), которое достигается при использовании систем с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов. В таких системах (входной зрачок находится на бесконечности) перемещение объекта вдоль оси минимально влияет на размер его изображения (рисунок 1.8).

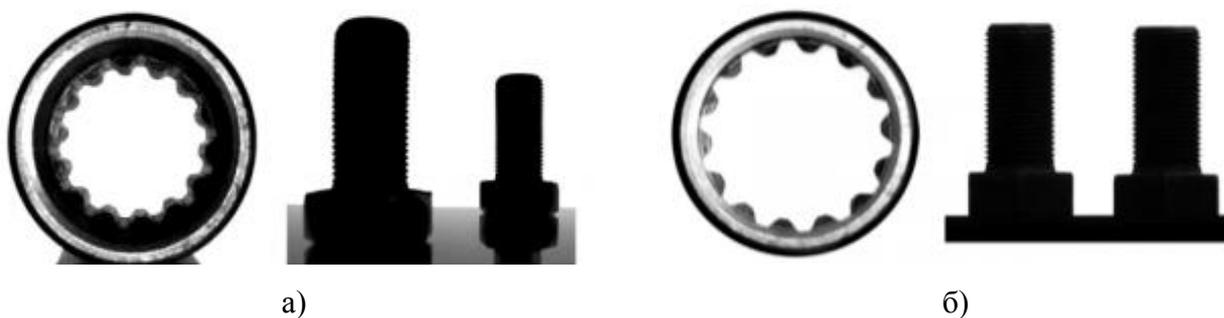


Рисунок 1.8 – Изображение, полученное с помощью объективов: а) обычного, б) телецентрического

Существует большое число схем телецентрических объективов, предназначенных для различных задач. Наиболее общим образом они разделяются на телецентрические в пространстве предметов, телецентрические в пространстве изображений и

бителецентрические (рисунок 1.9). Под телецентричностью понимают такой ход лучей, при котором главные лучи внеосевых пучков, входящих или выходящих из оптической системы, параллельны оптической оси.

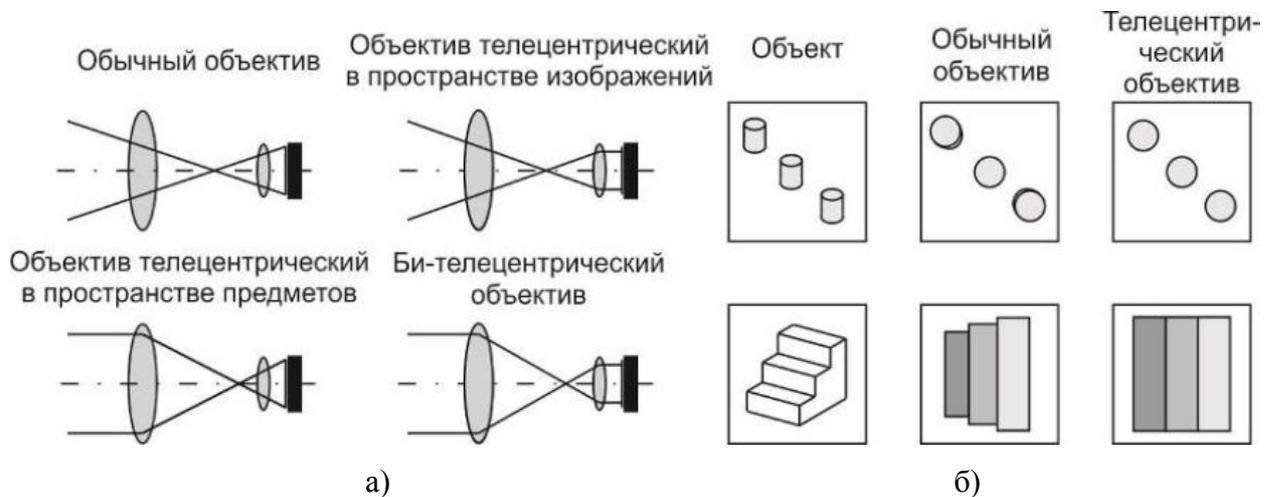


Рисунок 1.9 – Виды телецентрических объективов: а) оптические схемы, б) формируемые изображения

Первый и третий тип объективов применяется для биометрической идентификации личностей (например, для системы сканирования кожного рисунка [44]) и в системах технического зрения. Второй тип объективов используется в спектрометрах, проекторах для производства интегральных схем [45], в оптических системах для создания равномерного освещения.

Телецентрический объектив в пространстве предметов менее чувствителен к расфокусировке изделия – глубина резкости объективов может достигать десятков миллиметров при уменьшении апертурной диафрагмы объектива. Телецентрический объектив в пространстве изображений обеспечивает падение светового потока на фотоприемник под прямым углом на всей площади фотоприемника, что сводит к минимуму ошибку угла зрения или изменения увеличения, обеспечивая высокое разрешение и контраст при минимальной дисторсии. Телецентричность в пространстве изображений делает оптическую систему менее чувствительной к перемещению фотоприемной матрицы вдоль оптической оси. Вследствие этого в систем геометрического контроля к телецентричности в пространстве изображений тоже предъявляются определенные требования, хотя и меньшие, чем к телецентричности в пространстве предметов.

Для задачи размерного контроля при проектировании телецентрической системы необходимо минимизировать aberrации дисторсии, кривизны изображения, астигматизма,

комы и хроматизма увеличения проекционного объектива, которые искажают изображение изделия по полю, т.к. эти aberrации несимметрично перераспределяют энергию в пятне рассеяния точки относительно главного луча. Это, в свою очередь, может привести к некорректному определению центра пятна рассеяния и, как следствие, к дополнительной погрешности определения положения края изделия. Кроме этого, вклад от несимметричных aberrаций высших порядков может превысить вклад от aberrаций третьего порядка и привести к нарушению симметрии внеосевого пятна и ошибке измерений [46]. Сферическая aberrация исправляется с помощью внесения асферических поверхностей. Астигматизм и кривизна изображения корректируется внесением в схему слабоотрицательного или слабоположительного толстого мениска.

Ниже представлен обзор оптических схем телецентрических объективов, доступных в открытой печати. Большинство оптических схем не предназначено для использования в системах размерного контроля. Телецентрические объективы, представленные в патентах, часто являются многокомпонентными системами, состоящими из большого числа линз (иногда более 10). Для упрощения изготовления объектива стремятся минимизировать количество разных стекол. Некоторые объективы создают симметричными относительно апертурной диафрагмы (с увеличением 1^X). Если необходимо создать большое поле зрения в пространстве предметов, то значительно увеличивается длина объектива (до метра). Для уменьшения длины объектива её оптический ход преломляется с помощью призмы [3, 47-49]. Примеры таких систем представлены на рисунке 1.10.



а)



б)



в)

Рисунок 1.10 – Телецентрические призмённые объективы: а) Navitar Zoom lens / telecentric 12x, б) labor-microscopes, в) opto-engineering

В ходе анализа существующих схем телецентрических объективов рассмотрены отечественные и зарубежные патенты. В российской патентной базе существуют специализированные классы для поиска необходимых нам систем и изобретений: G02B27/54 – шлирен-оптика, G02B27/50 – оптика для визуализации фазовых объектов, G02B13/22 –

телецентрические объективы или системы линз, G02B9/64 – системы с семью и более линзами.

В большинстве схем объективов с телецентричностью в пространстве изображений объектив разделён апертурной диафрагмой на две части. Существует небольшое количество телецентрических в пространстве изображений схем с вынесенным зрачком [50, 51]. Вынесенный входной зрачок объектива дает возможность его совмещения с выходным зрачком предыдущей оптической системы (например, спектрометра).

Объектив с вынесенным входным зрачком [50], представленный на рисунке 1.11 состоит из двух компонент: силового положительного компонента 1 и коррекционного отрицательного компонента 2. Каждый из них состоит из трёх элементов. Силовой положительный компонент 1 скорректирован на сферическую aberrацию, кривизну поля, хроматизм положения и астигматизм. Коррекционный отрицательный компонент 2 уменьшает кому и компенсирует остаточные aberrации компонента 1.

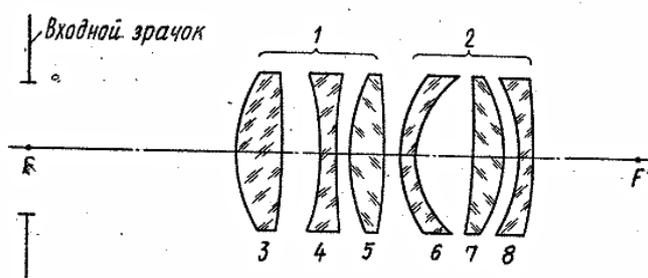


Рисунок 1.11 – Телецентрический объектив с вынесенным входным зрачком

Большинство патентуемых объективов обладают телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений [52-56]. Широкоугольный объектив [52], телецентричный в пространстве изображений, состоит из 11 одиночных линз (рисунок 1.12), среди которых мениски, двояковыпуклые и двояковогнутые линзы, изготовленные из 4 типов стекол (ТФ2, ОК4, К8, ТК21). Объектив обладает малой технологичностью из-за большого количества линз и типов стекол, предназначен для проецирования изображения на ПЗС-матрицу.

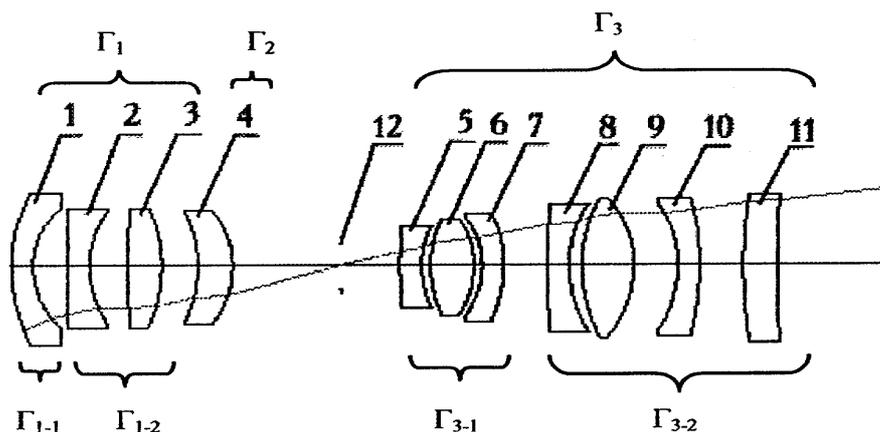


Рисунок 1.12 – Телецентрический в пространстве изображений объектив

Объективы, обладающие телецентричностью в пространстве изображений, предназначены для создания равномерного освещения и проецирования изображения на матрицу, поэтому обладают выходным люком малого диаметра, что не позволяет использовать предложенные объективы в обратном ходе лучей для проецирования объектов большого диаметра (при телецентричности в пространстве предметов).

Объективов с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов значительно меньше, чем в пространстве изображений, так как они востребованы только для специализированных применений. На рисунке 1.13 показан объектив [57], который содержит пять линзовых групп и снабжен дополнительной двухлинзовой группой, передний фокус которой совмещен с плоскостью изображения объектива. Общее количество линз в объективе: 12 одиночных и 1 склеенная. Проекционный объектив формирует изображение с максимальным размером от 12 до 25 мм, а числовая апертура со стороны изображения находится в диапазоне от 0,75 до 0,95 и обеспечивает монохроматическую коррекцию волнового фронта.

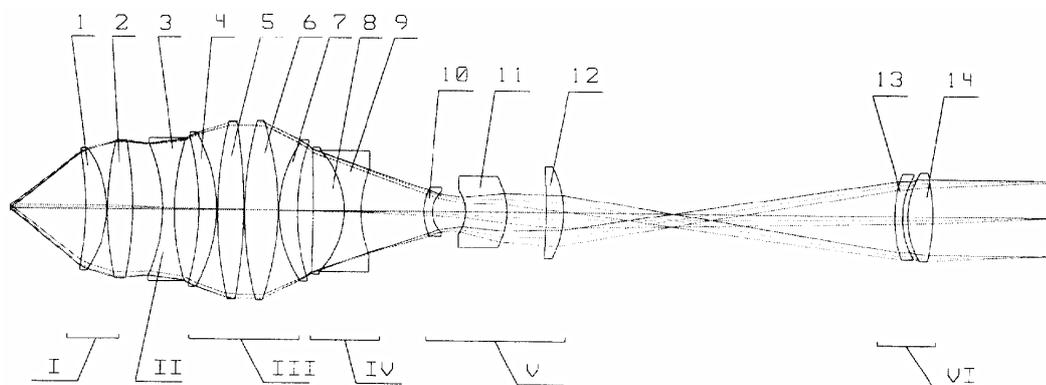


Рисунок 1.13 – Проекционный объектив, телецентрический в пространстве предметов

Телецентрический проекционный объектив [4] обладает телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов для исключения влияния погрешности позиционирования предмета на линейное увеличение системы, содержит 7 компонент, из которых 2 склеенные и 3 одиночные линзы (рисунок 1.14).

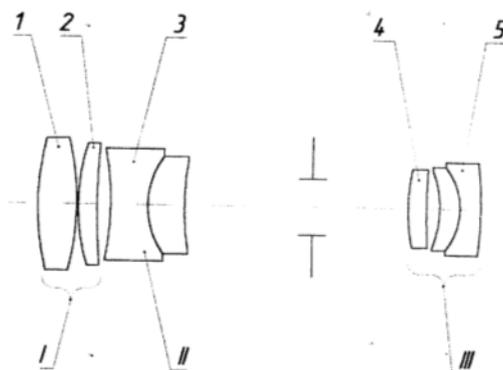


Рисунок 1.14 – Объектив, телецентрический в пространстве предметов

Битецентрические объективы [58, 59], как правило, симметричны относительно апертурной диафрагмы. Битецентрический объектив [59] содержит 4 одиночные и 2 склеенные компоненты (рисунок 1.15). Задний фокус первой системы совпадает с передним фокусом второй системы и совмещен с апертурной диафрагмой. Незначительные изменения в конструкции одной из частей объектива позволяют изменить его линейное увеличение.

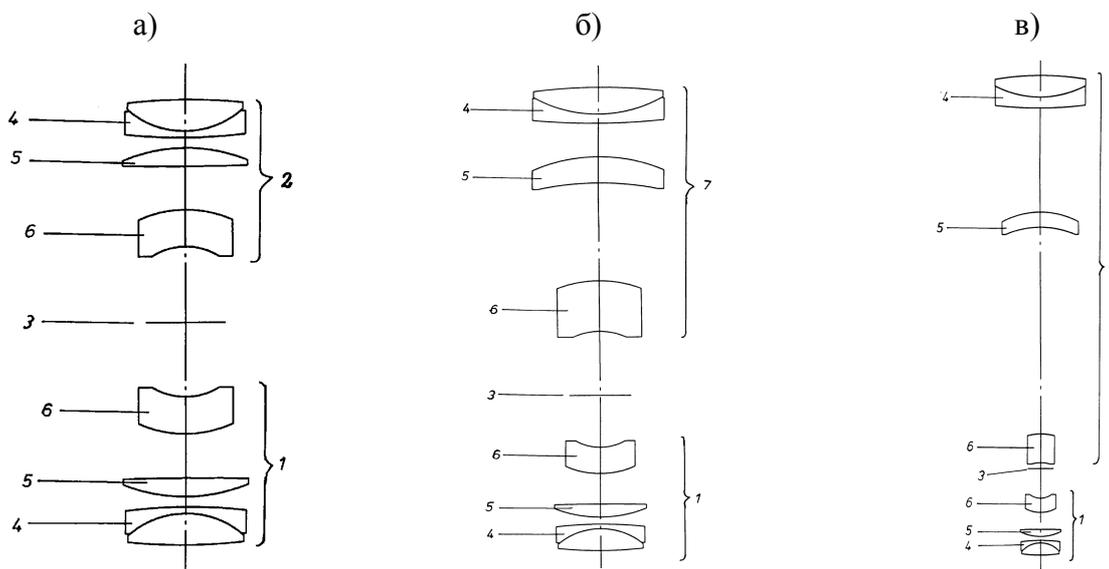


Рисунок 1.15 – Битецентрические объективы с увеличением: а) -1^x , б) $-0,5^x$, в) $-0,25^x$

Патентный поиск показывает, что хотя и существует большое количество различных телецентрических схем, не прослеживается единого подхода к их расчету. Каждая из схем

является самостоятельно разработанной системой и не наблюдается взаимного заимствования. Недостатком большинства схем является большое количество используемых элементов (более 10). Несмотря на это, многие из них имеют слабо исправленную дисторсию (более 0,3 %) и другие остаточные aberrации (астигматизм более 0,2 мм). Использование указанных схем в качестве прототипа для разработки телецентрического объектива путем увеличения масштаба линз и расстояний между ними не представляется возможным из-за требования ограничения размеров объектива.

Кроме патентов были рассмотрены коммерческие телецентрические объективы в пространстве предметов с большим полем зрения (более 200 мм) и малой дисторсией (менее 0,02 %), имеющиеся в продаже. Большинство продаваемых телецентрических объективов обладают малым диаметром входного зрачка (до 40 мм).

На рисунках 1.16-1.17, соответственно, показан внешний вид двух импортных объективов, имеющихся в продаже, с наилучшими оптическими характеристиками: объектив TC23240 фирмы Opto-engineering [3] и объектив MVTC23005 фирмы Thorlabs [2].

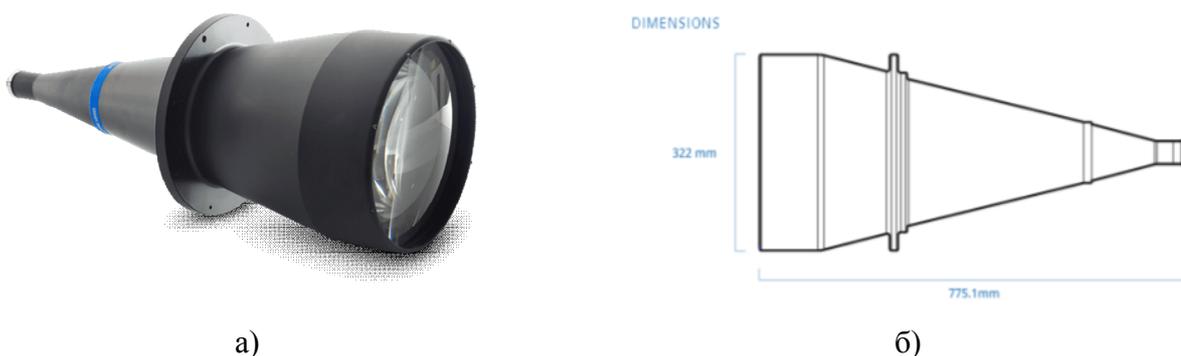


Рисунок 1.16 – Объектив TC23240 фирмы Opto-engineering: а) внешний вид, б) габаритные размеры



Рисунок 1.17 – Объектив MVTC23005 фирмы Thorlabs

В таблице 1.2 представлены технические характеристики указанных объективов.

Таблица 1.2 – Технические характеристики коммерческих объективов

	TC23240, Opto-engineering	MVTC23005, Thorlabs
Увеличение	0,037 ^x	0,051 ^x
Рабочее расстояние, мм	492,8	530
Глубина фокусировки, мм	±249	±260
Рабочее (возможное) относительное отверстие	1/8	1/8 (1/7,7 - 1/22)
Поле зрения для матрицы 2/3", мм x мм	230,2 x 192,6	214 x 214
Телецентричность средняя (максимальная), °	< 0,03 (0,08)	(0,03)
Дисторсия средняя (максимальная), %	< 0,04 (0,08)	(0,03)
Модуляционная передаточная функция, %	> 45	> 51
Длина объектива, мм	775,1	630,8
Максимальный диаметр объектива, мм	Ø 322	Ø 239,8
Вес объектива, кг	20,8	13,0 кг

Из таблицы 1.2 видно, что объектив TC23240, Opto-engineering обладает большой дисторсией и малой телецентричностью в пространстве предметов. Глубина поля объектива достаточна для использования в теневой проекционной системе. Его максимальное размером поле зрения 230,2 x 192,6 мм для фотоприемной матрицы 2/3" недостаточно для ряда прикладных задач. Длина объектива около 800 мм. Объектив MVTC23005 Thorlabs является бителецентрическим объективом, но его поле зрения не превышает 214 мм для матрицы 2/3". Объектив имеет недостаточно хорошо исправленную дисторсию, является дорогостоящим (около 700 000 рублей). Таким образом, зарубежные телецентрические объективы, будучи дорогостоящими, не отвечают техническим требованиям, предъявляемым к объективам при применении их в системах геометрического контроля изделий. Анализ рынка показывает, что отечественной промышленностью серийные телецентрические объективы не выпускаются. Поэтому для увеличения импортозамещения является актуальной задача проектирования, патентования собственных оптических схем и изготовления таких объективов.

Выводы по главе 1

В результате анализа оптических теневых проекционных систем для бесконтактного размерного контроля объектов в проходящем свете установлено что существующие системы измерения не подходят для контроля трехмерных изделий произвольной формы, так как либо не обеспечивают требуемую погрешность измерений (5 мкм), либо не предназначены для контроля изделий нецилиндрической формы, либо являются дорогостоящими. Кроме того, многие коммерческие измерители имеют скрытые от пользователей оптические схемы оптико-электронных блоков. Все это не позволяет применять их для контроля трехмерных изделий (в частности керамических бронероликов, кольцевых изоляторов и плиток размером до 65 мм) с погрешностью измерений не более 5 мкм.

Системы, основанные на других методах, не удовлетворяют требованиям размерного контроля трехмерных изделий. Так, системы, использующие расходящееся освещение, а также системы, основанные на теневых проекционных методах с обычной проекционной оптикой, обладают погрешностью измерения более 80 мкм из-за невозможности точного позиционирования изделия в измерительном объеме. Применение идентичного ортогонального канала для определения положения объекта требует использования сложных соотношений и программной обработки для расчета истинного размера изделия. Лазерные сканирующие системы требуют применения дорогостоящих проекционных сканеров и специальной оптики, нуждаются в частой калибровке, критичны к вибрациям, что затрудняет их применение в промышленных условиях.

Одним из основных компонентов теневой проекционной системы, влияющих на точность определения размеров объекта, является объектив, проецирующий теневое изображение объекта на фотоприёмную матрицу. Измеряемые изделия являются объемными телами, т.е. имеют протяженность вдоль оптической оси, кроме того существуют трудности их позиционирования в измерительном объеме с точностью менее 1 мм. В связи с этим, для уменьшения погрешности измерений к оптической проецирующей системе предъявляются требования минимизации влияния протяженности и положения объекта на увеличение его изображения, т.е. требования большой глубины резко изображаемого пространства (более 20 мм) и малой дисторсии (менее 0,02 %). Для того чтобы выполнить эти требования используются специализированные объективы – телецентрические в пространстве предметов и изображений. Наиболее близкая оптическая схема такого объектива [4] обладает малым разрешением по всему полю зрения (число Штреля на оси около 0,8, на краю – 0,43), дисторсией объектива более 0,05 % и полем зрения объектива менее 50 мм. Существующие в продаже импортные телецентрические в пространстве предметов объективы,

предназначенные для использования в системах теневого размерного контроля, обладают дисторсией более 0,02 %, являются дорогостоящими, а самое главное, имеют оптические схемы, скрытые от потребителя. Отечественное оптико-механическое производство не изготавливает промышленных телецентрических объективов. Большинство телецентрических в пространстве предметов объективов, представленных в патентах, не предназначено для использования в системах размерного контроля. Таким образом, использование существующих телецентрических объективов и известных оптических схем в системах размерного контроля керамических изделий не представляется возможным. При большом многообразии схем не прослеживается единого подхода к их расчету, каждая схема является самостоятельно разработанной и не наблюдается взаимного заимствования. В связи с этим, требуется проектирование новых оптических схем телецентрических объективов и их изготовление.

В связи с вышесказанным, задача разработки и создания теневых проекционных систем повышенной точности для измерения геометрических размеров изделий габаритами от 10 до 250 мм с погрешностью не более 5 мкм за счёт учета параметров осветителя, проекционного телецентрического объектива и толщины изделия, а также за счет уменьшения остаточной нетелецентричности и дисторсии объектива представляется актуальной. Сделан вывод о необходимости проектирования и изготовления собственных объективов с открытой оптической схемой и исправленными аберрациями.

В диссертационной работе указанная задача решена на примере разработки и изготовления систем контроля керамических бронероликов, кольцевых изоляторов и бронепластин, а также проектирования телецентрического объектива для теневого контроля перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов.

ГЛАВА 2 Формирование теневого изображения трехмерных объектов телецентрической системой и определение положения их границ

Глава посвящена исследованию особенностей формирования изображений трехмерных объектов (на примере объемного края) в проекционной дифракционно-ограниченной системе при освещении их частично-когерентным светом. Приведены разработанные способы определения положения края изображения объекта для измерения его размеров, основанные на пороговом методе.

2.1 Расчет профиля теневого изображения объемного края в частично-когерентном свете

Параметры всех компонентов системы контроля (угловые размеры осветителя, апертурной диафрагмы телецентрического объектива, толщины объекта) влияют на форму теневого изображения и, соответственно, на определение геометрических размеров изделия [60]. Четкое представление о процессах, происходящих в теневом проекционном канале, дает возможность корректного подбора параметров для расчета оптической схемы системы контроля. В процессе её проектирования, зная все перечисленные характеристики оптической схемы, для определения реального положения края необходимо иметь аналитическое описание получаемого теневого изображения. Строгие выражения для описания теневых изображений практически неприменимы в системах контроля изделий при промышленном производстве из-за их математической сложности и учета большого количества факторов.

Кроме того, имея аналитическое описание теневого изображения объекта, возможно провести калибровку системы для контроля большой номенклатуры изделий. В этом случае калибровка системы проводится по одному калибру с заданным параметром (толщиной, длиной, диаметром и пр.), а для всех остальных объектов вносится дополнительная корректирующая добавка. В случае если на одной установке измеряются объекты разного размера, то для повышения точности геометрического контроля требуется аналитическое описание влияния размера объекта на погрешность системы. Для работы в цеховых условиях проектируемая система должна быть устойчива к воздействию внешних возмущающих промышленных факторов, к которым провести калибровку невозможно, таких как ударов, вибраций, перепадов температуры, внешней засветки, электрических помех.

В работе на примере объемного края с абсолютно поглощающими гранями исследованы особенности формирования теневых изображений трехмерных объектов, получаемых в дифракционно-ограниченной проекционной системе при использовании частично-когерентного освещения. Источником света является протяженный источник с конечными угловыми размерами. Оптическая схема системы представлена на рисунке 2.1.

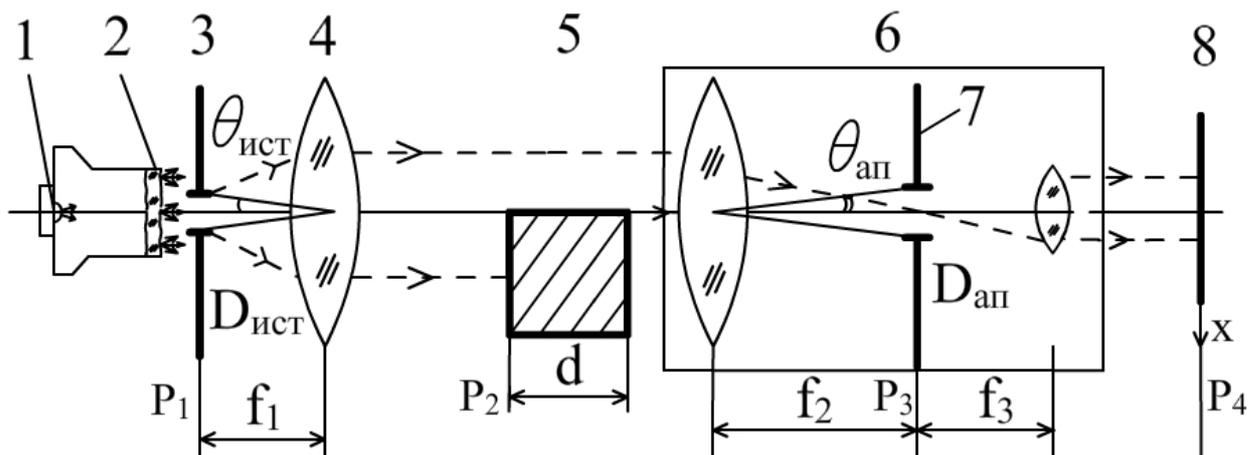


Рисунок 2.1 – Дифракционно-ограниченная оптическая схема формирования изображения трехмерного объекта: 1 – источник излучения; 2 – молочное стекло; 3 – диафрагма; 4 – коллиматор; 5 – объект измерения; 6 – телецентрический объектив; 7 – апертурная диафрагма; 8 – фотоприемная матрица

Система содержит два блока: осветительный и проекционный. Осветительный блок включает квазимонохроматический частично-когерентный (по пространству) источник излучения 1 с диффузным рассеивателем 2 и диафрагмой 3, установленной в передней фокальной плоскости коллиматора 4. Осветитель имеет угловые размеры $2\theta_{ист}$. В состав проекционного блока, формирующего изображение контролируемого объекта 5, входят телецентрический объектив 6, имеющий в своем составе апертурную диафрагму 7 с угловыми размерами $2\theta_{ап}$, и фотоприемная матрица 8. Объект измерений 5 в виде «толстой» полуплоскости толщиной d (трехмерный край) располагается между указанными блоками и освещается плоской волной.

Типичный профиль интенсивности света $\tilde{I}(x)$ в изображении объемного края на выходе системы в плоскости P_4 показан на рисунке 2.2. Для удобства интенсивность света представлена в нормированном виде: $\tilde{I}(x) = I(x)/I_0$, где I_0 – интенсивность выходного распределения в отсутствие объекта. Отметим, что при такой нормировке $\tilde{I}(x \rightarrow \infty) \rightarrow 1$.

Профиль её зависит не только от угловых размеров апертурной диафрагмы $2\theta_{an}$, но и от степени пространственной когерентности источника света, которая определяется его угловыми размерами $2\theta_{ист}$.

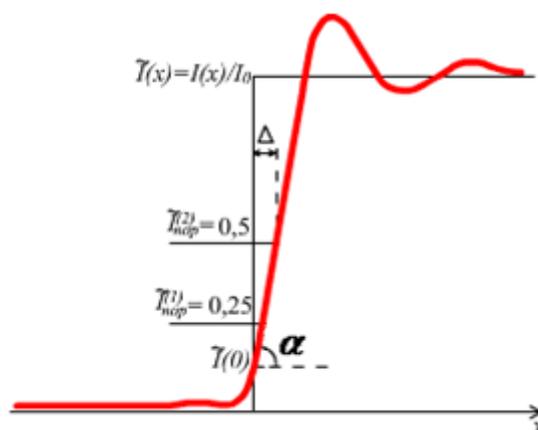


Рисунок 2.2 – Профиль интенсивности света в изображении объемного края в проекционной дифракционно-ограниченной системе

Выбор трехмерного объекта в виде края обусловлен тем, что край является основным элементарным фрагментом многих объемных тел (например, объемная щель-зазор, непрозрачный диск, кольцо и т.п.). Результаты, полученные для трехмерного края, могут быть обобщены на случай более сложных трехмерных объектов.

Одним из основных составляющих освещающей оптической системы является источник излучения, который может быть точечным или протяженным поперек оптической оси. Важнейшим параметром источника освещения является его угловой размер, исходя из которого определяют три вида осветителей: когерентные на базе лазеров ($\theta_{ист} \rightarrow 0 \text{ рад}$), некогерентные ($\theta_{ист} \rightarrow \frac{\pi}{2} \text{ рад}$) и частично-когерентные ($0 < \theta_{ист} < \frac{\pi}{2} \text{ рад}$) по пространству [61-64]. Временная когерентность не рассматривается ввиду малого влияния изменения длины волны на форму теневого изображения объекта. В дальнейшем, применяя понятие когерентности, мы будем говорить лишь о пространственной когерентности источника света.

В последние годы в оптическом размерном контроле в качестве частично-когерентных источников успешно используются светодиоды, которые, благодаря высокой оптической мощности, дешевизне, малым габаритам, широкой диаграмме направленности и простоте управления пучком света, находят широкое применение в измерительной технике. Такие источники имеют неоспоримое преимущество перед лазерными: формируемые в их свете

изображения не содержат спекл-шумов благодаря усредняющим свойствам волн по пространству [65, 66].

Перейдем к аналитическому описанию изображения объемного края. В случае одномерного и двумерного объекта (нулевой толщины) для этих целей используется теория Кирхгофа-Френеля [67]. При переходе к трехмерным объектам решение задачи значительно усложняется. Строгие решения, найденные при использовании уравнений Максвелла для объектов определенной конфигурации (шар, цилиндр и пр.), оказываются сложными, что не позволяет эффективно использовать их на практике. По этой причине были предложены приближенные подходы при расчете полей в проекционных системах формирования объемных тел [68, 69]. Они основаны на обобщении законов геометрической оптики с одновременным применением элементов волновой теории.

Среди приближенных методов расчета полей трехмерных объектов постоянной толщины для работы выбран конструктивный метод на основе модели эквивалентных диафрагм [70]. В соответствии с этой моделью, в случае трехмерного объекта в виде объемной полуплоскости с абсолютно поглощающей внутренней гранью, основной вклад в дифракционное поле на выходе системы дают окрестности граничных точек. Таким образом, объемную полуплоскость можно заменить двумя тонкими полуплоскостями, отстоящими друг от друга на расстояние d . Расчет поля для такой конфигурации трехмерного объекта заметно проще, нежели для "толстой" полуплоскости.

Влияние объемности объекта на структуру поля в его изображении определяется соотношением критического угла дифракции $\theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d}$ [33], при котором наиболее полно проявляются объемные эффекты, и углового размера апертурной диафрагмы $\theta_{ап}$. Если $\theta_{кр} \gg \theta_{ап}$ имеют место слабые объемные эффекты, и, наоборот, при $\theta_{кр} \ll \theta_{ап}$ влияние их достаточно велико. Далее при расчетах ограничимся слабыми объемными эффектами, что часто имеет место на практике.

2.1.1 Формирование теневого изображения тонкого объекта

Рассмотрим сначала случай формирования в частично-когерентном свете изображения плоского объекта (нулевой толщины) в виде полуплоскости для того, чтобы применить их при расчете поля в изображении объемного объекта.

Оптическая дифракционно-ограниченная схема формирования изображения плоского объекта показана на рисунке 2.3.

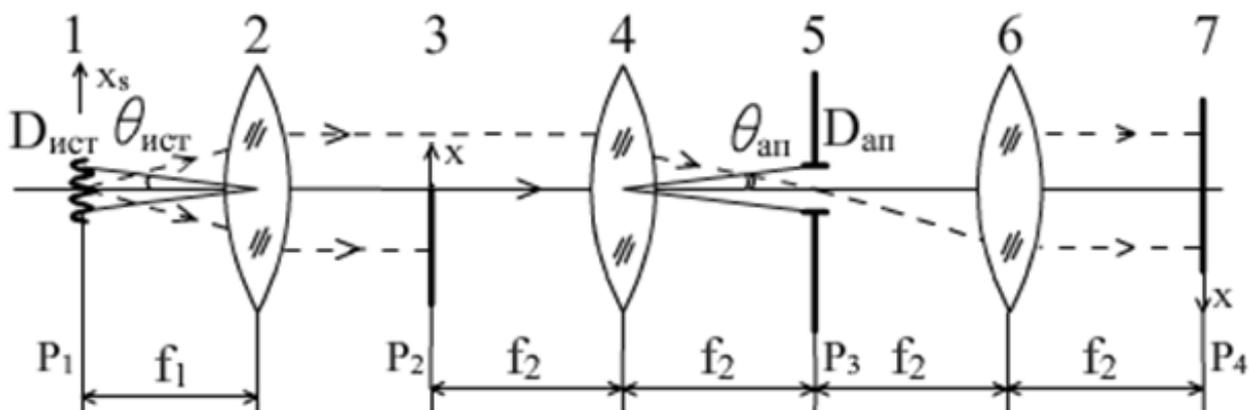


Рисунок 2.3 – Дифракционно-ограниченная оптическая схема формирования изображения плоского объекта в частично-когерентном свете: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – объект измерения; 4-6 – телецентрический объектив; 5 – апертурная диафрагма; 7 – фотоприемная матрица

Источник света 1 с угловыми размерами $2\theta_{ист}$ через коллиматор 2 освещает плоский объект 3, который с помощью оптики 4, 6 проецируется в плоскость фотоприемной матрицы 7. На объект падает плоская волна вдоль оптической оси. На фокусном расстоянии от линзы 4 находится апертурная диафрагма 5 с угловыми размерами $2\theta_{ап}$.

Прозрачность плоского края можно описать функцией включения (ступенчатой функцией Хэвисайда):

$$Y(x) = \begin{cases} 0 & x < 0, \\ 0,5 & x = 0, \\ 1 & x > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Для расчета распределения интенсивности в изображении объекта представим источник освещения как совокупность точечных источников, расположенных поперек оптической оси, расстояние между которыми равно $D_{ист}$. Каждый из них формирует с помощью коллиматора плоскую наклонную волну, которая освещает объект измерений. В плоскости P_4 создается набор смещенных изображений объекта. Далее определяется распределение интенсивности от каждого источника, а затем полученные распределения, в силу некогерентных свойств источника, суммируются по интенсивности в пределах апертуры источника.

$$I_{pez}(x) = \int_{-D_{ucm}/2}^{D_{ucm}/2} I(x_s) dx_s = \int_{-D_{ucm}/2}^{D_{ucm}/2} |A(x_s)|^2 dx_s = \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} |A(\omega_s)|^2 d\omega_s, \quad (2)$$

где $I_{pez}(x)$ – суммарная интенсивность в плоскости изображения объекта, $I(x)$ – распределение интенсивности от одного точечного источника с координатой x_s в плоскости изображения объекта, $\omega_{ucm} = k \frac{D_{ucm}/2}{f_1} = k\theta_{ucm}$ – угловая координата источника, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновой вектор (λ – длина волны излучения).

Распределение интенсивности в изображении плоского объекта от осевого точечного источника в дифракционно-ограниченной системе в плоскости экрана описывается сверткой входного распределения сигнала с импульсным откликом проекционной системы [71]:

$$\begin{aligned} I(x) &= Y(x) \cdot \exp(-i\omega_s x) \otimes \frac{\sin \omega_{an} x}{\pi x} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} Y(x - \xi) \exp(-i\omega_s (x - \xi)) \frac{\sin \omega_{an} \xi}{\pi \xi} d\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где \otimes – операция свертки, $\omega_{an} = k \frac{D_{an}/2}{f_2} = k\theta_{an}$ – угловой размер апертурной диафрагмы.

Теперь рассмотрим суммарное изображение от множества точечных источников, освещающих тонкий край. Так как точечные источники излучают свет случайным образом, то для получения результирующей интенсивности на выходе системы необходимо просуммировать по интенсивности элементарные поля от каждого точечного источника в пределах всего размера источника, т.е., учитывая (2) и (3) получим:

$$\begin{aligned} I_{pez}(x) &= \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Y(x - \xi) \exp(-i\omega_s (x - \xi)) \frac{\sin \omega_{an} \xi}{\pi \xi} \cdot \\ &\cdot Y(x - \eta) \exp(i\omega_s (x - \eta)) \frac{\sin \omega_{an} \eta}{\pi \eta} d\xi d\eta d\omega_s \end{aligned} \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что при формировании изображения плоского объекта в частично-когерентном свете результирующая интенсивность зависит от угловых размеров апертуры и источника. Кроме этого, структура изображения плоской полуплоскости в частично-когерентном свете определяется соотношением между угловыми размерами источника и апертурной диафрагмы.

2.1.2 Формирование теневого изображения трехмерного объекта

На практике реальные объекты являются объемными по толщине (протяженными). Поэтому на формирование их теневых изображений большое влияние оказывают параметры самих объектов. В качестве объекта будем рассматриваться протяженный край с абсолютно поглощающими боковыми гранями.

Для нахождения распределения интенсивности на выходе системы, воспользуемся предложенным в [33] конструктивным методом расчета дифракционной картины Фраунгофера на основе модели эквивалентных диафрагм. В этом случае модель объемного края имеет вид двух полуплоскостей, отстоящих друг от друга на расстоянии d . Найдем распределение интенсивности в изображении трехмерного объекта в плоскости P_4 проекционной системы.

Как и ранее, осветитель рассматривается как совокупность точечных источников. Выделим центральный точечный осевой источник ($x_s=0$), который освещает объект плоской нормально падающей волной. Эта волна, проходя через переднюю грань объекта, модулируется функцией $Y(x)$. Между передней и задней гранями объекта волновой фронт, дифрагированный на передней грани претерпевает преобразование Френеля слоем пространства толщиной d и определяется образ Френеля функции $Y(x)$ по формуле:

$$\tilde{Y}(x) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda d}} \int_{-\infty}^{\infty} Y(x_1) \exp(ik \frac{(x-x_1)^2}{2d}) dx_1 . \quad (5)$$

Дойдя до плоскости задней грани объекта, которая также описывается функцией $Y(x)$, волновой фронт модулируется ею, и амплитудное распределение поля в плоскости задней грани принимает следующий вид: $\tilde{Y}(x) \cdot Y(x)$. Полученный фронт при распространении далее в оптической системе свертывается, как и в случае плоского объекта, с импульсным откликом дифракционно-ограниченной системы.

Когда на объект падает плоский наклонный волновой фронт, соответствующий точечному внеосевому источнику излучения, смещенному на угол θ_s , амплитудное распределение поля в плоскости задней грани трехмерного объекта описывается выражением: $\tilde{Y}(x-\theta_s d) \cdot Y(x)$. Тогда распределение интенсивности в изображении задней грани трехмерного объекта получаем путем суммирования элементарных полей от множества сдвинутых точечных источников:

$$I_{рез}(x) = \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{Y}(x + \frac{\omega_s}{k}d - \xi) Y(x - \xi) \exp(-i\omega_s(x - \xi)) \frac{\sin \omega_{an} \xi}{\pi \xi} \cdot \tilde{Y}^*(x + \frac{\omega_s}{k}d - \eta) Y(x - \eta) \exp(i\omega_s(x - \eta)) \frac{\sin \omega_{an} \eta}{\pi \eta} d\xi d\eta d\omega_s \quad (6)$$

где знаком * обозначено комплексное сопряжение.

Для упрощения расчетов полей произведем нормировку полученного распределения. Для этого найдем интенсивность, которая получается при прохождении света через оптическую систему в отсутствии объекта ($Y(x)=1$). Тогда

$$I_{max}(x) = \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega_s(x - \xi)) \frac{\sin \omega_{an} \xi}{\pi \xi} \cdot \exp(i\omega_s(x - \eta)) \frac{\sin \omega_{an} \eta}{\pi \eta} d\xi d\eta d\omega_s.$$

Используя обобщенную формулу Релея [35]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\omega) S_2^*(\omega) d\omega,$$

и проведя ряд математических преобразований, получаем:

$$I_{max}(x) = \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \text{rect}\left(\frac{\omega_s}{2\omega_{an}}\right) d\omega_s, \quad (7)$$

где $\text{rect}\left(\frac{\omega_s}{2\omega_{an}}\right)$ – прямоугольная функция [71].

Величина I_{max} зависит от соотношения угловых размеров источника света θ_{ucm} и апертурной диафрагмы θ_{an} . В зависимости от соотношения размеров поперечного диаметра источника и апертурной диафрагмы рассмотрим два варианта источника: с малыми и большими угловыми размерами по сравнению с угловыми размерами апертуры.

В первом случае, когда $\omega_{ucm} < \omega_{an}$, величина I_{max} , согласно (6), определяется размером источника света и пропорциональна:

$$I_{max}(x) \sim I_0 \frac{f_1}{k} \cdot 2\omega_{ucm} = I_0 \cdot D_{ucm} \quad (8)$$

В случае, когда $\omega_{ucm} > \omega_{an}$, интенсивность пропорциональна размерам апертуры:

$$I_{max}(x) \sim I_0 \cdot \frac{f_1}{k} \cdot 2\omega_{an} = I_0 \cdot \frac{f_1}{f_2} D_{an}.$$

Физический смысл полученного результата состоит в следующем: если поперечный угловой размер источника излучения меньше углового размера апертуры диафрагмы, то световые лучи со всех точек источника, включая крайние, могут пройти через оптическую систему. В этом случае, интенсивность в изображении объекта пропорциональна диаметру источника. Однако если угловая апертура оптической системы становится меньше углового размера источника, то световые лучи с крайних его точек обрезаются апертурной диафрагмой. Интенсивность света в этом случае пропорциональна не диаметру источника, а размеру изображения апертуры в плоскости источника, т.е. величине $(f_1/f_2) \cdot D_{an}$, на которую и проводят нормировку.

На рисунке 2.4 приведены вычисленные с помощью компьютерного моделирования профили изображений объемного края с переменной толщиной d : от 0 до 9 мм при угловых размерах источника $\theta_{ист} > \theta_{ан}$. Можно видеть, что при изменении d имеет место смещение профиля относительно положения реального края объекта. При этом угол наклона профиля изображения трехмерного края меняется незначительно. Этот эффект особенно заметен при малых угловых размерах источника.

