

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**

05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук,
Чугуй Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: **Меледин Владимир Генриевич**,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теплофизики им.
С.С. Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук, главный научный
сотрудник

Хацевич Татьяна Николаевна,
кандидат технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ), профессор кафедры наносистем и
оптотехники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт мониторинга
климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии
наук (ИМКЭС СО РАН), г. Томск

Защита состоится «27» июня 2017 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.173.08 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20 и на сайте www.nstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Вихман В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 оптических 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 плоским световым пучком и фотоэлектрической регистрации его теневого изображения в проходящем свете.

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. Для уменьшения влияния протяжённости изделия вдоль оптической оси он должен обеспечивать большую глубину резко изображаемого пространства (более 20 мм) и высокую ортоскопичность изображения (дисторсия менее 0,02 %) при диаметрах поля зрения 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 теневых 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 [Chugui Yu.V. Optical dimensional metrology for 3D objects of constant thickness / Y.V. Chugui // Measurement. – 2001. – V.30 - № 1. – pp. 19-31]. 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 теневом проекционном методе (Trioptics, Германия; 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), 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 [Патент на полезную модель №: 25798 «Телецентрический проекционный объектив», опубликован 20.10.2002] 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 финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (идентификатор соглашения RFMEFI60414X0086), 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 положения 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°), 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 ряда 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, М.С. Кравченко 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 НП СО РАН.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы и степень разработанности тематики, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна, выносимые на защиту положения, практическая значимость работы, показан личный вклад автора, описана структура диссертации.

В **первой** главе проведён анализ оптических теневых методов измерения геометрических размеров объектов в проходящем свете: проекционный метод в параллельном, рассеянном и расходящемся пучках света, теневой сканирующий метод и метод оптического оконтуривания изображений измеряемых объектов. Особое внимание уделено теневым проекционным методам. Приводятся принцип действия, основные технические характеристики и функциональные возможности измерительных систем на основе этих методов. Дан обзор имеющихся в продаже телецентрических объективов и существующих патентов их оптических схем, применение которых позволяет в несколько раз снизить погрешность измерений системы.

В результате анализа теневых проекционных систем размерного контроля объектов показано, что существующие измерительные системы не отвечают требованиям к контролю трёхмерных изделий произвольной формы, так как они или не обеспечивают требуемую точность измерений (погрешность не более 5 мкм), или являются дорогостоящими, или не могут быть использованы для контроля изделий нецилиндрической формы. Так, системы, использующие расходящийся пучок света, а также системы, основанные на теневых методах с

обычной проекционной оптикой, отличаются большим уровнем погрешностей измерения (до 100 мкм) из-за невозможности точного позиционирования изделия в измерительном объёме. Применение идентичного ортогонального канала для определения положения объекта заметно усложняет программную обработку при расчёте истинного размера изделия.

Снизить погрешность измерений системы контроля до величины 5 мкм и ослабить требования к точности позиционирования изделия удаётся при применении телецентрических в пространстве предметов объективов. Анализ показывает, что существующие на рынке импортные телецентрические объективы не обеспечивают все необходимые для применения в измерительных системах требуемые параметры (дисторсия менее 0,02 %, телецентричность менее $0,01^\circ$), являются дорогостоящими. Более того, оптические схемы объективов не доступны потребителям. Отечественное оптико-механическое производство не изготавливает промышленных телецентрических объективов. Большинство телецентрических схем, представленных в патентах, не применимы в системах размерного контроля, т.к. состоят из большого числа линз (часто более десяти), изготовленных из разных марок стекол, аберрации исправлены слабо (дисторсия более 0,02 %). При большом многообразии схем не прослеживается единого подхода к их расчёту, каждая схема является самостоятельной разработкой.

Таким образом, результаты анализа подтверждают актуальность поставленной цели разработки, создания и исследования оптико-электронного канала теневых проекционных систем геометрического контроля трёхмерных объектов для применения в промышленном производстве. В качестве примера представлено проектирование систем контроля размеров керамических плиток, бронероликов и кольцевых изоляторов, а также проектирование телецентрического объектива для контроля перемешивающих решёток с размерами изделий от 10 до 250 мм (погрешность не более 5 мкм). Сделан вывод о необходимости проектирования и изготовления отечественных объективов с открытой оптической схемой и исправленными аберрациями.

Во **второй** главе в аналитическом виде представлены результаты исследования особенностей формирования изображений трёхмерных объектов в проекционной дифракционно-ограниченной системе при освещении их частично-когерентным светом. Приведены разработанные способы определения положения края изображения трёхмерного объекта для измерения его размеров, основанные на пороговом методе.

Оптическая схема теневой проекционной дифракционно-ограниченной системы показана на рисунке 1. Система содержит два канала: осветительный и проекционный. Осветительный канал включает квазимонохроматический частично-когерентный (по пространству) источник излучения 1 на базе светодиода с диффузным рассеивателем 2 и диафрагмой 3, установленной в передней фокальной плоскости коллиматора 4. Осветитель с основной длиной волны λ имеет угловые размеры $2\theta_{ист} = D_{ист}/f_1$. В состав проекционного блока, формирующего изображение контролируемого объекта 5 толщиной d ,

входят телецентрический объектив 6, имеющий в своем составе апертурную диафрагму 7 с угловыми размерами $2\theta_{ан} = D_{исч}/f_2$, и фотоприёмная матрица 8. Объект измерений 5 толщиной d располагается между указанными блоками и освещается некогерентными между собой плоскими волнами.

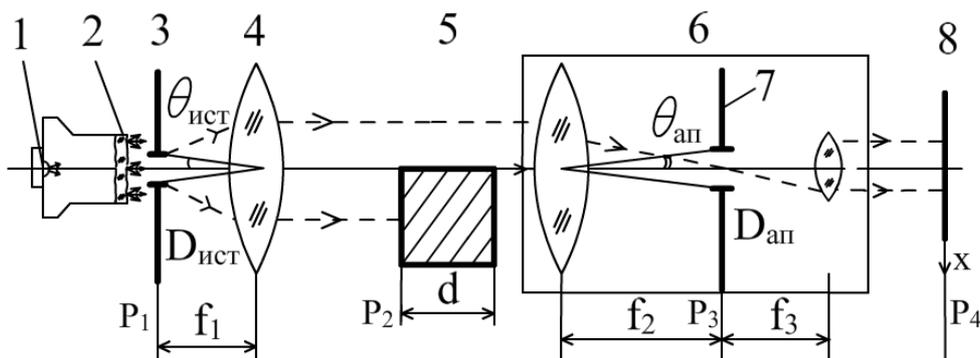


Рисунок 1 – Оптическая схема формирования изображения трёхмерного объекта. 1 – протяжённый источник излучения (светодиод); 2 – молочное стекло; 3 – диафрагма; 4 – коллиматор; 5 – объект измерения; 6 – телецентрический объектив; 7 – апертурная диафрагма; 8 – фотоприёмная матрица

Типичный профиль интенсивности света $\tilde{I}(x)$ в изображении края трёхмерного объекта показан на рисунке 2. Для удобства изложения интенсивность света представлена в нормированном виде: $\tilde{I}(x) = I(x)/I_0$, где I_0 – интенсивность выходного распределения в отсутствие объекта, $\tilde{I}(x \rightarrow \infty) \rightarrow 1$.

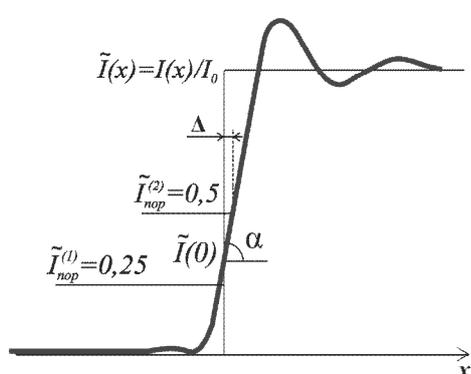


Рисунок 2 – Профиль изображения объёмного края

Среди приближенных методов расчета полей трёхмерных объектов выбран конструктивный метод на основе модели эквивалентных диафрагм [Chugui, Y. Fraunhofer diffraction by volumetric bodies of constant thickness / Y. Chugui, B. Krivenkov // Journal of the Optical Society of America. - 1989. - A6 (5). - pp. 618–619]. В соответствии с этой моделью в случае объёмного края с абсолютно поглощающей внутренней гранью основной вклад в дифракционное поле на выходе системы дают окрестности граничных точек. Таким образом, объёмный край можно заменить двумя тонкими полуплоскостями, отстоящими друг от друга на расстояние d . Влияние объёмности объекта на структуру поля в его изображении определяется соотношением критического угла дифракции $\theta_{кр} = \sqrt{\lambda/d}$ и углового размера апертурной диафрагмы $\theta_{ан}$. При расчетах рассмотрен случай слабых объёмных эффектов ($\theta_{кр} \gg \theta_{ан}$), что имеет место на практике.