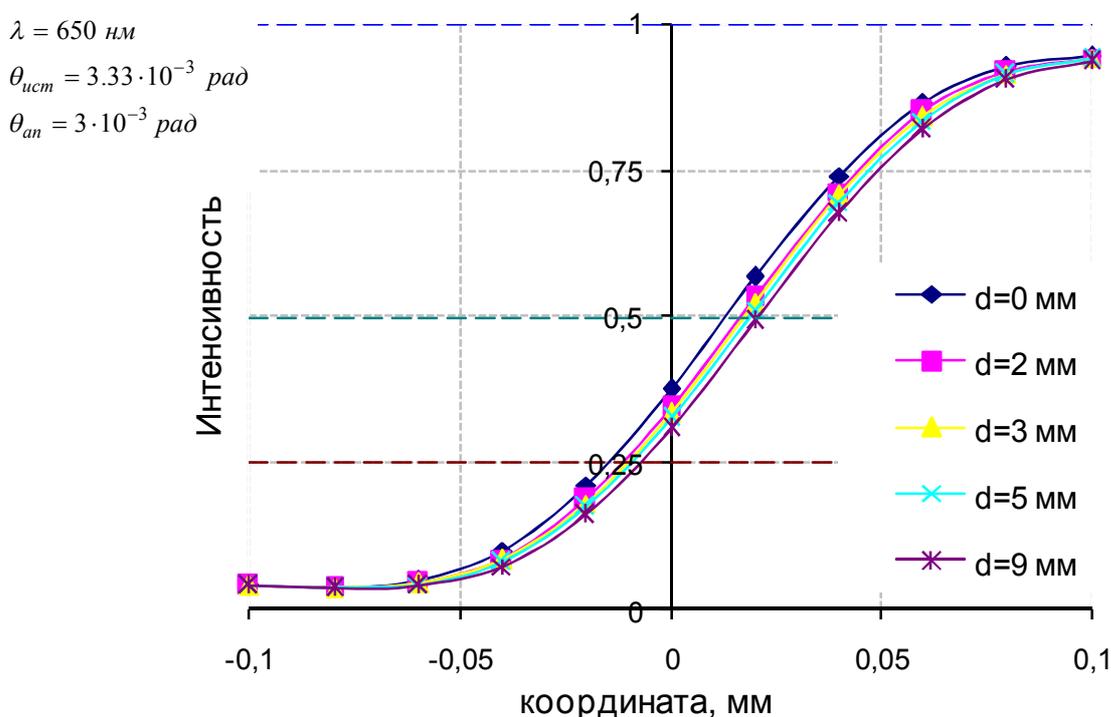


Рисунок 2.4 – Профиль изображения края трехмерного объекта в области реальной границы при разных значениях его толщины

Показанный график соответствует полученному аналитическому описанию положения изображения края трехмерного объекта. В случае объемного объекта профиль интенсивности света в его изображении зависит от толщины объекта. Из рисунка 2.4 видно как изменяется уровень интенсивности I_0 в точке расположения границы объекта. При увеличении толщины объемного края d величина I_0 уменьшается.

2.2 Способы определения положения границ изображения трехмерного объекта

С измерительной точки зрения крайне важно знать поведение интенсивности света I_0 в окрестности геометрической границы объекта. Исходя из уровня этой величины можно, воспользовавшись пороговым методом, найти её положение. Однако при теневом проекционном методе измерений размеров объектов, от поперечных размеров источника освещения (т.е. от степени когерентности) зависит смещение изображения измеряемого объекта, и, соответственно, выбор уровня порога в его изображении. В случае трехмерного объекта его толщина также влияет на уровень порога.

Наиболее часто в измерительной практике используют пороговый метод обработки теневых изображений объектов, в котором выбор порога определяется исходя из размеров осветителя, типа освещения. Так, при когерентном освещении типичного плоского объекта – полуплоскости, при обработке его дифракционно-ограниченного изображения выбирается уровень, равный четверти максимальной падающей интенсивности света. При полностью некогерентном освещении этот порог равен половине входной интенсивности, а при частично-когерентном освещении объекта – порог имеет промежуточное значение, которое определяется угловыми размерами источника [72].

В когерентном освещении имеют место характерные осцилляции интенсивности, являющиеся результатом сложения амплитуд светового поля в изображении объекта, при этом крутизна кривой больше, чем при некогерентном освещении (рисунок 2.5) [73]. Положение уровня интенсивности, соответствующего «истинному» краю (I_0), различно для когерентного и некогерентного освещений.

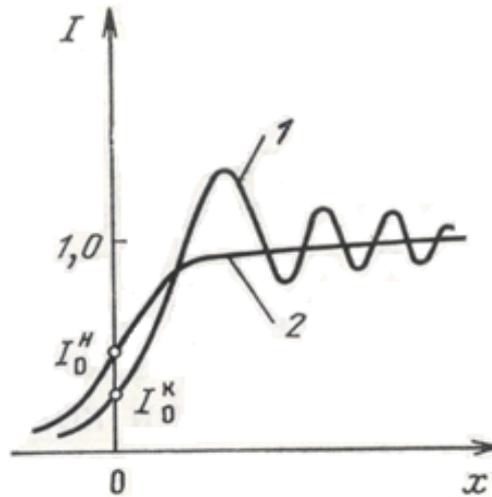


Рисунок 2.5 – Распределение интенсивности в изображении полуплоскости при абсолютно когерентном (1) и абсолютно некогерентном (2) освещении

При пороговом определении границ объекта ключевым является уровень интенсивности на кривой, аппроксимирующей профиль интенсивности на краю, который выбирается как уровень "истинного" положения края изделия. Неверный выбор этого параметра служит источником ошибки определения размеров изделий тенью проекционным методом.

Ниже представлены результаты вычисления в аналитическом виде параметра $I(0)$, на основе которого предложены и разработаны два способа определения положения границ трехмерного объекта, основанные на пороговом методе. Первый из них основан на установлении уровня порога $\tilde{I}_{пор}$, равного значению интенсивности света $\tilde{I}(0)$ в изображении трехмерного края в точке, соответствующей его геометрической границе. Второй способ предполагает использование стандартных пороговых методов для случаев когерентного и некогерентного освещений с внесением в них соответствующих корректирующих поправок.

2.2.1 Способ на основе расчетного порога

Первый способ основан на выборе уровня порога измерений $I(0)$ с учетом параметров $\theta_{ист}$, $\theta_{ан}$, d [74]. Исследуем зависимость уровня порога от угловых размеров источника. Сначала ограничимся случаем тонкой полуплоскости, а затем обобщим полученные

результаты на случай трехмерного объекта. Покажем вывод $I(0)$ для тонкого объекта. Из уравнения (4) получаем:

$$I_{nop} = I(0) = \frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Y(-\xi) \exp(-i\omega_s(-\xi)) \frac{\sin \omega_{an} \xi}{\pi \xi} \cdot Y(-\eta) \exp(i\omega_s(-\eta)) \frac{\sin \omega_{an} \eta}{\pi \eta} d\xi d\eta d\omega_s \quad (9)$$

Воспользовавшись обобщенной формулой Рэлея и принимая во внимание, что Фурье спектр функции $Y(x)$ равен $F(\omega) = \pi\delta(\omega) + \frac{1}{i\omega}$, можно привести выражение (9) к виду:

$$I_{nop} = I(0) = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\pi\delta(\omega + \omega_s) - \frac{1}{i(\omega + \omega_s)} \right] \text{rect}\left(\frac{\omega}{2\omega_{an}}\right) \cdot \left[\pi\delta(\omega - \omega_s) - \frac{1}{i(\omega - \omega_s)} \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{\omega}{2\omega_{an}}\right) d\omega d\omega_s =$$

$$= \frac{f_1}{4\pi^2 k} \left[\int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \left(\pi \text{rect}\left(\frac{\omega_s}{2\omega_{an}}\right) \right)^2 d\omega_s + \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \ln^2\left(\frac{\omega_{an} + \omega_s}{\omega_{an} - \omega_s}\right) d\omega_s \right] \quad (10)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака [71].

Далее рассмотрим случай малых угловых размеров источника освещения, когда $\omega_s \ll \omega_{an}$. В этом случае, первое слагаемое равно:

$$I_1(0) = \frac{f_1}{2k} 2\omega_{ucm}^2, \quad (11)$$

а второе слагаемое легко вычисляется при разложении его в ряд Тейлора при $x=0$:

$$I_2(0) = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \ln^2\left(\frac{\omega_{an} + \omega_s}{\omega_{an} - \omega_s}\right) d\omega_s = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \ln^2\left(\frac{1 + \frac{\omega_s}{\omega_{an}}}{1 - \frac{\omega_s}{\omega_{an}}}\right) d\omega_s =$$

$$= \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \ln^2\left(\left(1 + \frac{\omega_s}{\omega_{an}}\right)^2\right) d\omega_s = \frac{f_1}{\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \left(\frac{\omega_s}{\omega_{an}}\right)^2 d\omega_s = \frac{f_1}{\pi^2 k} \left[\frac{2}{3} \frac{\omega_{ucm}^3}{\omega_{an}^2} \right] \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) получаем:

$$I(0) = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \left[2\omega_{ucm}^2 \pi^2 + \frac{8}{3} \frac{\omega_{ucm}^3}{\omega_{an}^2} \right] \quad (13)$$

Учитывая нормировочный коэффициент (8), распределение интенсивности в изображении плоского объекта при $\omega_{ucm} \ll \omega_{an}$ имеет следующий вид:

$$I_n(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{\omega_{ucm}}{\omega_{an}} \right)^2 = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{D_{ucm}}{\frac{f_1}{f_2} D_{an}} \right)^2 = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{ucm}^2}{\theta_{an}^2}. \quad (14)$$

Видно, что при $D_{ucm} \rightarrow 0$ (случай точечного источника), уровень порога в области границы объекта соответствует $0,25I_{max}$, что соответствует теории. Когда источник света становится неточечным ($D_{ucm} \neq 0$), профиль края смещается влево и, соответственно, уровень порога увеличивается. Причем рост порога пропорционален квадрату отношения углового размера источника к угловому размеру апертурной диафрагмы системы. Существенно, что структура изображения края объекта в этом случае не претерпевает серьезных изменений. Следует отметить, что при увеличении угловых размеров источника света, влияние его протяженных свойств становится существенным.

Таким образом, второе слагаемое вносит существенный вклад в значение уровня порога изображения трехмерного объекта. Положение изображения края зависит от отношения диаметров апертуры и источника.

Найдем теперь значение $I(0)$ и, соответственно, пороговые значения $I_{пор}$ при определении пороговым методом положения границы в изображении трехмерной полуплоскости, освещенной частично-когерентным светом. С этой целью преобразуем выражение (9) с использованием спектральных представлений, т.е. получим распределение интенсивности света $I(x)$ через спектр Фурье двух полуплоскостей модели объемного края:

$$I(x) = \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \left| F(\omega, \omega_s) \cdot e^{i\omega x} \cdot \text{rect}\left(\frac{\omega}{2\omega_{an}}, d\omega\right) \right|^2 d\omega_s, \quad (15)$$

где $F(\omega, \omega_s)$ – спектр Фурье модели объемной полуплоскости, освещенной наклонной волной.

Рассмотрим случай освещения объекта нормально падающей волной света ($\omega_s = 0$). Спектр такого объекта имеет вид:

$$F(\omega) = \pi\delta(\omega) + \frac{\tilde{Y}_d(\omega)}{i\omega} + \frac{\tilde{Y}(0)}{i\omega} e^{\frac{i\omega^2 d}{2k}}.$$

В случае слабых объемных эффектов, в окрестности границы объекта ($\omega \rightarrow 0$), функцию Френеля $\tilde{Y}_d(\omega)$ можно преобразовать:

$$\tilde{Y}_d(\omega) = 0,5 + e^{-i\pi/4} \frac{\omega}{\omega_{кр}}.$$

Учитывая, что в окрестности границы объекта $e^{\frac{i\omega^2 d}{2k}} \rightarrow 1$, для спектра (15) можно записать:

$$F(\omega) = \left[\pi\delta(\omega) + \frac{1}{i\omega} \right] + \frac{e^{-i\pi/4}}{i\omega_{кр}}$$

В случае, когда трехмерный объект освещен наклонной волной, полученной от точечного источника, сдвинутого на угол ω_s , в окрестности границы объекта, при $\omega_s \ll \omega_{ан}$:

$$\begin{aligned} F(\omega, \omega_s = 0) &= \pi\delta(\omega - \omega_s) + \frac{\tilde{Y}_d(\omega - \omega_s)}{i(\omega - \omega_s)} + \frac{\tilde{Y}(-\omega_s)}{i(\omega - \omega_s)} e^{\frac{-i(\omega - \omega_s)^2 d}{2k}} = \\ &= \pi\delta(\omega - \omega_s) + \frac{0,5 + e^{-i\pi/4} \left(\frac{\omega - \omega_s}{\omega_{кр}} \right)}{i(\omega - \omega_s)} + \frac{0,5 + e^{-i\pi/4} \left(\frac{-\omega_s}{\omega_{кр}} \right)}{i(\omega - \omega_s)}. \end{aligned}$$

Откуда, после приведения подобных членов для спектра края трехмерного объекта, освещенного наклонной волной света получаем:

$$F(\omega, \omega_s = 0) = \pi\delta(\omega - \omega_s) + \frac{1}{i(\omega - \omega_s)} - \frac{e^{\frac{i\pi}{4}} (\omega - 2\omega_s)}{(\omega - \omega_s)\omega_{кр}},$$

где $\omega_{кр} = k\sqrt{\frac{\lambda}{d}}$ – критическая угловая частота.

Исходя из распределения $F(\omega, \omega_s)$, нетрудно найти поле $g(x, \omega_s)$ в изображении объемной полуплоскости (плоскость P_4 на рисунке 2.1). Оно, как нетрудно понять, будет являться результатом Фурье преобразования:

$$g(x, \omega_s) = \int_{-\omega_{an}}^{\omega_{an}} F(\omega) \exp(i\omega x) d\omega \quad (16)$$

Так как рассматривается некогерентное освещение объекта, результирующая интенсивность определяется, как сумма квадратов амплитуд от каждого отдельного точечного источника:

$$I(x) = \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} |g(x, \omega_s)|^2 d\omega_s = \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} g(x, \omega_s) g^*(x, \omega_s) d\omega_s. \quad (17)$$

Если теперь ограничить интенсивность света в точке $x=0$, соответствующей геометрической границе объемной полуплоскости, то выражение принимает вид:

$$I(0) = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \left| \int_{-\omega_{an}}^{\omega_{an}} \left[\pi \delta(\omega - \omega_s) + \frac{1}{i(\omega - \omega_s)} - \frac{e^{i\frac{\pi}{4}(\omega - 2\omega_s)}}{(\omega - \omega_s)\omega_{kp}} \right] d\omega \right|^2 d\omega_s$$

Воспользовавшись преобразованием, приведенным в (12), получаем:

$$I(0) = \frac{f_1}{4\pi^2 k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \left| \pi - \frac{\sqrt{2}\omega_{an}}{\omega_{kp}} - \frac{\sqrt{2}\omega_s^2}{\omega_{kp}\omega_{an}} + i \left(2\frac{\omega_s}{\omega_{an}} - \frac{\sqrt{2}\omega_{an}}{\omega_{kp}} - \frac{\sqrt{2}\omega_s^2}{\omega_{kp}\omega_{an}} \right) \right|^2 d\omega_s.$$

После ряда преобразований и нормировки, при $\omega_{ucm} \ll \omega_{an}$ и $\omega_{ucm}, \omega_{an} \ll \omega_{kp}$ получаем результирующую интенсивность в изображении толстого объекта в области его края:

$$I_n(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{D_{ucm}}{\frac{f_1}{f_2} D_{an}} \right)^2 - \frac{\sqrt{2}}{4\pi \sqrt{\frac{\lambda}{d}}} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{D_{ucm}^2 \cdot f_2}{f_1^2 \cdot D_{an}} \right) + \frac{D_{an}}{f_2} \right] + \frac{d}{2\pi^2 \lambda} \left[\frac{1}{3} \left(\frac{D_{ucm}}{f_1} \right)^2 - \frac{1}{10} \left(\frac{D_{ucm}^2 \cdot f_2}{f_1^2 \cdot D_{an}} \right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{D_{an}}{f_2} \right)^2 \right] \quad (18)$$

В угловых координатах это выражение может быть записано следующим образом:

$$I_n(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} - \frac{1}{\sqrt{2}\pi\theta_{кр}} \left[\frac{1}{3} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}} + \theta_{ан} \right] + \frac{2}{\pi^2\theta_{кр}^2} \left[\frac{1}{3}\theta_{уст}^2 - \frac{1}{10} \frac{\theta_{уст}^4}{\theta_{ан}^2} + \frac{1}{8}\theta_{ан}^2 \right] =$$

$$= \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\omega_{уст}^2}{\omega_{ан}^2} - \frac{1}{\sqrt{2}\pi\omega_{кр}} \left[\frac{1}{3} \frac{\omega_{уст}^2}{\omega_{ан}} + \omega_{ан} \right] + \frac{2}{\pi^2\omega_{кр}^2} \left[\frac{1}{3}\omega_{уст}^2 - \frac{1}{10} \frac{\omega_{уст}^4}{\omega_{ан}^2} + \frac{1}{8}\omega_{ан}^2 \right]$$

Т. к. $\omega_{уст}/\omega_{кр} \ll 1$, $\omega_{ан}/\omega_{кр} \ll 1$, $\omega_{уст}/\omega_{ан} \ll 1$, то можно пренебречь последними членами и упростить формулу до вида:

$$I_n(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} - \frac{\theta_{ан}}{\sqrt{2}\pi\theta_{кр}}. \quad (19)$$

Можно видеть, что уровень порога толстого объекта зависит от угловых размеров источника, угловых размеров апертуры, критического угла, а также от толщины исследуемого объекта. Даже когда источник освещения точечный, смещение уровня порога для определения положения края трехмерного объекта возникает за счет влияния его объемности.

Проанализируем полученную формулу (19). Она содержит 3 члена, первый из которых соответствует значению интенсивности в граничной точке изображения полуплоскости при его когерентном освещении $\theta_{уст} = 0$. Второй член описывает влияние конечных размеров источника света на интенсивность $I(0)$, зависимость которой от $\theta_{уст}$ носит квадратичный характер. Третий член описывает вклад, обусловленный влиянием объемности объекта, причем он обратно пропорционален $\theta_{кр}$, иными словами пропорционален \sqrt{d} . Существенно, что в выражении (19) его второй и третий члены имеют разные знаки. Это означает, что выбором параметров $\theta_{уст}, \theta_{ан}, \theta_{кр}$, можно скомпенсировать влияние указанных членов.

Оценим величину порога $I_{пор}$ при следующих параметрах оптической системы и контролируемого объекта. Пусть $\theta_{уст}/\theta_{ан} = 0,3$; $\theta_{ан} = 0,02$; $d = 10$ мм; $\lambda = 0,5$ мкм. Учитывая, что критический угол дифракции $\theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d} = 0,07$, получаем, что $I_{пор} \approx 0,22$. Таким образом, отличие значения порога от стандартного, равного 0,25, составляет $\sim 12\%$, что может приводить к заметным погрешностям измерений (~ 10 мкм).

Выражение (19) положено в основу первого способа определения положения границы объемного края путем выбора уровня порога $I_{пор}$ равным вычисленному значению $I(0)$.

2.2.2 Способ на основе расчета корректирующей добавки

Суть второго способа обработки измерительной информации состоит во внесении корректирующей добавки к стандартному порогу. При обработке изображений объектов для определения положения его границ часто выбирают постоянный порог $0,5I_{max}$, так как в этой области изображение аппроксимируется прямой линией и обработка изображения проводится легче, чем при выборе другого порога. При освещении объекта частично-когерентным светом возникает постоянное смещение Δ_1 , которое можно найти, воспользовавшись рисунком 2.6 [75]. Постоянное смещение может составлять порядка десяти микрометров, что является существенным источником погрешности определения размеров объекта.

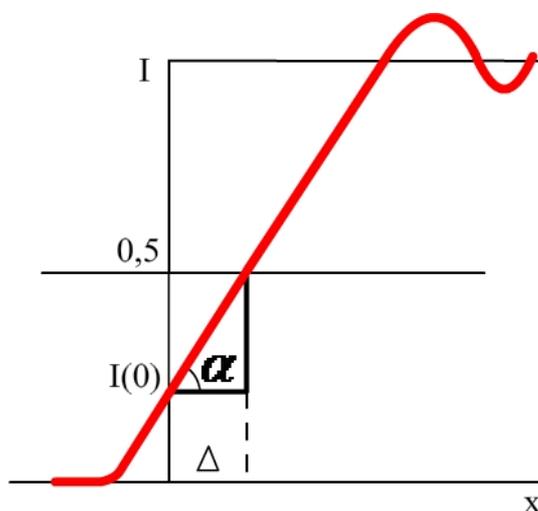


Рисунок 2.6 – Нахождение истинного положения границы края трехмерного объекта

Смещение края определяется по формуле (рисунок 2.6):

$$\Delta = \frac{0,5 - I(0)}{I'(0)}, \quad (20)$$

где $I'(0) = \operatorname{tg} \alpha$ – угол наклона профиля изображения края задней грани трехмерного объекта.

Зная в аналитическом виде выражения для $I(0)$ и $I'(0)$, можно однозначно определить смещение края. Так как уровень порога найден нами ранее (14), то для вычисления Δ необходимо найти наклон профиля изображения края в окрестности его границы $I'(0)$. Для этого найдем производную $I'(x)$ из формулы (4):

$$I'(x) = \left(\frac{f_1}{k} \int_{-\omega_{ucm}}^{\omega_{ucm}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Y(x-\xi) \exp(-i\omega_s(x-\xi)) \frac{\sin \omega_{an}\xi}{\pi\xi} \cdot Y(x-\eta) \exp(i\omega_s(x-\eta)) \frac{\sin \omega_{an}\eta}{\pi\eta} d\xi d\eta d\omega_s \right)' =$$

$$= \frac{f_1}{k} \frac{4 \sin \omega_{an} x}{x} \int_{-\infty}^{\infty} Y(x-\eta) \cdot \frac{\sin \omega_{an}\eta}{\pi\eta} \cdot \frac{\sin \omega_{ucm}(x-\eta)}{\pi(x-\eta)} d\eta$$

Учитывая, что $\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin \omega_{an} x}{x} \right) = \omega_{an}$, получаем:

$$I'(0) = \frac{4f_1\omega_{an}}{k} \int_{-\infty}^{\infty} Y(-\eta) \cdot \frac{\sin \omega_{an}\eta}{\pi\eta} \cdot \frac{\sin \omega_{ucm}\eta}{\pi\eta} d\eta.$$

Проведя ряд преобразований, аналогичных выводу формулы (14), и проведя нормировку, получаем следующую формулу для наклона профиля изображения для тонкой полуплоскости в зависимости от угловых размеров источника освещения:

$$I'_n(0) = \frac{D_{an}}{\lambda \cdot f_2} = \frac{\theta_{an}}{\lambda}, \quad \omega_{ucm} \ll \omega_{an}, \quad \omega_{an}, \omega_{ucm} \ll \omega_{кр} \quad (21)$$

Можно видеть, что при выбранных соотношениях $\omega_{ucm}, \omega_{an}, \omega_{кр}$ наклон профиля изображения края плоского объекта определяется только параметрами апертуры (ее диаметром, фокусным расстоянием линзы) и длиной волны и не зависит от размера источника.

Для трехмерного края наклон профиля изображения в окрестности границы определяется выражением:

$$I'(0) = \frac{2\theta_{an}}{\lambda} + \frac{4}{\sqrt{2\pi}\lambda\theta_{кр}} \left(\frac{1}{3}\theta_{ucm}^2 - \theta_{an}^2 \right). \quad (22)$$

Используя формулу (22), получаем корректирующую добавку при выборе уровня порога $0,5I_{max}$:

$$\Delta = \frac{\lambda}{\theta_{an}} \left[0,25 + \frac{3}{2\sqrt{2\pi}} \frac{\theta_{an}}{\theta_{кр}} - \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{ucm}^2}{\theta_{an}^2} \right]. \quad (23)$$

Оценим составляющую Δ при параметрах оптической системы: $\theta_{ucm}/\theta_{an}=0,3$; $\theta_{an}=0,02$; $d=10$ мм; $\lambda=0,5$ мкм. Подставляем значения этих параметров в (23) и получаем,

что $\Delta=9$ мкм. Таким образом, при отсутствии корректировки уровня порога возникает существенная ошибка измерений.

Выбирать уровень порога $0,25I_{max}$ целесообразно при освещении объекта абсолютно-когерентным светом. При этом корректирующая добавка составит:

$$\Delta_2 = \frac{\lambda}{\theta_{an}} \left[\frac{3}{2\sqrt{2}\pi} \frac{\theta_{an}}{\theta_{кр}} - \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{ист}^2}{\theta_{an}^2} \right]. \quad (24)$$

Видно, что корректирующая добавка также зависит от размера источника, апертурной диафрагмы и толщины объекта. Подбором взаимных размеров этих величин можно минимизировать смещение положения края. Введением корректирующей добавки в стандартный порог определения границы трехмерного объекта можно значительно повысить точность её нахождения (на величину ~ 10 мкм).

Выводы по главе 2

В главе 2 приведены теоретические исследования особенностей формирования теневого изображения трехмерного объекта дифракционно-ограниченной системой при использовании частично-когерентного освещения, применительно к системам промышленного размерного контроля. Найдены выражения для определения положения истинного края изделия, а также найдена аналитическая зависимость интенсивности света $\tilde{I}(0)$ в граничных точках в зависимости от параметров системы. Показано, что эта интенсивность определяется тремя составляющими, первая из которых соответствует значению интенсивности в граничной точке изображения полуплоскости при его когерентном освещении, вторая – пропорциональна квадрату отношения углового размера источника света к угловому размеру апертурной диафрагмы приемного объектива, а третья – пропорциональна угловому размеру апертурной диафрагмы и корню квадратному из толщины объекта. Так как вторая и третья составляющие имеют разные знаки, то выбором угловых размеров источника (при заданной толщине объекта d) можно минимизировать смещение границы в изображении края объекта. Даже в случае когерентного источника света, смещение уровня порога для определения положения края трехмерного объекта возникает за счет влияния его объемности. Проведён анализ вклада в погрешность каждой из её составляющих.

В результате расчетов установлено, что в теновом изображении объекта наблюдается смещение его профиля в зависимости от толщины измеряемого объекта d , угловых размеров

источника освещения $2\theta_{ист}$ и апертурной диафрагмы $2\theta_{ап}$ приемного телецентрического объектива. Использование стандартных порогов приводит к погрешности определения положения геометрической границы трехмерного объекта, зависящих от параметров $\theta_{ист}$, $\theta_{ап}$ и d .

На основе полученных выражений предложены два способа определения положения границ трехмерного объекта, основанные на пороговом методе. Первый из них базируется на установлении уровня порога $\tilde{I}_{пор}$, равного значению интенсивности света $\tilde{I}(0)$ в изображении трехмерного объекта в точке, соответствующей его геометрической границе. Второй способ основан на использовании стандартных порогов для случаев когерентного ($\tilde{I}_{пор}^{(1)} = 0,25$) и некогерентного ($\tilde{I}_{пор}^{(2)} = 0,5$) освещений с внесением в них корректирующих добавок.

Результаты исследований использованы при разработке измерительной системы для промышленного контроля "Кольцо". Предложенный способ вычисления размеров изделия по его теневому изображению, учитывающий влияние объемности измеряемого объекта, а также угловые размеры источника света и апертуры оптической системы, позволил снизить погрешность измерения изделий на порядок.

ГЛАВА 3 Проектирование оптических схем телецентрических объективов с улучшенными характеристиками

Исходя из анализа существующих телецентрических схем и объективов, имеющих в продаже (глава 1), можно сделать вывод о необходимости проектирования собственной оптической схемы с исправленными aberrациями и изготовления на ее основе объектива для применения в системах контроля. В настоящей главе приведено проектирование таких телецентрических объективов с помощью программного обеспечения ZEMAX. Каждый объектив проектировался под конкретный размер контролируемого объекта с учетом измерительных методов, используемых в разрабатываемой системе (например, совмещение телевизионного и теневого проекционного методов). Разработаны оптические схемы объективов для измерения трёх видов изделий разных типоразмеров: керамических колец, керамических бронеплиток и перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок. По первым двум схемам изготовлены объективы. Изготовление линз проводилось на заводе АО "Швабе - Оборона и Защита", изготовление корпусов, сборка и юстировка объективов – в КТИ НП СО РАН. Разработанные объективы обладают улучшенными по сравнению с существующими оптическими характеристиками: увеличенными полем зрения (до 250 мм), разрешением (до 100 линий/мм), уменьшенными дисторсией (менее 0,02 %), нетелецентричностью (менее 0,01°) и астигматизмом (менее 0,1 мм). Разработанные оптические схемы содержат малое количество оптических элементов (не более 7 вместо более 10), которые сдвинуты к апертурной диафрагме (кроме первого), благодаря чему уменьшаются диаметры изготавливаемых линз.

В процессе разработки определены общие требования к разработке объективов, выполняя которые можно спроектировать телецентрический объектив для контроля изделий с определенными параметрами. Проведен анализ влияния остаточных aberrаций рассчитанных объективов и допусков их изготовления на качество получаемого изображения.

3.1 Описание объектов измерения и их контролируемых параметров

Разработаны объективы для измерения трёх видов изделий разных типоразмеров: керамических колец, керамической бронеплитки и перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок (ТВС) [76]. Остановимся более подробно на этих изделиях.

Керамические кольца представляют собой кольцевые изоляторы из вакуумной керамики (рисунок 3.1), имеют различную форму наружного диаметра (гладкая, волнистая), часть колец обладает металлизированной торцевой поверхностью для спайки, внешняя поверхность изделий глазурованная или матовая.



Рисунок 3.1 – Кольцевые изоляторы из вакуумной керамики

Размерному контролю подлежат: внутренний и наружный диаметры от 23 до 45 мм с погрешностью не более 0,005 мм; высота в диапазоне от 0,8 до 10 мм с погрешностью не более 0,002 мм; соосность цилиндрических поверхностей, плоскостность и параллельность торцевых поверхностей с погрешностью не более 0,008 мм. Необходимо обнаруживать дефекты типа сколов на кромках размером не менее 0,2 мм.

Керамическая бронеплитка (рисунок 3.2) может иметь четырехгранную или шестигранную форму с размерами от 20 до 50 мм и разными рассеивающими свойствами: белая керамика из Al_2O_3 обладает свойством внутреннего рассеяния света, черная керамика из B_4C поглощает излучение.

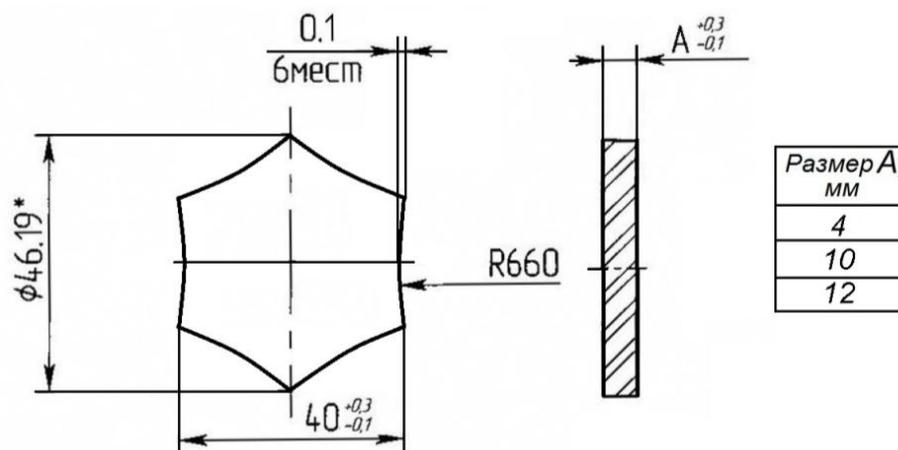


Рисунок 3.2 – Шестигранник из белой керамики

Размерному контролю подлежат: линейные размеры с погрешностью не более 0,03 мм, параллельность и плоскостность рабочих поверхностей изделий с погрешностью не более 0,015 мм, а также определение наличия сколов на кромках размером более 0,5 мм.

Перемешивающие решетки (ПР), изготавливаемые из циркония или нержавеющей стали (рисунок 3.3), входят в состав тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерного реактора, располагаются между дистанционирующими решетками [76-78]. В одной сборке располагается порядка 4-5 ПР. Они служат для оттока горячего теплоносителя от тепловыделяющих элементов и выравнивания энтальпии в активной зоне реактора между менее нагруженными и более нагруженными областями в конструкциях ТВС, что крайне важно для обеспечения необходимого теплового режима их функционирования [79]. Для обеспечения 100% контроля всех ячеек ПР и необходимого быстродействия (время контроля одной решетки не более 15 мин) требуется использовать объектив, в поле зрения которого укладываться вся ПР, то есть иметь большое поле зрения ~250 мм [80].

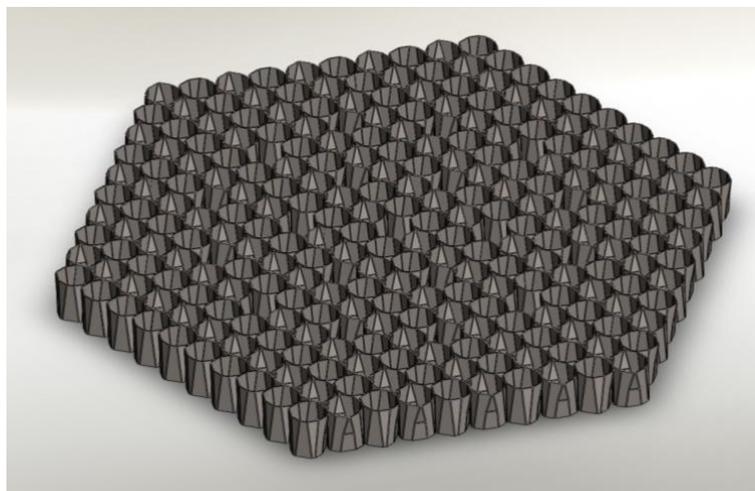


Рисунок 3.3 – Трехмерная модель ПР типа "Прогонка"

Размерному контролю [81, 82] подлежат: диаметры вписанных окружностей в ячейку (от 10 до 12 мм) и в отверстие под канал (от 12 до 15 мм) с погрешностью не более 0,03 мм; позиционные отклонения их центров (от 0 до 1 мм) с погрешностью не более 0,07 мм.

Ниже приведена сводная таблица 3.1, в которой сведены типы изделий, их контролируемые параметры и максимально допустимые погрешности измерений.

Таблица 3.1 – Типы изделий, контролируемые параметры и максимально допустимые погрешности их измерений

Изделие	Мин. - макс. размеры, мм	Определяемый параметр	Макс. погрешность, мм
Кольцевой изолятор	23-45	внутренний, наружный диаметры	0,005
		высота	0,002
		соосность цилиндрических поверхностей, плоскостность, параллельность торцевых поверхностей	0,008
Бронеплитка	20-50	линейный размер	0,03
		параллельность, плоскостность	0,015
ПР	213-243	диаметр вписанной окружности в ячейку	0,03
		диаметр вписанной окружности в отверстие под канал	0,03
		отклонения центров вписанных окружностей	0,07

3.2 Общие требования к разрабатываемым объективам

Сформулирован ряд общих требований к разработке телецентрического объектива, которые необходимо выполнять при проектировании объектива для размерного контроля изделий. Расчет объективов приведен с учетом указанных требований.

1. Рабочий диапазон длин волн

Диапазон определяется с учетом используемого источника освещения. Для обеспечения достаточной светосилы в качестве источника света выбраны светодиоды. Применение видимого диапазона при незначительной доработке конструкции позволяет при необходимости совмещать теневой проекционный метод с другими оптическими методами

измерений: структурным, телевизионным. Кроме того, видимый диапазон обладает преимуществом при юстировке системы. Однако при использовании систем контроля в промышленных цеховых условиях зачастую возникает засветка входной апертуры измерительной системы солнечным излучением. Солнечный спектр в видимой области имеет пиковое значение на зеленой длине волны [83], поэтому для минимальной потери энергии при отсечении паразитного солнечного излучения целесообразно использовать либо синюю, либо красную область видимого спектра. Синие светодиоды требуют большего приложенного напряжения и имеют меньший КПД по сравнению с красными, поэтому предпочтительно использование красного освещения.

Кроме того, предпочтительно рассчитывать объектив на диапазон длин волн, для которого чувствительность матрицы максимальна. Используемые для теневых проекционных каналов фотоприемные матрицы имеют максимальную чувствительность на красной длине волны 600-660 нм. В качестве примера, на рисунке 3.4 показан спектр чувствительности одной из применяемых в системах фотоприемных матриц [84].

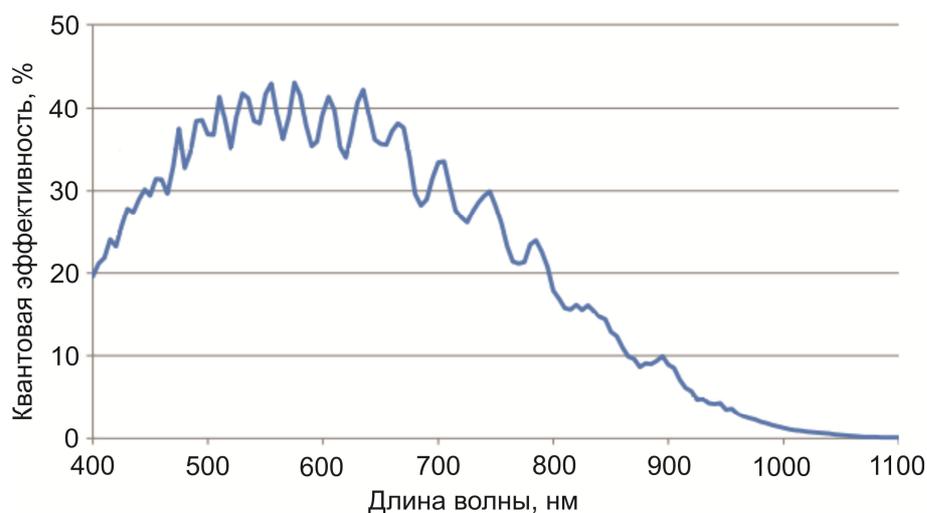


Рисунок 3.4 – Спектральная чувствительность фотоприемной матрицы Smosis CMV20000

2. Линейное поле зрения (входная апертура объектива)

Входная апертура приемного устройства и выходная апертура осветителя задаются величиной измеряемого изделия. Для того, чтобы объект не покидал поле зрения объектива при его позиционировании в измерительной установке, а также чтобы уменьшить влияние дифракционных эффектов на щели "апертура объектива – край объекта" и не допустить возникновения виньетирования по краям объектива (которое является причиной

неравномерности освещенности фотоприемной матрицы) поле зрения оптической системы должно превышать размер объекта на 1,5 мм по всему периметру.

3. Размер фотоприемной матрицы

В качестве матрицы для фотоприемной камеры должна использоваться монохроматическая матрица с разрешением, согласованным с разрешением объектива, при этом размер пикселя не должен превышать максимально допустимую погрешность в 3 раза. Такое соотношение между размером пикселя и погрешностью объясняется тем, что с помощью программных алгоритмов теневым проекционным методом возможно стабильное определение положения края с погрешностью, равной 1/3 пикселя. Размер матрицы задает увеличение оптической системы, поэтому предпочтительно использовать фотоприемную матрицу большего размера.

4. Максимально допустимое отклонение от телецентричности в пространстве предметов

Это требование рассчитывается исходя из толщины объекта: отклонение телецентричности объектива на объекте толщиной d должно давать смещение видимого положения края перпендикулярно оптической оси не более 1/6 от максимального значения погрешности измерений. Расчет производится по формуле:

$$tg \alpha = \frac{\Delta}{d},$$

где α – угол телецентричности, Δ – смещение видимого положения края перпендикулярно оптической оси, d – толщина объекта.

5. Максимально допустимое отклонение от телецентричности в пространстве изображений

Ограничения на телецентричность в пространстве изображений задаются для того, чтобы независимо от расстояния между объективом и фотоприемной матрицей формировалось изображение одинакового размера. Как отмечалось ранее, бителецентрический объектив позволяет минимизировать изменение размера изображения объекта и сформировать постоянное увеличение, потому что позиция луча на детекторе в этом случае не изменяется.

Для стабильного определения положения края изделия на матрице требуется её равномерное освещение. Этого можно добиться, в частности, обеспечением телецентрического способа падения лучей на матрицу. Максимальный угол телецентричности рассчитывается исходя из формулы [85]:

$$H = H_0 \cos^4 \beta,$$

где H_0 – светосила в центре поля зрения, H – светосила в точке поля зрения, для которой угол, образованный проведенным в эту точку главным лучом с осью, равен β .

Телецентрический в пространстве изображений ход лучей позволяет уменьшить эффект пиксельного виньетирования, которым обладают все матрицы – уменьшения квантовой эффективности фотоприемника при наклонном падении световых пучков. Из рисунка 3.5 видно, что угол пиксельного виньетирования для одной из матриц, применяемых в системе, большой – $\sim 15^\circ$.

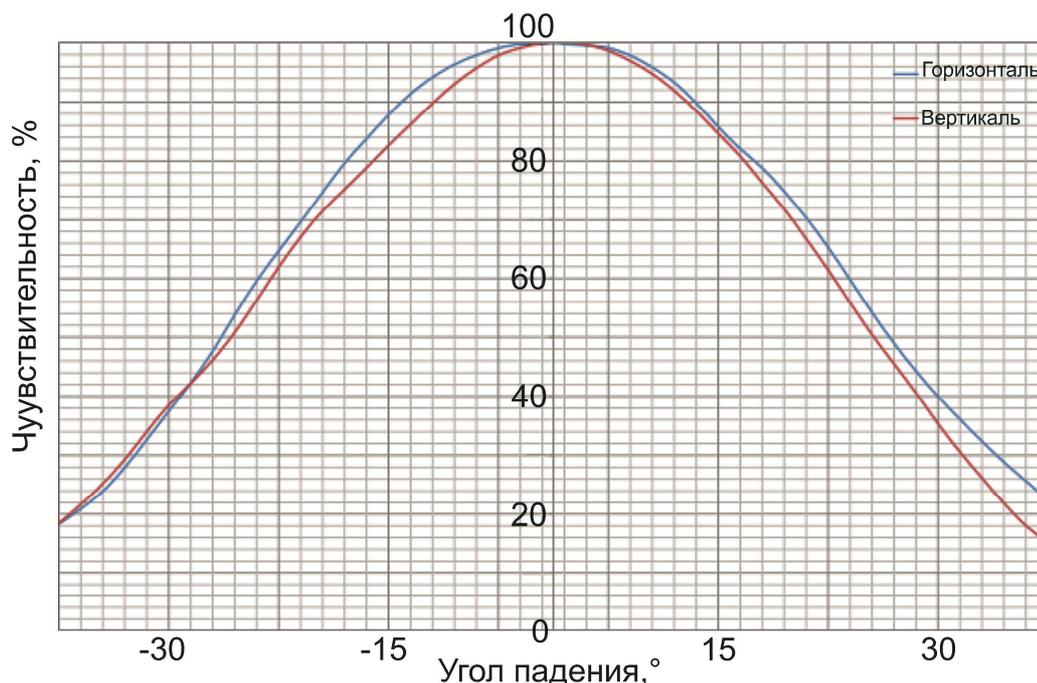


Рисунок 3.5 – Зависимость чувствительности фотоприемной матрицы от угла наклона падающего на нее излучения

6. Максимальная дисторсия телецентрического объектива

Частично дисторсия объектива корректируется калибровкой оптической системы (глава 4). Для более точного определения положения точки объекта на изображении требуется минимизировать этот вид aberrаций на этапе проектирования объектива.

Дисторсия рассчитанного объектива определяется по формуле:

$$\nu = \frac{\Gamma - \Gamma_0}{\Gamma} \cdot 100\% ,$$

где ν – дисторсия объектива, Γ_0 – коэффициент линейного увеличения идеальной оптической системы, Γ – коэффициент линейного увеличения реальной оптической системы.

Максимально допустимое смещение (искажение) изображения определяется техническими требованиями к погрешности системы и составляет 1/3 от погрешности измерений. Максимально допустимая дисторсия на краю поля зрения не должна превышать указанную величину.

7. Относительное отверстие объектива

Относительное отверстие определяется по формуле [86]:

$$\theta = \frac{D}{f},$$

где θ – относительное отверстие объектива, D – диаметр апертурной диафрагмы объектива, f – фокусное расстояние объектива.

При расчете часто требуется предусмотреть возможность использования объектива, как в телевизионном, так и в теновом проекционном режиме. К теновым проецирующим объективам требования по исправлению аберраций ниже, чем к телевизионным. Поэтому расчет проводится на большее относительное отверстие, с учетом того, что при уменьшении диаметра апертурной диафрагмы качество изображения улучшается, а пятно рассеяния увеличивается, что и требуется для теновых проекционных систем.

От относительного отверстия зависит радиус диска Эйри, т.е. размер пятна рассеяния на матрице:

$$r = \frac{1,22\lambda s'}{D},$$

где r – радиус диска Эйри, D – диаметр апертурной диафрагмы объектива, s' – задний отрезок, λ – длина волны.