В результате расчётов поля для случая $\theta_{исч} \ll \theta_{ан}$ получено следующее аналитическое выражение для распределения интенсивности света в изображении объёмного края в месте расположения его границы:

$$\tilde{I}(0) = 0,25 + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_{уст}^2}{\theta_{ан}^2} - \frac{\theta_{ан}}{\sqrt{2\pi}\theta_{кр}}.$$

Можно видеть, что интенсивность света $\tilde{I}(0)$ определяется тремя составляющими, первая из которых соответствует значению интенсивности в граничной точке изображения полуплоскости при её когерентном освещении, вторая – пропорциональна квадрату отношения углового размера источника света к угловому размеру апертурной диафрагмы проекционного объектива, а третья – пропорциональна отношению углового размера апертурной диафрагмы к критическому углу дифракции (пропорциональна корню квадратному из толщины объекта). При малых угловых размерах источника света основной вклад в интенсивность света $\tilde{I}(0)$ даёт третья составляющая. Расчёты показывают, что, например, при $\theta_{ан} = 0,03$, $d = 3$ мм, $\lambda = 0,5$ мкм, $\theta_{уст}/\theta_{ан} = \theta_{ан}/\theta_{кр} = 0,25$ вклады второй и третьей составляющих в интенсивность $\tilde{I}(0)$ составляют, соответственно, 1 и 23 %. При увеличении угловых размеров источника вклад второй составляющей в поле $\tilde{I}(0)$ резко увеличивается. Т.к. вторая и третья составляющие имеют разные знаки, то выбором $\theta_{уст}$ и $\theta_{ан}$ (при заданном $\theta_{кр}$) можно минимизировать смещение границы объёмного края.

В результате расчётов установлено, что в теновом изображении объекта наблюдается смещение его профиля в зависимости от толщины измеряемого объекта d , угловых размеров источника освещения $2\theta_{уст}$ и апертурной диафрагмы $2\theta_{ан}$, которое может составлять 10 мкм. Использование стандартных порогов приводит к погрешности определения положения границы трёхмерного объекта, зависящей от параметров $\theta_{уст}$, $\theta_{ан}$ и d .

На основе полученных выражений предложены два способа определения положения границ трёхмерного 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 трёхмерного 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, зависящих от параметров $\theta_{уст}$, $\theta_{кр}$ и $\theta_{ан}$.

Показано, что использование изменяющегося уровня порога в зависимости от указанных параметров оптической схемы позволяет повысить точность определения реального положения границы трёхмерного объекта. Чаще при обработке изображений выбирают порог, равный $\tilde{I}_{пор}^{(2)} = 0,5I_{max}$, так как в области этого порога изображение края аппроксимируется прямой линией, что облегчает обработку изображений. Однако в этом случае имеет место постоянное смещение Δ , которое можно вычислить по следующей формуле:

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

Показано, что путём коррекции уровня порога сигнала на величину, пропорциональную смещению Δ , можно определить с высокой точностью положение реальной границы трехмерного объекта. Предложенный подход использован в системе размерного контроля «Кольцо» и позволил на порядок снизить погрешность измерения изделий.

Третья глава посвящена проектированию с помощью программного обеспечения ZEMAX новых оптических схем телецентрических объективов с открытой оптической схемой и исправленными аберрациями, предназначенных для применения в системах размерного контроля.

Каждый объектив проектировался под конкретные размеры контролируемых объектов с учётом 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 решёток тепловыделяющих сборок. Созданы объективы для решения первых двух задач. 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 %) и нетелецентричностью (менее 0,01°).

Методика расчета телецентрических объективов состоит в формировании принципиальных особенностей и расположения оптических элементов схемы и формулировании предъявляемых к ней требований. Предлагаемая оптическая схема должна содержать силовой компонент, превышающий размер контролируемого изделия, который формирует телецентричность в пространстве предметов; пару менисков из стекол с различной дисперсией, проводящих ахроматизацию передней части объектива и корригирование сферической аберрации, комы, астигматизма; апертурную диафрагму; склеенную линзу и линзу, уменьшающую кривизну поля, астигматизм, дисторсию и угол падения лучей на фотоприемник. Для повышения технологичности изготовления первая линза в объективе является единственной линзой большого диаметра, остальные линзы смещаются к апертурной диафрагме. При большом поле зрения (250 мм) вводится асферическая поверхность.

Определены требования к расчету телецентрических в пространстве предметов объективов, которые включают рабочий диапазон длин волн; входную апертуру объектива; размер фотоприёмной матрицы; максимально допустимые отклонения от телецентричности в пространстве предметов и изображений; максимальную дисторсию телецентрического объектива и его относительное отверстие.

В таблице приведены расчетные параметры спроектированных объективов, а также для сравнения показаны параметры импортного объектива

Thorlabs MVTC23024 VI-TELECENTRIC 0,243^X, который является одним из основных аналогов.

Таблица – 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 резко изображаемого пространства, мм	±11	±20	±20	±150
Дисторсия, %	-0,03	-0,01	-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

На рисунке 3 показаны оптические схемы спроектированных объективов, в диссертационной работе приведены графики их aberrаций.

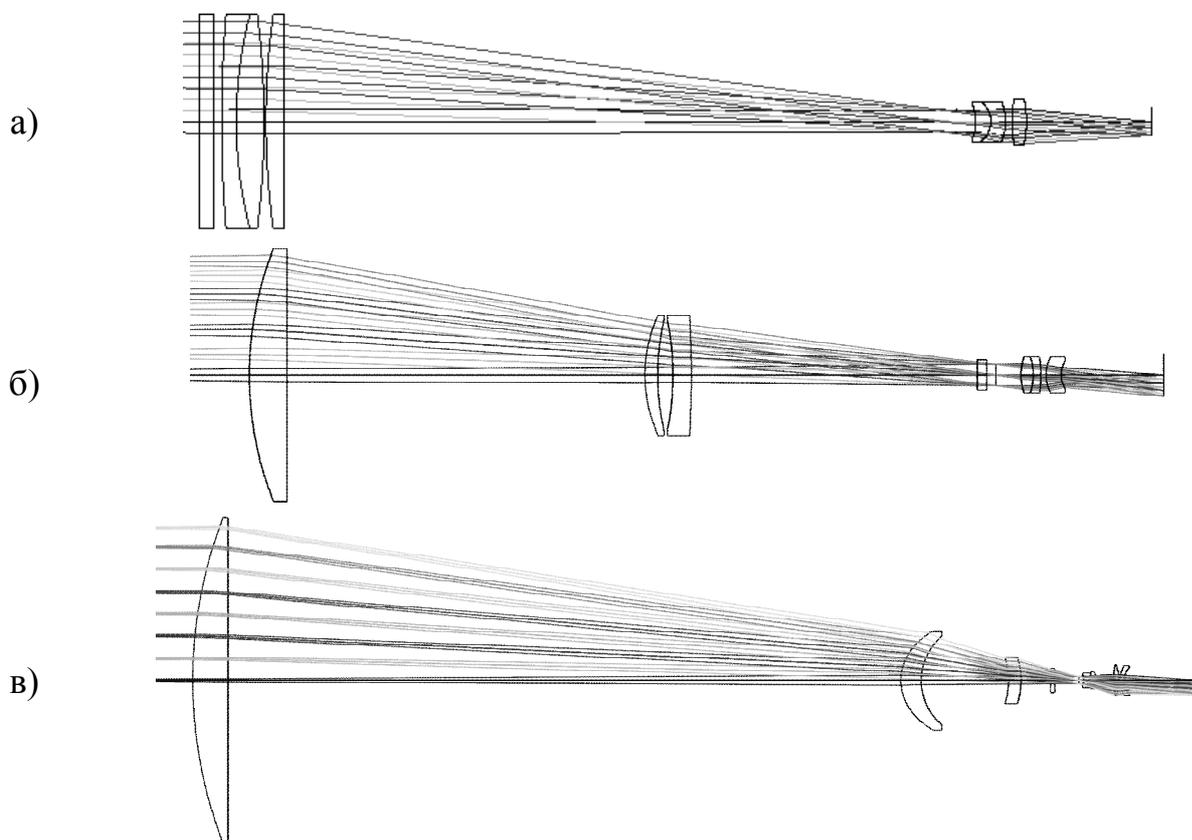


Рисунок 3 – Оптические схемы телецентрических объективов:
а) «Кольцо» 0,155^X, б) «КБК» 0,189^X, в) «Решетка» 0,097^X

Проведён анализ влияния остаточных aberrаций объективов и допусков их изготовления на качество получаемого изображения. Показано, что наибольшее влияние на точность определения 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).