Чтобы достоверно определить положение центра точки, радиус диска Эйри должен занимать не менее 1 пикселя (~3,5 мкм). Для определения центра масс пятна рассеяния с субпиксельной точностью, его диаметр преднамеренно выбирается больше размера одного пикселя. Кроме того, необходимо учитывать, что оптическая система должна быть согласована с разрешением матрицы, то есть 80% энергии пятна должно попадать на площадь одного пикселя.

Также от диаметра апертурной диафрагмы напрямую зависит глубина резко изображаемого пространства (ГРИП, глубина фокусировки, глубина резкости). Глубина фокусировки определяется протяженностью объекта измерений и точностью его позиционирования в объеме. Апертурная диафрагма проекционной системы изготавливается в виде отверстия на непрозрачном экране. Диаметр диафрагмы Δ выбирается исходя из необходимой глубины фокусировки по соотношению [87]:

$$\Delta = \frac{p \cdot z'}{\Gamma \cdot D / 2},$$

где p – расстояние от главной плоскости объектива до плоскости наилучшей фокусировки (в пространстве предметов), z' – размер изображения точки, Γ – увеличение объектива, D – диаметр входного зрачка объектива.

Кроме этого, при выборе относительного отверстия необходимо учитывать минимально допустимую светосилу разрабатываемого объектива. Так как измерения проводятся в стационарном режиме (объект неподвижен), то допускается длительная выдержка (порядка 20 мс). Несмотря на существующие яркие светодиоды и просветляющие покрытия, которые наносятся на все детали, длина разрабатываемых объективов может быть весьма существенной (до 800 мм), как и входная апертура (до 250 мм), что накладывает ограничения по допустимому максимальному диафрагменному числу. Допустимая светосила объектива H определяется по формуле [85]:

$$H = \pi \tau \left(\frac{\sin \alpha}{V} \right)^2,$$

где τ – коэффициент пропускания объектива, V – увеличение оптической системы, α – передний апертурный угол объектива.

8. Передний рабочий отрезок

Оптимальное расстояние от объекта до первой поверхности объектива – в диапазоне от 150 до 200 мм, расстояние между осветительным и приемными блоками – не менее 300 мм. Эти расстояния задаются конструктивными особенностями измеряемого объекта и способом подачи изделия в измерительный объем. Необходимо предусмотреть удобство установки и съема изделия ручным методом или путем автоматизации на установочную позицию.

Основываясь на указанных требованиях к расчету телецентрических в пространстве предметов объективов и используя оптические схемы, представленные ниже, возможно проектирование оптических систем для различных объектов измерения с заданными параметрами.

3.3 Расчет телецентрических объективов

Исходя из указанных требований, в программе ZEMAX спроектирован ряд телецентрических в пространстве предметов объективов. Объективы предназначены для получения изображений объектов, представленных в разделе 3.1, диаметром от 45 до 245 мм. В каждой новой модификации объектива при увеличении поля зрения увеличивается в

процентном соотношении телецентричность в пространстве предметов, снижается дисторсия объектива.

Метод расчета в программе ZEMAX основан на алгоритмах оптимизации параметров оптической системы [88]. ПО ZEMAX включает в себя 3 возможных вида оптимизации: обычная, "Глобальный поиск" и оптимизация методом "Молотка". При всех видах оптимизации в качестве переменных используются кривизны поверхностей, толщины линз и воздушных промежутков между ними, марки стекол, конические постоянные поверхностей.

При обычной оптимизации алгоритм минимизирует по методу наименьших квадратов функцию качества (Merit function), состоящую из взвешенных значений целевых параметров оптической системы (операторов):

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i}$$

где W_i – вес оператора, V_i – текущее значение оператора, T_i – целевое значение оператора.

С помощью программного обеспечения подбираются значения операторов до тех пор, пока величина среднего квадратичного отклонения функции качества (RMS, Root-Mean-Square) не станет минимальна. Измерение величины RMS измеряется по критерию "Spot Radius", то есть определяется полная (радиальная) поперечная аберрация лучей в плоскости изображения, которая впоследствии минимизируется.

При "Глобальном поиске" методом подбора различных, несвязанных друг с другом, схем ищется общий вид оптической системы, которую затем можно оптимизировать обычным алгоритмом. Разница с обычной оптимизацией заключается в том, что при обычной оптимизации производится минимизация функции качества одной перспективной оптической схемы. Тогда как при "Глобальном поиске" создается набор различных схем с разными параметрами, после чего каждая из схем оптимизируется отдельно. Создаётся набор из 10 файлов с результирующими оптическими системами. Расчетчик анализирует каждую из схем и выбирает наиболее удовлетворяющую его требованиям.

Оптимизация методом "Молотка" проводится путем резкого значительного изменения одного из параметров (так называемого «простукивания») оптической схемы с целью найти максимально хорошее качество изображения. Этот вид оптимизации проводится, когда уже спроектирована частично оптимизированная оптическая система.

При проектировании телецентрических объективов были использованы все виды оптимизаций.

В качестве дополнительных критериев функции качества, в соответствии с подразделом 3.2, были выбраны следующие требования:

- максимальный размер изображения (размер фотоприемной матрицы),
- относительное отверстие объектива,
- угол падения лучей на первую поверхность объектива (телецентричность в пространстве предметов),
- угол падения лучей на фотоприемную матрицу (телецентричность в пространстве изображений),
- максимально допустимая дисторсия объектива,
- ограничения на конструктивные параметры объектива (минимальный передний рабочий отрезок, максимальная длина объектива),
- ограничения на конструктивные параметры оптических элементов (максимальный диаметр линз, расположенных перед апертурной диафрагмой; диапазон толщин воздушных промежутков и стекол; минимальная толщина по краю линз и воздушных промежутков; диапазон радиусов кривизны линз),
- ограничения по маркам стекол (диапазон коэффициентов показателя преломления; чисел Аббе, парциальной дисперсии).

В области границы изделия весовые значения операторов, отвечающих за определение телецентричности и дисторсии, выбираются выше, чем в центре изображения. Это связано с тем, что в теневой проекционной системе контроля необходимо иметь качественное изображение в области границ объекта.

Диапазон длин волн выбирается от 0,6 до 0,66 мкм в соответствии с требованиями, указанными в подразделе 3.2, пункт 1. Апертурная диафрагма располагается внутри объектива. В ходе расчета объектива проводится его ахроматизация.

В первой модификации объектива, из соображений простоты и дешевизны изготовления, количество линз в составе объектива выбрано не более четырёх, число различных марок стёкол – не более двух. После первых попыток оптимизации такой системы выяснилось, что не удастся создать систему, в которой пятна рассеяния по всему полю достигают дифракционного качества и при этом объектив обладает требуемой телецентричностью и дисторсией. При увеличении количества оптических элементов до шести, а также путем изменения весовых значений операторов, результаты оптимизации значительно улучшились.

При увеличении линейного поля зрения телецентрического объектива добавляется дополнительный оптический элемент. В последней модификации (объектив "Решетка" 0,097^X) использована дополнительная третья марка стекла.

Затем проводится анализ полученной схемы на абберации, в ходе которого определяется, удовлетворяет ли полученная оптическая схема задаваемым требованиям. Последующий этап расчета объектива состоит в доводке его характеристик с учетом реальных условий измерения. Для этого полученные значения диаметров оптических элементов и апертурной диафрагмы приводятся к реальным, задаются существующие в наличии марки стекол.

Заключительным этапом является проверка технологичности изготавливаемых оптических элементов и анализ допусков оптической системы. Системы были проанализированы методом Монте-Карло по 1000 исполнениям. Анализ показал, что для 98% полученных искаженных оптических схем функция качества ухудшается не более чем на 45%, что является приемлемым при производстве объективов.

В таблице 3.2 указаны предъявленные требования к линейке разработанных объективов, определенные исходя из приведенных выше параметров.

Таблица 3.2 – Требования к разработанным объективам

Параметр/Объектив	"Кольцо" 0,155 ^X	"КБК" 0,189 ^X	"Решетка" 0,097 ^X
Рабочий диапазон длин волн, мкм	0,6-0,65	0,61-0,66	0,61-0,66
Диаметр линейного поля зрения, мм	50	80	250
Размер фотоприемной матрицы, ммхмм	10 x 8	11 x 11	33 x 25
Максимальная нетелецентричность в пространстве предметов, °	0,028	0,01	0,019
Максимальная нетелецентричность в пространстве изображений, °	5	5	5
Максимальная дисторсия, %	0,016	0,01	0,04
Рабочее относительное отверстие	1/5	1/7	1/7

3.3.1 Телецентрический объектив "Кольцо" 0,155^X

Первой модификацией в линейке телецентрических является объектив "Кольцо" 0,155^X. Объектив рассчитывался для контроля кольцевых изоляторов на линейное поле зрения 50 мм, телецентричен в пространстве предметов (максимальная нетелецентричность в пространстве предметов 0,028°) и ортоскопичен (максимальная дисторсия 0,02%). Объектив может работать в двух режимах: с малой апертурой для формирования теневых изображений и с большой апертурой для формирования телевизионных изображений с высоким разрешением (около 100 линий/мм). Для этого используется сменная апертурная диафрагма ($D/f^* = 1/25$ или $1/5$). Его оптическая схема показана на рисунке 3.6.

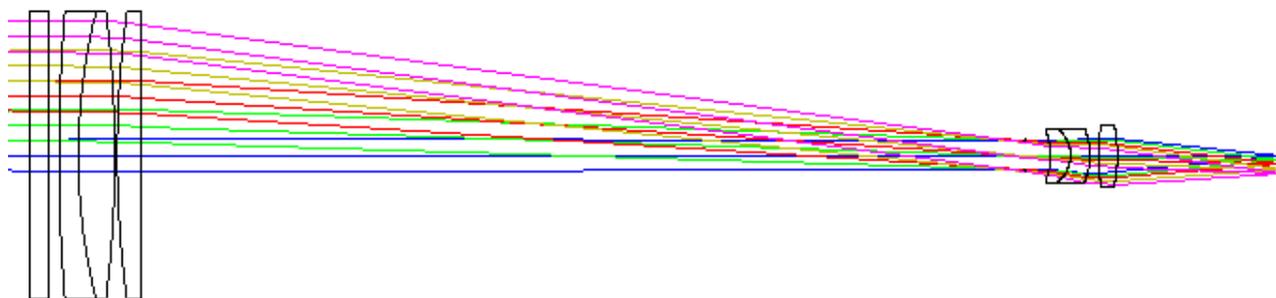


Рисунок 3.6 – Оптическая схема телецентрического объектива "Кольцо" 0,155^X

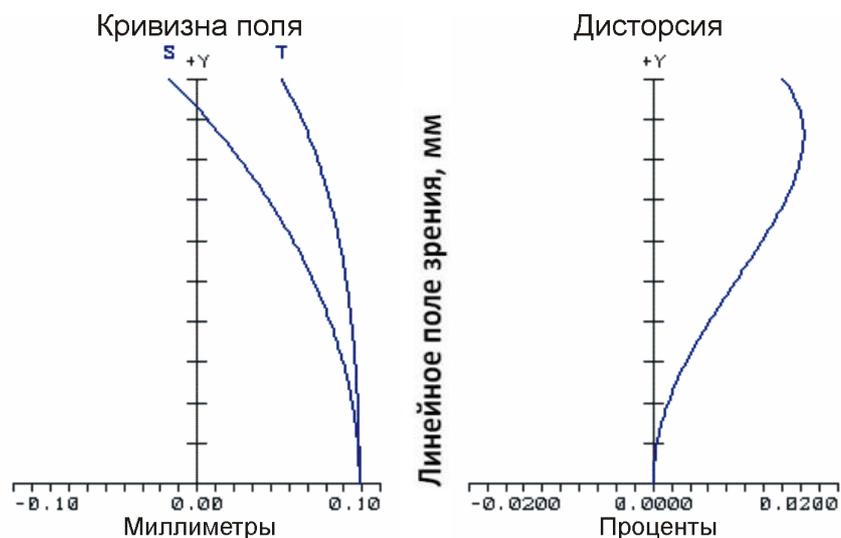
Объектив состоит из четырех компонентов – две одиночные и две склеенные линзы (общее количество линз – 6 штук), изготовленные из двух марок стекол. Объектив разделён апертурной диафрагмой на две части – первая формирует телецентричность системы в пространстве предметов, вторая исправляет оставшиеся aberrации и проецирует изображение объекта на матрицу. Перед первой линзой установлен светофильтр, отсекающий лишнее солнечное излучение и служащий одновременно защитным стеклом.

В таблице 3.3 приведены конструктивные параметры оптических элементов спроектированного объектива "Кольцо" 0,155^X. Позиции линз указаны в соответствии с рисунком 3.9, № пов. – номер поверхности по ходу луча, R – радиус поверхности, d – толщина между поверхностями, D – диаметр поверхности, марка стекла – по ГОСТ 3514-94.

Таблица 3.3 – Конструктивные параметры объектива "Кольцо" 0,155^X

Позиция	№ пов.	R, мм	d, мм	D, мм	Марка стекла
Светофильтр	1	∞	4	29	К8
	2	∞	2	29	
Отрицательный мениск	3	344,984	4	29	ТФ1
Линза двояковыпуклая	4	115,883	7,5	29	К8
	5	-234,256	0,5	29	
Линза плосковыпуклая	6	208,94	5	29	К8
	7	∞	182,2	29	
Апертурная диафрагма	8	∞	5,25	2,88	
Слабо положительный мениск	9	-14,855	4,2	4,5	К8
Слабо отрицательный мениск	10	-6,637	4	5,5	ТФ1
	11	-13,864	1,84	5,5	
Линза двояковыпуклая	12	48,532	3,8	6,25	К8
	13	-30,55	34,033	6,25	

Графики кривизны поля и дисторсии показаны на рисунке 3.7. График частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) показан на рисунке 3.8.

Рисунок 3.7 – Расчетные кривизна поля и дисторсия объектива "Кольцо" 0,155^X

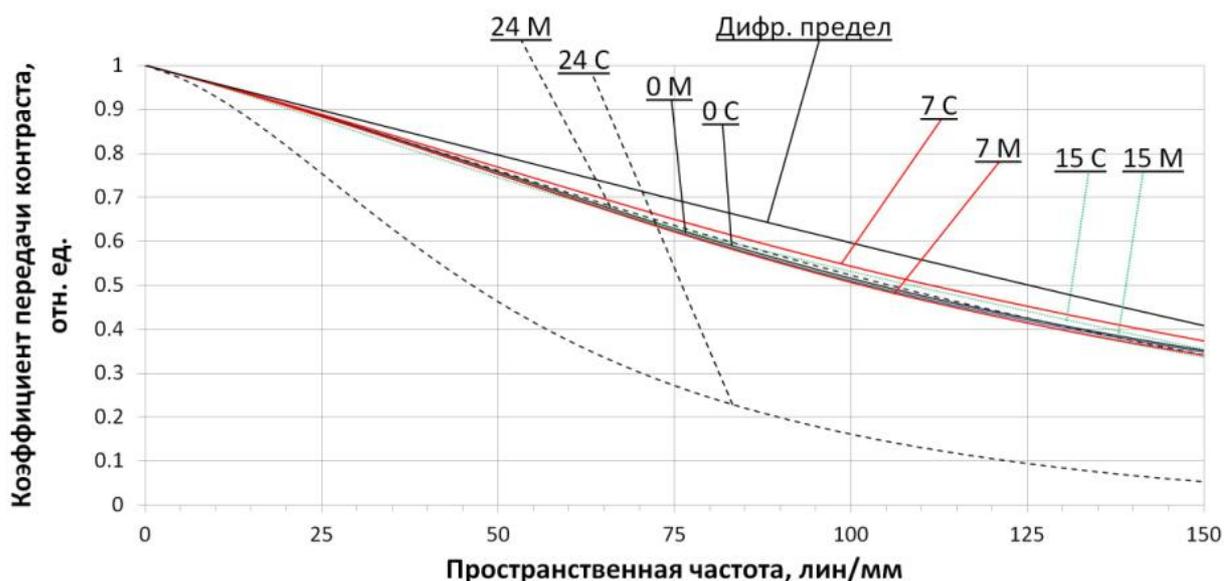


Рисунок 3.8 – ЧКХ объектива "Кольцо" $0,155^X$ для разных значений поля зрения в сагитальном (С) и меридиональном (М) сечениях

Из рисунка 3.7 видно, что в объективе хорошо исправлена дисторсия – не превышает 0,02 %. Астигматизм не превышает 0,15 мм. Из рисунка 3.8 следует, что объектив обладает хорошим разрешением, так как коэффициенты передачи контраста для пространственной частоты 100 мм^{-1} не хуже 0,5 для всего поля зрения объектива.

3.3.2 Телецентрический объектив "КБК" $0,189^X$

Второй модификацией является объектив "КБК" $0,189^X$. Объектив рассчитан на линейное поле зрения 80 мм, ортоскопичен (максимальная дисторсия 0,01%), существенно улучшена телецентричность в пространстве предметов по сравнению с предыдущей моделью ($0,01^\circ$). Объектив может работать в двух режимах: с малой апертурой для формирования теневых изображений и с большой апертурой для формирования телевизионных изображений с высоким разрешением (около 80 линий/мм). Его оптическая схема показана на рисунке 3.9.

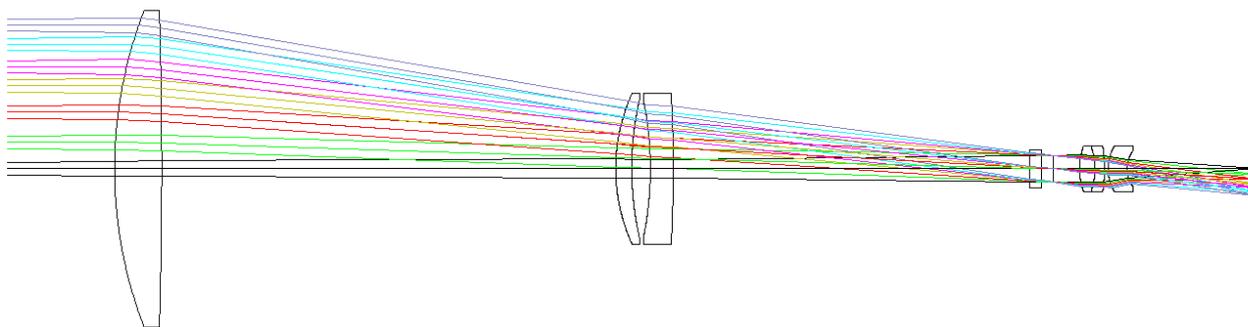


Рисунок 3.9 – Оптическая схема телецентрического объектива "КБК" 0,189^X

Объектив состоит из шести линз, одна из них склеенная. Используется две марки стекол. Апертурная диафрагма делит объектив на две части, перед диафрагмой располагается светофильтр. Разместить светофильтр внутри объектива решено для уменьшения его рабочей площади, что упрощает изготовление плоскопараллельной цветной пластины. В таблице 3.4 приведены конструктивные параметры оптических элементов объектива "КБК" 0,189^X.

Таблица 3.4 – Конструктивные параметры объектива "КБК" 0,189^X

Позиция	№ пов.	R, мм	d, мм	D, мм	Марка стекла
Линза плосковыпуклая	1	116,9	12,4	42	К8
	2	∞	119,2	42	
Положительный мениск	3	48,87	4,2	20	ЛК5
	4	83,37	5	18,5	
Отрицательный мениск	5	-92,033	6	18	ТФ10
	6	-368,1	93,8	20	
Светофильтр	7	∞	3	5	К8
	8	∞	3	5	
Апертурная диафрагма	9	∞	6,4	3,57	
Линза двояковыпуклая	10	18,36	4	6	ЛК5
Слабо отрицательный мениск	11	-19,143	2,5	6	ТФ10
	12	-42,95	1	6	
Слабо отрицательный мениск	13	12,532	4,95	6	ТФ10
	14	8,633		4,5	

Позиции линз указаны в соответствии с рисунком 3.9; № пов. – номер поверхности по ходу луча; R – радиус поверхности, d – толщина между поверхностями, D – диаметр поверхности, марка стекла – по ГОСТ 3514-94.

Вторая часть объектива служит для коррекции остаточных aberrаций объектива и создания телецентричности в пространстве изображений. Использование всего одной склеенной линзы увеличивает технологичность изготовления объектива. В объективе используется лишь одна (первая) линза большого диаметра, остальные отнесены как можно ближе к диафрагме, благодаря чему уменьшена их площадь. Смена второй части объектива без изменения корпуса и передней части позволяет использовать объектив с другой фотоприемной матрицей.

На рисунке 3.10 показаны графики кривизны поля и дисторсии объектива, на рисунке 3.11 – график ЧКХ.

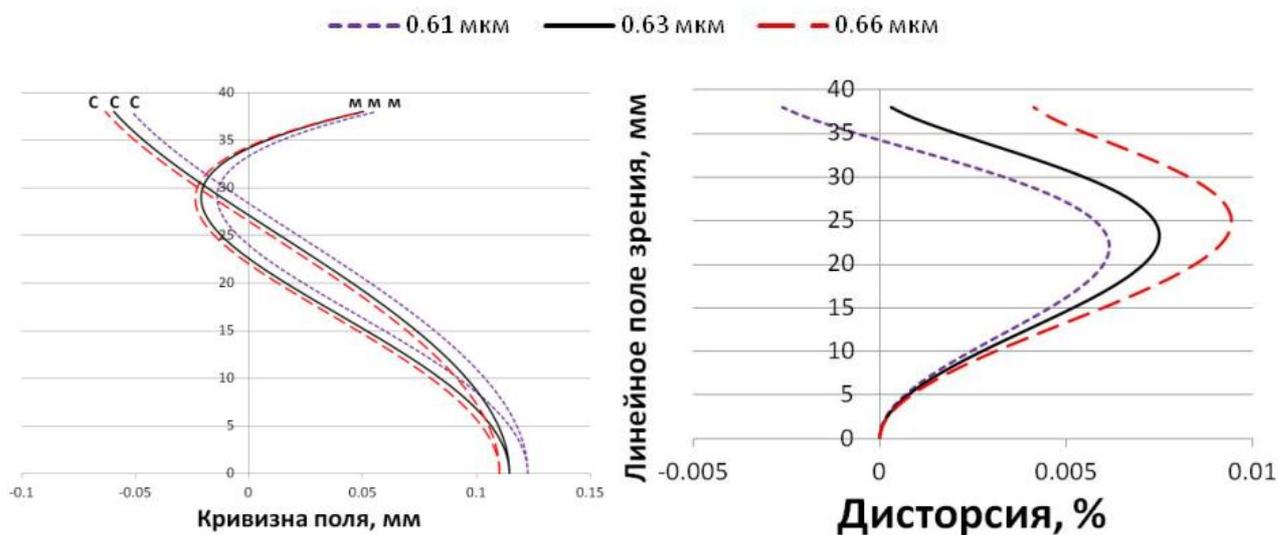


Рисунок 3.10 – Расчетные кривизна поля и дисторсия объектива "КБК" 0,189^x

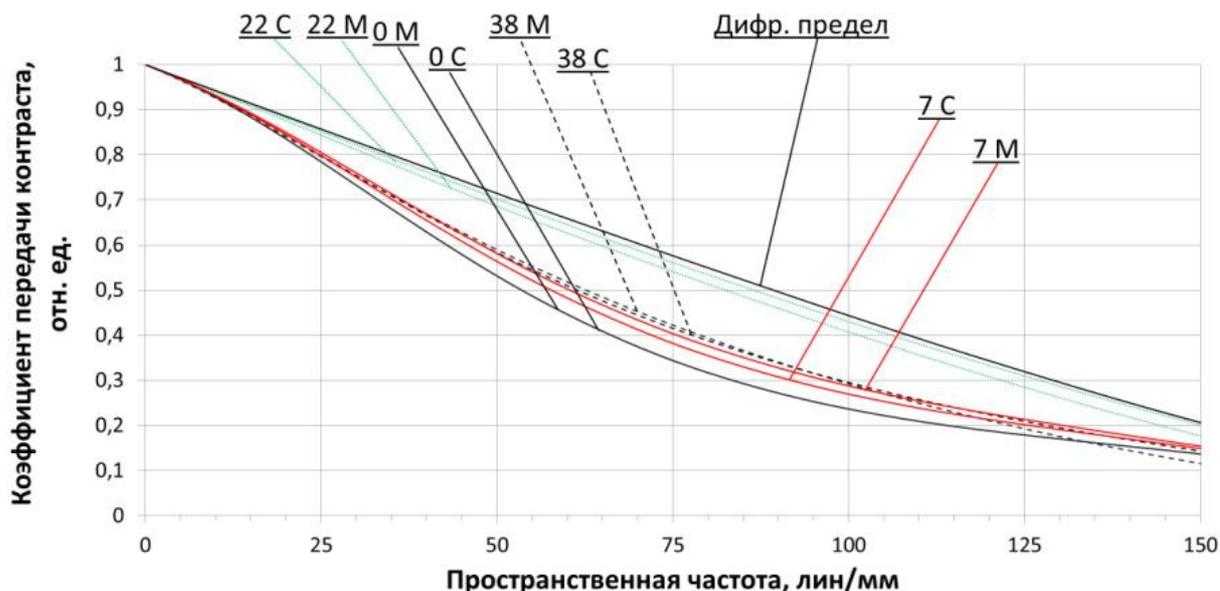


Рисунок 3.11 – ЧКХ объектива "КБК" $0,189^X$ для разных значений поля зрения в сагитальном (С) и меридиональном (М) сечениях

Рисунок 3.10 иллюстрирует, что при существенном увеличении поля зрения объектива, удалось улучшить его ортоскопичность по сравнению с предыдущим объективом "Кольцо" $0,155^X$ – дисторсия не превышает 0,01 %. Из рисунка 3.11 видно, что на уровне коэффициента передачи контраста 0,5 относительных единиц, его пространственная частота превышает 60 мм^{-1} для всего поля зрения. При этом расчет проведен таким образом, чтобы наилучшее разрешение, близкое к дифракционному пределу, соответствовало положению края объекта в кадре объектива (22 мм).

3.3.3 Телецентрический объектив "Решетка" $0,097^X$

Третий рассчитанный телецентрический в пространстве предметов объектив "Решетка" $0,097^X$ [89] обладает существенно увеличенным линейным полем зрения (250 мм) по сравнению с предыдущими схемами, формирует равномерное качественное изображение как осевых, так и внеосевых точек по всему прямоугольному полю, определяемого размерами матрицы (число Штреля по всему полю не меньше 0,9). Объектив формирует изображение с низкой дисторсией (менее 0,02%) и высокой телецентричностью (максимальное отклонение от телецентричности в пространстве предметов – $0,019^\circ$).

Оптическая схема объектива представлена на рисунке 3.12.

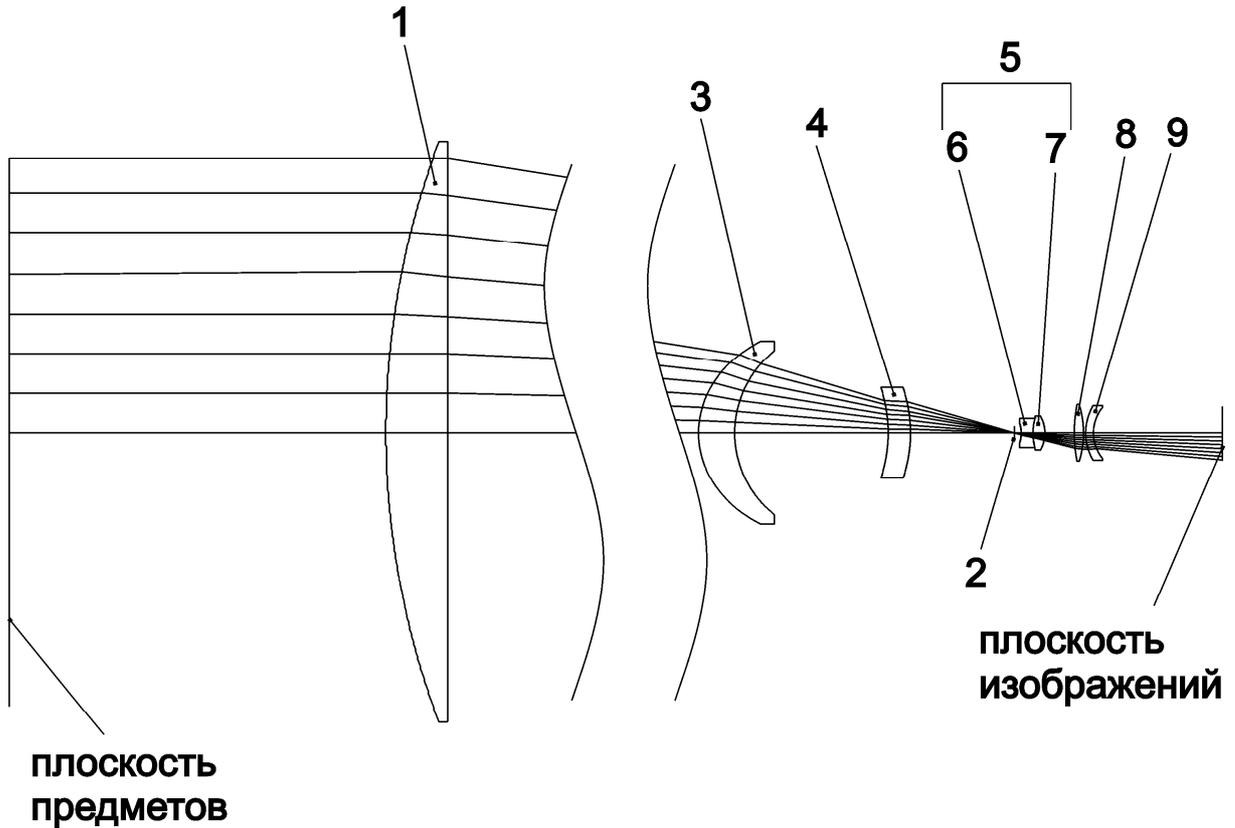


Рисунок 3.12 – Оптическая схема объектива "Решетка" 0,097^X: 1, 3, 4, 8, 9 – одиночные линзы, 2 – апертурная диафрагма, 5 – склеенная линза, 6, 7 – одиночные линзы, входящие в состав склеенной линзы

Объектив состоит из шести компонент, общее количество линз – 7 штук, одна из них склеенная линза. В объективе используется три марки стекол. Объектив обладает апертурной диафрагмой с переменным радиусом (ирисовой диафрагмой). Непосредственно перед ней установлен светофильтр, отсекающий лишнее солнечное излучение и пропускающий только рабочую длину волны.

Объектив разделён апертурной диафрагмой на две части: первая формирует телецентричность системы в пространстве предметов, вторая исправляет оставшиеся aberrации и проецирует изображение объекта на матрицу. В качестве матрицы выбран 20-мегапиксельный КМОП-датчик изображения Cmosis CMV20000 для промышленных систем с большим разрешением (5120 x 3840 пикселя, размер пикселя 6,4 x 6,4 мкм, физический размер матрицы 32,768 x 24,576 мм) [84].

В таблице 3.5 приведены конструктивные параметры оптических элементов рассчитанного объектива "Решетка" 0,097^X.

Таблица 3.5 – Конструктивные параметры объектива "Решетка" 0,097^X

Позиция	№ пов.	R, мм	d, мм	D, мм	Марка стекла	K
Линза 1 (плосковыпуклая)	1	373,24	27,98	131,62	Кварц плавленый	
	2	∞	535,6	130,92		
Линза 3 (положительный мениск)	3	40,03	16,17	40	Кварц плавленый	-0,284825
	4	46,89	69,58	35,74		
Линза 4 (слабо отрицательный мениск)	5	-64,68	10	18,97	ТФ2	
	6	-62,83	23,64	18,43		
Апертурная диафрагма	7	∞	3,8	6,14		
Линза 6 (двояковогнутая)	8	-12,9	5	4,13	ТФ2	
Линза 7 (двояковыпуклая)	9	25,06	5	6,06	Кварц плавленый	
	10	-14,06	13,73	7,1		
Линза 8 (двояковыпуклая)	11	64,99	4,19	12,61	СТК9	
	12	-42,56	1	12,74		
Линза 9 (слабо отрицательный мениск)	13	24,26	3,5	12,35	Кварц плавленый	
	14	18,09	58,41	11,44		

В таблице 3.5 позиции линз указаны в соответствии с рисунком 3.12; № пов. – номер поверхности по ходу луча; R – радиус поверхности, d – толщина между поверхностями, D – диаметр поверхности, марка стекла – по ГОСТ 3514-94, K – коническая постоянная.

Параллельное оптической оси освещение проходит последовательно через линзы 1, 3, 4 и фокусируется в плоскости апертурной диафрагмы 2. При этом формируется заданная телецентричность пучка, все лучи, попадающие в объектив под большим углом, не проходят

в оптическую систему. Далее излучение, пройдя через линзы 6, 7, 8 и 9, корректируется от aberrаций, фокусируется ими в плоскости фотоприёмника, формируя изображение объекта.

В объективе хорошо исправлены обе хроматические aberrации, кома. Присутствуют остаточные сферическая aberrация, астигматизм, кривизна поля и дисторсия [90, 91]. Однако их значения не превышают допустимых и являются приемлемыми для разрабатываемой системы контроля.

На рисунке 3.13 показаны расчетная дисторсия и кривизна поля, на рисунке 3.14 – расчетная ЧКХ объектива.

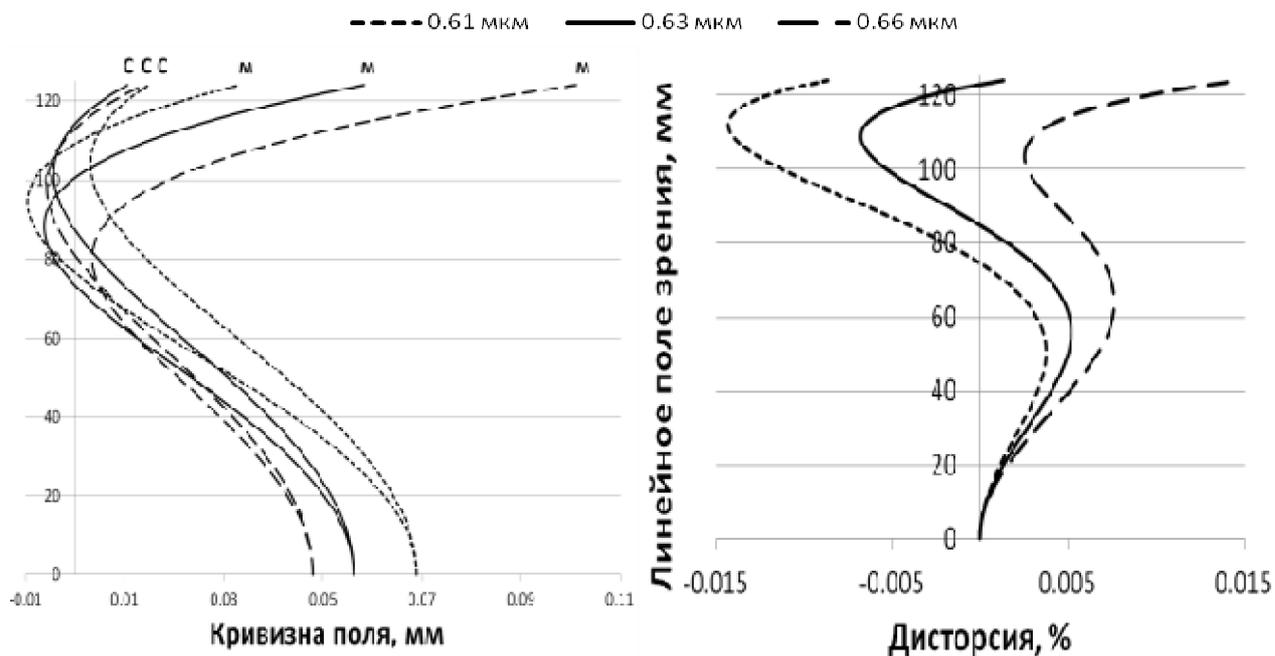


Рисунок 3.13 – Дисторсия и кривизна поля объектива "Решетка" 0,097^x

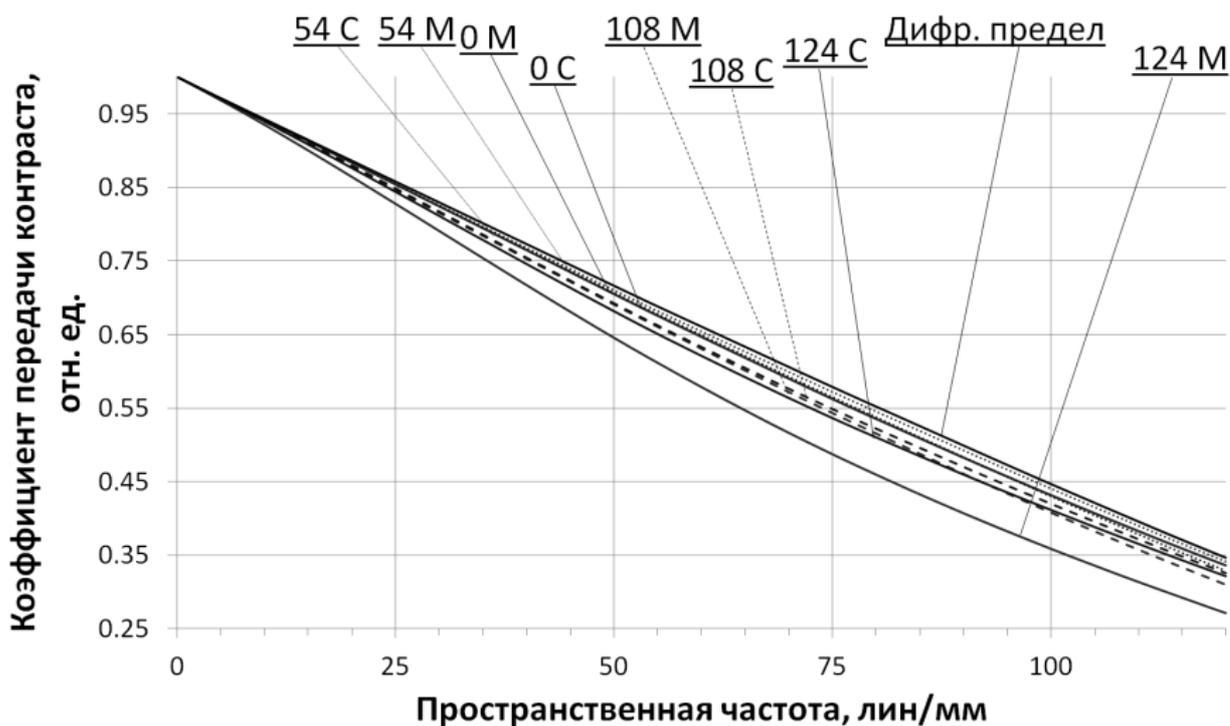


Рисунок 3.14 – ЧКХ объектива "Решетка" 0,097^X для разных значений поля зрения в саггитальном (С) и меридиональном (М) сечениях

Из рисунка 3.13 видно, что данный объектив обладает высокой ортоскопичностью – дисторсия менее 0,02%. Кроме того, хорошо исправлен астигматизм – менее 0,1 мм. Это ведёт к существенному увеличению телецентричности объектива в пространстве предметов – максимальная нетелецентричность 0,019°.

Из графика на рисунке 3.14 следует, что объектив обладает хорошим разрешением, так как коэффициенты передачи контраста для пространственной частоты 100 мм⁻¹ не хуже 0,5, а число Штреля по всему полю не меньше 0,9.

Для сравнения в таблице 3.6 приведены оптические параметры разработанных телецентрических объективов и паспортные данные зарубежного объектива Thorlabs MVTC23024 BI-TELECENTRIC 0,243^X, который является одним из лучших аналогов, доступных в продаже (глава 1).

Таблица 3.6 – Оптические характеристики телецентрических объективов

	Thorlabs MVTC23024 0,243 ^x	"Кольцо" 0,155 ^x	"КБК" 0,189 ^x	"Решетка" 0,097 ^x
Увеличение, крат	0,243	0,155	0,189	0,097
Фокусное расстояние, мм	2000	500	250	1500
Диагональ кадра, мм	11	10	14,5	41
Диаметр поля зрения, мм	45	50	80	250
Рабочий отрезок в пространстве предметов, мм	103	200	150	170
Рабочее относительное отверстие	1/8	1/5	1/7	1/7
Глубина фокусировки, мм	±11	±20	±20	±150
Дисторсия, %	-0,03	-0,02	-0,01	-0,015
Телецентричность, °	-0,147	-0,028	-0,01	-0,019
Разрешение по центру/ по краю, линий/мм	75/50	110/44	86/64	95/75
Расстояние от первой поверхности до плоскости изображения, мм	180	250	300	800

Из таблицы 3.6 видно, что все расчетные параметры разработанных оптических схем превышают паспортные данные коммерческого объектива. Для применения объективов в системах размерного контроля особенно важно улучшение таких характеристик как дисторсия и телецентричность.

3.4 Анализ влияния остаточных aberrаций и допусков изготовления разработанных объективов

Для оценки влияния различных погрешностей, возникающих при изготовлении и эксплуатации объективов, в программе ZEMAX проведено компьютерное моделирование: изменения телецентричности объектива по полю, поведения дисторсии вдоль оптической оси

объектива, изменения формы пятна рассеяния при его смещении вдоль оптической оси, выполнен тепловой анализ объектива, а также оценено влияние допусков изготовления и сборки линз на дисторсию и телецентричность объективов.

3.4.1 Анализ aberrаций компонентов объектива

Для анализа влияния элементов оптической схемы на формируемое изображение ниже приведены aberrации, вносимые каждым компонентом объектива "Решетка" 0,097^X отдельно. Это позволит минимизировать требуемые aberrации в дальнейших модификациях объективов. На рисунке 3.15 приведены диаграммы Зейделя (диаграммы aberrаций третьего порядка) для рассчитанного объектива.

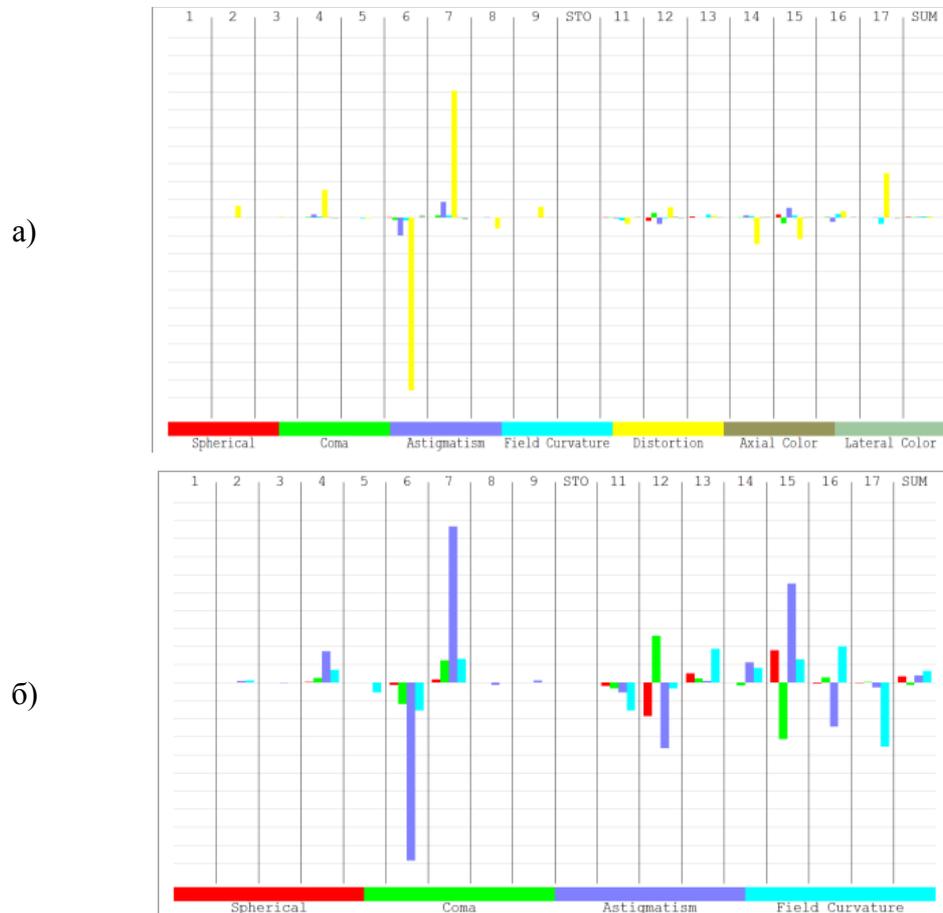


Рисунок 3.15 – Диаграмма Зейделя для объектива "Решетка" 0,097^X: а) включающая все семь aberrаций третьего порядка, б) без хроматических aberrаций и дисторсии

Проанализируем aberrации, вносимые отдельно линзами объектива "Решетка" 0,097^X, показанного на рисунке 3.12. Первая линза 1 имеет диаметр, превышающий размер предмета, является плосковыпуклой и обращена плоской поверхностью к апертурной диафрагме. Плосковыпуклая форма самой большой линзы упрощает её изготовление, что

повышает технологичность изготовления всего объектива. Линза 1 обладает лишь незначительной дисторсией, что объясняет её высокую телецентричность в пространстве предметов. Она является единственной линзой большого диаметра в объективе, что также увеличивает технологичность его изготовления.

Вторая линза 3 является положительным мениском с выпуклой асферической поверхностью, обладает астигматизмом и комой, но освобождена от сферической и прочих aberrаций. Служит для доведения телецентричности до заданной величины, а также поджимает сходящийся пучок лучей. Применение асферической поверхности также позволяет значительно уменьшить диаметр линз 3, 4, таким образом, в объективе остается только одна крупногабаритная линза. Использование асферической поверхности позволяет лучше скомпенсировать сферическую aberrацию, кому и астигматизм при увеличении относительного отверстия до $1/7$.

Третья линза 4 – слабо отрицательный мениск, обращенный выпуклой стороной к диафрагме. Линза практически свободна от aberrаций и изготовлена из материала с большим числом Аббе, что необходимо для компенсации хроматических aberrаций.

Далее расположены светофильтр, пропускающий только красную длину волны, и апертурная диафрагма. Диаметр диафрагмы зависит от цели использования объектива, поэтому наиболее целесообразно использование ирисовой диафрагмы. Расчетное максимальное относительное отверстие составляет $1/7$.

После диафрагмы, вогнутой стороной к диафрагме, располагается склеенная линза 5, состоящая из двояковогнутой 6 и двояковыпуклой 7 линз. Компонент практически избавлен от хроматических aberrаций, но обладает отрицательными комой, кривизной поля и сферической aberrацией, вносит значительный отрицательный астигматизм и дисторсию.

Пятый компонент 8 представляет собой двояковыпуклую линзу, которая компенсирует астигматизм, сферическую aberrацию, кому и кривизну поля, вносимую предыдущей склейкой. Также этот компонент несколько уменьшает угол падения лучей на фотоприемник и вносит отрицательную дисторсию.

Шестая линза 9 – слабо отрицательный мениск, служит для компенсации остаточных aberrаций, в частности кривизны поля и астигматизма, а также для исправления остаточной дисторсии объектива, т.е. повышения телецентричности в пространстве изображений.

3.4.2 Моделирование изменения дисторсии вдоль оптической оси

При смещении объекта вдоль оптической оси происходит изменение дисторсии по полю. В этом случае калибровка системы по одному из положений приводит к появлению ошибки измерений в других положениях объекта. Графики дисторсии рассчитанного объектива "КБК" 0,189^X для всей глубины фокусировки (± 20 мм) показаны на рисунке 3.16: дисторсия на границах глубины фокусировки (130 мм, 170 мм) и на рабочем расстоянии объектива (150 мм).

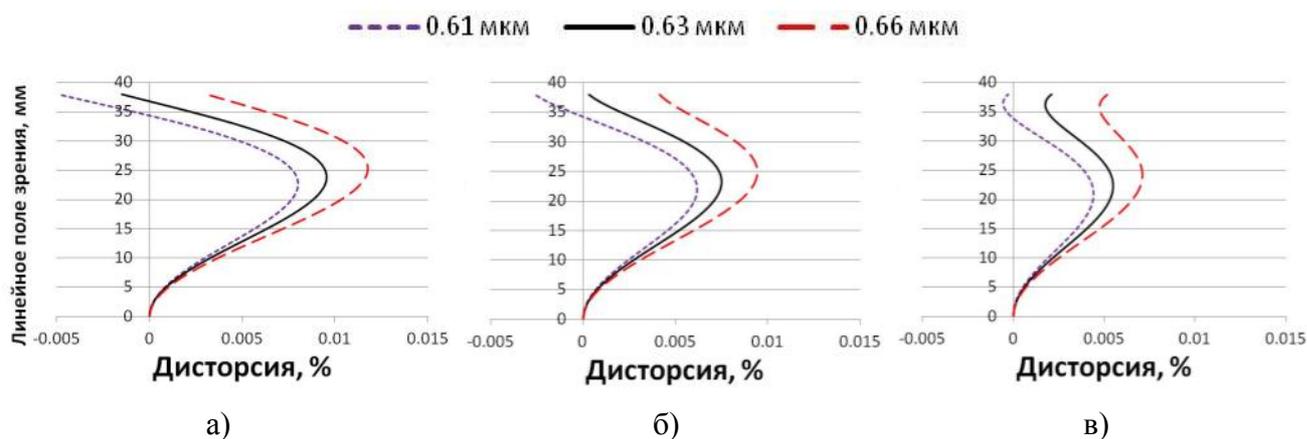


Рисунок 3.16 – Графики дисторсии объектива "КБК" 0,189^X при различных передних рабочих расстояниях в пределах глубины фокусировки: а) 130 мм, б) 150 мм, в) 170 мм

По графикам на рисунке 3.16 видно, что максимальное смещение положения пятна рассеяния при перемещении объекта по всей глубине фокусировки составляет 5 мкм. При определении размеров объекта максимальная ошибка, вводимая дисторсией вдоль оптической оси, составляет 10 мкм (с учетом двух границ объекта).

3.4.3 Моделирование телецентричности объектива по полю

Телецентричность объектива по полю зрения (поперёк оптической оси) непостоянна. При недостаточной ахроматизации компонентов объектива, расположенных до апертурной диафрагмы, наблюдается зависимость телецентричности от длины волны освещения. Всё это приводит к тому, что изменение положения объекта по полю влечет за собой появление ошибки определения размера объекта. На рисунке 3.17 приведены графики телецентричности трёх рассчитанных объективов.

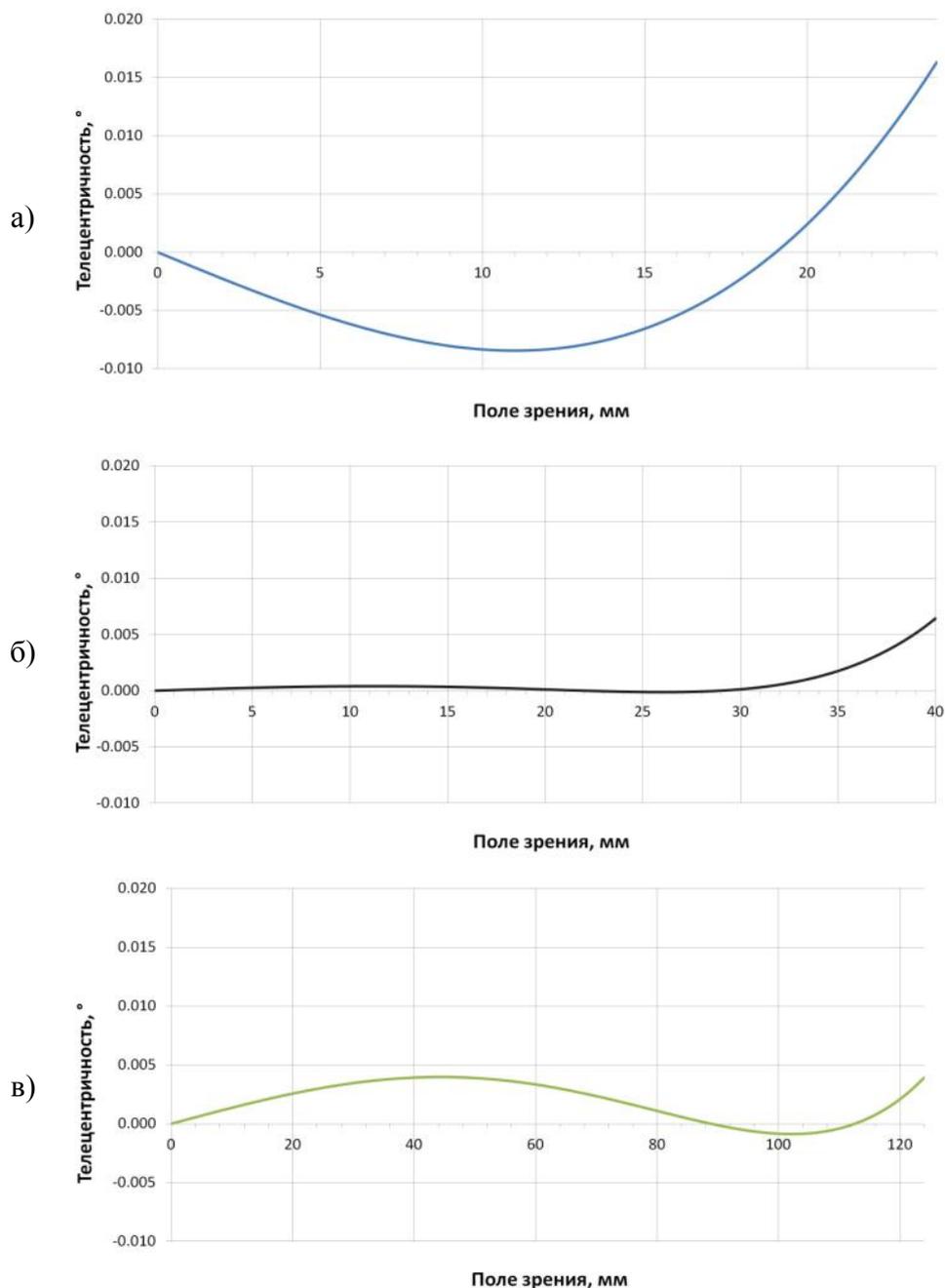


Рисунок 3.17 – Графики телецентричности по полю объективов: а) "Кольцо" $0,155^{\times}$, б) "КБК" $0,189^{\times}$, в) "Решетка" $0,097^{\times}$

Из рисунка 3.17 видно, что использование асферических поверхностей позволяет существенно повысить телецентричность системы. Так, поле зрения объектива "Решетка" $0,097^{\times}$ увеличено по сравнению с объективом "Кольцо" $0,155^{\times}$ в 5 раз, при этом телецентричность по полю увеличена более чем в 1,5 раза, причем в определенных точках она обращается в ноль. Это означает, что можно рассчитать телецентричность объектива таким образом, чтобы в заданной точке поля зрения её влияние было минимально.

3.4.4 Моделирование телецентричности объектива при смещении объекта вдоль оптической оси

Проведено моделирование смещения центроида пятна рассеяния при перемещении положения объекта вдоль оптической оси на величину глубины фокусировки объектива. При таком смещении на положение центра пятна влияет изменение его формы за счет перераспределения несимметричных aberrаций в телецентрическом объективе. Это приводит к неверному определению размера изделия. На рисунке 3.18 приведены результаты такого моделирования для краевых пучков трёх рассчитанных объективов.

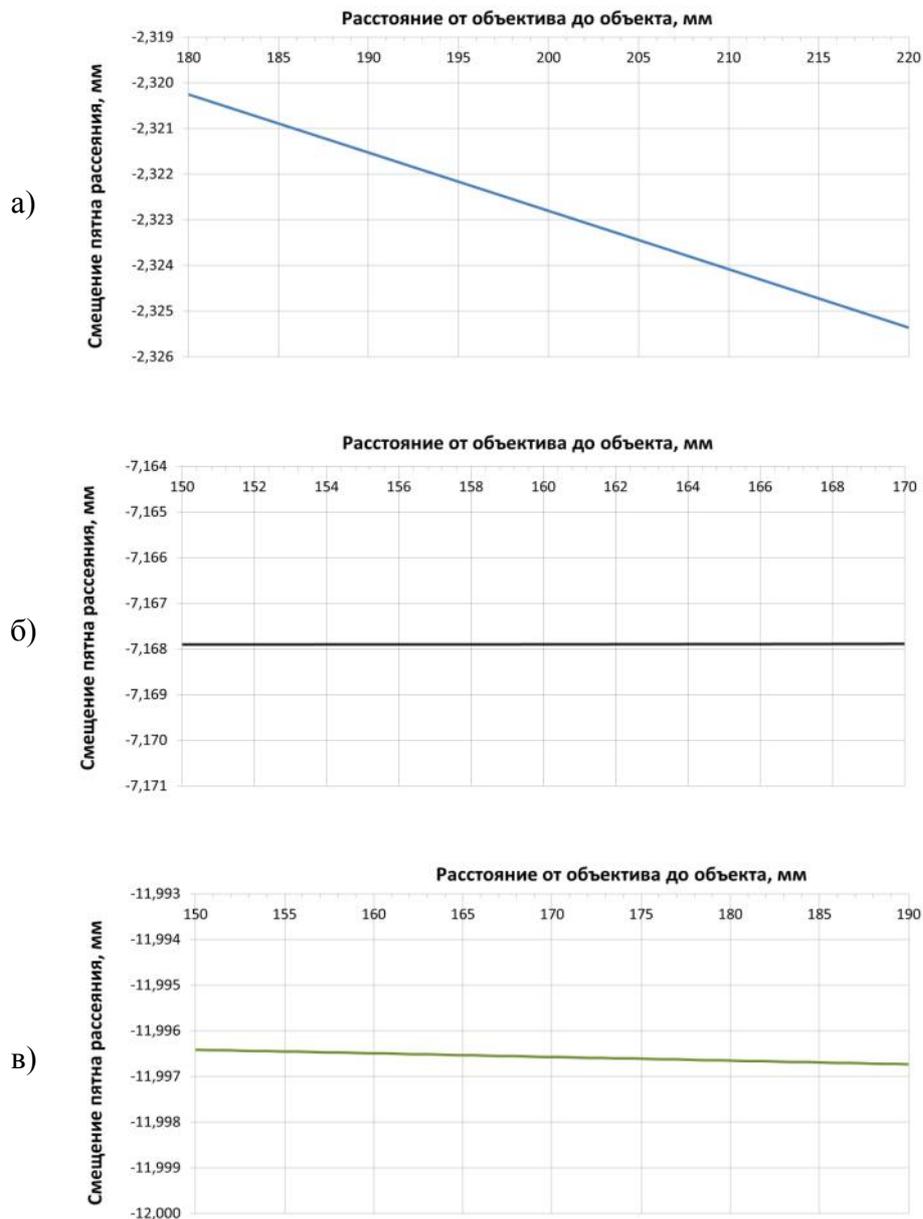


Рисунок 3.18 – График смещения пятна рассеяния при смещении объекта вдоль оптической оси для объективов: а) "Кольцо" $0,155^X$, б) "КБК" $0,189^X$, в) "Решетка" $0,097^X$

Из рисунка 3.18 видно, что при смещении объекта в пределах глубины фокусировки (± 20 мм), максимальное смещение центроиды пятна рассеяния наблюдается для объектива "Кольцо" $0,155^X$ и при определении размера объекта составляет 5 мкм.

3.4.5 Оценка влияния допусков на дисторсию объектива

Проведен анализ допусков изготовления оптических компонентов объектива и его сборки. При моделировании оценивалось влияние децентрировок и наклонов поверхностей линз и элементов в целом.

Проведена оценка влияния допусков методом Монте-Карло: на рисунке 3.19, а показано смещение дисторсии по всему полю; на рисунках 3.19, б, в приведены графики дисторсий при тех же параметрах оптической схемы в двух противоположных направлениях.

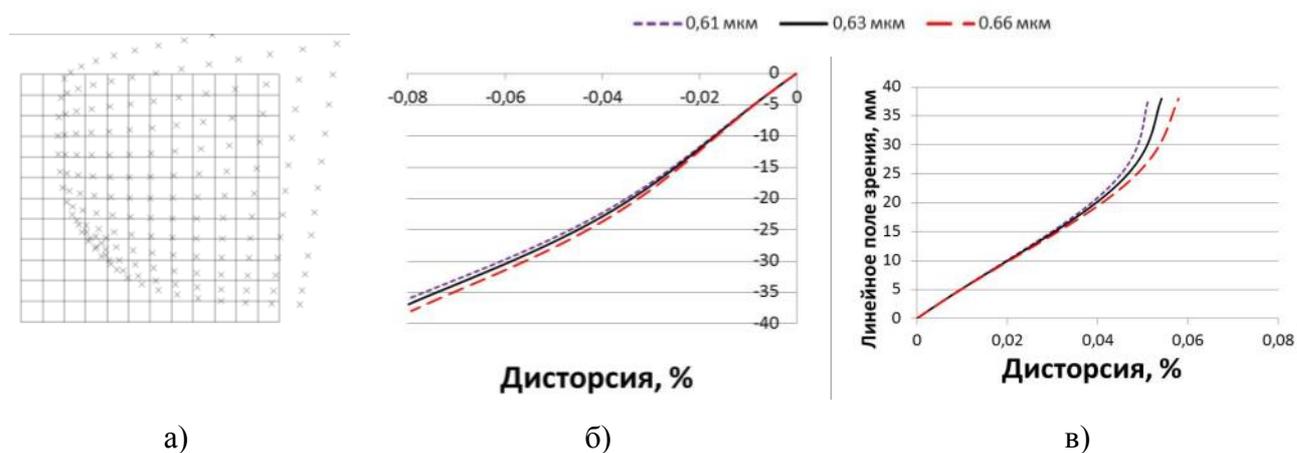


Рисунок 3.19 – Оценка влияния допусков методом Монте-Карло на объектив "КБК" $0,189^X$: а) смещение дисторсии по всему полю, б) графики дисторсии в положительном направлении поля, в) график дисторсии в отрицательном направлении поля

Из рисунка 3.19 видно, что при изготовлении объектива возможно появление существенной несимметричности дисторсии по полю. На эти aberrации влияют в большей степени децентрировка поверхностей элементов объектива, расположенных после апертурной диафрагмы, в меньшей мере наклон их поверхностей и децентрировка последнего компонента. Наклон первого компонента влияет на ухудшение телецентричности.

Влияние положения линз, расположенных после апертурной диафрагмы, уменьшается при большем увеличении системы (увеличиваются диаметры линз), что возможно при применении матриц большего размера. Поэтому для улучшения качества объективов

рекомендуется либо ужесточать допуски к изготовлению оптических элементов и всего объектива в целом, либо применять более широкоформатные матрицы.

3.4.6 Тепловой анализ объектива

Термоанализ проводился для самого протяженного объектива "Решетка" $0,097^X$, так как влияние температуры максимально при увеличении длины объектива. На работу разработанного объектива влияют такие факторы окружающей среды, как температура и давление окружающего воздуха. При анализе учитывались три фактора. Во-первых, показатель преломления стекла зависит от температуры и от длины волны; относительные показатели преломления, измеренные относительно воздуха, также изменяются с изменением давления. Во-вторых, стекло расширяется или сжимается при изменении температуры, которая может изменить радиус и толщину линзы. В-третьих, интервалы между элементами оптической системы могут изменяться из-за расширения или сокращения материала линз [88].

С помощью ПО ZEMAX был проведён термоанализ разработанного объектива. Термоанализ объектива проводился в диапазоне 30° (от 10°C до 40°C). В качестве номинальных условий окружающей среды (температуру и давление при сборке объектива) были выбраны температура 20°C , давление 1 атмосфера. Использование системы при пониженном давлении (увеличения высоты над уровнем моря) не предполагалось. Коэффициенты температурного расширения (КТР) стекол взяты из каталога ЛЗОС, материал корпуса объектива – дюралюминий. Все КТР используемых материалов представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – КТР используемых материалов

Материал	КТР, 10^{-6} K^{-1}
Дюралюминий	22,6
Плавленый кварц	0,51
Стекло ТФ2	7,8
Стекло К8	7,6
Стекло СТК9	5,7

В ходе анализа изменялись радиусы кривизны оптических поверхностей, толщины линз, толщины воздушных промежутков (размеры корпуса объектива), показатель преломления стекол.

Функция рассеяния точки (ФРТ) для всего диапазона представлена на рисунке 3.20. Для имитации изменения температуры в промышленных условиях, анализ проводился без дополнительной подстройки системы.

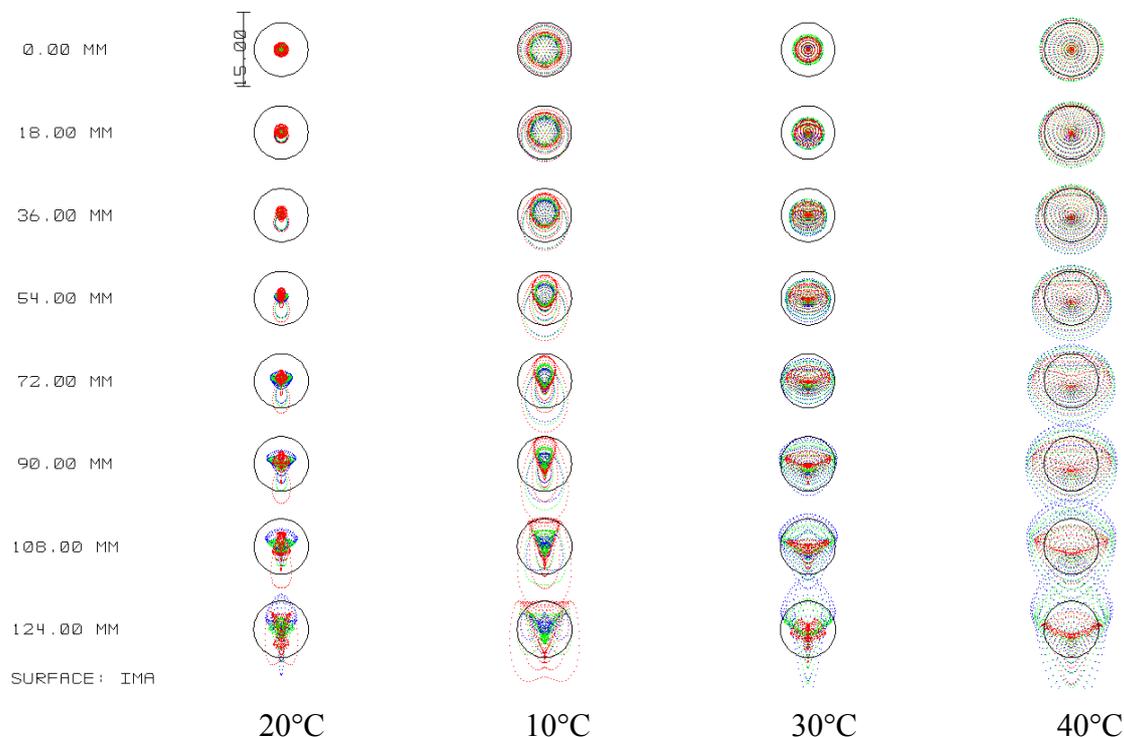


Рисунок 3.20 – ФРТ при тепловом анализе разработанного объектива для разных точек поля зрения при разных температурах, кружком обозначен диск Эйри

Видно, что при температуре 30°C изображение можно считать приемлемым (изображение точки практически не превышает диаметр диска Эйри), тогда как при нагреве температуры окружающей среды до 40°C происходит значительная расфокусировка объектива (больше дифракционного предела). Это объясняется большой протяженностью объектива (800 мм), значительной зависимостью материала корпуса от температуры (таблица 3.5) и большим тепловым влиянием на асферическую поверхность по сравнению со сферической.

Проведенное моделирование свидетельствует о необходимости термостабилизации атмосферы вокруг приемной части оптической системы. Этого можно добиться, поместив приемный объектив в теплоизолированный кожух (например, пенополиуретановый), а также путем исключения попадания падения прямых солнечных лучей на измерительную установку.

Выводы по главе 3

В главе 3 показан подход к проектированию в ПО ZEMAX телецентрических объективов с высокой телецентричностью и ортоскопичностью. Сформулированы общие требования к разработке телецентрической оптической системы, на основе которых проводится расчет телецентрических объективов для различных размеров объектов.

Приведены оптические схемы и графики aberrаций трех объективов, спроектированных для использования в системах геометрического контроля изделий в промышленном производстве: объектива "Кольцо" $0,155^X$ с диаметром поля зрения 50 мм для контроля керамических колец, дисторсией менее 0,02 % и телецентричностью в пространстве предметов менее $0,028^\circ$; объектива "КБК" $0,189^X$ с диаметром поля зрения 80 мм для контроля бронеплиток, дисторсией менее 0,01 % и телецентричностью в пространстве предметов менее $0,01^\circ$; объектива "Решетка" $0,097^X$ с диаметром поля зрения 250 мм для контроля перемешивающих решеток, дисторсией менее 0,015 % и телецентричностью в пространстве предметов менее $0,019^\circ$. Разработанные оптические схемы содержат малое количество оптических элементов (не более 7 вместо более 10). Все элементы систем максимально сдвинуты к апертурной диафрагме, благодаря чему уменьшаются диаметры изготавливаемых линз. Показан анализ aberrаций, вносимых каждым компонентом системы, который позволит минимизировать их при разработке дальнейших модификаций объективов.

Проведено моделирование изменения дисторсии и телецентричности при смещении объекта вдоль оптической оси и по полю зрения объектива, выполнен тепловой анализ объектива, оценено влияние допусков изготовления компонентов объектива на дисторсию и телецентричность.

Проведен анализ влияния остаточных aberrаций объективов и допусков их изготовления на качество получаемого изображения. Показано, что наибольшее влияние на определение размеров изделия вносят несимметричные aberrации объективов: дисторсия, кома, астигматизм, а также нетелецентричность объектива, которая прямо пропорциональна дисторсии.

С помощью моделирования установлено, что из-за изменения дисторсии при смещении объекта измерения вдоль оптической оси объектива возникает смещение положения пятна, которое вносит существенную ошибку измерений в определение размера изделий системой геометрического контроля (для объектива "КБК" $0,189^X$ такая погрешность составляет 10 мкм).

Продемонстрировано, что применение асферической поверхности в объективе позволяет увеличить телецентричность системы более чем в 1,5 раза при увеличении поля зрения в 5 раз. Установлено, что можно рассчитать телецентричность таким образом, чтобы на заданном поле зрения её влияние было минимально (график телецентричности переходит через нулевое значение).

При перемещении объекта вдоль оптической оси происходит смещение центроиды пятна рассеяния за счет изменения его формы и остаточной нетелецентричности (для объектива "Кольцо" $0,155^X$ такая погрешность составляет 5 мкм). Повышение телецентричности объектива ведёт к уменьшению указанного смещения до величины менее 1 мкм.

В результате оценки влияния допусков изготовления и сборки компонент системы на дисторсию и телецентричность объективов показано, что даже небольшое смещение (40 мкм) элементов объектива, расположенных после апертурной диафрагмы, приводит к ухудшению качества его изображения ниже дифракционного. Наибольшее влияние вносит децентрировка оптических поверхностей и элементов в целом. Влияние положения этих линз уменьшается при большем увеличении объектива за счет роста диаметров линз, расположенных после апертурной диафрагмы, что возможно при применении фотоприемных матриц большего размера. Поэтому для улучшения качества объективов рекомендуется либо ужесточать допуски к изготовлению оптических элементов и всего объектива в целом, либо применять более широкоформатные матрицы.

В результате теплового анализа установлено, что необходима термостабилизация атмосферы вокруг приемной части оптической системы (при изменении температуры окружающей среды на 20°C происходит ухудшение качества изображения внеосевых пучков ниже дифракционного). Термостабилизации можно добиться, поместив приемный объектив в теплоизолированный кожух (например, пенополиуретановый), а также исключив падение прямых солнечных лучей на измерительную установку.

ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования теневого проекционного канала

В главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния параметров теневой проекционной системы на формирование изображений трехмерных объектов. Предложена методика тестирования оптических характеристик телецентрических объективов в составе системы контроля для оценки качества изготовления объективов.

Экспериментальные исследования теневого проекционного канала выполнялись в двух направлениях. Первая часть посвящена экспериментальному изучению влияния различных параметров системы на формируемое теневое изображение. Полученные результаты использованы для выбора характеристик осветительного и приемного блоков при проектировании систем контроля.

Вторая часть экспериментов нацелена на апробацию методики определения оптических характеристик телецентрических объективов после их изготовления. Разработка такой методики необходима для учета дополнительных ошибок, обусловленных несовершенством изготовления линз и последующей сборки, которые приводят к несимметричному относительно оптической оси распределению аберраций по полю зрения и, соответственно, к увеличению погрешности измерений системы. Уникальность разработанной методики состоит в возможности одновременного измерения на одном стенде дисторсии, телецентричности, разрешения, увеличения и частотно-контрастной характеристики телецентрического длиннофокусного объектива. В результате тестирования объектива выявляются несовершенства его изготовления и сборки, а также формируется калибровочная кривая оптического канала, использование которой уменьшает погрешность измерений системы на десятки микрометров.

4.1 Используемые компоненты системы

В зависимости от параметров оптической системы на фотоприёмнике формируются изображения различной структуры. Для увеличения чувствительности метода, уменьшения погрешности системы контроля, поставляемой на производство, а также для использования одной системы для большой номенклатуры изделий необходимо представлять физические основы формирования теневого изображения. Имея это представление можно давать конкретные рекомендации к компонентам разрабатываемой системы – в первую очередь к оптической части.

Всю систему промышленного теневого проекционного контроля можно разбить на четыре блока: освещающая часть, контролируемый объект, приемная часть, устройство анализа измерительной информации и её обработки. В свою очередь, каждый из блоков состоит из своих компонент и заслуживает отдельного исследования. Ниже представлено описание используемых компонентов этих блоков и их характеристики.

Источники излучения. Важным параметром освещения является степень его когерентности, от которой зависит характер получаемого изображения. Нами были рассмотрены три варианта осветителей: абсолютно-когерентный на основе лазера, частично-когерентный с использованием светодиода и абсолютно некогерентный на базе матрицы светодиодов.

Абсолютно-когерентный источник включает лазер 1 и коллиматор 2, отстоящий от него на фокусное расстояние (рисунок 4.1). Достоинствами абсолютно-когерентного осветителя является его большая энергетическая эффективность и меньшее влияние объемности за счёт того, что формируется плоская волна света, падающая на объект. Однако такое освещение критично к наличию дефектов на элементах системы (коллимирующем объективе, объекте) вследствие возникновения спеклов.

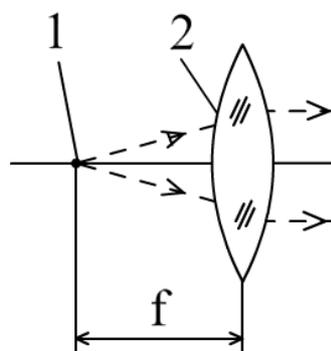


Рисунок 4.1 – Оптическая схема лазерного абсолютно-когерентного осветителя:
1 – лазер, 2 – коллиматор

В случае светодиодного осветителя, источник света – светодиод 1 – располагается в фокусе коллимирующего объектива 2 (рисунок 4.2). Достоинствами такого осветителя является доступность, дешевизна, большая номенклатура имеющихся светодиодных источников, а также отсутствие спекл-шумов благодаря некогерентному излучению светодиода в узкой спектральной полосе.

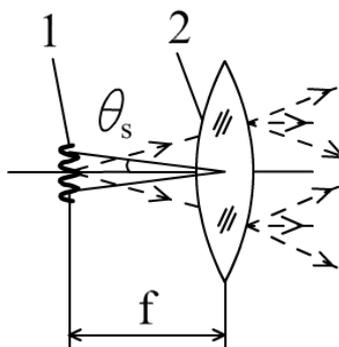


Рисунок 4.2 – Оптическая схема светодиодного частично когерентного осветителя:
1 – светодиод, 2 – коллиматор

Матовый осветитель, реализующий абсолютно некогерентное освещение, основан на использовании матрицы светодиодов 1 и диффузора – матового рассеивателя 2 на базе молочного стекла (рисунок 4.3). В этом случае объект освещается некогерентными волнами с различными наклонами и фазами, в результате чего на выходе осветительной системы формируется равномерное освещающее поле.

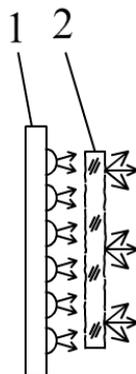


Рисунок 4.3 – Оптическая схема матового абсолютно некогерентного осветителя:
1 – матрица светодиодов, 2 – матовый рассеиватель

В измерительных теневых проекционных системах для формирования теневых изображений контролируемых объектов часто используются частично-когерентные осветители [92]. В процессе выполнения работы, кроме частично-когерентного освещения объекта применялся абсолютно некогерентный источник освещения на базе матового осветителя.

В качестве частично-когерентного осветителя использовались светодиодные кластеры марки Cree Xlamp XR LED ($\lambda=620-635$ нм) и Cree Xlamp XLD-AC1x01-XPC-11-GRN ($\lambda=520-525$ нм), вставленные в пластиковый рассеивающий тубус, на конце которого закреплено молочное стекло (рисунок 4.4).

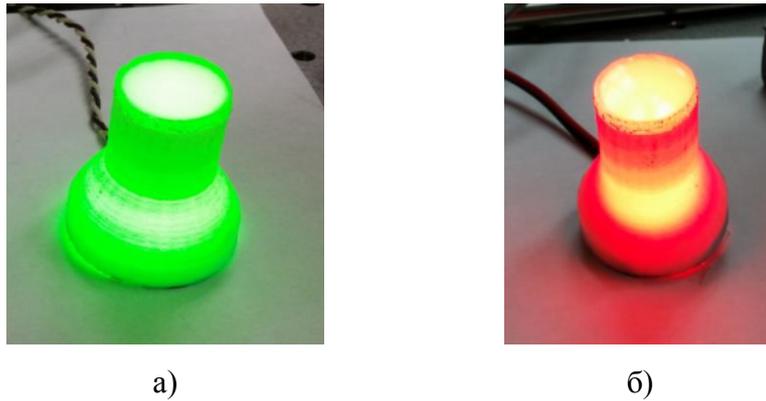


Рисунок 4.4 – Внешний вид светодиодного кластера в пластиковом тубусе с молочным стеклом: а) $\lambda=520-525$ нм, б) $\lambda=620-635$ нм

За молочным стеклом на тубусе по ходу оптического луча устанавливается ирисовая диафрагма, позволяющая изменять размер осветителя (рисунок 4.5). Благодаря использованию тубуса удается практически совместить молочное стекло с ирисовой диафрагмой, установленной в фокус коллимирующего объектива Индустар 37 4,5/300.

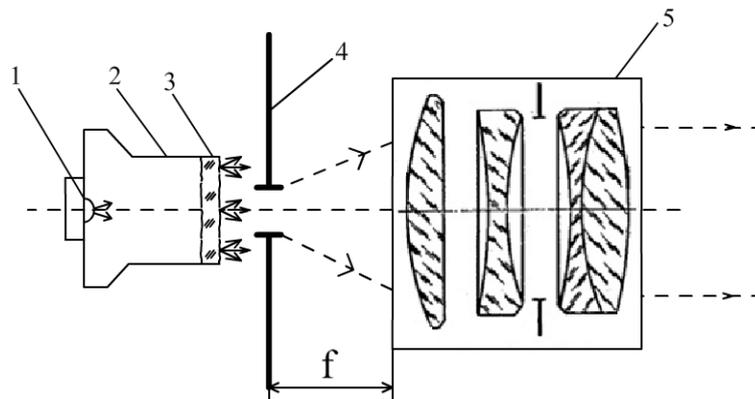


Рисунок 4.5 – Схема оптическая частично-когерентного осветителя: 1 – светодиодный кластер, 2 – тубус, 3 – молочное стекло, 4 – ирисовая диафрагма, 5 – коллимирующий объектив Индустар 37

В качестве матового источника освещения использовался белый светодиодный модуль ОМА-W100H86-30FB (цветовая температура 3000 К) с расположенным после него молочным стеклом (рисунок 4.3).

Объекты измерения могут иметь разную геометрическую форму (цилиндр, щель, толстый брусок и др.), геометрические характеристики (форма края, наличие фасок, наклон относительно оптической схемы), оптические характеристики (прозрачность, коэффициенты

отражения и рассеяния). Всё это влияет на формирование теневого проекционного изображение объекта и, соответственно, на положение теневой границы объекта.

Одной из важных оптических характеристик объекта являются его рассеивающие свойства. Поскольку в нашей системе используется телецентрический объектив в пространстве предметов, то рассеивающие свойства контролируемого изделия не должны вносить значительного влияния в формирование теневого изображения (телецентрический объектив в пространстве предметов "видит" только лучи от объекта, практически параллельные оптической оси). Протяженность и положение самого объекта оказывают большее влияние на формирование теневого изображения, как это показано в главе 2.

Объекты измерений для установок контроля описаны в главе 3. В экспериментальном стенде использовались как реальные объекты измерений – шестигранники из белой керамики толщинами 4, 10, 12 мм (рисунок 3.2), так и упрощенные объекты для того, чтобы не вносить дополнительную ошибку в измерения за счет сложной формы изделия: металлические зеркальные калибры толщинами 2, 4, 6, 10, 12 мм (рисунок 4.6); аналогичные металлические матовые калибры толщинами 2, 4, 6, 10, 12 мм; лезвие бритвы (моделирование тонкого объекта).

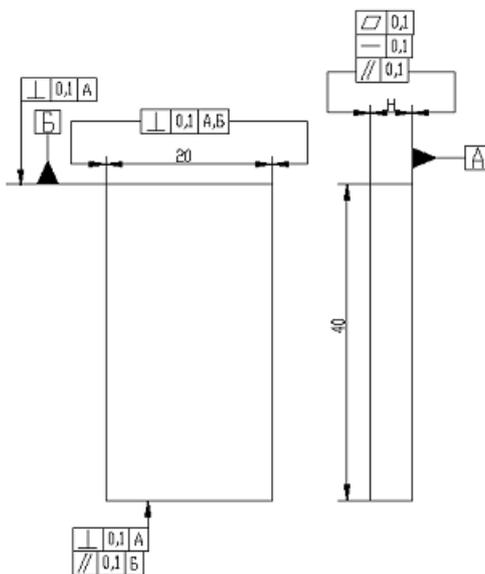


Рисунок 4.6 – Эскиз металлического калибра

Проекционная система теневого канала состоит из телецентрического объектива (подробно рассмотрен в главе 3) и цифровой камеры, на которую проецируется теневое изображение.

Телецентрические объективы. Исследовались три телецентрических в пространстве предметов объектива: один зарубежный объектив Thorlabs MVTC23024 BI-TELECENTRIC

0,243^X (рисунок 4.7) и два спроектированных и изготовленных в КТИ НИ СО РАН – объектив "КБК" 0,189^X (рисунок 4.8) и объектив "Кольцо" 0,155^X (рисунок 4.9).

Эскиз объектива Thorlabs MVTC23024 0,243^X показан на рисунке 4.7, его оптические характеристики представлены в таблице 3.4. Параметры фотоприемной матрицы Smosis CMV2000, которая использовалась совместно с объективом, показаны в таблице 4.1.

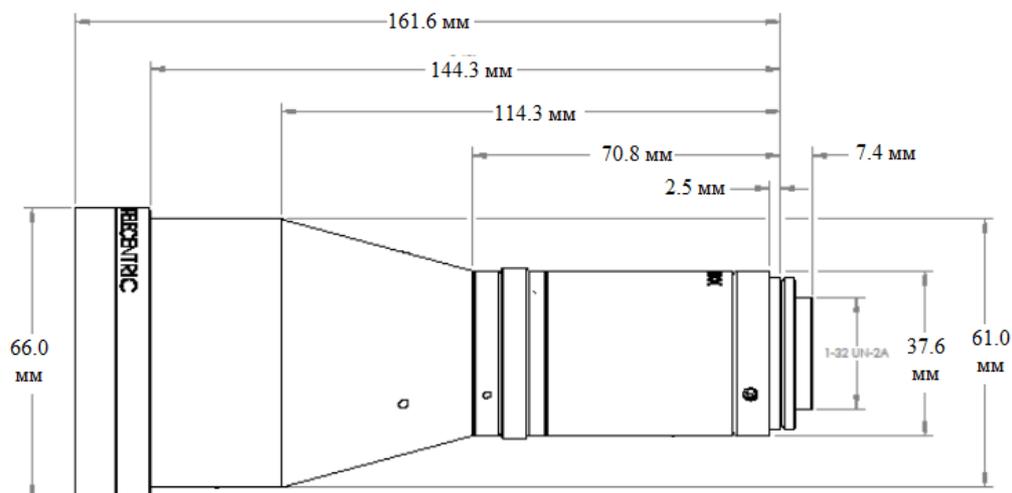


Рисунок 4.7 – Эскиз бителецентрического объектива Thorlabs MVTC23024 0,243^X

Объектив "КБК" 0,189^X использовался совместно с матрицей Smosis CMV4000, характеристики которой приведены в таблице 4.1. Оптическая схема объектива показана на рисунке 4.8, его рассчитанные параметры представлены в таблице 3.4.

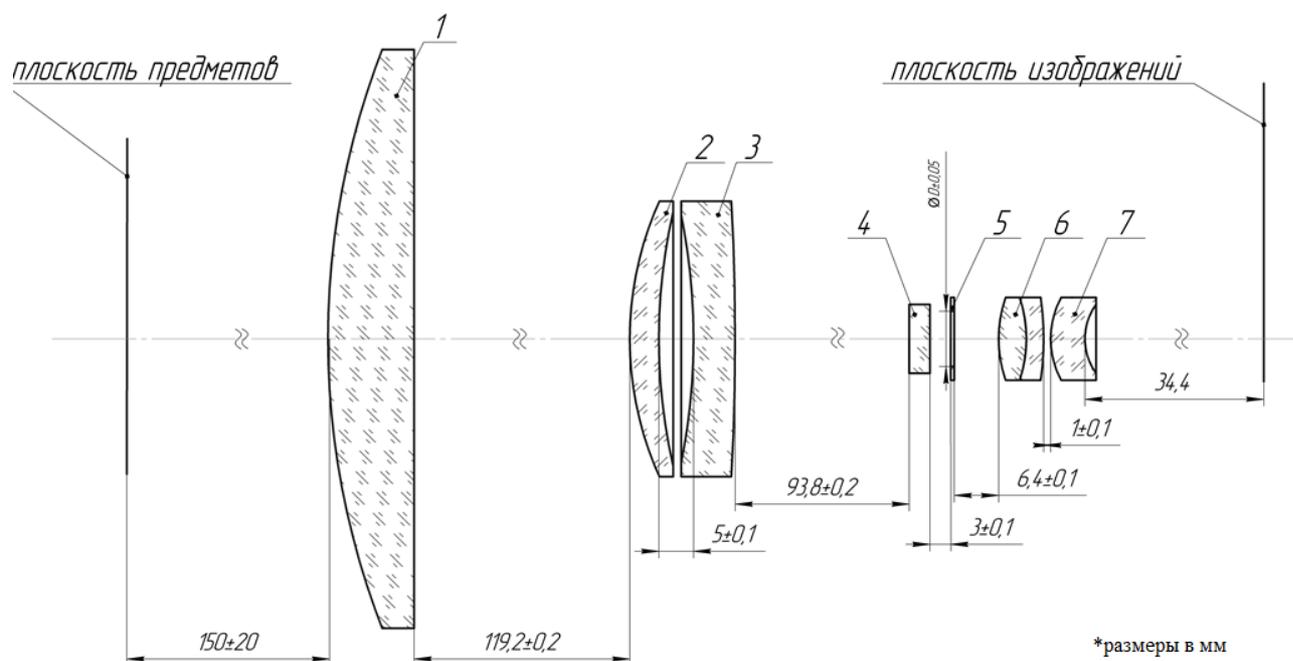


Рисунок 4.8 – Оптическая схема объектива "КБК" 0,189^X

Объектив "Кольцо" $0,155^X$ использовался совместно с матрицей IBIS4-A-6600 CYP4SM6600AB, характеристики которой приведены в таблице 4.1. Оптическая схема объектива показана на рисунке 4.9, его рассчитанные параметры представлены в таблице 3.4.

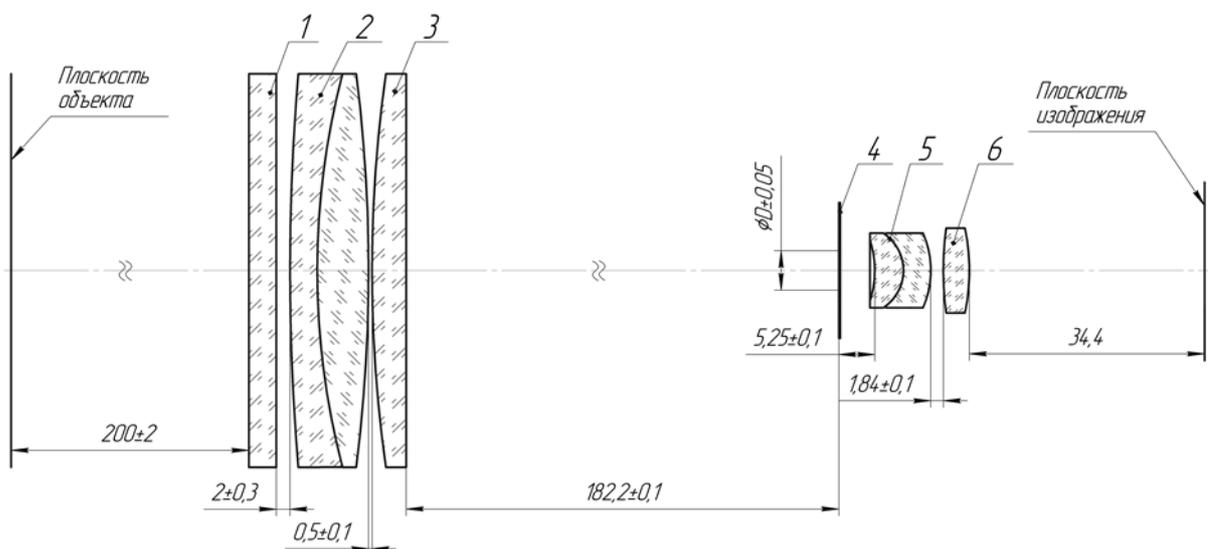


Рисунок 4.9 – Оптическая схема объектива "Кольцо" $0,155^X$

На рисунке 4.10 показана фотография трёх исследованных объективов.