Показано, что применение асферической поверхности в объективе позволяет улучшить телецентричность системы более чем в 1,5 раза при увеличении поля зрения в 5 раз. В результате расчётов установлено, что путём выбора параметров при заданном поле зрения её можно свести к нулю.

При перемещении положения объекта вдоль оптической оси происходит смещение центроида пятна рассеяния за счет изменения его формы и остаточной нетелецентричности, что приводит к погрешностям измерения. Так, для объектива «Кольцо» $0,155^X$ такая погрешность составляет 5 мкм. Показано, что путём улучшения телецентричности объектива указанное смещение можно уменьшить 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 заметному ухудшению качества его изображения в сравнении с дифракционным. Установлено, что наибольшее влияние вносит децентрировка оптических поверхностей и элементов в целом.

В **четвертой** главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния параметров теневой проекционной системы на формирование изображений трёхмерных объектов. Предложена методика тестирования оптических характеристик телецентрических объективов в составе системы контроля для калибровки её оптической части.

Полученные экспериментальные данные по влиянию на смещение границы объекта параметров системы (угловых размеров источника и апертурной диафрагмы телецентрического объектива; толщины объекта и его положения в измерительном объёме) согласуются с результатами теоретических исследований и компьютерного моделирования.

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

Установлено, что наибольший вклад в погрешность измерений вносит нетелецентричность системы в пространстве предметов, возникающая из-за влияния остаточной дисторсии по полю, а также вследствие 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 до величины более 60 мкм.

Чтобы уменьшить неравномерность засветки поля зрения и дополнительные погрешности определения края, связанные с ней, рекомендовано выбирать угловые размеры осветителя $2\theta_{ист}$ исходя из условия $\theta_{ист} > 3\theta_{ан}$.

Предложена и реализована методика определения оптического качества изготовления и сборки телецентрических объективов, которая позволяет определять одновременно: дисторсию поля на рабочем расстоянии, изменение дисторсии вдоль оптической оси в пределах глубины фокусировки, телецентричность, увеличение, среднее разрешение по полю, частотно-контрастную характеристику. Суть разработанной методики заключается в регистрации двух изображений точечной миры, смещенной вдоль оптической оси, по которым определяются характеристики объектива. Для вычисления величин дисторсии, увеличения и разрешения объектива положения центров кружков на зарегистрированном изображении миры сравниваются с положениями кружков на идеальной сетке. По смещению кружка на двух изображениях определяется величина телецентричности. Частотно-контрастная характеристика определяется как прямое преобразование Фурье от деконволюции кружка миры.

Ввиду простоты реализации методику можно применять к уже встроенным в установку объективам. Для снижения погрешности измерений системы целесообразно использовать дополнительную калибровку, основанную на предложенной методике.

Анализ разработанных объективов свидетельствует об их высоких технических характеристиках по сравнению с объективом-аналогом. 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 $0,01^\circ$).

В **пятой** главе представлены разработанные и внедрённые в промышленную эксплуатацию на предприятие ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» (г. Новосибирск) три системы: «Кольцо» для контроля кольцевых изоляторов, «КБК» для контроля керамической бронеплитки и «УКБр-1» для контроля бронероликов (выдан Акт о внедрении). К настоящему времени на них проконтролировано более 1 000 000 изделий.

Описанные в главах 2-4 результаты теоретических и экспериментальных исследований использовались при создании указанных систем размерного контроля. На их основе модернизированы существующие способы определения положения края изделия с учётом влияния толщины изделия и угловых размеров источника света (глава 2). 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).

Применялась калибровка оптического канала, основанная на разработанной методике определения оптических характеристик объективов (глава 4).