Рисунок 4.10 – Внешний вид объективов: 1 – "КБК" $0,189^X$, 2 – "Кольцо" $0,155^X$, 3 – Thorlabs MVTС23024 $0,243^X$

Фотоприёмники. От характеристик фотоприёмника напрямую зависит качество получаемого изображения, и, соответственно, алгоритм программной обработки. В цифровой камере для улучшения разрешения проекционной системы были применены монохроматические матрицы с высоким разрешением, при выборе которых существенными являются большой размер матрицы и количество пикселей из-за относительно большого

поля зрения объектива и сравнительно малого его увеличения. Для регистрации изображения в экспериментах использовались КМОП камеры разработки КТИ НП [93].

Так как теневой проекционный канал работает в стационарном режиме, то для получения теневого изображения от фотоприемной матрицы не требуется большой скорости считывания кадров и чувствительности, следовательно, в этом случае возможно использование бегущего затвора. В экспериментальных стендах использовались три фотоприемных матрицы: Cmosis CMV2000, Cmosis CMV4000 и IBIS4-A-6600 CУИ4SM6600AB. Характеристики матриц приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Характеристики фотоприемных матриц

Тип матрицы	CMV2000	CMV4000	IBIS4-A-6600
Совмещенный объектив	Thorlabs MUTC23024	"КБК" 0,189 ^X	"Кольцо" 0,155 ^X
Максимальное разрешение, пикселей	2048x1088	2048x2048	2210x3002
Размер пикселя, мкм	5,5x5,5	5,5x5,5	3,5x3,5
Размер изображающей матрицы, мм	11,264x5,984	11,264x11,264	7,74x10,51
Тип затвора	Кадровый (global shutter)	Кадровый (global shutter)	Бегущий (rolling shutter)
Частота кадров, кадр./с	70	37	5

Апертурная диафрагма телецентрического объектива, являющаяся составной частью проецирующего объектива, – одна из основных его компонентов. В качестве апертуры использовалась диафрагма в виде отверстия, размер которой изменялся для формирования теневого и телевизионного изображения (ирисовая диафрагма). Форма апертурной диафрагмы выбирается круговой для формирования симметричной теневой картины. Плоскость диафрагмы оптически сопряжена с плоскостью изображения источника. Боковое отклонение положения диафрагмы от осевого приводит к появлению добавочной погрешности измерений.

Программные способы обработки изображений. Методика определения геометрических параметров объекта в теневом проекционном приборе предусматривает

нахождение координат его краёв и последующее вычисление по ним требуемых параметров. Типичные теневые изображения края показаны на рисунке 4.11. На рисунке 4.11, а показан исходный, на рисунке 4.11, б – обработанный с помощью ПО фрагмент изображения. На исходном фрагменте изображения видны области света, полутени и тени, обозначена область обработки изображения. На обработанном фрагменте показана область обработки изображения, проведено отсечение уровня черного (для отсечения шумов матрицы) и показано положение края, полученное в результате обработки. Распределение интенсивности света в окрестности границы края приведено на рисунке 4.11, в.

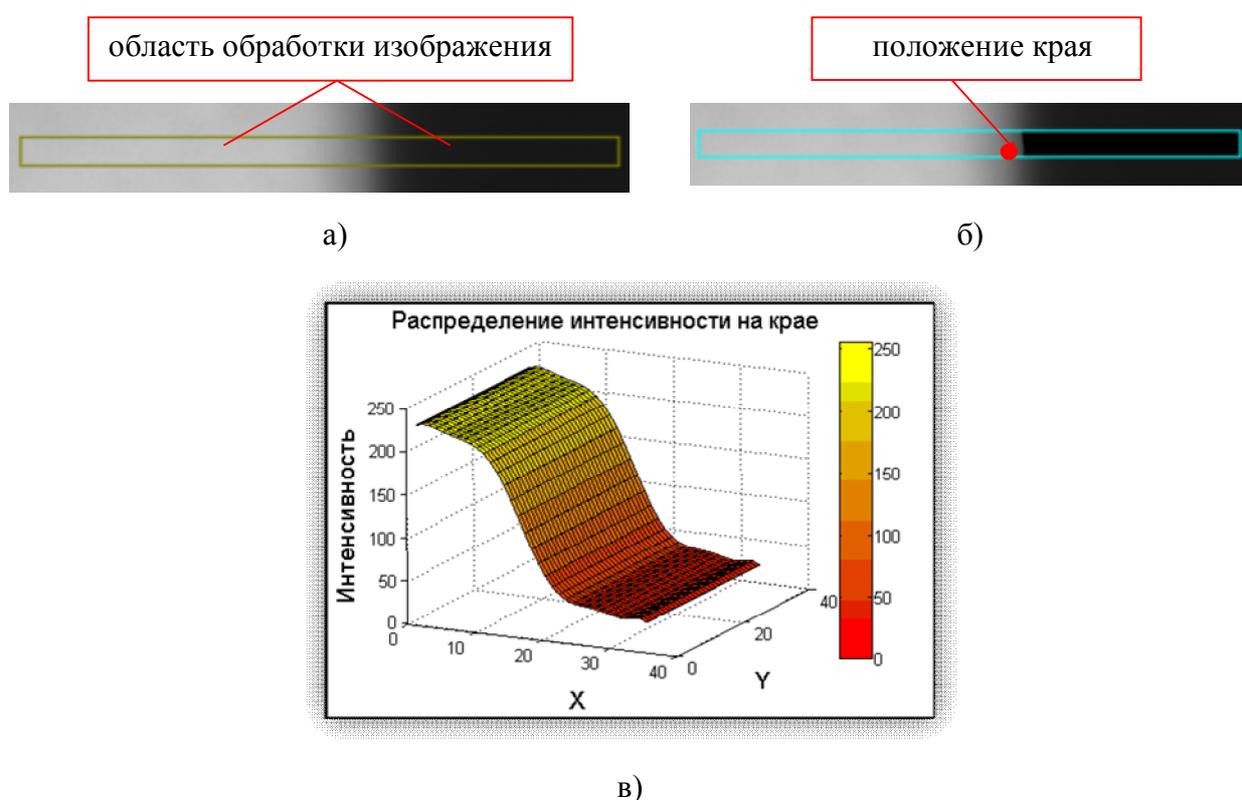


Рисунок 4.11 – Теневое изображение края: а) исходное; б) обработанное изображение, в) график распределения интенсивности света в окрестности края объекта

ПО для обработки теневых изображений последовательно осуществляет следующие операции: сначала для выравнивания равномерности освещенности осуществляется световая коррекция кадра по предварительно полученным световому и темному кадрам. По пустому полю (в отсутствии объекта) нормируется освещенность изображения по всему полю, убирается так называемый "колокол", возникающий за счет виньетирования отдельными деталями приемного объектива и неравномерной засветки рабочей области осветителем. Эта

операция производится для дальнейшего определения максимального ($I_{max}=1$) и минимального ($I_{min}=0$) уровней в поле измерения.

Затем производится коррекция дисторсии полученного кадра: по миру вычисляется двумерная дисторсия по полю и в соответствии с ней смещается каждая точка поля. Калибровка по миру осуществляется для учета остаточных aberrаций реального объектива (преимущественно дисторсии, т.к. именно она даёт максимальное смещение положения точки по полю при обработке программным обеспечением). Точечная мира представляет собой стеклянную пластинку с нанесенным непрозрачным слоем хрома, на которую методом прямой лазерной записи с высокой точностью (погрешность не более 0,1 мкм) нанесен рисунок в виде малых кружков диаметром 0,25 мм, расположенных в узлах квадратной сетки с шагом 0,5 мм (рисунок 4.12). Мира изготовлена в амплитудном исполнении на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300С/М в КТИ НИ СО РАН [94].

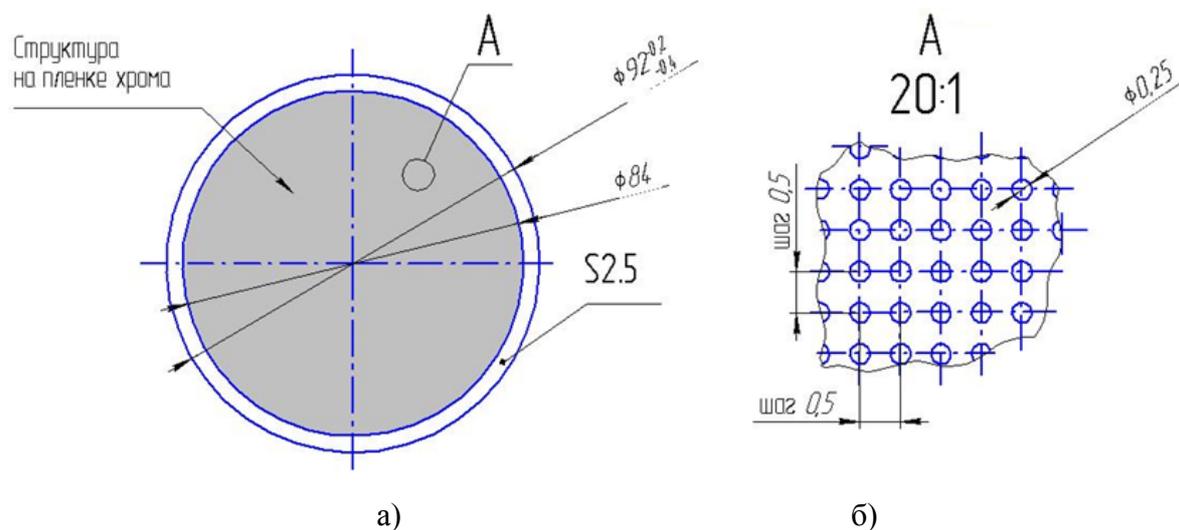


Рисунок 4.12 – Эскиз мира для объектива "КБК" 0,189^X: а) общий вид, б) увеличенный фрагмент

Далее полученный профиль интенсивности света по каждой строке аппроксимируется прямой в линейной области и согласно пороговому методу обработки изображений определяется положение точки на пограничной кривой, в которой интенсивность имеет промежуточное значение, соответствующее истинному положению края элемента.

4.2 Предварительная юстировка экспериментального стенда

Во всех экспериментах контроль плоскостности сколлимированного пучка осуществлялась с помощью датчика Шака-Гартмана [95]. Внешний вид схемы контроля плоскостности луча представлен на рисунке 4.13.

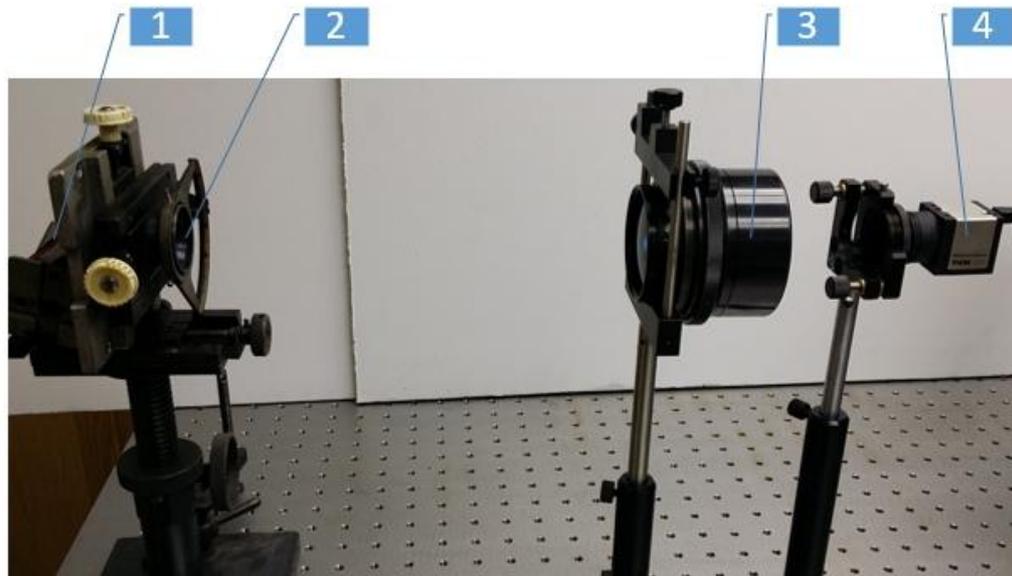


Рисунок 4.13 – Контроль плоскостности освещающего пучка: 1 – светодиод, 2 – диафрагма, 3 – коллиматор, 4 – датчик Шака-Гартмана

В качестве примера на рисунке 4.14 показан зарегистрированный волновой фронт, сформированный осветителем. По рисунку 4.14 видно, что пучок хорошо сколлимирован, радиус кривизны пучка, согласно датчику Шака-Гартмана, составляет порядка 100 м.

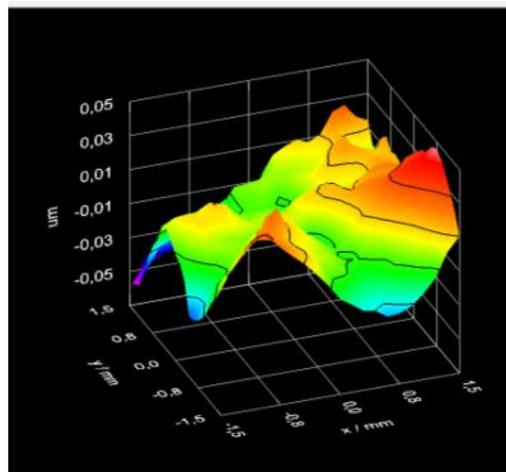


Рисунок 4.14 – Волновой фронт по датчику Шака-Гартмана, сформированный осветителем

Перед каждым экспериментом проводилась калибровка канала по точечной mire (рисунок 4.12) для корректировки остаточной дисторсии изображения в одном расчетном положении. При изменении расстояния от объекта до объектива происходит изменение дисторсии изображения, что приводит к неправильному определению положения края объекта. Такое изменение дисторсии объясняется влиянием остаточной нетелецентричности объектива.

Также была проверена линейность фотоприемной матрицы при увеличении интенсивности её освещения, определен порог нелинейности и все дальнейшие эксперименты проводились ниже полученного порога. Для проверки повторяемости эксперименты были проведены многократно в разное время.

4.3 Исследования влияния параметров системы контроля на измеряемый размер трехмерного объекта

Задача первой серии экспериментов заключалась в исследовании влияния конструктивных параметров проекционной теневой системы на формирование теневого изображения для применения в системах размерного контроля. Для этого необходимо получить зависимость размеров теневого изображения трехмерного объекта от диаметра апертурной диафрагмы $2\theta_{an}$, углового размера $2\theta_{ист}$ и длины волны света λ , толщины d и отражающих свойств объекта.

Чтобы уменьшить влияние неточности юстировки оптической схемы (несоосность оптических осей осветителя и приемного блока, смещение объекта под углом относительно оптической оси при его перемещении и прочее), в экспериментах рассматривалось относительное изменение горизонтального размера изображения объекта, а не его абсолютная величина.

Первая серия экспериментов проводилась на одном и том же стенде теневого проекционного канала. Исследовалось влияние различных параметров схемы на изменение размера теневого изображения объекта. Внешний вид экспериментального стенда показан на рисунке 4.15.

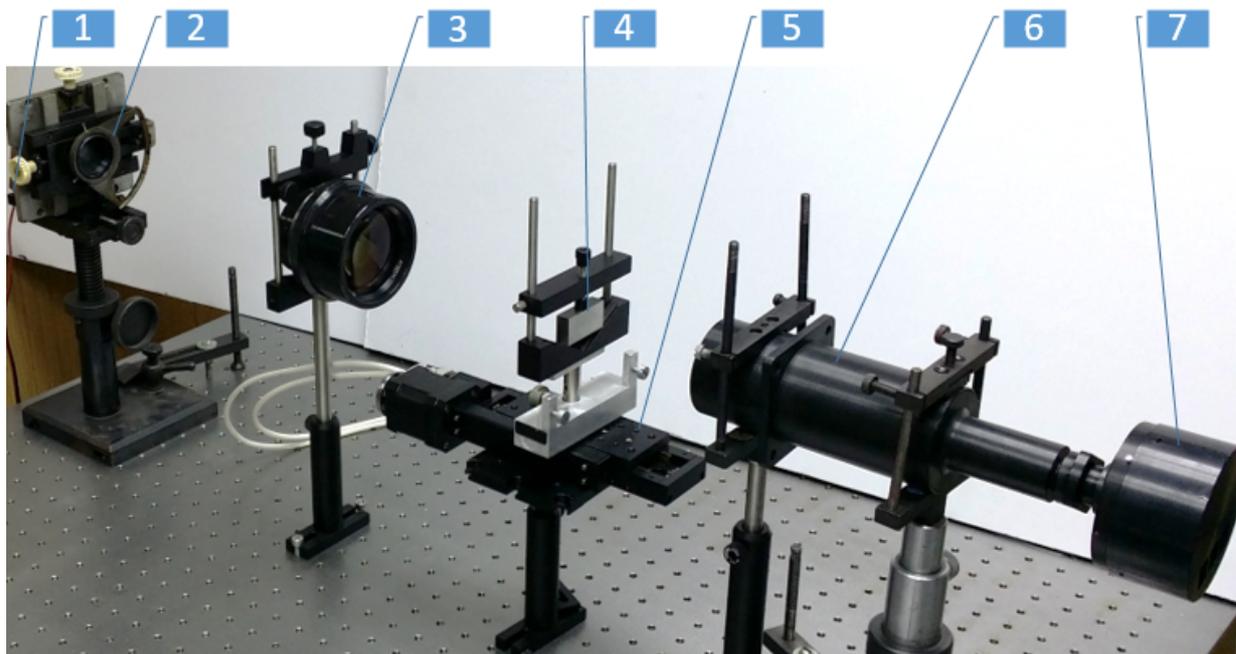


Рисунок 4.15 – Внешний вид стенда теневого проекционного канала: 1 – светодиод, 2 – диафрагма, 3 – коллиматор, 4 – объект измерений, 5 – линейный привод, 6 – телецентрический объектив, 7 – камера

4.3.1 Влияние относительного отверстия объектива на размер изображения объекта

Первый эксперимент заключался в определении изменения размера объекта в зависимости от относительного отверстия объектива. Протяженные объекты устанавливались в рабочем поле теневого проекционного прибора. В качестве приемного объектива использовался Thorlabs MVTС23024 0,243^X, имеющий в своей конструкции изменяемую апертурную диафрагму D_{an} (диапазон числовой апертуры объектива $f/\#$: $f/6.5$ - $f/22$). В качестве осветителя использовался светодиодный кластер Cree Xlamp XR LED (таблица 4.1).

На фотоприёмной матрице регистрировалось теньовое изображение объекта. Объект и осветитель были неподвижными, апертурная диафрагма приемного объектива D_{an} изменялась во всем диапазоне, при этом регистрировались изображения. Размер объекта определялся по результатам программной обработки его изображения. Зависимость размера изображения объекта от радиуса апертурной диафрагмы показана на рисунке 4.16.

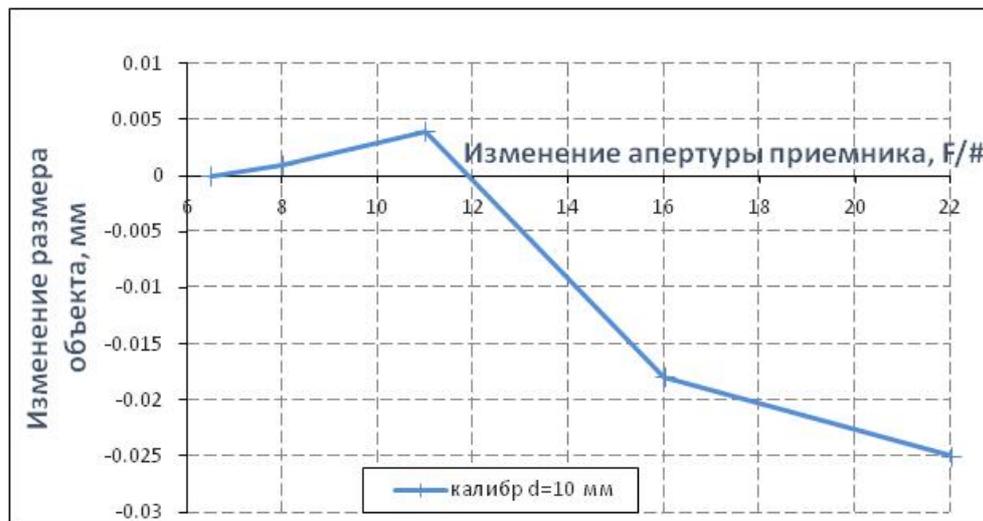


Рисунок 4.16 – Зависимость размера изображения объекта от размера апертуры телецентрического объектива Thorlabs

Из графика видно, что при изменении апертуры приемника происходит изменение размеров изображения объекта на величину 30 мкм. Следует обратить внимание, что в процессе измерений коррекция дисторсии и световая калибровка проводилась лишь по одному кадру для того, чтобы не вносить погрешность, обусловленную изменением положения объекта. Отсюда можно сделать вывод, что полученное изменение размеров объекта в большей степени обусловлено изменением аберраций объектива при изменении размера апертурной диафрагмы приемника.

4.3.2 Влияние диаметра осветителя на размер изображения объекта

Во втором эксперименте при неподвижном положении объекта и неизменном относительном отверстии объектива производилось изменение диаметра источника света. График зависимости размера изображения объекта от размера осветителя показан на рисунке 4.17.

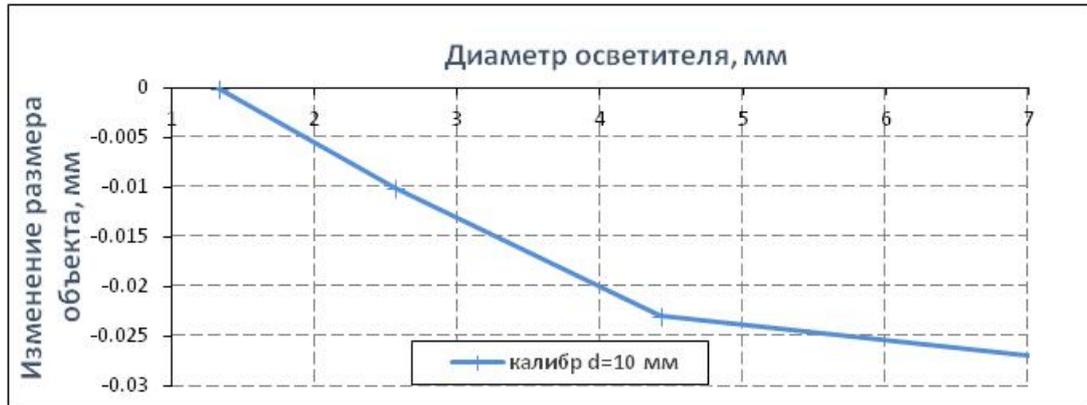


Рисунок 4.17 – Зависимость размера изображения объекта от диаметра осветителя

Видно, что при изменении диаметра осветителя происходит изменение регистрируемого размера объекта на 27 мкм. В первую очередь это обусловлено погрешностью калибровки при изменении освещения, так как в условиях, когда уровень засветки пустого кадра изменяется в зависимости от интенсивности излучения, калибровка работает некорректно. Кроме этого, важным фактором является эффект усреднения шумов по полю зрения при увеличении размера осветителя. Для иллюстрации на рисунке 4.18 приведены изображения пустого поля при использовании источника с малыми (приближение к когерентному случаю) и с большими угловыми размерами (приближение к некогерентному случаю).

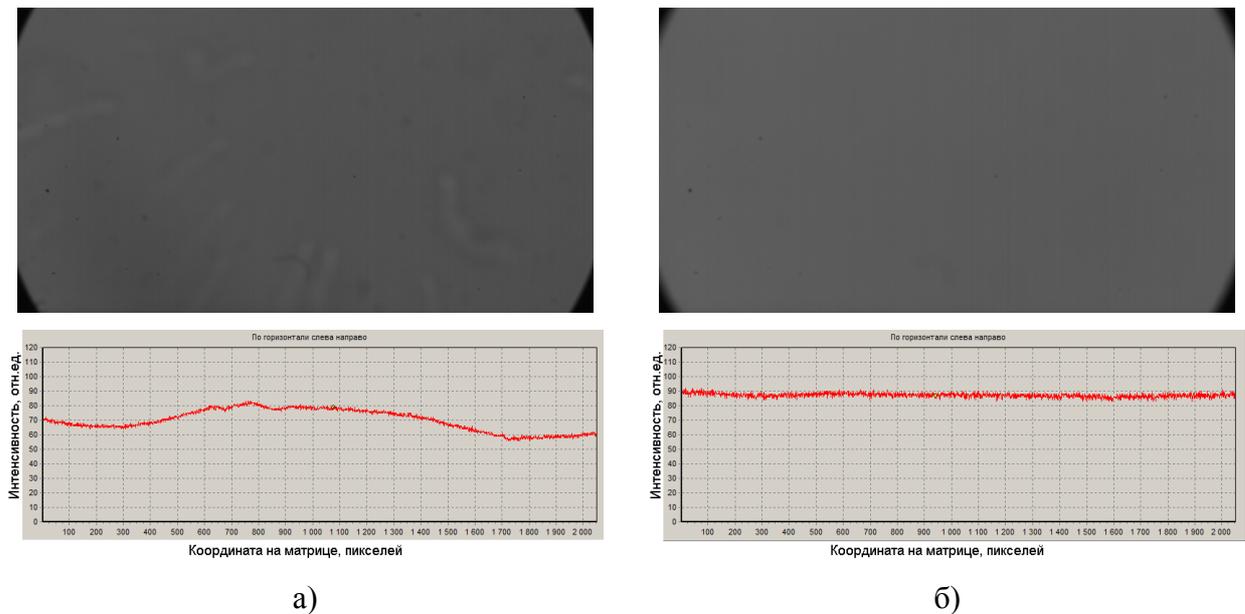


Рисунок 4.18 – Пустой кадр и профиль интенсивности в теновом проекционном канале:
а) малый диаметр осветителя, б) большой диаметр осветителя

Очевидно, что более равномерное освещение получается при увеличении площади осветителя. В этом случае дефекты в оптическом канале практически не видны, тогда как при малой апертуре осветителя (приближенная модель точечного источника) на поле визуализируются оптические неоднородности. Наблюдаемый излом в поведении графика на рисунке 4.17 соответствует случаю, когда угловой размер источника света равен угловому размеру апертурной диафрагмы. При увеличении углового размера осветителя его влияние на световые характеристики резко уменьшается. Отсюда можно сделать вывод, что для повышения точности измерений необходимо добиваться более равномерного освещения объекта, что достигается при увеличении углового размера источника света.

4.3.3 Влияние толщины объекта на размер его изображения

В третьем эксперименте исследовалось влияние объемности и оптических свойств протяженного объекта на изменение его размера. Объекты разной толщины (от 1 до 10 мм) устанавливались на рабочую позицию, изображение регистрировалось объективом "Кольцо" 0,155^x, затем с помощью ПО определялся размер объекта. На рисунке 4.19 представлены данные компьютерного моделирования при использовании конструктивной модели дифракции на протяженном крае при освещении частично-когерентным светом источником (глава 2) и результаты проведенного эксперимента. Видно, что отличие экспериментальных и теоретических данных в среднем не превышает нескольких микрометров, что свидетельствует о хорошем согласии экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов. Отличия между данными могут быть вызваны погрешностями юстировки и остаточными aberrациями оптической системы.

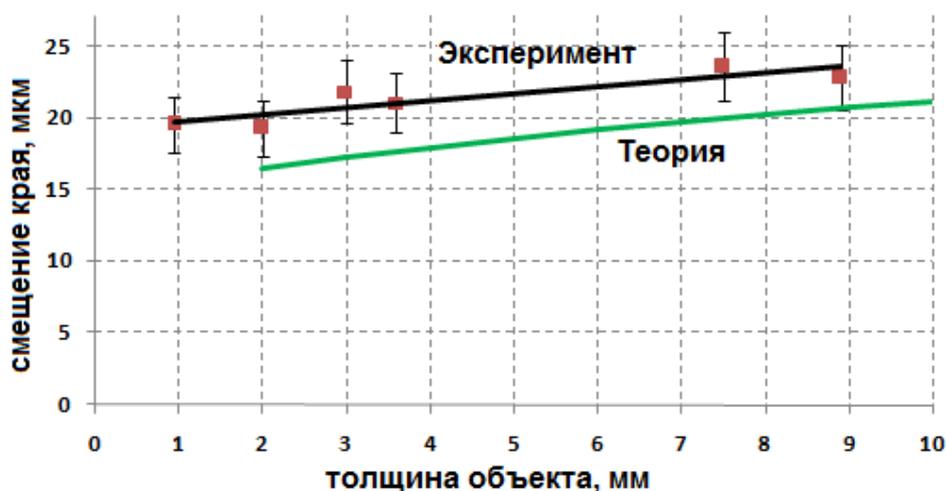


Рисунок 4.19 – Зависимость изменения размера изображения объекта от его толщины

Затем были проведены исследования влияния толщины объекта на определение его размеров при его перемещении вдоль оптической оси. Осветительная и проекционная (объектив Thorlabs MVTС23024, $f/\#$ 22) части оставались неизменными. Объект перемещался в рабочей области теневого проекционного канала вдоль оптической оси в диапазоне ± 20 мм с шагом 1 мм, при этом последовательно регистрировались его теневые изображения. Затем объект заменялся объектом другой толщины, проводилась повторная калибровка и эксперимент повторялся. Таким образом, была измерена зависимость определяемого размера от изменения расстояния от плоскости объекта до первой линзы объектива, а также от толщины объекта.

На рисунке 4.20 приведена одна из полученных зависимостей изменения размеров теневого изображения объектов разной толщины от положения объекта в измерительном объеме при фиксированном угловом размере источника света.

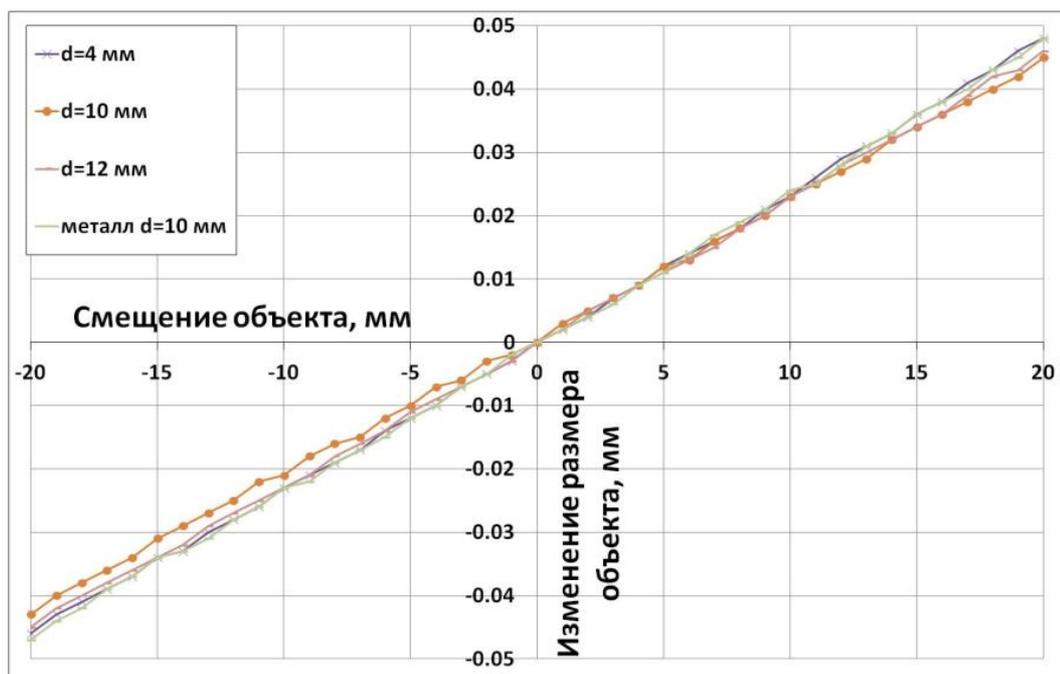


Рисунок 4.20 – Зависимость изменения размера изображения объекта от его смещения вдоль оптической оси, разным цветом обозначены объекты разной толщины

Можно видеть, что графики имеют линейную зависимость и для объектов разной толщины практически совпадают. Это свидетельствует о том, что при смещении объекта из рабочего положения влияние остаточной нетелецентричности объектива оказывается большим, чем влияние толщины объекта. Однако при выставлении объекта в требуемом фиксированном положении для обеспечения измерений с высокой точностью следует учитывать его толщину.

4.3.4 Влияние смещения объекта на определение его размера

В следующем эксперименте исследовалось влияние смещения объекта на определение его размера. Объект смещался вдоль оптической оси в диапазоне ± 20 мм от рабочего расстояния объектива. Направление движения объекта указано в направлении хода луча. Эксперимент последовательно проводился со всеми тремя объективами. Для объектива Thorlabs MVTС23024 были проведены исследования при трёх диаметрах апертурной диафрагмы. В качестве источника освещения использовался красный светодиод, при этом размер осветителя D варьировался. В качестве объекта использовался металлический калибр толщиной 10 мм. В экспериментах использовались частично-когерентный осветитель (рисунок 4.5) и абсолютно некогерентный источник на базе матового рассеивателя (рисунок 4.3).

Фотография стенда при использовании рассеянного освещения приведена на рисунке 4.21.

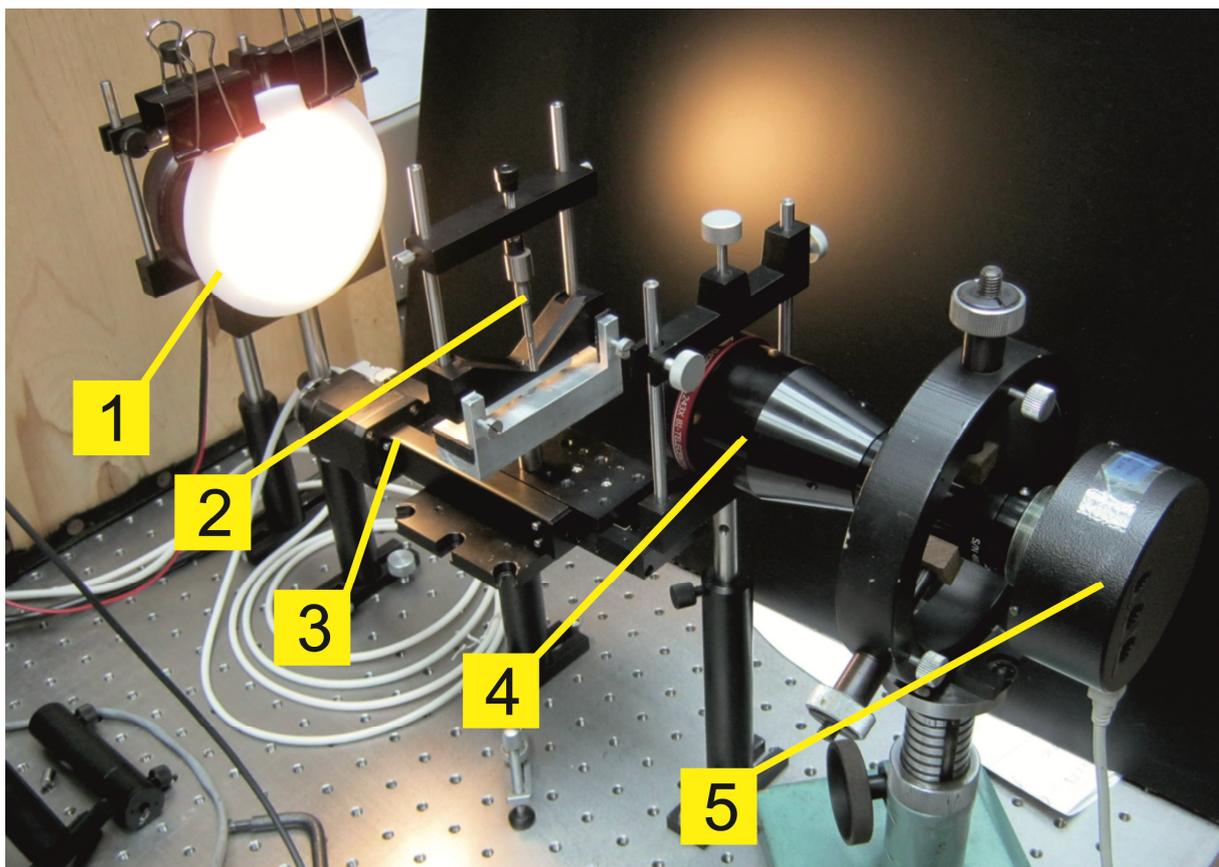
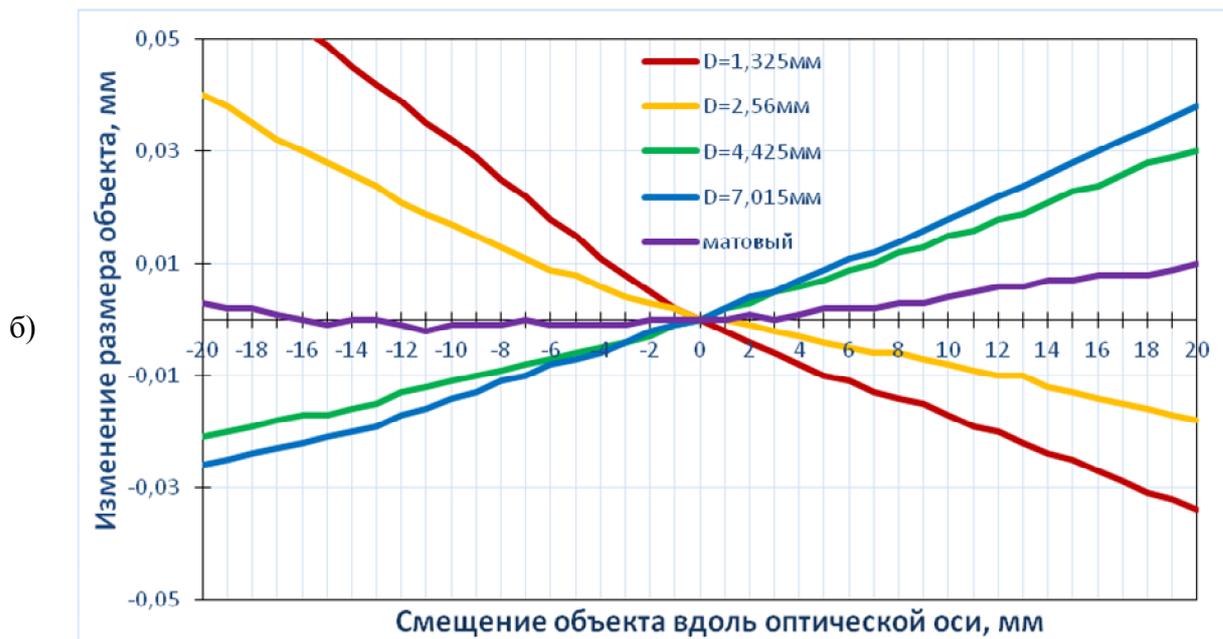
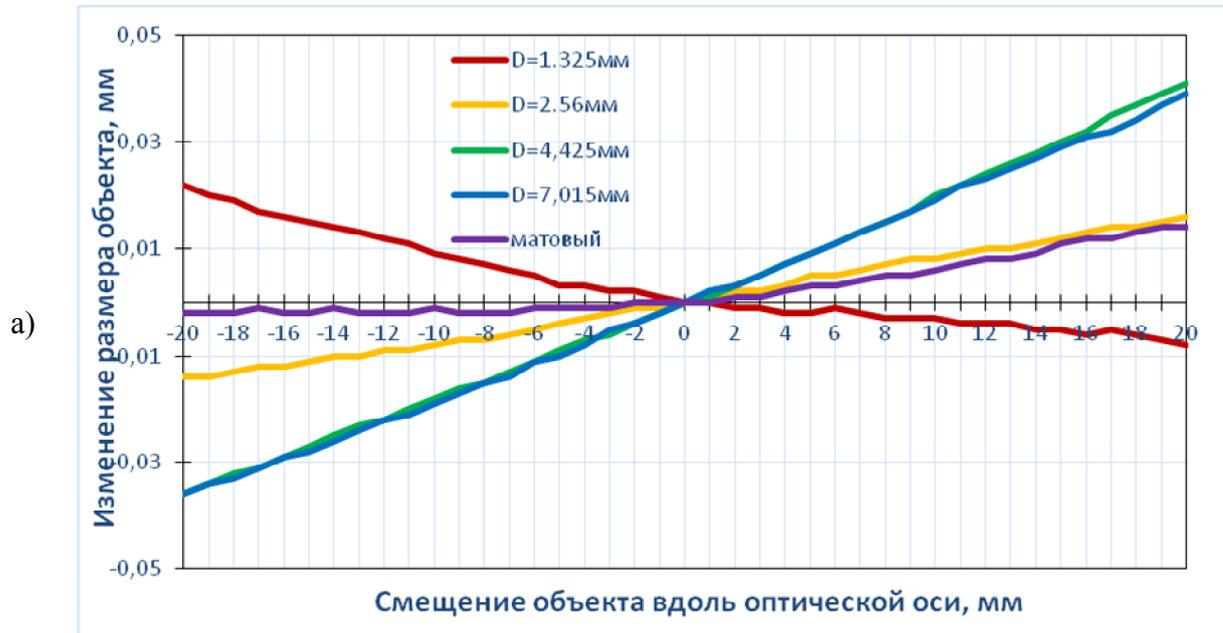


Рисунок 4.21 – Внешний вид стенда теневого проекционного канала при использовании рассеянного освещения: 1 – матовый источник освещения, 2 – объект, 3 – линейный привод, 4 – телецентрический объектив, 5 – камера

На рисунках 4.22-4.24 приведены графики зависимости размеров объекта при его смещении вдоль оптической оси при различных параметрах осветителя и фотоприемника для трёх объективов.