Система геометрического контроля «Кольцо» предназначена для контроля размеров колец из вакуумной керамики, в том числе с металлизированной поверхностью. До поставки системы на предприятие контроль качества продукции проводился контактным инструментом вручную, что не удовлетворяло требованиям к быстродействию контроля (более 20 000 шт./месяц, 10 типоразмеров кольцевых изоляторов) и приводило к натирам на готовых изделиях.

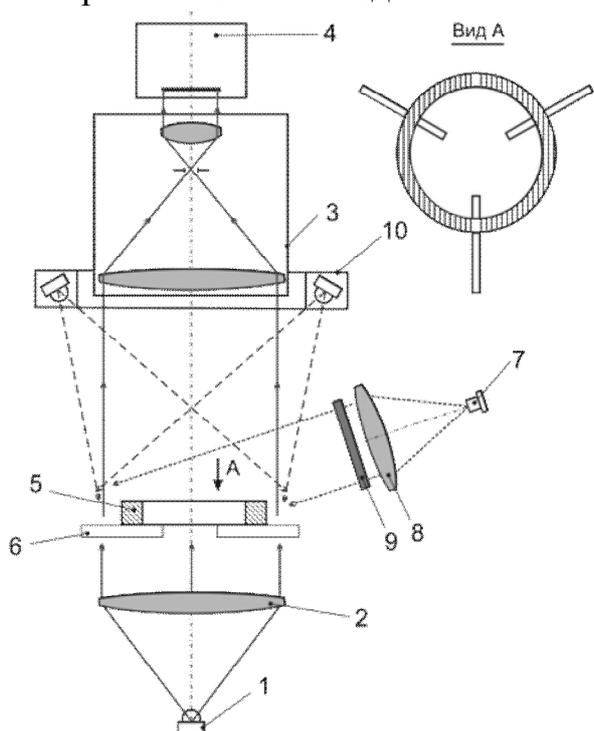


Рисунок 4 – Оптическая схема системы контроля «Кольцо»: 1 – светодиод; 2 – коллимирующий объектив; 3 – телецентрический объектив; 4 – цифровая камера; 5 – керамическое кольцо; 6 – столик; 7 – лазер полупроводниковый; 8 – коллимирующий объектив; 9 – дифракционный оптический элемент; 10 – кольцевой осветитель

Принцип измерения размеров кольцевых изделий поясняется оптической схемой, приведенной на рисунке 4. В основу работы системы положены: теневой проекционный метод для измерения внутреннего и наружного диаметров колец и соосности этих диаметров; метод структурного освещения для измерения высоты колец, неплоскостности и непараллельности их торцевых поверхностей; телевизионный метод для обнаружения дефектов на торцевых поверхностях колец.

Согласно проведенным с использованием стандартных образцов производственным испытаниям система позволяет измерять в автоматическом режиме: внутренний и наружный диаметры от 23 до 45 мм с погрешностью не более $\pm 0,005$ мм; высоту в диапазоне от 0,8 до 10 мм с погрешностью не более $\pm 0,002$ мм; неплоскостность и непараллельность торцевых поверхностей с погрешностью не более $\pm 0,008$ мм, а также обнаруживать дефекты – сколы на кромках шириной не менее 0,2 мм. Время контроля одного изделия не превышает 8 с. В апреле 2011 года система внедрена в промышленную эксплуатацию на ЗАО «НЭВЗ-Керамикс».

Для контроля дефектов внешнего вида и геометрии керамических элементов из V_4C и Al_2O_3 трёх типов («шестигранник плоский», «плитка плоская» и «плитка радиусная») для ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» разработана и изготовлена система «КБК». Изделия применяются для формирования броневой защиты с малым весом для танков, авиации, судов, автомобилей, личного состава. Для создания высокопрочной брони требуется четкая

стыковка пластин друг с другом (допустимый зазор между пластинами не более 50 мкм).

В основу работы системы положен метод структурного освещения для измерения высоты изделий, радиуса внутренней цилиндрической поверхности изделий, плоскостности их рабочих поверхностей; телевизионный метод для измерения габаритных размеров, параллельности противоположных граней изделий и обнаружения дефектов.

По результатам производственных испытаний система позволяет контролировать: линейные размеры в диапазоне от 20 до 50 мм с погрешностью не более $\pm 0,03$ мм, параллельность и плоскостность рабочих поверхностей изделий с погрешностью не более $\pm 0,015$ мм, а также наличие дефектов (сколов на кромках) размером более 0,5 мм. С августа 2014 года система «КБК» находится на предприятии ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» в промышленной эксплуатации.