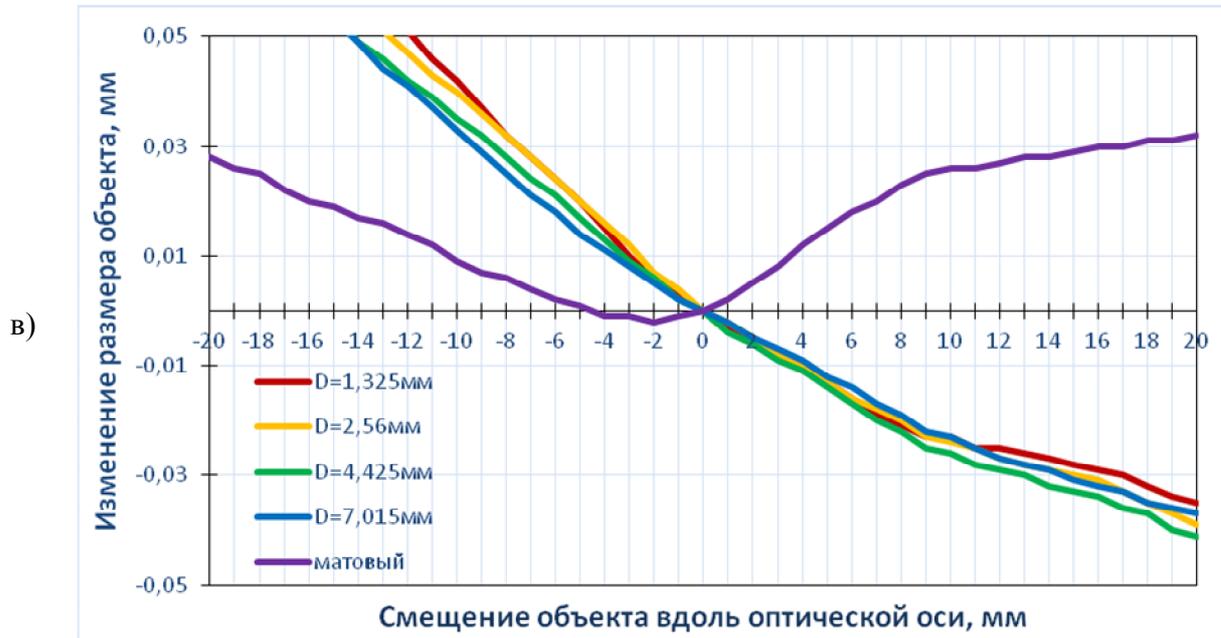


Рисунок 4.22 – Зависимость изменения размера объекта от его смещения для объектива Thorlabs MVTC23024 0,243^X при различных диаметрах осветителя D и относительных отверстиях объектива: а) 1/22, б) 1/16, в) 1/6,5

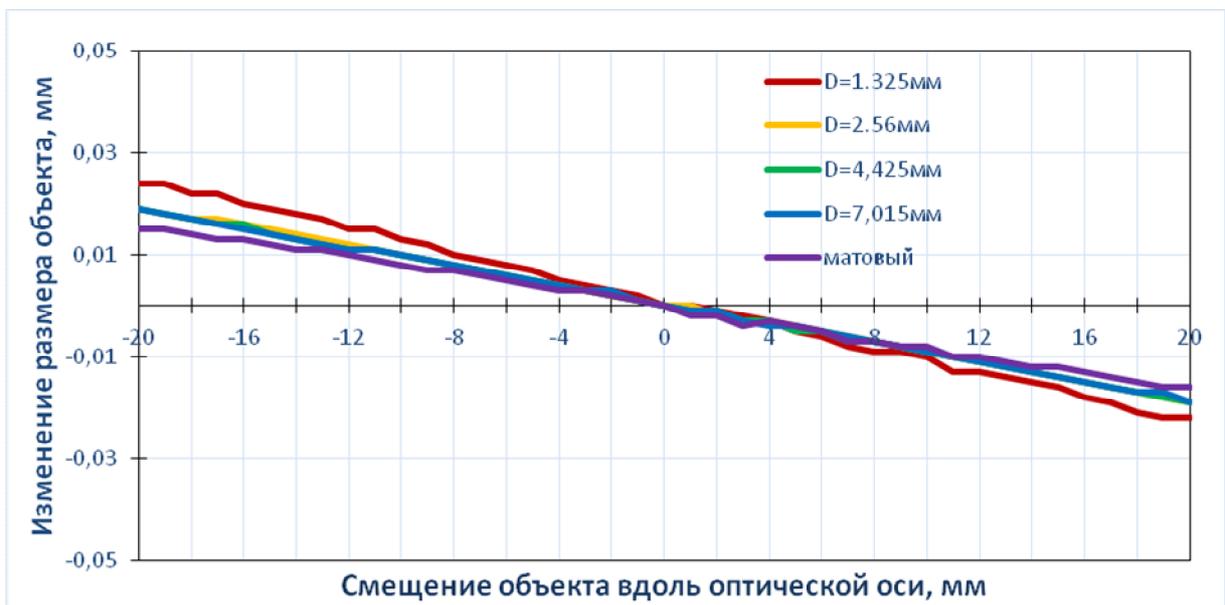


Рисунок 4.23 – Зависимость изменения размера объекта от его смещения для объектива "КБК" 0,189^X при различных диаметрах осветителя D

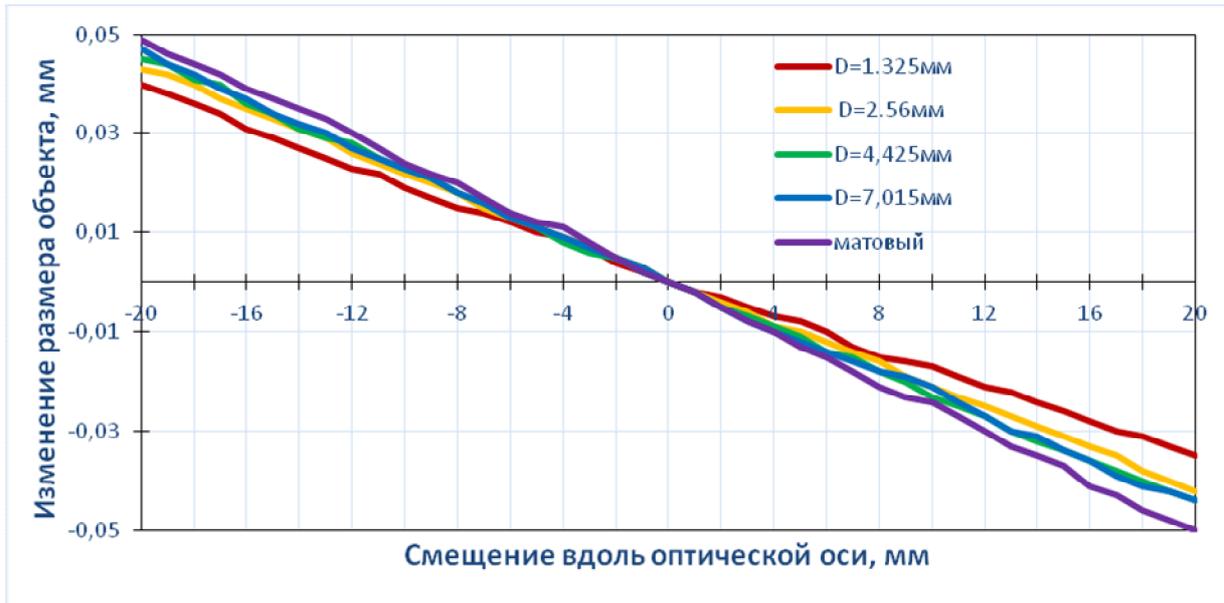
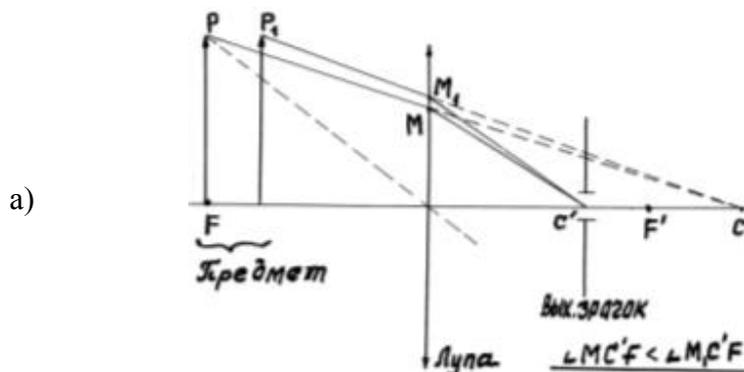


Рисунок 4.24 – Зависимость изменения размера объекта от его смещения для объектива "Кольцо" $0,155^X$ при различных диаметрах осветителя D

Из графиков видно, что при равных значениях угловых размеров источника и апертурной диафрагмы приемного объектива Thorlabs MVTС23024 возникает ситуация, при которой ошибка отклонения размера изображения объекта вдоль оптической оси минимальна (система телецентрична, рисунок 4.25, б), как показано в главе 2. При угловой апертуре источника освещения, меньшей этого критического значения, наблюдается гиперцентрическая перспектива (рисунок 4.25, в). При дальнейшем увеличении углового размера осветителя перспектива в системе становится энтоцентрической (нормальной) (рисунок 4.25, а). Важно, что переход из нормальной перспективы в гиперцентрическую происходит при размере осветителя тем больше, чем больше размер апертурной диафрагмы. Как и следовало ожидать (глава 2), особенности формирования изображений определяются соотношением между угловыми размерами источника света и апертурной диафрагмы проекционного объектива.



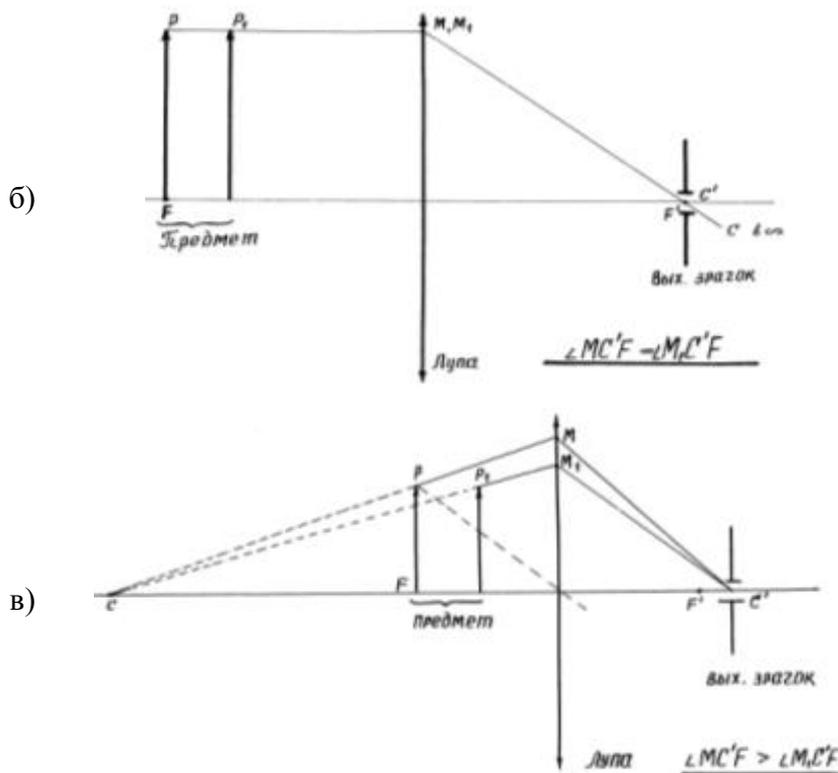


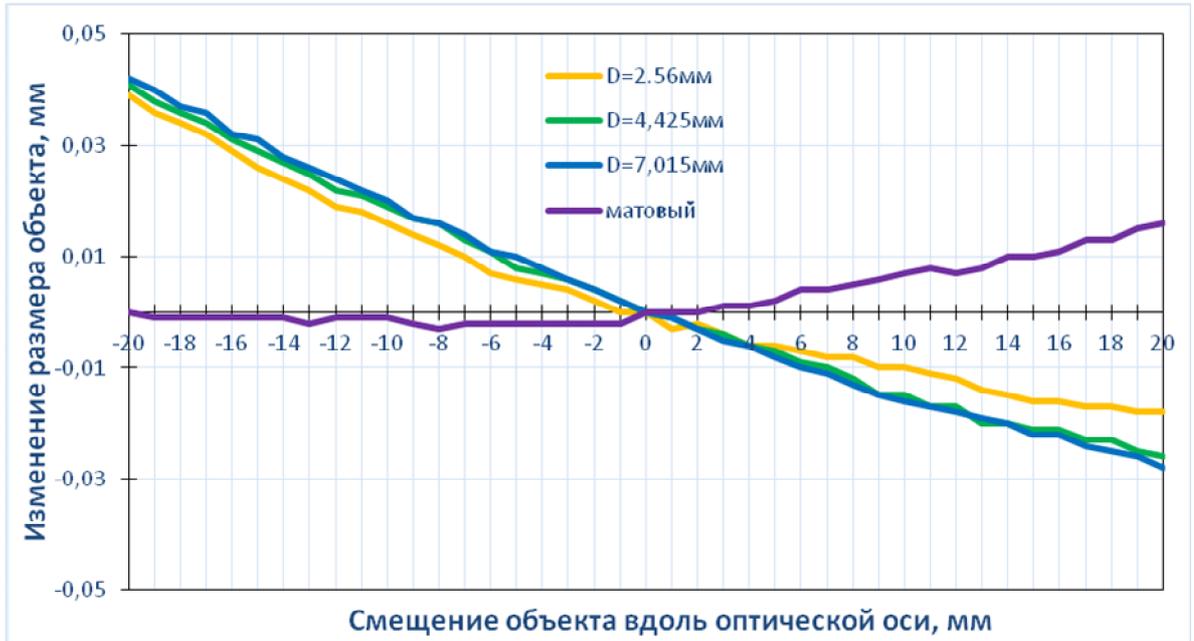
Рисунок 4.25 – Иллюстрация перспектив: а) энтоцентрическая, б) телецентрическая, в) гиперцентрическая

В случае использования некогерентного осветителя на базе матового рассеивателя всегда наблюдается нормальная перспектива. При открытой апертуре телецентрического объектива существенно возрастает уровень aberrаций, уменьшается телецентричность системы. В таких условиях проводить измерения размеров объектов не представляется возможным.

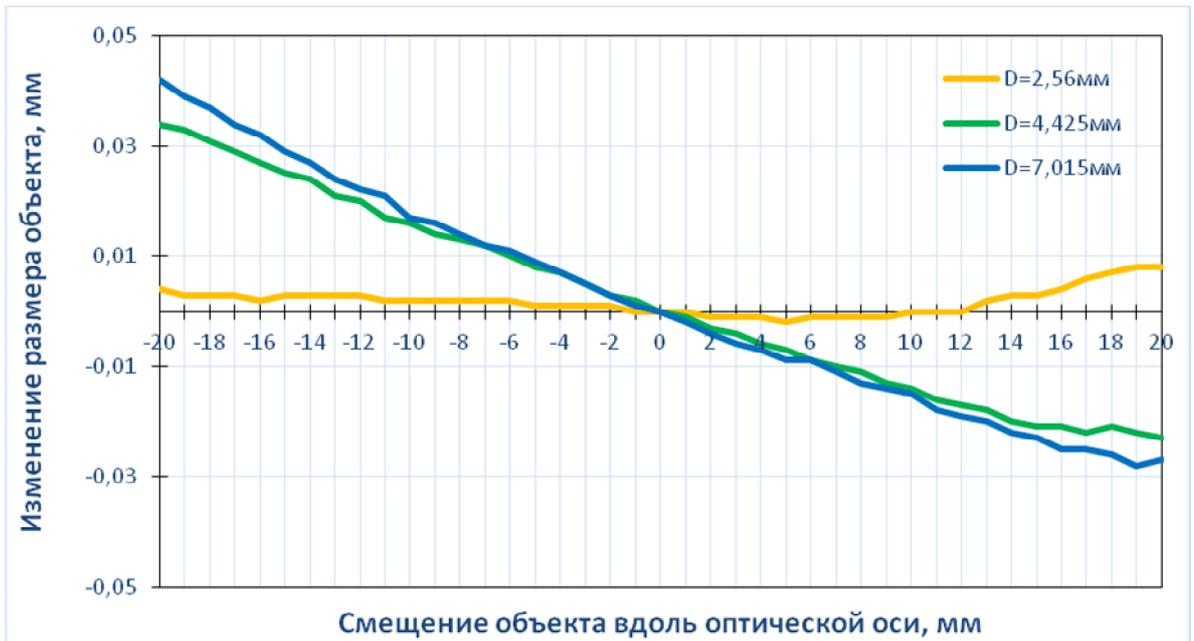
4.3.5 Влияние длины волны осветителя на размер изображения объекта

В последнем эксперименте исследовалось влияние длины волны осветителя на формирование теневого изображения. Эксперимент проводился с зеленым светодиодом и объективом Thorlabs MVTС23024 $0,243^X$ аналогично предыдущему эксперименту. Определялось изменение размера изображения объекта при перемещении объекта (калибра толщиной 10 мм). Результаты эксперимента представлены на рисунке 4.26. Направление движения объекта указано в направлении хода луча.

а)



б)



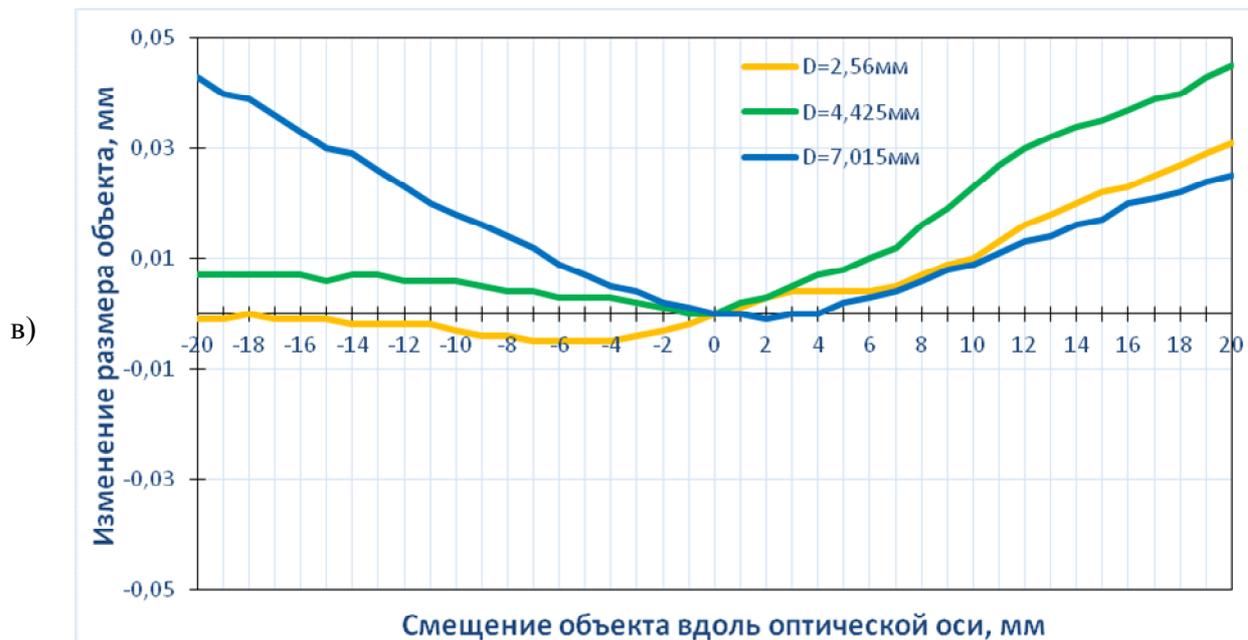


Рисунок 4.26 – Зависимость изменения размера объекта от его смещения для объектива Thorlabs MVTС23024 0,243^X при использовании светодиода с $\lambda=520-525$ нм, при различных диаметрах осветителя D и относительных отверстиях объектива: а) 1/22, б) 1/16, в) 1/6,5

Из сравнения рисунков 4.22 и 4.26 видно, что меняется наклон полученных графиков (т.е. меняется перспектива объектива). Это обусловлено влиянием остаточного хроматизма положения передней части телецентрического объектива (до апертурной диафрагмы по ходу лучей). Как было отмечено выше, в случае абсолютно телецентрической оптической системы положение фокуса передней части проецирующего объектива точно совмещено с плоскостью апертурной диафрагмы (сюда же проецируется изображение осветителя). В этом случае перемещение объекта не приводит к изменению увеличения системы. При освещении объекта красной длиной волны фокусное расстояние передней части объектива смещается за плоскость апертурной диафрагмы, образуя энтоцентрическую (нормальную) перспективу объектива. Тогда как при уменьшении длины волны благодаря дисперсии фокус смещается в положение перед апертурной диафрагмой (ближе к предмету). Это приводит к изменению перспективы с нормальной на гиперцентрическую (рисунок 4.25).

Отсюда можно сделать вывод, что при расчете объектива на широкий диапазон длин волн требуется проводить ахроматизацию передней части объектива, так как телецентричность объектива существенно зависит от длины волны. При замене осветителя с расчетной длиной волны на осветитель с другой длиной волны, при неизменных угловых размерах, требуется полная перекалибровка системы.

4.4 Методика определения оптических характеристик объектива

Вторым крупным блоком экспериментальных исследований является разработка и апробация методики проверки качества изготовленных объективов и сравнения изготовленных объективов с существующими промышленными образцами. Суть методики состоит в использовании точечной миры. С помощью такой методики были проверены следующие важнейшие характеристики телецентрических объективов: дисторсия поля на рабочем расстоянии, изменение дисторсии вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, а также частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) объектива в различных точках по полю.

Одним из достоинств предложенной и реализованной методики является возможность определения всех требуемых параметров объектива на одном экспериментальном стенде. Это значительно упрощает процесс контроля качества, дает полное представление о характеристиках объектива по всему полю и предоставляет возможность использования метода в уже собранной установке контроля для проверки характеристик оптической схемы в промышленных условиях.

Было проведено исследование и сравнение трёх телецентрических объективов: импортного Thorlabs MVTC23024 BI-TELECENTRIC 0,243^X и изготовленных в КТИ НП – "КБК" 0,189^X, "Кольцо" 0,155^X. Исследования показали, что рассчитанные объективы обладают большей телецентричностью, меньшей дисторсией, большим полем зрения. Однако объектив Thorlabs MVTC23024 рассчитан на больший спектральный диапазон и обладает более высоким разрешением.

Остановимся более подробно на предложенной методике. На рабочем расстоянии от контролируемого приемного телецентрического объектива устанавливалась точечная мира (рисунок 4.12) с размерами, превышающими его поле зрения. Далее с помощью линейного привода закрепленная мира смещалась вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки объектива (± 20 мм) с шагом 1 мм и регистрировалось изображение миры (рисунок 4.27). Шаг 1 мм выбран для проверки линейности изменения оптических параметров вдоль оси.

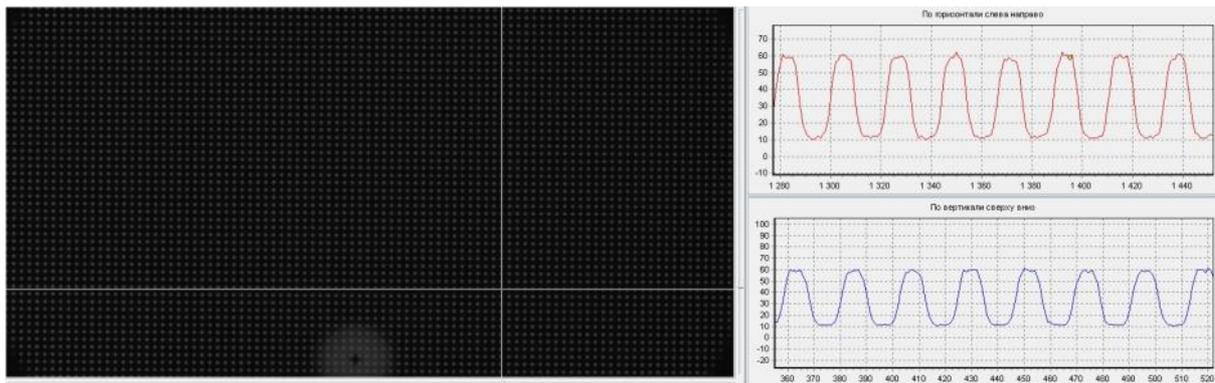


Рисунок 4.27 – Регистрируемое изображение мира и график интенсивности на мире по двум осям

После подтверждения линейности регистрация изображений мира проводилась в трёх положениях: на границах глубины фокусировки и на рабочем расстоянии. Обработка и анализ полученных изображений осуществлялись с помощью специального ПО.

Внешний вид экспериментального стенда показан на рисунке 4.28.

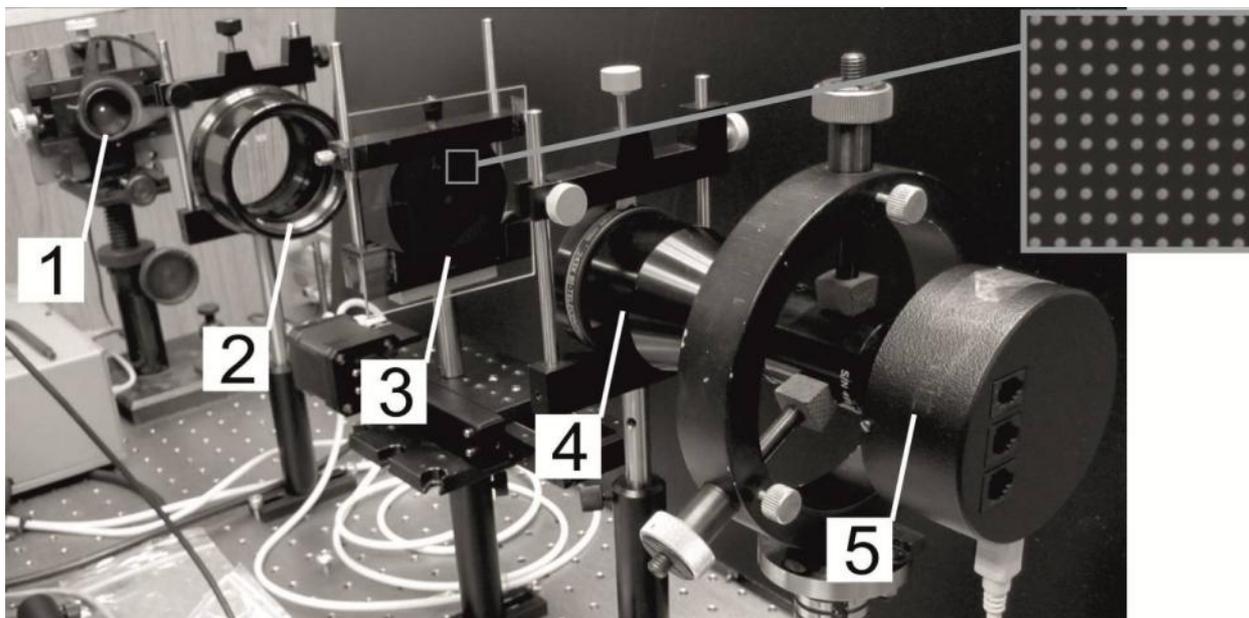
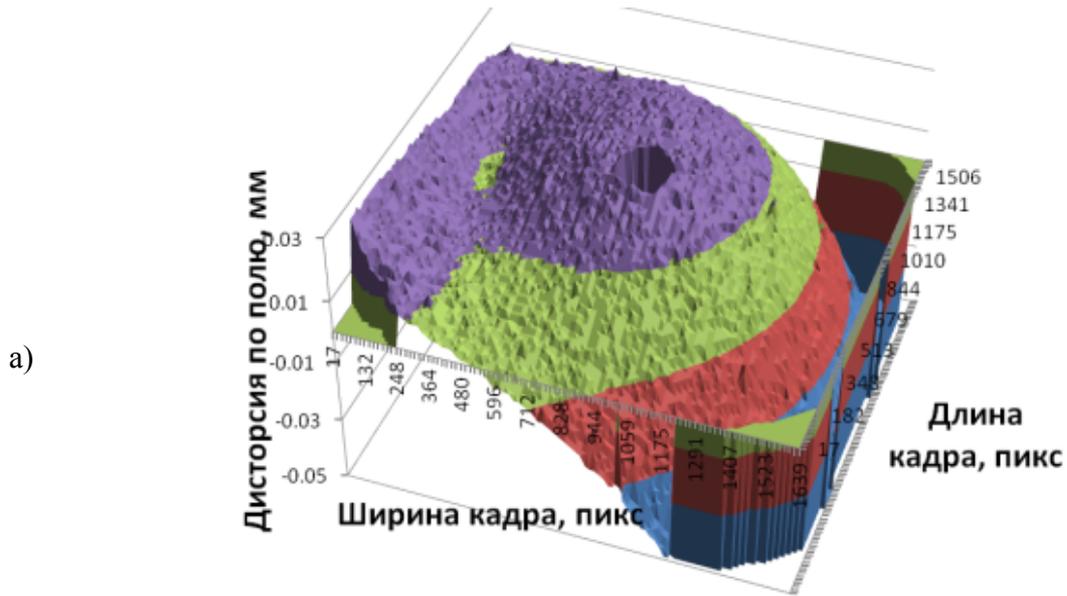


Рисунок 4.28 – Внешний вид стенда для определения оптических характеристик телецентрического объектива. 1 – источник освещения, 2 – коллиматор, 3 – мира на линейной подвижке, 4 – телецентрический объектив, 5 – фотоприемная матрица

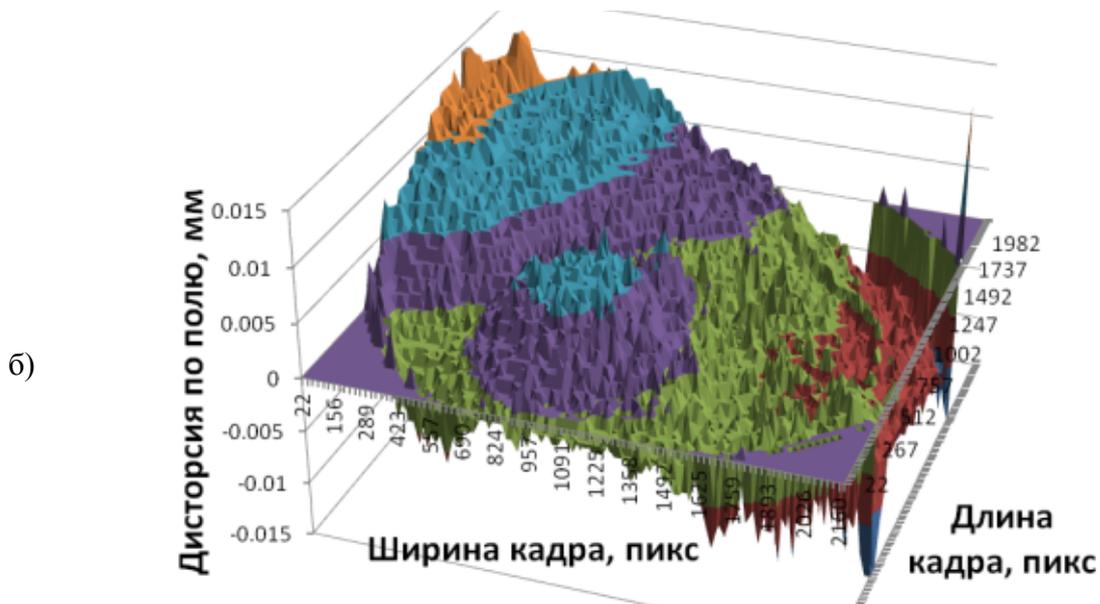
4.4.1 Определение дисторсии объектива

Изменение дисторсии объектива по полю зрения объектива определялось методом центра масс путем нахождения смещения положения каждой точки от центра кадра.

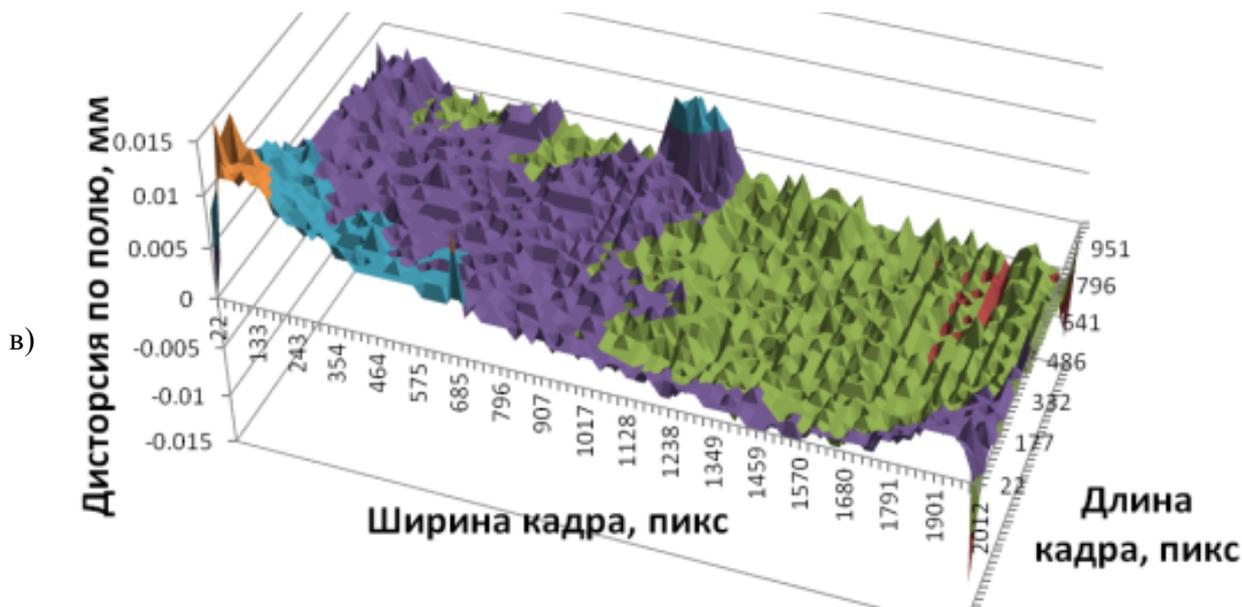
Сравнивая известные расчетные положения точек безаберрационного объектива и полученные смещения реальных точек мира, определялись значения дисторсии с учетом её знака. По этому же изображению определялось среднее разрешение по полю, увеличение объектива. На рисунке 4.29 показаны измеренные картины дисторсионных искажений для трёх объективов.



поле зрения 80 мм, максимальная дисторсия -0,059%



поле зрения 50 мм, максимальная дисторсия -0,06%



поле зрения 45 мм, максимальная дисторсия -0,066%

Рисунок 4.29 – Поля дисторсии телецентрических объективов на рабочем расстоянии:
 а) "КБК" $0,189^X$, б) "Кольцо" $0,155^X$, в) зарубежного Thorlabs MVTC23024 $0,243^X$

Из анализа рисунка 4.29 следует, что в разработанных объективах существенно увеличено поле зрения при несколько улучшенной максимальной дисторсии. Видно, что изготовленные в КТИ НП объективы обладают неосесимметричной дисторсией, что вызвано смещением положения сферических поверхностей линз задней части объектива (неточность их изготовления и сборки), как показано в главе 3. Отсюда следует вывод о необходимости ужесточения допусков к изготовлению как оптических, так и механических элементов телецентрических объективов. Кроме того, видна общая добавка, обусловленная смещением апертурной диафрагмы из фокуса передней части объектива. Компенсация этого смещения позволит уменьшить дисторсию объективов до расчетной.

4.4.2 Определение телецентричности объектива

Схема проверки телецентричности показана на рисунке 4.30. По смещению каждой точки на изображении миры определялся угол смещения во всем измеряемом диапазоне, что и является остаточной нетелецентричностью объектива. Общее смещение всех точек миры, обусловленное несоосностью её установки в измерительном канале, учитывалось в ПО.

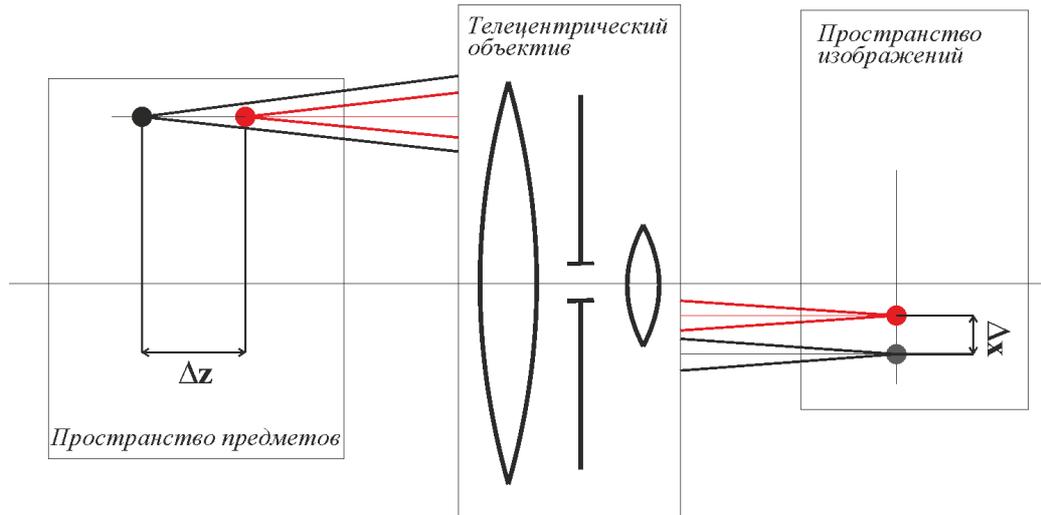


Рисунок 4.30 – Схема для проверки телецентричности объектива

Остаточная нетелецентричность объектива неодинакова по его полю зрения. Кроме этого, картина дисторсии в каждом положении вдоль оптической оси оказывается различной. Это приводит к появлению значительной ошибки, обусловленной несовпадением плоскостей калибровки и регистрации изображений объекта измерений. Было исследовано влияние изменения расстояния от плоскости миры до объектива на поведение телецентричности (изменение дисторсии вдоль оптической оси). На рисунке 4.31 показано изменение телецентричности для трёх объективов в области границ измеряемого объекта в зависимости от диаметра осветителя D .

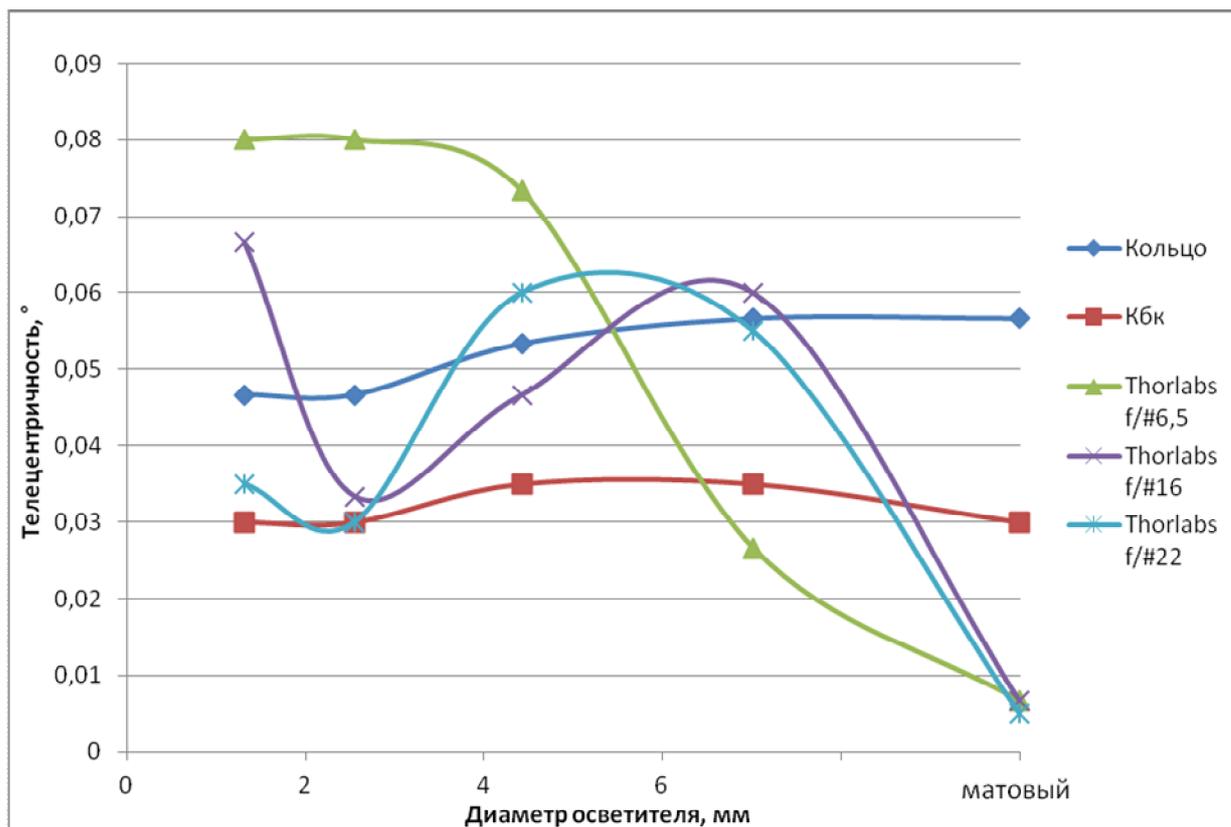


Рисунок 4.31 – Зависимость телецентричности объективов от диаметра осветителя D

Из рисунка 4.31 видно, что рассчитанные объективы "КБК" $0,189^X$, "Кольцо" $0,155^X$ имеют телецентричность, слабо зависящую от диаметра осветителя D , в то время как зарубежный объектив демонстрирует существенную зависимость телецентричности от размера апертурной диафрагмы, причем при уменьшении диаметра апертурной диафрагмы D_{an} телецентричность увеличивается, что согласуется с теорией. При изменении размера осветителя D наблюдаются скачки телецентричности объектива Thorlabs MVTC23024 $0,243^X$, что ещё раз подтверждает необходимость расчета и изготовления стабильных телецентрических систем с известной оптической схемой. При освещении матовым источником для объектива Thorlabs MVTC23024 $0,243^X$ наблюдается минимальная нетелецентричность в выбранном положении, которая объясняется сменой знака телецентричности в положении края изделия.

В результате экспериментальных исследований были получены трехмерные графики поведения абсолютного значения телецентричности (таблицы 4.3, 4.4) и её знака (таблицы 4.2, 4.4) для трёх объективов. Измерения проводились на рабочем расстоянии объектива и при смещении объекта на 6 мм от объектива. На рисунке 4.32 показана карта

положительного смещения точки по полю, использованная в ПО для расшифровки знака телецентричности.

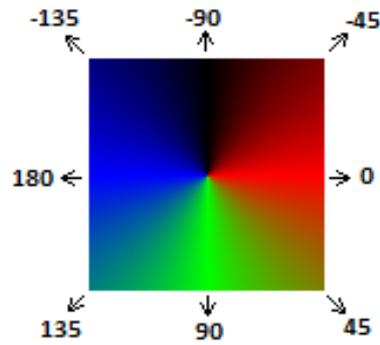
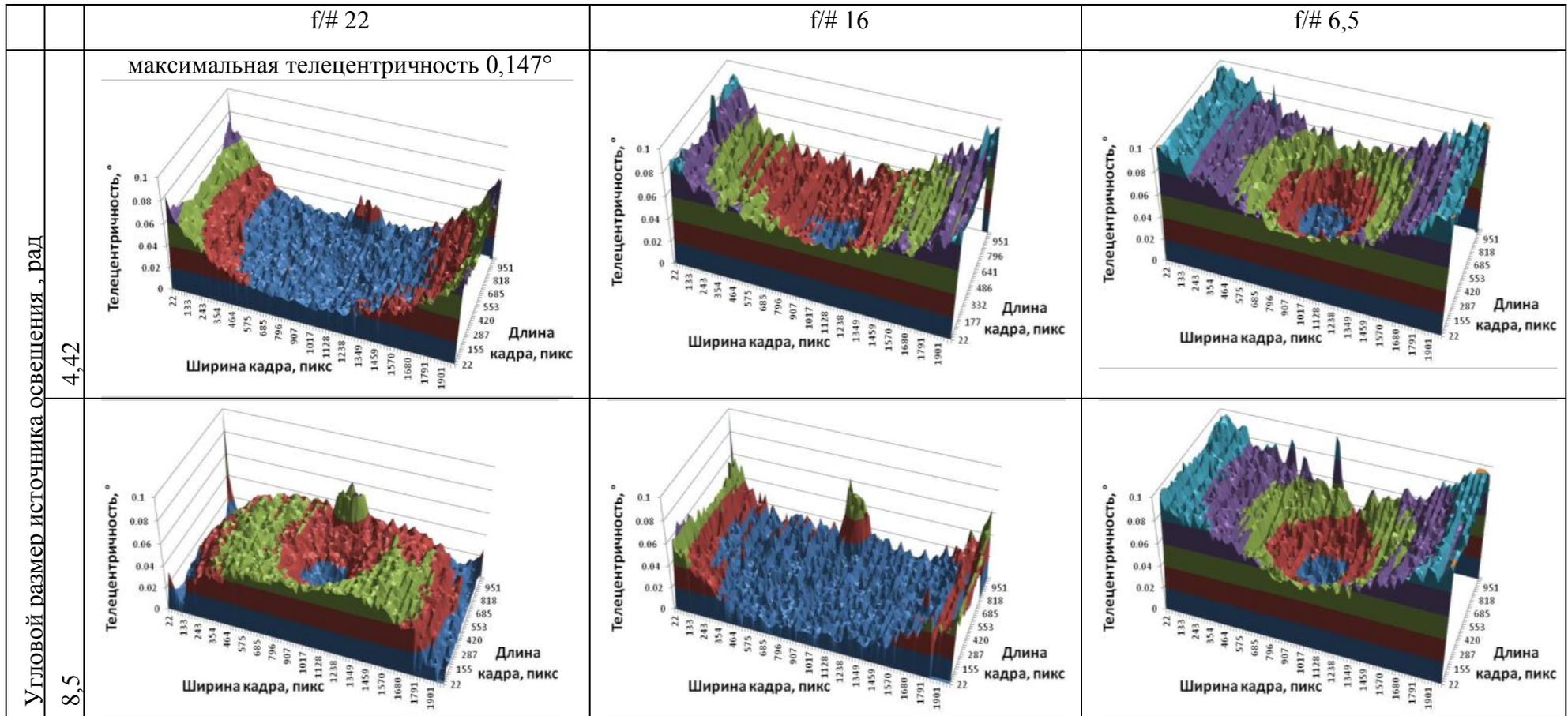


Рисунок 4.32 – Карта положительного смещения точек мира по полю

Таблица 4.2 – Распределение знака телецентричности объектива Thorlabs MVTC23024 0,243^x по полю при разных относительных отверстиях и диаметрах осветителя D

		f/# 22	f/# 16	f/# 6,5
Угловой размер источника освещения, рад	4,42			
	8,5			
	14,75			
	23,38			
	матовый			

Таблица 4.3 – Поля телецентричности объектива Thorlabs MVTC23024 0,243^X при разных относительных отверстиях и диаметрах источника света D



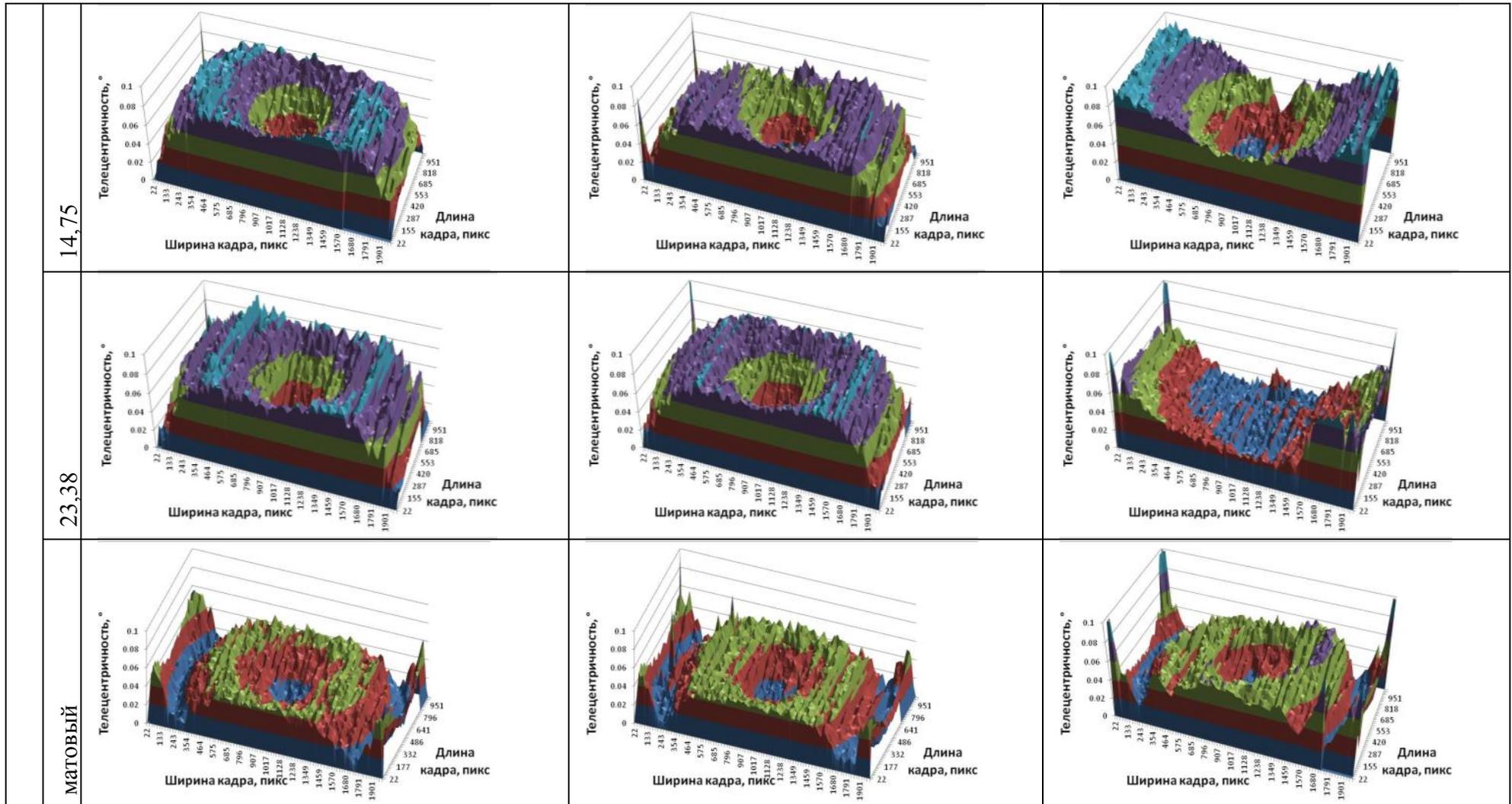
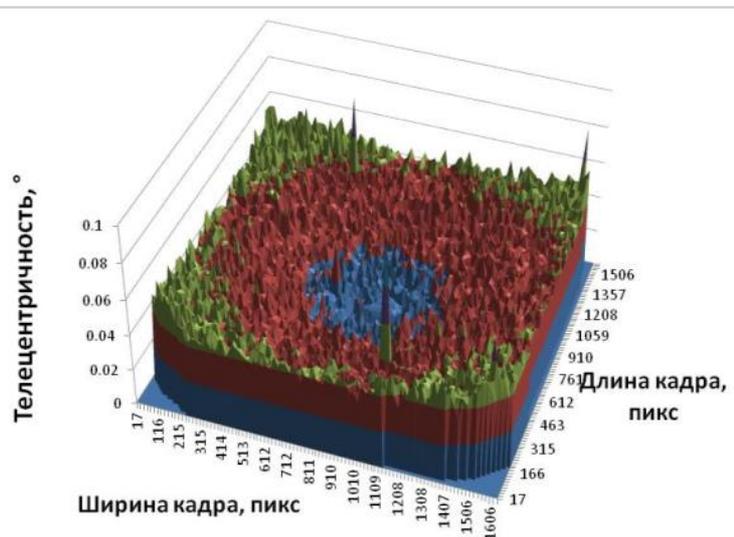
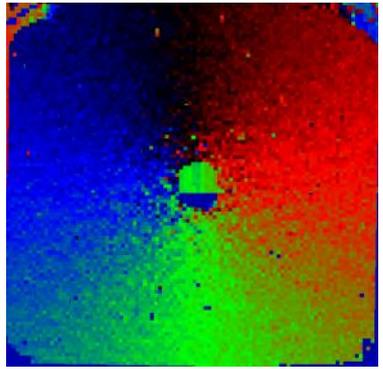
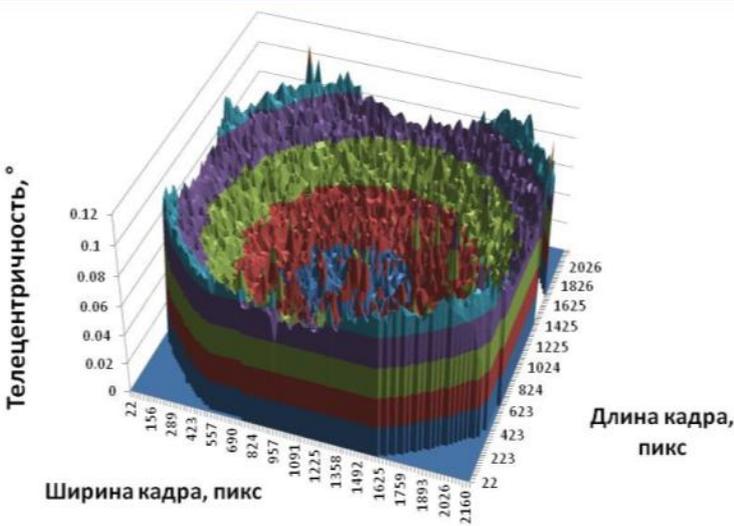
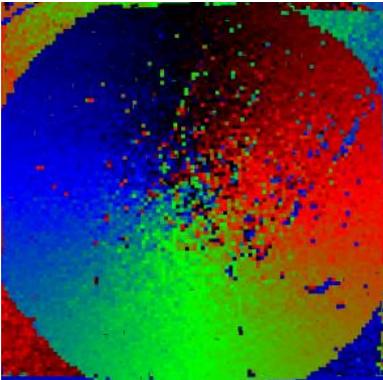


Таблица 4.4 – Распределение абсолютного значения и знака телецентричности объективов "КБК" $0,189^X$ и "Кольцо" $0,155^X$ при угловом размере осветителя $2\theta_{ист}=4,42 \cdot 10^{-3}$ рад

	Абсолютное значение телецентричности, $^{\circ}$	Знак телецентричности
"КБК" $0,189^X$	<p>максимальная телецентричность $0,05^{\circ}$</p> 	
"Кольцо" $0,155^X$	<p>максимальная телецентричность $0,118^{\circ}$</p> 	

Из таблиц 4.2-4.4 видно, что для объектива Thorlabs MVTС23024 $0,243^X$, в отличие от объективов "КБК" $0,189^X$ и "Кольцо" $0,155^X$, телецентричность меняет знак и характер распределения по полю в зависимости от диаметра осветителя D . В разработанных объективах при существенном увеличении поля зрения телецентричность выше. Смещением апертурной диафрагмы в них возможно уменьшить остаточную нетелецентричность, как это сделано в объективе "КБК" $0,189^X$.

Из анализа экспериментальных данных следует, что, как и следовало ожидать (глава 3), что точность определения размера объекта зависит от его положения по полю зрения (место нахождения краев объекта). При расчете объектива на определенный размер объекта можно минимизировать влияние объемности путем расчета соответствующего распределения телецентричности. Видно, что при освещении объекта матовым источником излучения и регистрации объективом Thorlabs MVTC23024 0,243^x знак телецентричности меняется на противоположный. В этом месте поля телецентричность практически равна нулю, что приводит к существенному снижению погрешности определения размера объекта в этом положении.

4.4.3 Определение ЧКХ и ФРТ объектива

Для оценки разрешения изготовленного объектива по предложенной методике возможно также определение его ЧКХ. Функция рассеяния точки (ФРТ) даёт информацию о размытии энергии в пятне и, соответственно, позволяет судить о правильности определения положения центра точки программой. Существующие методики основываются на определении разрешения объективом периодической линейной структуры [96]. Предложенная методика позволяет не использовать дополнительных миш и приспособлений.

Алгоритм определения ЧКХ и ФРТ объектива следующий. Размер поля зрения определяется исходя из общего количества точек, входящих в кадр объектива. Реальное увеличение объектива по всему полю находится путем сравнения реального размера точки с известным исходным размером.

Форма сигнала от точки миры диаметром 0,25 мм задается по формуле:

$$f(x, y) = \begin{cases} \sqrt{x^2 + y^2}, & x \in [-0,125; 0,125] \\ 0, & x \in (-\infty; -0,125) \cup (0,125; \infty) \end{cases}$$

Изображение точки, сформированной на фотоприемнике объективом, определяется как свертка сигнала с импульсным откликом оптической системы:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \cdot h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta,$$

где $g(x, y)$ – форма сигнала, полученная на фотоприемнике, $h(x, y)$ – импульсный отклик оптической системы или функция рассеяния точки.

Для определения ФРТ системы выполняется операция двумерной деконволюции (обратной свёртки) сигнала от точки миры по известной формуле [70]:

$$h(x, y) = F^{-1} \left(\frac{F(g(x, y))}{F(f(x, y))} \right) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{F(g(x, y))}{F(f(x, y))} \right) \cdot e^{i(ux+vy)} dudv,$$

где F – преобразование Фурье, F^{-1} – обратное преобразование Фурье.

Оптическая передаточная функция (ОПФ) связана с ФРТ прямым преобразованием Фурье:

$$H(u, v) = F[h(x, y)] = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \cdot e^{-i(ux+vy)} dx dy,$$

Взяв квадрат модуля ОПФ получим ЧКХ. При необходимости можно получить фазовую передаточную функцию (ФПФ), как аргумент (фазу) ОПФ.

Выводы по главе 4

В главе представлены результаты выполненных экспериментальных исследований телецентрических объективов, которые свидетельствуют о существенном влиянии оптических параметров теневого проекционного канала на точность определения размеров объектов. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретических исследований, полученными в главе 2, и компьютерным моделированием, представленным в главе 3. Экспериментально установлено, что на положение границы объекта в теневом изображении влияют следующие факторы: угловой размер и длина волны источника освещения; толщина объекта; степень исправленности aberrаций оптической системы; размер апертурной диафрагмы приемного телецентрического объектива; позиционирование изделия в измерительном объеме.

Наибольшим влиянием обладает нетелецентричность системы в пространстве предметов, возникающая из-за влияния остаточной дисторсии по полю, а также изменения дисторсии вдоль оптической оси. Показано, что даже небольшая остаточная нетелецентричность ($0,1^\circ$) приводит к повышению погрешности метода и увеличивает ошибку определения геометрических размеров изделий на величину более 60 мкм.

Показано, что неточность позиционирования изделия в пределах ± 4 мм относительно рабочего расстояния объектива является допустимой при определении размера изделия с погрешностью менее 5 мкм, требуемой при проектировании систем геометрического контроля.

При проектировании измерительных проекционных систем контроля является приемлемым использование матовых источников освещения, которые упрощают конструкцию осветителя. Чтобы уменьшить неравномерность засветки поля зрения и дополнительные погрешности определения края, связанные с ней, рекомендовано

выбирать угловые размеры осветителя исходя из условия $\theta_{ист} > \theta_{ан}/3$. Применение осветителя с числовой апертурой меньшей более чем в 3 раза, чем числовая апертура проекционного объектива нецелесообразно вследствие возрастания. Показано, что при разработке системы контроля следует избегать ситуации, когда угловой размер источника освещения примерно равен угловому размеру апертурной диафрагмы приемного телецентрического объектива, так как это приводит к резкому изменению профиля изображения объекта.

Установлено, что использование отличной от расчетной длины волны осветителя смещает положение изображения источника, что приводит к появлению дополнительной нетелецентричности системы. При расчете объектива на широкий диапазон длин волн требуется проводить ахроматизацию части объектива, расположенной до апертурной диафрагмы.

Предложена и реализована методика определения оптического качества изготовления и сборки телецентрических объективов, которая позволяет определять следующие характеристики объектива: дисторсию поля на рабочем расстоянии, изменение дисторсии вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, частотно-контрастную характеристику объектива в различных точках по полю. Суть разработанной методики заключается в регистрации двух изображений точечной миры, смещенной вдоль оптической оси. Ввиду простоты реализации её можно применять к уже встроенным в установку объективам. Для снижения погрешности определения размеров изделия теневой проекционной системой, целесообразно использовать дополнительную калибровку, основанную на предложенной методике. Калибровка телецентричности объектива при изготовлении системы размерного контроля возможна благодаря экспериментально полученным линейным зависимостям изменения размера объекта от его положения в измерительном объеме.

Анализ разработанных объективов свидетельствует об их высоких оптических характеристиках по сравнению с лучшим зарубежным объективом- аналогом (глава 1). Рассчитанные объективы обладают рядом преимуществ, важных при использовании в системе контроля: значительно увеличенное линейное поле зрения (с 45 мм до 250 мм), уменьшенная дисторсия (с 0,03% до 0,01%) и остаточная нетелецентричность (с $0,147^\circ$ до $0,01^\circ$). Для уменьшения несимметричности картины дисторсии по полю, необходимо предъявлять требование ужесточения допусков на изготовление оптических элементов,

металлических колец-компенсаторов, а также их центрировку и юстировку в корпусе объектива. Кроме этого, вместо насыпного метода сборки объектива следует применять вальцовку отдельных или групп линз, а затем доводку колец-компенсаторов в процессе изготовления сборки [86, 97, 98].

Полученные результаты использованы при разработке и создании измерительных систем для промышленного контроля изделий (глава 5).

ГЛАВА 5 Разработка и испытания оптико-электронных систем размерного контроля геометрии изделий

В настоящей главе представлены результаты разработки, создания и испытаний трёх оптико-электронных систем размерного контроля изделий: "Кольцо" для измерения геометрических параметров керамических колец, "КБК" для измерения радиусных и плоских плиток из бронекерамики, "УКБр-1" для контроля геометрических параметров бронероликов. Все системы находятся в промышленной эксплуатации на ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" (дочернее предприятие ХК ОАО "НЭВЗ-Союз"), город Новосибирск, что подтверждено Актом о внедрении (приложение А).

Описанные в главах 2-4 результаты теоретических и экспериментальных исследований использовались при создании указанных систем размерного контроля.

Модернизированы существующие компьютерные способы определения положения края изделия с учетом влияния толщины изделия и угловых размеров источника света (глава 2), что позволило уменьшить погрешность определения геометрических размеров изделий на порядок [74].

В системах установлены телецентрические в пространстве предметов объективы (глава 3), позволяющие регистрировать, как теневые изображения с малой дисторсией (менее 0,02 %), так и телевизионные изображения с высоким разрешением (до 100 линий/мм). Разработанные объективы применимы не только в системах контроля тенью проекционным методом, но телевизионным, триангуляционным, методом структурного освещения.

Методика определения оптических характеристик телецентрических объективов (глава 4) использовалась для установления пригодности конкретного изготовленного объектива для работы в системе. Применялась калибровка оптического канала, основанная на разработанной методике.

5.1 Оптико-электронная система размерного контроля керамических колец "Кольцо"

В КТИ НП СО РАН в интересах ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" (г. Новосибирск) создана система автоматического бесконтактного контроля керамических колец из вакуумной керамики "Кольцо" (рисунок 5.1), в том числе с металлизированной поверхностью.

Керамические кольца-изоляторы с большой высотой используются для изоляции вакуумных дугогасительных камер, которые входят в комплектацию вакуумных выключателей, выключателей нагрузок, применяемых в коммутационной аппаратуре в электрических сетях трехфазного переменного тока частотой 50 и 60 Гц. Изоляторы для корпусов силовых полупроводниковых приборов предназначены для изготовления диодов и тиристоров высоковольтных преобразовательных устройств. Изоляторы электронно-оптических преобразователей используются в военной промышленности в качестве электроизоляционного материала для приборов ночного видения [99].

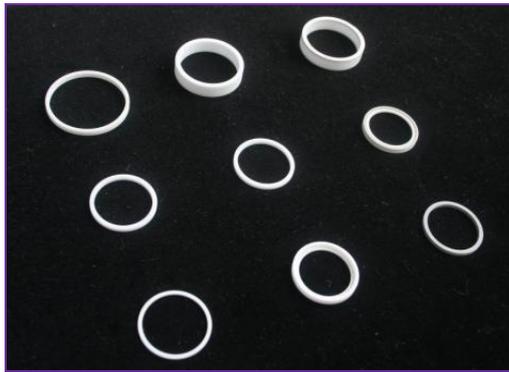


Рисунок 5.1 – Кольцевые изоляторы из вакуумной керамики

До поставки системы на производство контроль качества продукции на предприятии проводился контактным инструментом вручную. Такой подход не удовлетворял требованиям к быстродействию контроля, требующегося для обеспечения количества изготавливаемой продукции (более 20 000 шт./месяц, 10 типоразмеров кольцевых изоляторов). Кроме этого, внедрение системы позволило снизить трудозатраты и исключить "человеческий" фактор при контроле.

В системе использовался специально разработанный телецентрический объектив "Кольцо" 0,155^x (глава 3). При программной обработке изображений изделий использовались аналитически полученные способы учета влияния толщины кольцевого изолятора на определяемый диаметр при определении его пороговым методом (глава 2). Для минимизации остаточной дисторсии проводилась калибровка по миру (глава 4).

Система контроля позволяет измерять в автоматическом режиме следующие параметры изделий: внутренний и наружный диаметры от 23 до 45 мм с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм; высоту в диапазоне от 0,8 до 10 мм с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм; соосность цилиндрических поверхностей с погрешностью не более $\pm 0,015$ мм; плоскостность и параллельность торцевых поверхностей с погрешностью не более

$\pm 0,005$ мм, а также обнаруживать дефекты – сколы на кромках шириной не менее 0,2 мм. Время контроля одного изделия не превышает 8 с [9].

В основу работы системы положены следующие методы:

- теневой проекционный для измерения внутреннего и наружного диаметров колец и соосности этих диаметров;
- структурного освещения для измерения высоты колец, неплоскостности и непараллельности их торцевых поверхностей;
- телевизионный для обнаружения дефектов на торцевых поверхностях колец.

Принцип измерения размеров кольцевых изделий поясняется оптической схемой, приведенной на рисунке 5.2.

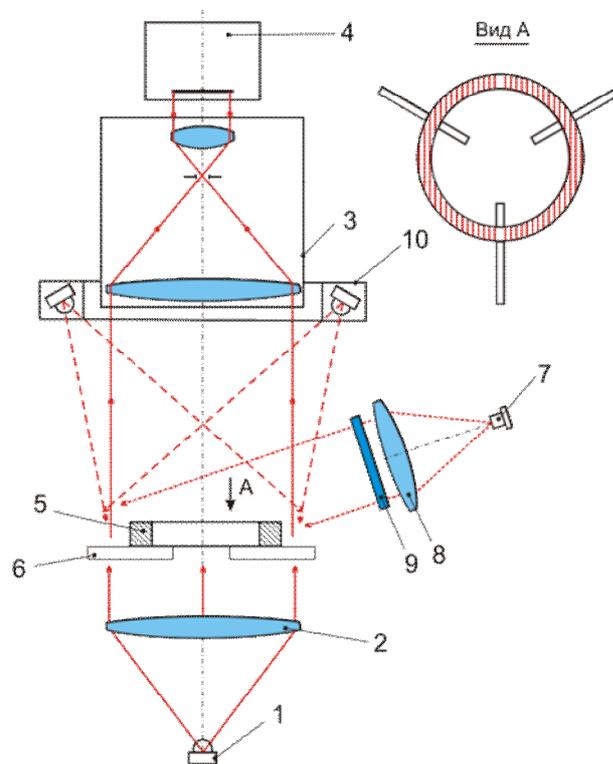


Рисунок 5.2 – Оптическая схема системы контроля керамических колец:
 1 – светодиод; 2 – коллимирующий объектив; 3 – телецентрический объектив;
 4 – цифровая камера; 5 – кольцо; 6 – столик; 7 – лазер полупроводниковый;
 8 – коллимирующий объектив; 9 – дифракционный оптический элемент (ДООЭ);
 10 – кольцевой осветитель

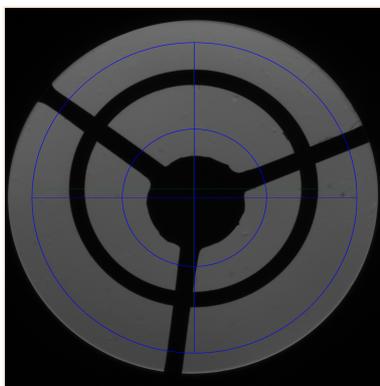
Теневой проекционный канал состоит из светодиода 1, коллимирующего объектива 2, телецентрического в пространстве предметов объектива 3 "Кольцо" $0,155^X$ и фотоприемной цифровой камеры 4. Контролируемое изделие 5 устанавливается на

столике 6. Остальные элементы предназначены для реализации метода структурного освещения и телевизионного метода. При контроле всех геометрических параметров колец различными методами используется один и тот же фотоприемный узел, что обеспечивает компактность и упрощает конструкцию установки.

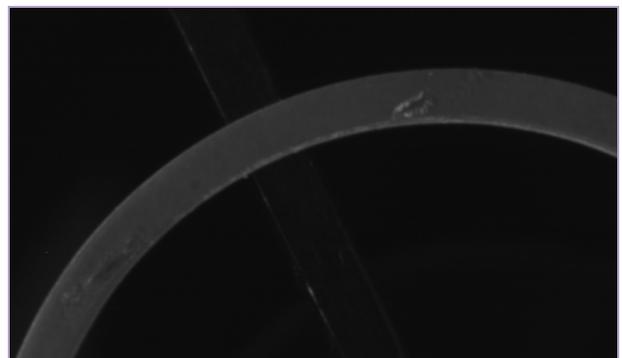
Для задачи контроля керамических колец использовался специально разработанный телецентрический объектив "Кольцо" $0,155^X$, описанный в главе 3. Оптическая система содержит два симметричных телецентрических объектива, повернутых друг к другу [100, 36]. Особенностью объектива, который использовался в системе, является то, что он работает в двух режимах: с малой апертурой для формирования теневых изображений и с большой апертурой для формирования изображений торцов колец с высоким разрешением (около 100 линий/мм).

В качестве осветителя используется свехяркий светодиод, излучение которого коллимуруется объективом типа И-51 ($f' = 210$ мм). Измеряемое кольцо устанавливается на столике с тремя тонкими опорами (рисунок 5.2, вид А). Теневое изображение регистрируется при малой диафрагме объектива камеры.

Обработка теневого изображения (рисунок 5.3, а) производится следующим образом. Из predeterminedенного центра (реальный центр кольца может с ним не совпадать) проводятся лучи с заданным шагом по углу. Сигнал вдоль луча вычисляется по пикселям кадра с помощью билинейной интерполяции. Край кольца вычисляется как положение точки с сигналом, равным половине амплитудного значения (среднее между предварительно найденными уровнями черного и белого) с субпиксельным уточнением с помощью линейной интерполяции фронта сигнала по методу наименьших квадратов в окрестности искомой точки. Телевизионное изображение (рисунок 5.3, б) используется для определения дефектов на торцах изделия.



а)



б)

Рисунок 5.3 – Изображение кольцевого изделия: а) теневое, б) телевизионное

Для компенсации геометрических искажений, вызванных ошибками изготовления и крепления линз объектива, производится программная коррекция положения точек контура кольца. Для этого заранее снимается изображение образцовой точечной миры (рисунок 4.12). Далее на изображении по методу центра масс определяются центры кружков, каждому из которых сопоставляется точка на идеальной плоскости. Весь набор центров разбивается на треугольники с помощью триангуляции Делоне. По каждой паре треугольников строится дробно-линейное конформное преобразование [101]. Для коррекции положения точки края кольца достаточно найти содержащий эту точку треугольник и, с помощью конформного преобразования, преобразовать ее координаты из пикселей в миллиметры.

Для снижения погрешности измерительной системы в 10 раз (с 20 мкм до 2 мкм) использовался предложенный способ учета влияния параметров оптической системы и толщины объекта на характер теневого изображения, основанный на введении корректирующей добавки в выбранный уровень порога (глава 2).

Внешний вид системы приведен на рисунке 5.4.

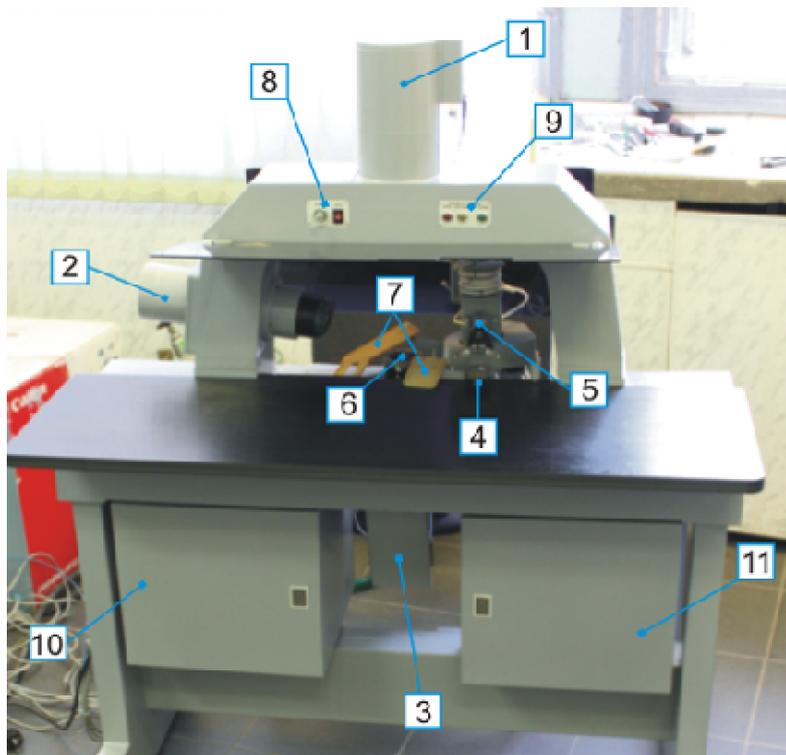


Рисунок 5.4 – Внешний вид опико-электронной системы контроля керамических колец "Кольцо": 1 – осветитель телевизионного канала; 2 – лазерный осветитель; 3 – осветитель теневого канала; 4 – позиция загрузки детали; 5 – манипулятор; 6 – измерительная позиция; 7 – позиции разбраковки; 8 – панель включения; 9 – панель отображения статуса детали; 10, 11 – аппаратные отсеки

Загрузка деталей производится вручную. В позиции загрузки размещен датчик наличия детали, который позволяет системе работать автоматически по мере поступления деталей. В процессе измерения каждая деталь посредством манипулятора перемещается на измерительную позицию, где последовательно производится ее измерение каждым из трех измерительных каналов. По результатам измерения деталь переносится манипулятором на соответствующую позицию разбраковки, на панели отображения статуса детали загорается соответствующий сигнал (годен, брак, исправимый брак).

Система прошла полный цикл производственных испытаний на предприятии ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" и в настоящее время находится в промышленной эксплуатации. Ежемесячно на установке "Кольцо" контролируется более 20 000 изделий, 10 типоразмеров кольцевых изоляторов.

В 2013 году изготовлен модернизированный вариант системы «Кольцо-М», который поставлен и находится в эксплуатации во Всероссийском НИИ автоматики им. Духова (г. Москва). Система контролирует геометрические параметры кольцевых изоляторов в более широком диапазоне (наружный диаметр от 8 до 45 мм) без снижения требований к погрешности измерений.

5.2 Оптико-электронная система размерного контроля плоской и радиусной плитки из бронекерамики "КБК"

Для контроля дефектов внешнего вида и геометрии керамических элементов из карбида бора B_4C и алюмооксидной Al_2O_3 керамики трёх типов («шестигранник плоский», «плитка плоская» и «плитка радиусная») для ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" разработана и изготовлена система "КБК".

Изделия (рисунок 5.5) применяются для формирования броневой защиты с малым весом для танков, вертолетов, авиации, судов, автомобилей, личного состава. Для создания высокопрочной брони требуется четкая стыковка пластин друг с другом (допустимый зазор между пластинами не более 50 мкм). Для защиты радиусных поверхностей бронетехники используется радиусная плитка, шестигранники. Существенно, что до последнего времени контроль всех требуемых параметров осуществлялся вручную, что трудоемко и не удовлетворяет требованиям производства.



Рисунок 5.5 – Плоская и радиусная плитка из карбида бора и вакуумной керамики

В разработанной системе использовался специально рассчитанный телецентрический объектив "КБК" 0,189^X (глава 3). По результатам экспериментов, приведенных в главе 4, было принято решение в качестве источника света использовать некогерентный осветитель на базе матового кольцевого рассеивателя.

Система позволяет измерять и контролировать следующие геометрические параметры: линейные размеры в диапазоне от 20 до 50 мм с погрешностью не более 30 мкм, параллельность и плоскостность рабочих поверхностей изделий с погрешностью не более 20 мкм, а также наличие дефектов на поверхности изделий (сколов на кромках) размером более 0,5 мм.

В основе работы системы положены следующие методы:

- структурного освещения для измерения высоты изделий, радиуса внутренней цилиндрической поверхности, плоскостности рабочих поверхностей;
- телевизионный для измерения габаритных размеров, параллельности противоположных граней изделий и обнаружения дефектов.

Оптическая схема системы приведена на рисунке 5.6.

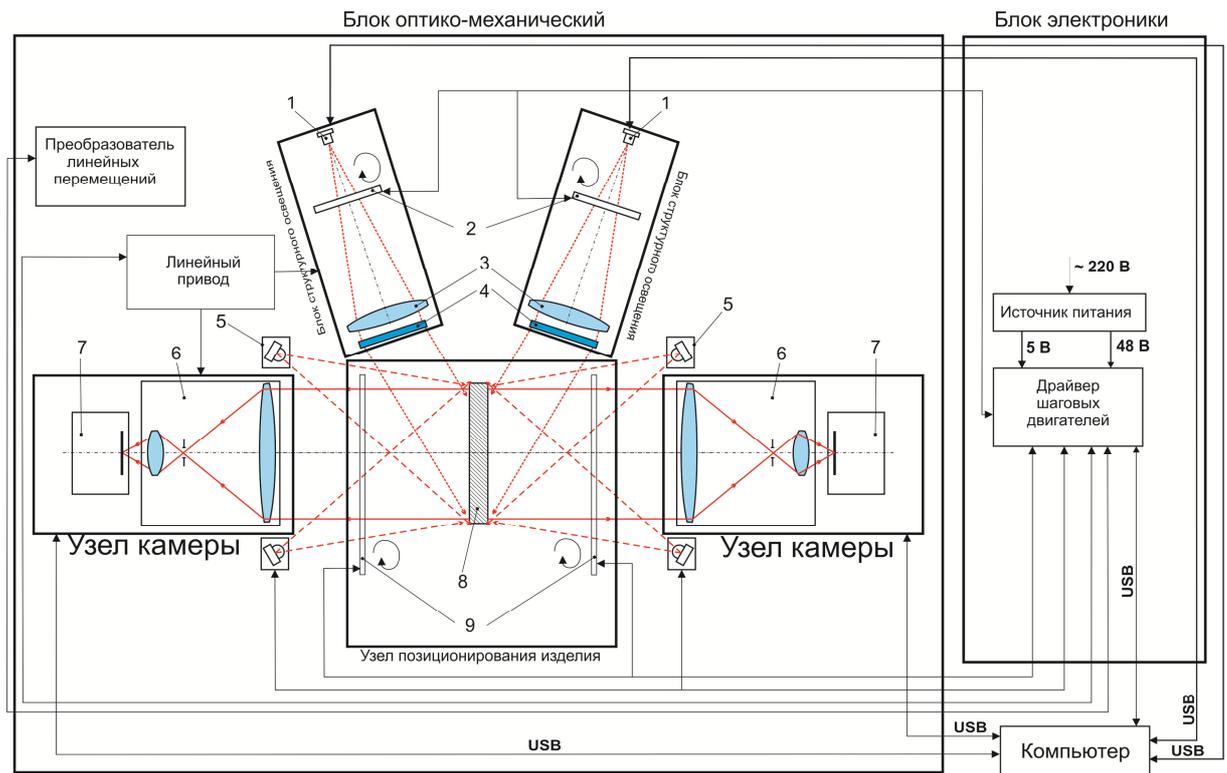


Рисунок 5.6 – Оптическая схема системы "КБК": 1 – осветитель, 2 – шторки, 3 – коллимационный объектив, 4 – ДОЭ, 5 – осветитель кольцевой, 6 – объектив, 7 – модуль камеры, 8 – изделие, 9 – шторки

На столешнице системы расположены два канала А, Б. Между блоками расположен узел позиционирования детали, на котором устанавливается изделие. Конструкция системы симметрична относительно плоскости, проходящей через середину изделия. Его измерение происходит одновременно с двух сторон. Каждый канал состоит из блока структурного освещения, кольцевого осветителя и узла камеры. Канал А дополнительно имеет моторизованную подвижку и перемещается в горизонтальном направлении для подстройки под объекты разной толщины. Канал Б неподвижен. Перенастройка на разные типы изделия осуществляется путем передвижения канала А с помощью линейного привода.

В качестве проекционного блока для реализации обоих методов используется два телецентрических объектива "КБК" $0,189^X$, описанных в главе 3. Для создания телевизионного изображения объектив работает с широкой апертурной диафрагмой.

Для получения телевизионного изображения изделие освещается равномерно с помощью кольцевого осветителя, состоящего из 24 сверхярких светодиодов, который формирует излучение в области измерительной позиции с высокой степенью

равномерности (неравномерность не более 5 – 10 %). Подсвеченная контролируемая поверхность изделия проецируется с помощью объектива на фотоприёмную матрицу камеры. Экспозиция камеры программно меняется в зависимости от отражательной способности изделия. Изображение с камеры передается в компьютер, где производится программная обработка полученного изображения. При измерении одного изделия производится регистрация четырёх изображений.

При обработке изображения определяется положение края изделия на изображении, полученном телевизионным методом. Множество найденных точек края аппроксимируется прямой или параболой в зависимости от изделия. Затем определяется пересечение полученных кривых, и находятся координаты углов изделия. По ним вычисляются геометрические размеры плитки и параллельность её граней.

Внешний вид системы приведен на рисунке 5.7. Загрузка и выгрузка деталей производится вручную. Результаты измерений детали выводятся на экран монитора с соответствующей маркировкой (годен, брак).

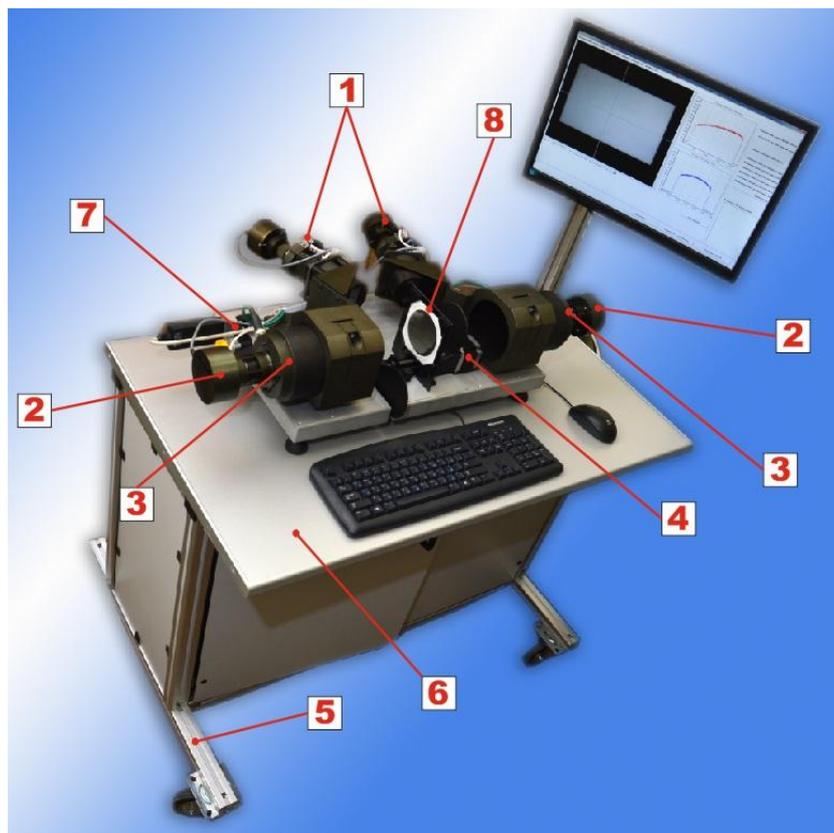


Рисунок 5.7 – Внешний вид опико-электронной системы контроля керамической плитки "КБК": 1 – блок структурного освещения, 2 – узел камеры, 3 – осветитель кольцевой, 4– узел позиционирования детали, 5 – каркас стола, 6 – столешница, 7 – линейный привод канала А, 8 – мира/изделие

Для учета систематической погрешности системы используется предварительная программная калибровка системы, аналогичная проводимой в системе "Кольцо". Затем осуществляется измерение размеров изделия с помощью ПО. Границы объекта определяются с помощью оператора Собеля (аналог дифференцирования). Оператор использует ядра 3×3 , с которыми сворачивают исходное изображение для вычисления приближенных значений производных по горизонтали (G_x) и по вертикали (G_y). Они вычисляются следующим образом:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \otimes A \text{ и } G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \otimes A,$$

где A — исходное изображение; G_x и G_y — два изображения, в которых каждая точка содержит приближенные производные по x и по y .

В каждой точке изображения вычисляется приближенное значение величины градиента G :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}.$$

По максимуму функции G определяется граница изделия (рисунок 5.8).

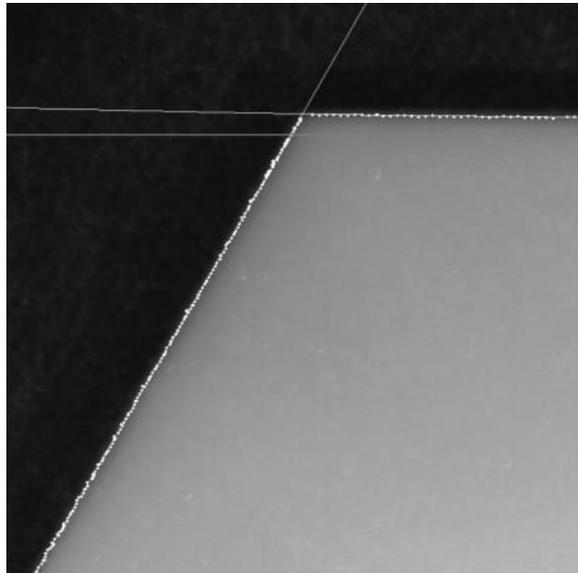


Рисунок 5.8 – Обработанное с помощью ПО теневое изображение бронеплитки

Система "КБК" прошла полный цикл производственных испытаний на предприятии ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" и в настоящее время находится в промышленной эксплуатации.

5.3 Оптико-электронная система размерного контроля бронероликов "УКБр-1"

Для ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" разработана, изготовлена и внедрена на предприятие система контроля бронероликов из Al_2O_3 -керамики "УКБр-1". Она предназначена для контроля керамических бронероликов двух типов (с двумя сферическими торцами и с одним сферическим торцом) по следующим параметрам: диаметр в диапазоне от 12 до 30 мм с погрешностью не более 5 мкм, высота в диапазоне от 7 до 26 мм с погрешностью не более 30 мкм и цилиндричность с погрешностью не более 10 мкм. Время контроля одного изделия не более 1 с.

Бронеролики (рисунок 5.9) применяются для создания керамо-композитных навесных бронепанелей защитного кожуха военной техники, бронезилетов личного состава, которые выдерживают нагрузку до 15 тонн.

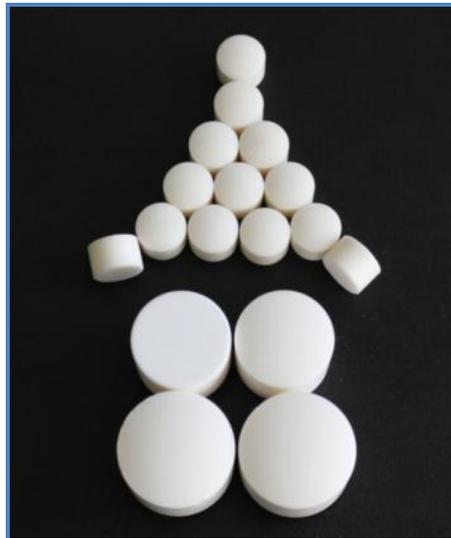


Рисунок 5.9 – Бронеролики из вакуумной керамики

Критичным является контроль диаметров бронероликов, так как при их сборке в элементы защиты важно, чтобы в одном элементе были подобраны изделия, максимально близкие по диаметру. В этом случае обеспечивается наиболее плотная компоновка бронероликов внутри брони, что в свою очередь улучшает её защитные характеристики.

В системе использовался телецентрический объектив "Кольцо" 0,155^X (глава 3). Дисторсия объектива корректировалась по методике, описанной в главе 4.

В основу работы системы контроля бронероликов положены следующие методы:

- теневой для измерения диаметра, высоты и цилиндричности бронероликов;
- телевизионный для обнаружения дефектов.

Для увеличения быстродействия система разделена на три параллельных оптических канала. На рисунке 5.10 показана оптическая схема одного канала.

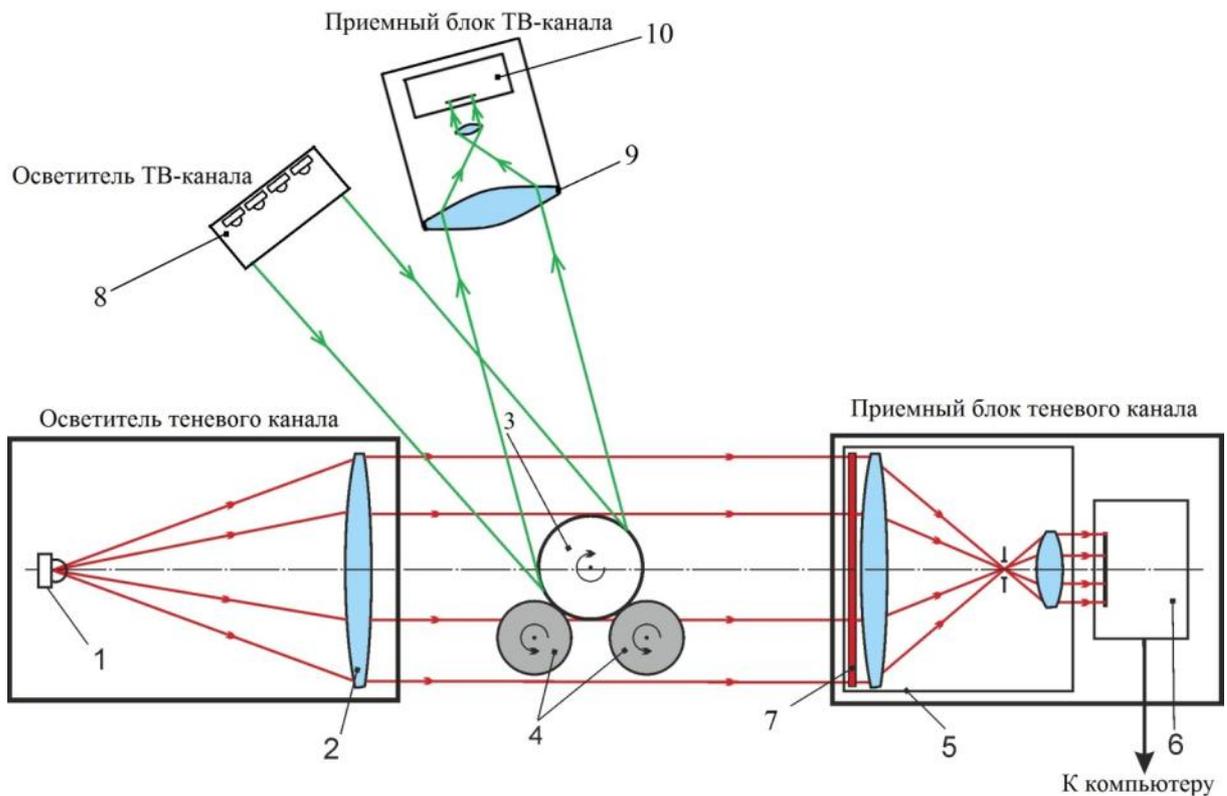


Рисунок 5.10 – Оптическая схема одного канала системы контроля бронероликов "УКБр-1": 1 – светодиод теневого проекционного канала, 2 – объектив, 3 – бронеролик, 4 – гребенчатые валы, 5 – телецентрический объектив, 6 – цифровая камера теневого проекционного канала, 7 – светофильтр, 8 – линейка светодиодов ТВ-канала, 9 – объектив, 10 – цифровая камера ТВ-канала

Пучок света от светодиода 1 коллимируется объективом 2 и освещает бронеролик 3, установленный на гребенчатых валах 4. Теневое изображение бронеролика формируется телецентрическим объективом 5 (описанным в главе 2) на матрице цифровой камеры 6. Валы 4 имеют вырезы для того, чтобы была видна с двух сторон цилиндрическая поверхность бронеролика. Изображение передается в компьютер (на рисунке не показан), где проводится вычисление геометрических параметров. Бронеролик 3 вращается вокруг своей оси гребенчатыми валами 4. Для измерения цилиндричности изделия во время одного оборота бронеролика регистрируется серия кадров (до 10 шт.), и таким образом проводится измерение диаметра во многих сечениях по углу. Боковая поверхность бронеролика освещается линейкой светодиодов 8. Изображение бронеролика в рассеянном свете проецируется объективом 9 на матрицу цифровой камеры 10. Благодаря

вращению бронеролика на компьютер передается набор изображений боковой поверхности бронеролика, по которым далее программно строится её развертка. По развертке автоматически определяется наличие дефектов боковой поверхности (раковин, сколов, включений).