Для ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» создана, разработана и изготовлена система «УКБр-1» для определения геометрических размеров бронероликов из Al_2O_3 двух типов (с двумя сферическими торцами и с одним сферическим торцом). Бронеролики применяются для создания керамо-композитных навесных бронепанелей защитного кожуха военной техники, бронежилетов личного состава.

В основу работы системы контроля положены теневой метод для измерения диаметра, высоты и цилиндричности бронероликов и телевизионный метод для обнаружения дефектов. Для увеличения быстродействия система разделена на три параллельных оптических канала.

Согласно проведенным приёмным испытаниям система позволяет определять: диаметр в диапазоне от 12 до 30 мм с погрешностью не более $\pm 0,005$ мм, высоту в диапазоне от 7 до 26 мм с погрешностью не более $\pm 0,03$ мм и цилиндричность с погрешностью не более $\pm 0,01$ мм. Время контроля одного изделия не более 1 с. С 2014 года система находится в опытной эксплуатации на ЗАО «НЭВЗ-Керамикс».

На системе «УКБр-1» при использовании теневого проекционного метода проверена эффективность применения методики коррекции аберраций путем калибровки системы. В результате эксперимента установлено, что учет остаточной дисторсии по полю позволил значительно уменьшить погрешность системы – на 17 мкм.

В заключении сформулированы **основные результаты диссертации**.

1. Исследованы особенности формирования изображений объёмного края трёхмерного объекта в проекционной дифракционно-ограниченной системе. Найдена аналитическая зависимость интенсивности света в изображении объёмного 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.

2. 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.

3. 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.) (подана заявка на патент).

4. 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).

5. 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.

6. 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.

7. 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 снижения систематической погрешности измерений до 5 мкм для диаметра 45 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.

Созданные измерительные системы для бесконтактного контроля трёхмерных объектов обладают высоким потенциалом импортозамещения и пополняют арсенал современных отечественных оптико-электронных средств размерного контроля трёхмерных изделий.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Завьялов, П.С. Оптико-электронный контроль керамических изделий / П.С. Завьялов, Л.В. Финогенов, **Е.С. Жимулева**, Д.Р. Хакимов, К.И. Савинов // Датчики и системы. – 2016. – т. 8-9. – С. 64-72.

2. 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.

3. 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. Хакимов // Дефектоскопия. – 2012. – № 12. – С. 65-73.

Работы, опубликованные в других изданиях:

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

5. **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 – pp. 90661L-1 – 90661L-8.

6. Chugui, Y.V. 3D image formation in transmitted partially coherent and incoherent light applied to dimensional inspection / Y.V. Chugui, **E.S. Senchenko** //

International Journal of Automation Technology. – 2015. – Vol.9. – No.5. – pp. 508-514.

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

8. Chugui, Y.V. 3D image formation in transmitted partially coherent and incoherent light applied to dimensional inspection / Y.V. Chugui, **E.S. Senchenko** // 11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry 2014. September 02-05, 2014, Tsukuba, Japan – pp. 363-367.

9. **Сенченко, Е.С.** Высокоточные алгоритмы контроля 3D объектов теневым методом в частично-когерентном свете / **Е.С. Сенченко**, Ю.В. Чугуй // Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы: юбилейный сборник избранных трудов КТИ НИ СО РАН. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. – С. 63-74.

10. **Сенченко, Е.С.** Алгоритмы контроля 3D объектов теневым методом / **Е.С. Сенченко** // Материалы работ победителей и лауреатов Всероссийского конкурса "Научно-инновационные проекты молодых ученых", Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2012. – С. 186-197.

11. Chugui, Y.V. 3D Optical Measuring Technologies for Scientific and Industrial Applications / Y.V. Chugui, A.V. Latyshev, S.N. Makarov, S.V. Plotnikov, **E.S. Senchenko**, E.V. Sysoev, A.G. Verhogliad, P.S. Zav'yalov // Proc. 10th IMEKO Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry LMPMI 2011, Braunschweig, Germany – pp. 13-22.

12. 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.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс. (383) 346-08-57

формат 60 × 84/16, объём 1,25 п.л., тираж 100 экз.

заказ №75, подписано в печать 18.04.2017.