Фотография макета одного канала показана на рисунке 5.11.

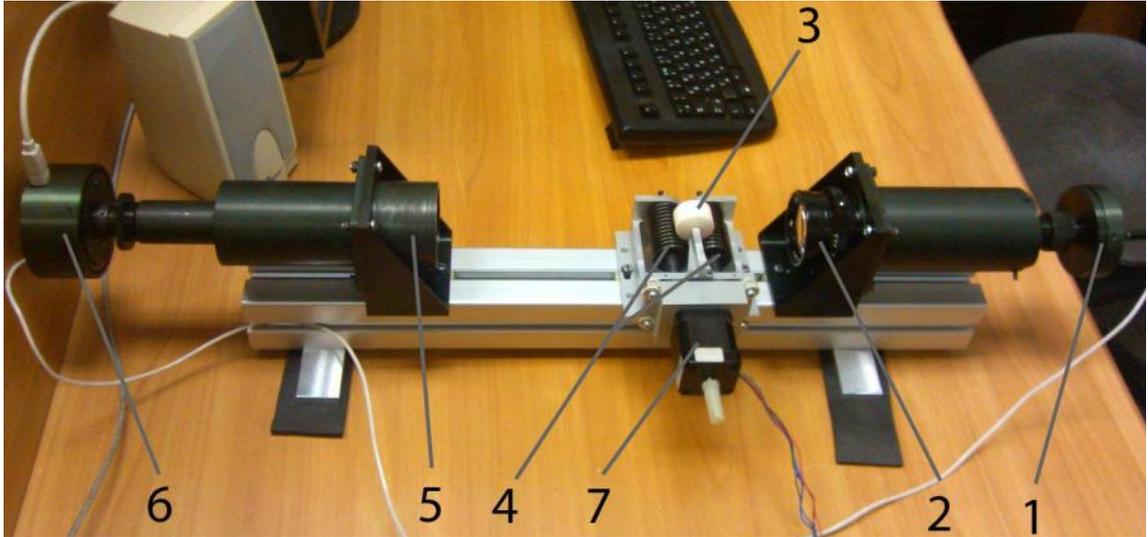


Рисунок 5.11 – Внешний вид одного измерительного блока системы контроля бронероликов "УКБр-1": 1 – светодиодный осветитель, 2– объектив, 3 – бронеролик, 4 – гребенчатые валы, 5 – телецентрический объектив, 6 – цифровая камера, 7 – привод

С помощью системы осуществляется разбраковка изделий на десять размерных групп (AA, A, B, C, D, E, F, G, «Брак+», «Брак-») в зависимости от разброса диаметров, с учетом годности по высоте, цилиндричности роликов и дефектов на их поверхности. Бронеролики, диаметр которых выходит за допустимые пределы, попадают в категории «Брак+» или «Брак-».

Измерения производятся одновременно в параллельных каналах. После измерения бронеролики с помощью пневматического манипулятора перемещаются на движущийся конвейер. В зависимости от результатов измерений бронеролики автоматически с помощью пневматических цилиндров сортируются по группам. Внешний вид всей системы приведен на рисунке 5.12.

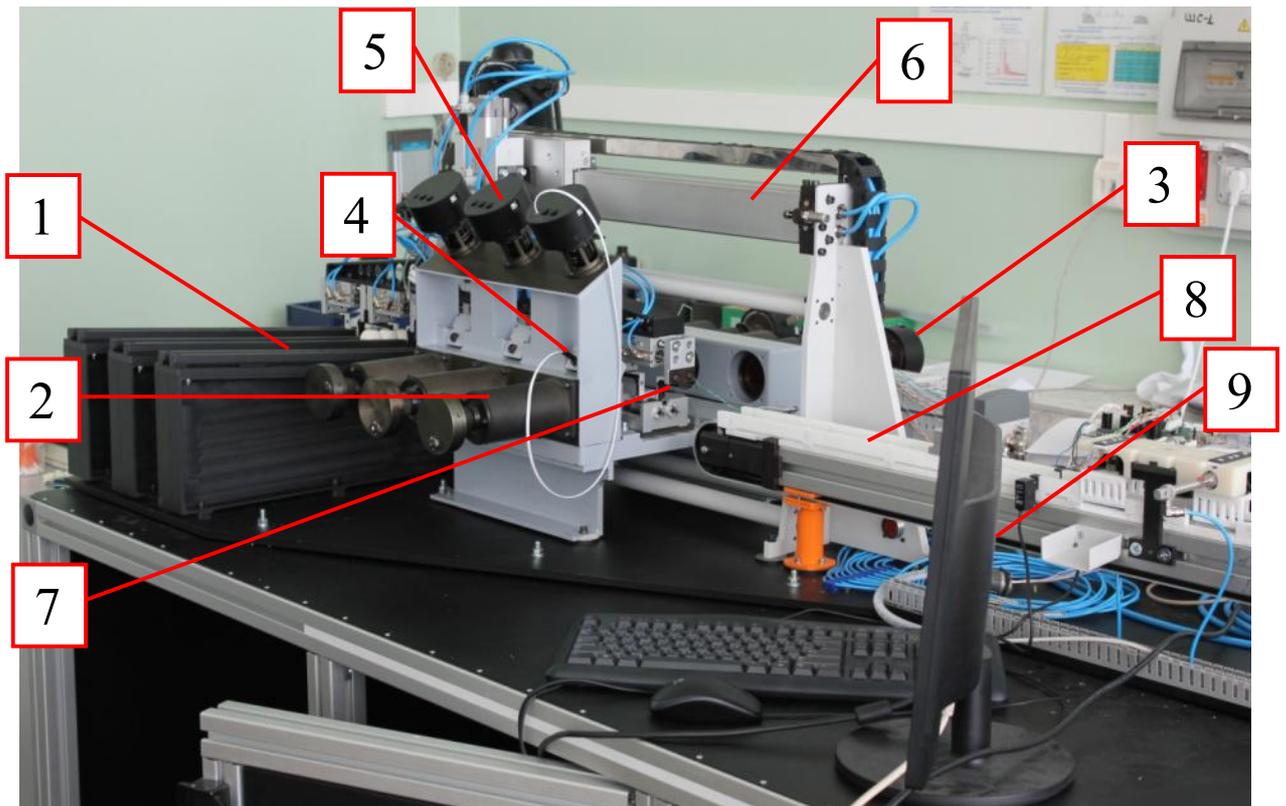


Рисунок 5.12 – Внешний вид системы контроля бронероликов "УКБр-1":
 1 – позиция подачи, 2 – осветители теневого проекционного канала, 3 – камеры теневого канала, 4 – осветители телевизионного канала, 5 – камеры телевизионного канала, 6 – манипулятор, 7 – пневмозахват, 8 – конвейер, 9 – монитор

С помощью ПО производится калибровка каждого канала системы (аналогично предыдущим системам), после чего определяется теневая граница объекта. Для теневого проекционного канала проводится нормировка интенсивности сигнала по всей матрице для учета остаточной неравномерности освещения кадра. Определение границы производится путем нахождения положения половины значения максимальной нормированной интенсивности в кадре (среднее между предварительно найденными уровнями черного и белого). Затем производится субпиксельное уточнение с помощью линейной интерполяции фронта сигнала по методу наименьших квадратов в окрестности искомой точки. Пример теневого изображения бронеролика показан на рисунке 5.13.

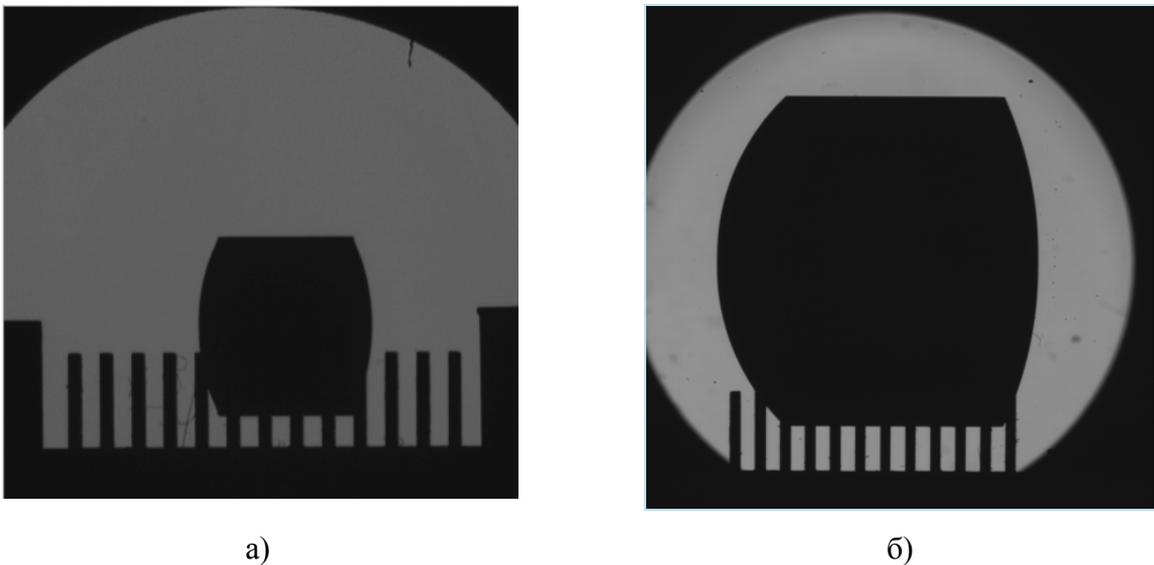


Рисунок 5.13 – Теневые изображения бронероликов, полученные системой: а) бронеролик диаметром 13,4 мм, б) бронеролик диаметром 29 мм

С 2014 года установка находится в опытной эксплуатации на ЗАО "НЭВЗ-Керамикс". За это время проконтролировано около 500 000 изделий, ежемесячно производится контроль около 24 000 изделий.

5.4 Результаты метрологических испытаний систем размерного контроля и их анализ

В результате анализа погрешностей измерений размеров объектов теневыми проекционными системами было установлено, что основными источниками погрешности являются: влияние остаточных нетелецентричности и aberrаций проекционных объективов, используемых в системе; неточность установки объекта измерений в

измерительном объеме; неверный выбор уровня порога в профиле интенсивности изображения объекта, не учитывающий параметры системы и толщину объекта.

Для минимизации указанных составляющих погрешности измерений были разработаны усовершенствованные способы определения размеров объекта пороговым методом с учетом параметров системы и толщины объекта. Кроме этого, рассчитаны и изготовлены телецентрические объективы с высокими техническими характеристиками. Разработана и применена в системах контроля методика коррекции остаточной дисторсии по точечной mire, существенно снижающая погрешность измерений системы (более 10 мкм).

Ниже проиллюстрирована эффективность применения методики коррекции aberrаций, а также представлены результаты приемочных испытаний созданных систем и сравнительный анализ с результатами измерений отделом технического контроля (ОТК) предприятия.

На системе геометрического контроля "УКБр-1" теневым проекционным методом были измерены диаметры и высоты бронероликов с учетом коррекции дисторсии по mire и без коррекции. В случае, когда mire не использовалась, одно из измерений принималось за реперное. По нему определялись геометрические размеры остальных изделий. В эксперименте участвовали изделия различных размеров. Размеры бронероликов, полученные без коррекции, сравнивались с размерами, полученными по mire, а также с размерами, полученными контактным методом с помощью микрометра. В результате эксперимента установлено, что учет остаточной дисторсии по полю позволил уменьшить погрешность системы на 17 мкм. Это свидетельствует об эффективном использовании коррекции измерений по точечной mire.

В апреле 2011 года система геометрического контроля керамических изоляторов "Кольцо" прошла производственные испытания. В результате поверки системы с использованием стандартных образцов установлены следующие погрешности измерения геометрических параметров колец (при доверительной вероятности 0,95):

- погрешность измерения наружного диаметра±0,005 мм;
- погрешность измерения внутреннего диаметра±0,006 мм;
- погрешность измерения высоты±0,002 мм;
- погрешность измерения неплоскостности торцевых поверхностей..... ±0,006 мм;
- погрешность измерения непараллельности торцевых поверхностей..... ±0,008 мм.

В процессе испытаний были проведены сравнительные измерения большого количества керамических колец разных типоразмеров системой контроля "Кольцо" и штатными контактными средствами ОТК. Результаты испытаний приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение результатов контроля керамических колец

	Система	ОТК
Всего, шт.	10337	8625
Годные, шт.	8894	7460
Брак и исправимый брак, шт.	1443	1165
Процент брака	14%	13,5%
Изделия с дефектами (по партиям после прокалики)	4,6%	8,5%

Результаты контроля дефектов системой и ОТК (таблица 5.1) отличаются (4,6% и 8,5% соответственно) ввиду того, что система не контролирует дефекты на наружной и внутренней боковых поверхностях, внутренние поры и намечающиеся трещины.

В результате измерения системой партий изделий, прошедших ОТК, установлено, что соответствие результатов контроля составило 78%. Основные причины различий связаны с повышенной погрешностью контроля контактными средствами (результаты контроля зависят от степени их износа) и нахождением фактических размеров изделий на границе диапазона допустимых размеров.

В августе 2014 года система геометрического контроля плоской и радиусной плитки из бронекерамики "КБК" прошла производственные испытания. В процессе испытаний проведены измерения большого количества керамических плиток разных типоразмеров для сравнения результатов контроля системой и штатным контактным средством ОТК (контрольно-измерительной машины). В результате установлены следующие погрешности измерения геометрических параметров керамических плиток (при доверительной вероятности 0,95):

- погрешность измерения ширины $\pm 0,03$ мм;
- погрешность измерения высоты $\pm 0,01$ мм;
- погрешность измерения непараллельности граней..... $\pm 0,015$ мм.

Основные различия связаны с деформированной формой изделий и дискретным характером определения их размеров средствами ОТК. Система бесконтактного контроля

даёт более точные значения геометрических размеров благодаря их усреднению по всей грани изделия.

В 2014 году также были проведены приемочные испытания системы геометрического контроля "УКБр-1" с использованием стандартных образцов, измеренных оборудованием в ОТК предприятия. В результате испытаний получены следующие погрешности:

- погрешность измерения диаметра $\pm 0,005$ мм;
- погрешность измерения высоты $\pm 0,03$ мм;
- погрешность измерения цилиндричности..... $\pm 0,01$ мм.

Результаты испытаний систем контроля и их анализ показывают, что системы полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к контролю изделий, а применение коррекции по мере позволило более чем на 10 мкм повысить точностные характеристики систем контроля.

Выводы по главе 5

На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований (главы 2-4) в КТИ ИП СО РАН разработаны, созданы, а также внедрены и успешно эксплуатируются на предприятии города Новосибирска ЗАО "НЭВЗ-Керамикс" три системы промышленного контроля изделий из керамики: "Кольцо", "КБК", "УКБр-1" (система контроля "Кольцо" эксплуатируется более пяти лет). Погрешность измерения систем составляет 5-30 мкм в зависимости от параметра контроля. В основу работы систем положен принцип комплексирования различных оптико-электронных методов измерения размеров: теневого проекционного, структурного освещения, телевизионного. Системы обладают повышенной точностью по сравнению с существующими и полностью удовлетворяют техническим требованиям заказчика.

Использование систем на предприятии позволило повысить точность контроля (погрешность не более 5 мкм), его быстродействие (1 шт./с), снизить трудозатратность, увеличить надежность измерений, практически устранить "человеческий фактор". К настоящему моменту на системах проконтролировано более 650 000 изделий.

В созданных системах используются разработанные специальные телецентрические объективы, позволяющие регистрировать, как теневые изображения с малой дисторсией (менее 0,02 %), так и телевизионные изображения с высоким разрешением (до 100 линий/мм). Показано, что применение разработанных телецентрических объективов

пригодно не только для использования в системах контроля, основанных на теневых проекционных методах, но и для систем, измерения в которых проводятся другими оптическими методами (телевизионным, методом структурного освещения, триангуляционным).

Для уменьшения погрешности измерений, а также увеличения номенклатуры измеряемых изделий, использована теоретическая модель дифракции на протяженном крае при освещении источником с конечными размерами, на основе которой рассчитаны корректирующие поправки при измерении диаметров колец тенью проекционным методом.

Разработанные и изготовленные телецентрические объективы и созданные на их базе измерительные системы для бесконтактного контроля трехмерных объектов обладают высоким потенциалом импортозамещения и пополняют арсенал современных отечественных оптико-электронных средств размерного контроля трехмерных изделий.

Заключение

В работе решена задача разработки, создания и исследования оптико-электронных каналов для теневых проекционных систем геометрического контроля размеров изделий габаритами до 250 мм с повышенной точностью измерения на примере систем контроля керамических изделий с погрешностью не более 5 мкм.

Исследованы особенности формирования изображений объемного края трёхмерного объекта в проекционной дифракционно-ограниченной системе. Найдена аналитическая зависимость интенсивности света в изображении объемного края в области его границы от параметров оптической системы. Показано, что интенсивность света в месте расположения границы объекта, наряду с постоянной составляющей, которая соответствует значению интенсивности в граничной точке изображения полуплоскости при его когерентном освещении, содержит две дополнительные. Одна из них пропорциональна квадрату отношения углового размера источника света к угловому размеру апертурной диафрагмы приемного объектива, а другая – отношению углового размера апертурной диафрагмы к критическому углу дифракции, который пропорционален корню квадратному из толщины объекта. Так как эти составляющие имеют разные знаки, то при заданной толщине объекта выбором угловых размеров источника можно минимизировать смещение границы объекта от положения истинного края теневого изображения.

Предложены два способа определения положения границ трехмерного края на базе порогового метода, учитывающие параметры системы и толщину объекта. Первый из них предусматривает установление уровня порога, равного значению интенсивности света в изображении трёхмерного объекта в точке, соответствующей его геометрической границе, а второй – основан на использовании стандартных порогов (0,25 и 0,5 от уровня максимальной интенсивности, соответственно, для случаев когерентного и некогерентного освещений) с внесением в них корректирующих поправок.

В рамках импортозамещения спроектированы оптические схемы телецентрических в пространстве предметов объективов для применения в системах размерного контроля, обладающих улучшенными оптическими характеристиками по сравнению с известными схемами: увеличенным полем зрения (до 250 мм), телецентричностью лучей в пространстве предметов (не более $0,01^\circ$), ортоскопичностью (дисторсия менее 0,02 %) и разрешением по всему полю зрения (до 100 линий/мм при коэффициенте передачи

контраста 0,7 отн. ед.), уменьшенным астигматизмом (менее 0,1 мм). Спроектированная схема с линейным полем зрения 250 мм с сохранением дифракционного качества изображения по всему полю не имеет аналогов среди проекционных телецентрических в пространстве предметов объективов (подана заявка на патент). Разработанные оптические схемы содержат малое количество оптических элементов (не более 7 вместо более 10), среди которых всего одна склеенная линза, причём первая линза в объективе имеет максимальный диаметр, а остальные элементы благодаря близкому расположению к апертурной диафрагме имеют заметно меньшие диаметры, что позволяет снизить стоимость изготовления объективов.

Путём компьютерного моделирования проведён анализ влияния aberrаций объектива и допусков его изготовления на размер теневого изображения объекта. Показано, что наибольшее влияние на погрешность измерения вносит изменение формы пятна рассеяния при смещении объекта вдоль и поперек оптической оси (до 10 мкм). Точность изготовления оптических элементов и сборки передней части объектива (до апертурной диафрагмы) влияет на телецентричность в пространстве предметов, а элементов задней части (после апертурной диафрагмы) – на величину дисторсии. Суммарная погрешность измерения без учёта результатов анализа может превышать 30 мкм.

Экспериментально исследовано влияние длины волны и диаметра осветителя, относительного отверстия проекционного объектива, толщины и смещения объекта на изменение размера его теневого изображения. Выявлено, что основными составляющими погрешности при промышленном контроле являются: остаточная нетелецентричность и дисторсия телецентрического объектива (ошибка до 30 мкм), неточность позиционирования изделия в измерительном объёме (смещение объекта на 5 мм может привести к ошибке 10 мкм), влияние толщины объекта на положение края (до 5 мкм). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами теоретических исследований и компьютерным моделированием.

Создана и апробирована методика контроля оптических параметров телецентрических объективов, основанная на регистрации двух изображений точечной миры, смещённой вдоль оптической оси. В отличие от известных методик, предложенная позволяет одновременно определять такие оптические характеристики объектива, как дисторсию поля на рабочем расстоянии, изменение дисторсии вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, частотно-контрастную характеристику объектива в различных точках по полю. Это

позволяет использовать методику для калибровки оптического канала, уже встроенного в систему контроля.

Полученные результаты использованы при разработке и создании трёх систем контроля трёхмерных объектов: «Кольцо» для контроля кольцевых изоляторов, «КБК» для контроля керамических бронеплиток и «УКБр-1» для контроля бронероликов. Системы находятся в промышленной эксплуатации на предприятии ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» с 2011 года, что подтверждено Актом о внедрении. Применение в системах разработанных способов обработки изображений трёхмерных объектов, а также спроектированных и изготовленных телецентрических объективов позволило добиться радикального снижения систематической погрешности измерений 5 мкм для диаметра 65 мм, что соответствует лучшим мировым аналогам. Эксплуатация систем позволила автоматизировать процесс контроля изделий, сделать его бесконтактным, повысить надежность и быстродействие контроля (1 шт./с), снизить трудозатратность, исключить субъективный «человеческий» фактор, и тем самым повысить рентабельность производства.

Разработанные и изготовленные телецентрические объективы и созданные на их базе измерительные системы для бесконтактного контроля трёхмерных объектов обладают высоким потенциалом импортозамещения и пополняют арсенал современных отечественных оптико-электронных средств размерного контроля трёхмерных изделий.

Список сокращений и условных обозначений

ГРИП	– глубина резко изображаемого пространства
ЗАО	– закрытое акционерное общество
ДОЭ	– дифракционный оптический элемент
КПД	– коэффициент полезного действия
КТИ НП СО РАН	– Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук
КТР	– коэффициент температурного расширения
ЛЗОС	– Лыткаринский завод оптического стекла
МПФ	– модуляционно передаточная функция
ОАО	– открытое акционерное общество
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство
ОПФ	– оптическая передаточная функция
ОТК	– отдел технического контроля
ПО	– программное обеспечение
ПР	– перемешивающая решетка
ТВС	– тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	– тепловыделяющий элемент
ФКЭ	– функция концентрации энергии
ФПФ	– фазовая передаточная функция
ФРТ	– функция рассеяния точки
ЧКХ	– частотно-контрастная характеристика

Список литературы

1. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 271 с.
2. Каталог Thorlabs, Inc. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://thorlabs.us/>
3. Каталог Opto Engineering [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.opto-engineering.com>
4. Телецентрический проекционный объектив Патент на полезную модель №: 25798 [Текст]: МКП G02В, Волков Д.Ю., Совз И.Е., Сокольский М.Н., Трегуб В.П. , патентообладатель: Открытое акционерное общество "ЛОМО", заявл. 06.03.2002; опубл. 20.10.2002.
5. ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 12 с.
6. Сырямкин, В.И. Системы технического зрения: Справочник / В.И. Сырямкин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др.; под общей редакцией В.И. Сырямкин, В.С. Титов. - Томск: МГП "РАСКО", 1992. - 367 с.: ил.
7. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. - М.: Изд-во Машиностроение, 2003. – 657 с.
8. Волосов, С.С. Приборы для автоматического контроля в машиностроении: учеб пособие для вузов / С.С. Волосов, Е.И. Педь. - М.: Изд-во стандартов, 1975. - 336 с.
9. Белобородов, А.В. Оптико-электронный контроль керамических колец / А.В. Белобородов, А.А. Гущина, П.С. Завьялов, Е.С. Сенченко, Л.В. Финогенов, Ю.В. Чугуй // Датчики и системы. – 2012. – т. 4. – С. 25-29.
10. Трегуб В.П. Цветной теневой метод исследования теплообмена на моделях склоновых земель агроландшафтов: дис. ... канд. техн. наук : 06.01.03 / Трегуб Владимир Петрович.- СПб., 2005. - 130 с.
11. Арбузов, В.А. Оптическая Гильберт-диагностика динамических структур в газовых потоках / В.А. Арбузов, Ю.Н. Дубнищев, Д.А. Герасимов, Д.А. Дружинин. – Новосибирск: Издательство СО РАН, Автометрия. -2007. - Том 43. - №5. С. 104-110.
12. Скотников, М.М. Теневые количественные методы в газовой динамике /

М.М. Скотников. - М.: Наука, 1976. – 160 с.

13. Васильев, Л.А. Теневые методы / Л.А. Васильев. - М. Наука, 1968. - 400 с.
14. Сикорук, Л.Л. Телескопы для любителей астрономии / Л.Л. Сикорук. – 2-е изд., перераб. - Главная редакция физико-математической литературы, М.: Наука. - 1989. - 368 с.
15. Вокулер, Ж. Фотографирование небесных тел (для любителей астрономии) / Ж. Вокулер, Ж. Тексеро. - М, 1967. – 104 с.
16. Витриченко, Э.А. Методы исследования астрономической оптики / Э.А. Витриченко. – Издательство: Москва "Наука", 1980. – 152 с.
17. Батшев, В.И. Оптические системы, свойства и методы контроля асферических поверхностей большого диаметра: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Батшев Владимир Игоревич. - [Место защиты: Москв. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана] — Москва, 2010. -121 с.
18. Максutow, Д. Д. Теневые методы исследования оптических систем / Д. Д. Максutow. – М. - Л., Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. -171 с.
19. Ronchi, V. Le frange di combinazioni nello studio delle superficie e dei sistemi ottici / V. Ronchi // [Combination fringes in the study of surfaces and optical systems], Rivista d'Ottica e Meccanica di precision [Journal of Optics and Precision Mechanics]. – 1923. - vol. 2. - pp. 9-35.
20. Mobsby, E. A Ronchi Null Test for Paraboloids / E. A. Mobsby, Sky and Telescope. – 1974. – v. 48. - No 5.
21. Максutow, Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д. Д. Максutow. - Л.; М.: ОГИЗ-Гостехиздат, 1984. – 280 с.
22. Кирилловский, В.К. Оптические измерения. Часть 7. Инновационные методы контроля при изготовлении прецизионных асферических поверхностей / В.К.Кирилловский, Е.В.Гаврилов. – СПб ГУ ИТМО, 2009.- 118 с.
23. Скорнякова, Н. М. Применение теневого фонового метода / Н. М. Скорнякова // ОМИП-2009, Москва. - 2009.
24. Авиация: Энциклопедия / Главный редактор Г.П. Свищев. - М.: Большая Российская Энциклопедия, 1994. - 766 с.
25. Murphy, D. B. Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging / Douglas B. Murphy. – John Wiley & Sons. 2001. – 385 p.
26. Лемешко, Ю.А. Дифракционный метод измерения диаметров круговых отражающих цилиндров / Ю.А. Лемешко, Ю.В. Чугуй // Автометрия. - 2005. том 41. - №6.

– С. 3-12.

27. Свендровский, А.Р. Расчёт диаметра в бесконтактных двухкоординатных измерителях / А.Р. Свендровский // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения – сборник трудов конференции. – 2005. – с. 31.

28. Фролов, Д. Н. Опыт разработки устройства бесконтактного измерения диаметра кабельных изделий. / Д. Н. Фролов, А. Р. Свендровский, А. А. Гольцеймер, Ю. Г. Гладышев // Электротехника. - 1991. – №3. – с. 26.

29. Фёдоров, Е.М. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства / Е.М. Фёдоров, А.Е. Гольдштейн, В.В. Редько // Ползуновский вестник. - 2010.- № 2. С. 141-148.

30. Чугуй, Ю.В. Метод измерения размеров объектов в когерентном свете на основе преобразования Френеля / Ю.В. Чугуй, Н.А. Яковенко, М.Д. Ялуплин // Автометрия. - 2004. - №5. - Т. 40. - С. 38-55.

31. Редько В.В. Приборы и методы контроля качества и диагностики / Редько В.В., Федоров Е.М.: Томск. 2007. – 118 с.

32. Ялуплин, М. Д. Оптические методы высокоточного измерения геометрических размеров объектов на основе дифракции света: дис. ... канд. физ-мат. наук: 01.04.05 / Ялуплин Михаил Дмитриевич. – Краснодар, 2006. - 117 с.

33. Чугуй, Ю.В. Особенности формирования и оконтуривания изображений объемных тел в когерентном свете / Ю.В. Чугуй. // Автометрия. - 1991. - №4. 1991. - С.103-112.

34. Дубнищев, Ю. Н. Теория и преобразование сигналов в оптических системах / Ю.Н. Дубнищев. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2011. – 368 с.

35. Богатырева, В.В. Оптические методы обработки информации / Учебное пособие. / В.В. Богатырева, А. Л. Дмитриев. – СПб: СПбГУИТМО. 2009. – 74 с.

36. Богомолов, Е.Н. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «Сенсор» / Е.Н. Богомолов, Н.В. Василец, Б.Е. Кривенков, Ю.В. Чугуй, Л.М. Шульженко, В.П. Юношев, И.В. Ярославцев // Автометрия. – 1989. – №5. – С. 83-91.

37. Каталог "Элеконт" [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.elecont.com.ua/ru/>

38. Каталог "Эрмис+" [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ermis.tomsk.ru/catalog/>

39. Каталог "Keyence" [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.keyence.co.uk/products/>

40. Каталог ООО «НПО Редвилл» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.redwill.ru>
41. Рождественский, Д.С. Когерентность лучей при образовании изображения в микроскопе / Д.С. Рождественский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940 - т. 10. - вып. 3. – С.305-330.
42. Быстров, Ю.А. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве / Ю.А. Быстров, Е.А. Колгин, Б.Н. Котлецов. - М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.: ил.
43. Smith, W.J. Modern Optical Engineering The Design of Optical system 3rd edition / W.J. Smith. - McGraw-Hill Professional, 2000. - 617 p.
44. Афокальная система для сканирования кожного рисунка [Текст]: заявка 2008101230/14, МКП А61В5/117/ Дроздов Н.Г. заявитель и патентообладатель Дроздов Н.Г., патент 2459579, заявл. 09.01.2008; опубл. 27.08.2012.
45. Объектив, телецентрический для ультрафиолетовой области спектра [Текст]: заявка 28762164, МКП G02В 13/14/ Грамматин А.П., Яковлева Е.Е. патент 871122, заявл. 25.01.1980; опубл. 07.10.1981.
46. Волков, Д.Ю. Разработка и исследование объективов с телецентрическим ходом лучей: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Волков Дмитрий Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2004. – 1490 с.
47. Zoom Telecentric System. Telecentric 12x [Электронный ресурс] / Navitar. - Режим доступа: <http://www.sensorsintegration.com/uploaded/Doc/Navitar%20Telecentric%20Brochure.pdf>
48. Телецентрический объектив [Электронный ресурс] / Labor-Microscopes // Санкт-Петербург. - Режим доступа: <http://www.labor-microscopes.ru/about/new-development/objectives/telecentricheskij-obektiv.html>
49. Широкоугольный телецентрический проекционный объектив с призмой [Текст]: заявка 4930151 СССР: МПК G02В/13/22/ Гончаренко Е.Н., Беляков Г.Ф. и Овчинникова Д.А.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научный центр «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова. -№1793412; заявл.20.04.1991; опубл. 07.02.1993.
50. Светосильный телецентрический объектив с вынесенным входным зрачком [Текст]: заявка 3924663, МКП G02В 13/22/ Журавлев П.В., Шатунов К.П.; заявитель и патентообладатель СКТБ СЭиАП СО АН СССР, патент 1283692, заявл. 08.07.1965; опубл. 15.01.1987.

51. Линзовый телецентрический объектив с вынесенным входным зрачком [Текст]: заявка 2577003, МКП G02В 13/22/ Куликовская Н. И., Королева А.В., Филонов А.С., Ванециан Р.А. и Благородов А.М.; заявитель и патентообладатель Предприятие ПЯ Р-6681, патент 670916, заявл. 02.02.1978; опубл. 30.06.1979.
52. Телецентрические объектив [Текст]: МКП G02В 13/22 Мельникова Н.Н., Грудзино Ю.Б., Давиденко В.П., Румянцев В.В., патентообладатель: Открытое акционерное общество "Лыткаринский завод оптического стекла" патент 2278403, заявл. 24.12.2004; опубл. 20.06.2006.
53. Проекционный светосильный телецентрический объектив [Текст]: МКП G02В 13/22 Хацевич Т.Н., Голицын А.В., Журавлев П.В. Патентообладатель: Институт физики полупроводников СО РАН, патент 2385476, заявл. 21.07.2008; опубл. 27.03.2010.
54. Широкоугольный проекционный объектив [Текст]: МКП G02В 13/22 Марчук С.М. Патентообладатель: Томский политехнический университет, патент 2253141, заявл. 19.05.2004; опубл. 27.05.2005.
55. Широкоугольный проекционный объектив [Текст]: МКП G02В 13/04 Марчук С.М. Патентообладатель: Томский политехнический университет, патент США №US 6542316, заявл. 26.12.2007; опубл. 01.04.2003.
56. Telecentric objective lens with double Gaussian objective - couples lens contents into image conducting fibres with higher illuminating strength at picture edges [Текст]: Eberhard O-6900 Jena De Dietzsch, Gudrun O-6902 Jena De Schneider, заявитель: Jenoptik GmbH, O-6900 Jena, DeDE 4208635 C, заявл. 18.03.1992; опубл. 22.07.1993.
57. Объектив с телецентрическим ходом лучей [Текст]: МКП G02В 13/22/ Лапо Л.М., Совз И.Е., Сокольский М.Н., Полищук Г.С., Трегуб В.П. патентообладатель: Открытое акционерное общество "ЛОМО", патент 2305857, заявл. 29.05.2006; опубл. 10.09.2007.
58. Telecentric image-forming optical system for large image size, [Текст]: Zenji Dainippon Screen Mfg. Co.Ltd. Wakimoto, заявитель: Dainippon Screen Mfg. Co., Ltd. патент № EP 0299474 A2, заявл. 14.07.1987; опубл. 18.01.1989.
59. Measurement objective telecentric on both sides [Текст]: Rolf Dr. Diplom-Mathematiker Wartmann, заявитель: Jos. Schneider Optische Werke Kreuznach GmbH & Co. KG, патент EP 0747743 A1, заявл. 03.06.1995; опубл. 11.12.1996.
60. Русинов, М.М. Техническая оптика / М.М. Русинов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. - 488 с.: ил.
61. Дубнищев, Ю. Н. Колебания и волны / Ю. Н. Дубнищев. – 2-е изд., перераб.

– СПб. : Лань, 2011. - 384 с.

62. Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис. - М.: Мир, 1971. – 494 с.

63. Горелик, Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику / Г.С. Горелик; под ред. С.М. Рытова. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 656 с.

64. Ахманов, С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. - М.: МГУ, 1998. – 654 с.

65. Франсон, М. Когерентность в оптике / М. Франсон, С. Сланский. - М.: Наука. 1967. - С 80.

66. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. - М.: Наука. 1976. – 451 с.

67. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Оптика / Д.В. Сивухин. - М.: Наука, 1980. – 752 с.

68. Коронкевич, В.П. Оптико-геометрический метод расчета дифракции Фраунгофера на объемных телах / В.П. Коронкевич, Б.Е. Кривенков, С.В. Михляев // Автометрия. - 1980 –№2. – С. 25-35.

69. Боровиков, В.А. Геометрическая теория дифракции / В.А. Боровиков, Б.Е. Кинбер. - М.: Связь. 1978. – 248 с.

70. Кривенков, Б.Е. Дифракция Фраунгофера на объёмных телах постоянной толщины / Б.Е. Кривенков, Ю.В. Чугуй // Автометрия. - №3, - 1987.

71. Гудмен, Д. Введение в Фурье оптику / Д. Гудмен. - М.: Мир, 1970. – 364 с.

72. Chugui, Yu. V. Constructive theory of formation and filtering the optical imaging and Fraunhofer diffraction patterns of 3D opaque object of constant thickness in coherent light / Yu. V. Chugui // Proc. SPIE, 2655. – 1996. - pp. 287-298.

73. Chugui, Yu. V. Fraunhofer diffraction by bodies of constant thickness / Yu. V. Chugui, B.E. Krivenkov // JOSA, A 6. – 1989. - pp. 617-626.

74. Chugui, Y. V. High Precision Algorithms for 3D Objects Shadow Inspection in Partially Coherent Light / Yuri V. Chugui and Elena S. Senchenko // Key Engineering Materials. – 2014. - Vol. 613. - pp 151-156.

75. Senchenko, E.S. Shadow Inspection of 3D Objects in Partially Coherent Light / E.S. Senchenko, Yu.V. Chugui // Measurement science review. – 2011. – Vol. 11. - No. 4. - pp. 104-107.

76. Артемьев, В.К. Обзор некоторых достижений в области экспериментально-расчетных исследований повышения эффективности решеточных интенсификаторов

теплообмена в ТВС / В.К. Артемьев, Н.В. Гусев, Ю.Н. Корниенко, Е.В. Корниенко // Россия, Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского. -2008. 16 с.

77. Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора [Текст]: заявка РСТ/RU2009/000080/ Самойлов О.Б., Романов А.И., Кайдалов В.Б., Фальков А.А., Симановская И.Е., Кострицын В.А., Евстигнеев И.В. патентообладатель: ОАО "Машиностроительный завод", патент WO 2010030207 A1, заявл. 19.02.2009; опубл. 18.03.2010.

78. Селиванов, Ю.Ф. Влияние перемешивающих решеток типа "Вихрь" на критическую мощность ТВС ВВЭР / Ю.Ф. Селиванов, Р.С. Пометько, С.Е. Волков // Третья международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2014). – г. Москва, 7-10 октября 2014 г.

79. Завьялов, П.С. Трехмерный контроль геометрических параметров дистанционирующих решеток ядерных реакторов на основе дифракционных оптических элементов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / Завьялов Петр Сергеевич. – Новосибирск, 2011. - 138 с.

80. Лисенков, Е.А. Исследование перемешивания однофазного теплоносителя на модели ТВС-2М с перемешивающими решетками / Е. А. Лисенков, С. М. Лобачев, Ю. А. Безруков, А. В. Селезнев // ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, Россия. – 2013. – 10 с.

81. Senchenko, E.S. Nuclear fuel assemblies' deformations measurement by optoelectronic methods in cooling ponds / E.S. Senchenko, P.S. Zavyalov, L.V. Finogenov, D.R. Khakimov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2013. – Vol. 9066.

82. Завьялов, П.С. Метод структурного освещения для измерения деформаций тепловыделяющих сборок в бассейне выдержки АЭС / П.С. Завьялов, Е.С. Сенченко, Л.В. Финогенов, Д.Р. Хахимов // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 65-73.

83. Валлея, С.Л. Справочник по геофизике и космическому пространству / под ред. С.Л. Валлея и МакГроу-Хилла. - Нью-Йорк, 1965.

84. Datasheet Cmosis CMV20000 [Электронный ресурс] / Cmosis. - Режим доступа: http://www.cmosis.com/products/product_detail/cmV20000

85. Чуриловский, В.Н. Теория оптических приборов / В.Н. Чуриловский. - М.: Машиностроение, 1966. - 565 с.: ил.

86. Кругер, М.Я. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Кругер М.Я., Панов В.А., Кулагин В.В. и др.: М.: ГНТИМЛ. 1963. – 804 с.

87. Волосов, Д.С. Фотографическая оптика: учебное пособие / Д.С. Волосов. - 2-е изд. - М.: Искусство. 1978. — 543 с.
88. Мануал ZEMAX [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.zemax.com>
89. Хацевич, Т.Н. Медицинские оптические приборы. Ч. II. Очковая оптика [Текст]: учеб. пособие / Т.Н. Хацевич. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 367 с.
90. Ефремов, В.С. Оптические материалы и ахроматическая коррекция типовых компонентов оптических систем [Текст]: учеб. пособие / В.С. Ефремов, В.Б. Шлишевский. – Новосибирск: СГГА. 2013. – 284 с.
91. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения / М.Н. Сокольский. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. —221 с: ил.
92. Chugui, Y.V. 3D image formation in transmitted partially coherent and incoherent light applied to dimensional inspection / Y.V. Chugui and E.S. Senchenko // International Journal of Automation Technology. – 2015. - Vol.9. - No.5. – pp. 508-514.
93. Белобородов, А. В. Цифровые КМОП камеры для промышленного применения / А. В. Белобородов, Д. А. Малофеев, Л. В. Финогенов // Датчики и Системы. – 2011. – № 8. – С. 49–52.
94. Gurenko, V.M. Laser writing system CLWS-300/C-M for microstructure synthesis the axisymmetric 3-D surfaces / V.M. Gurenko, L. B. Kastorsky, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, V.M. Vedernikov, A.G. Verkhoglyad // Proc. SPIE. – 2002. – 4900. – pp. 320 – 325.
95. Еськова, Л.М. Метод Гартманна с регистрацией гартманнограммы и диафрагмы в одном масштабе / Л.М. Еськова, А.И. Стороженко // Научно-технический вестник. Теория и практика современных технологий, Санкт-Петербург – 2004. – Выпуск 15.
96. Сысоев, Е.В. Повышение поперечного разрешения при измерении 3D рельефа интерференционным методом / Е.В. Сысоев, И.А. Выхристюк // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X междунар. науч. конгр. и выст. (Новосибирск, 8-18 апр. 2014 г.) : междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. матер. в 2 т. – Новосибирск. - 2014. – Т. 1. – С. 59-64.
97. Данилевич, Ф.М. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов: справочное пособие / Ф.М. Данилевич, В.А. Никитин, Е.П. Смирнова. - Л., "Машиностроение" (Ленингр. отд-ние), 1976. – 256 с.

98. Бубис, И.Я. Справочник технолога-оптика: справочник / И.Я. Бубис, В.А. Вейнденбах, И.И. Духопел и др.; под общ. ред. С.М. Кузнецова и М.А. Окатова. – Л. Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 414 с., ил.
99. НЭВЗ-Керамикс [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.nevz-ceramics.com/ru>
100. Белоглазова, В.А. Оптико-электронное устройство бесконтактного контроля геометрических параметров ТВЭЛ / В.А. Белоглазова, О. И. Битюцкий, А. А. Гущина, Ю. К. Карлов, Б.Е. Кривенков, П. И. Лавренюк, В. И. Ладыгин, В. И. Несин, А.И. Пастушенко, А. Н. Петров, Ю. В. Пименов, В. В. Рожков, И. Г. Чапаев, В. М. Чернышев, Ю. В. Чугуй, В. П. Юношев, С. П. Юношев // Автометрия. – 2004. – №2. – С. 82-92.
101. Свешников, А.Г. Теория функций комплексной переменной / А.Г. Свешников, А.Н. Тихонов. – М.: Наука. – 1979. – 163 с.
102. Телецентрический в пространстве предметов объектив Заявка на получение патента на изобретение №: 2016115311 [Текст]: Завьялов П.С., Сенченко Е.С., патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, дата приор. 19.04.2016.

Приложение А
Акт внедрения ЗАО "НЭВЗ-Керамикс"

ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»

ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС»
г. Новосибирск, Красный проспект, 220

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Жимулевой Е. С.

В ходе исследований, выполнявшихся в КТИ НП СО РАН с 2010 года (ответственный исполнитель Жимулева Е. С.), была теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность контроля геометрических параметров изделий из вакуумной керамики теневым и телевизионным методами с использованием телецентрических объективов.

Материалы диссертационной работы Жимулевой Е. С. использовались при выполнении работ в период 2010 - 2015 гг. по созданию КТИ НП СО РАН трёх систем промышленного контроля геометрических параметров: изоляторов из вакуумной керамики "Кольцо", бронеплиток из карбида бора и вакуумной керамики "КБК", керамических бронероликов "УКБр-1", которые, соответственно, в 2011, 2014 и 2015 годах переданы в эксплуатацию на ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС». В настоящее время системы находятся в промышленной эксплуатации на предприятии.

Эксплуатация систем «Кольцо», «КБК», «УКБр-1» позволила автоматизировать процесс контроля изделий, сделать его бесконтактным, повысить надежность и быстродействие контроля, снизить трудозатратность, исключить субъективный "человеческий" фактор, и тем самым повысить рентабельность производства.

/ Исполнительный директор



Медведко О.В.