

**На правах рукописи**

**СТАРОСТИН ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЗРАЧНЫХ ТРУБОК**

**Специальность 05.11.07 –**

**Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени**

**кандидата технических наук**

**Москва – 2009**

Работа выполнена в филиале государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский энергетический институт (технический университет)" в г. Смоленске.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Зиенко Станислав Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Григорьев Андрей Андреевич

кандидат технических наук, доцент  
Фотиев Юрий Анатольевич

Ведущая организация: НПО «Оптика», г. Москва

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ года в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский переулок, д.4 (зал заседаний диссертационного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Ю.М. Климков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы.**

Прозрачные трубки являются одним из наиболее широко используемых классов изделий современной стекольной промышленности. Они применяются в приборостроении, в лазерной технике, в энергетике, в измерительном оборудовании, в строительстве, в химической промышленности, в медицине, фармакологии и биологии. Стеклообразующие трубки также широко используются в светотехнике при изготовлении стартеров, люминесцентных ламп (ЛЛ), а также других источников света.

В условиях современного производства, функционирующего в жесткой конкурентной среде, на первый план выдвигаются вопросы качественного контроля и/или измерения геометрических параметров вырабатываемых на производстве изделий. В случае прозрачных трубок определяющими параметрами являются, в первую очередь, наружный и внутренний диаметры, а также толщина стенки.

Геометрические размеры прозрачных трубок необходимо выдерживать в определенных границах, во-первых, с целью упрощения технологических операций на последующих этапах производства. Так, например, точность измерения наружного диаметра трубки-колбы ЛЛ влияет на качество последующей сборки ламп. Таким образом, процесс измерения геометрических параметров трубок определяет эффективность производства и, в конечном итоге, себестоимость выпускаемого изделия. Во-вторых, геометрические параметры трубки определяют качество конечного продукта. В частности, при изготовлении ЛЛ эллипсность, внутренний диаметр и толщина стенки колбы определяют важные светотехнические и эксплуатационные характеристики ламп. Таким образом, разработка и внедрение измерительных устройств, использующих современные достижения в области оптико-электронной и вычислительной техники, позволяют повысить конкурентоспособность производства.

В последние годы, в связи с бурным развитием вычислительной техники, все большее распространение находят системы, в которых обработка измери-

тельной информации осуществляется автоматически с помощью компьютеров в соответствии с определенными алгоритмами. Для измерения геометрических параметров при этом представляется перспективным использование видеосистем, позволяющих передавать оптическое изображение, несущее информацию о геометрических размерах исследуемых объектов, в компьютер для последующей цифровой обработки.

**Предметом исследования** работы являются методы получения и дальнейшей компьютерной обработки оптических измерительных сигналов в устройствах, предназначенных для определения геометрических параметров прозрачных трубок.

**Цель работы** – разработка и исследование новых методов получения и цифровой обработки оптических изображений прозрачных трубок для измерения их геометрических параметров.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) выполнен аналитический обзор литературных и патентных источников известных оптических методов и средств измерения геометрических параметров прозрачных трубок, проведен их анализ, установлена возможность их усовершенствования за счет использования современных компьютерных методов обработки изображений;

2) разработаны и исследованы новые методы измерения диаметров, эллипсностей и несоосности образующих наружной и внутренней стенок прозрачной трубки;

3) получена аналитическая зависимость, описывающая взаимосвязь диаметра трубки и размера и формы следа лучей на экране, создаваемого при освещении трубки плоским пучком лучей;

4) найдены новые способы цифровой обработки изображений теневой проекции трубки, ее поперечного сечения, а также следа отраженных от ее поверхности лучей на экране;

5) практически реализованы предложенные методы и схемотехнические решения.

### **Научная новизна.**

1. Новый метод измерения диаметра трубок – метод отображения, отличающийся от известных проекционных методов тем, что обработке подвергается изображение следа широкого пучка лучей, получаемого на экране при отражении от поверхности трубки плоского пучка излучения.

2. Новый метод обработки изображения теневой проекции прозрачной трубки, который позволяет повысить помехоустойчивость измерительного устройства за счет применения специально полученных дифференцирующих масок.

3. Новый метод обработки изображения поперечного сечения трубки, который впервые позволил определять не только диаметры наружной и внутренней стенок трубки, как в известных методах, но также их эллипсность и несоосность.

**Научное значение** работы состоит в разработке и исследовании новых методов цифровой обработки изображений прозрачных трубок и их отображений, а также в разработанных на их основе методах измерения геометрических параметров трубок.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в предложенных схемах устройств, реализующих разработанные методы измерения геометрических параметров стеклянных трубок. Научные результаты работы были реализованы в действующих макетах устройств, а также в оптико-электронном измерительном комплексе, позволяющим в автоматическом режиме на технологических линиях вытяжки осуществлять измерения наружного диаметра трубок и выдавать исполнительные сигналы на устройства разбраковки и отображения информации, который был разработан, изготовлен и внедрен в стекольное производство ОАО «ОСРАМ» (г. Смоленск) при непосредственном участии автора.

Результаты научно-технических разработок могут быть использованы для измерения геометрических параметров стеклянных трубок, предназначенных для светотехнической промышленности, энергетики, измерительной техники, химии, медицины и т. п., и, кроме того, при измерении параметров непро-

зрачных изделий, в том числе нефтегазовых труб, труб водоснабжения и отопления.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается данными экспериментов и компьютерного моделирования, а также результатами внедрения разработок на ОАО «ОСРАМ» (Акт о внедрении научных положений и выводов диссертации от 21.12.2007 г.).

#### **Апробация работы.**

Основные результаты докладывались на научных семинарах кафедры «Оптико-электронные системы» филиала Московского энергетического института (технического университета) в г. Смоленске, на III, IV и V межрегиональных научно-технических конференциях «Информационные технологии, энергетика и экономика» (г. Смоленск), XII международной конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва) и III международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (г. Орел).

#### **Публикации.**

Результаты проведенных исследований отражены в восьми научных работах, в том числе в двух рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК. По результатам разработок автора подана заявка на патент 2071143578, РФ G01 B11/08 (принята к рассмотрению 27.11.2007.) «Способ измерения диаметра объектов цилиндрической формы с направленно отражающей поверхностью».

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа изложена на 138 страницах, иллюстрирована 58 рисунками и 10 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 90 наименований и пяти приложений на 16 страницах.

**На защиту выносятся:**

1) новый метод измерения диаметра – метод отображения, основанный на получении и обработке оптического изображения, создаваемого на экране следами лучей, отраженных от поверхности трубки при ее освещении плоским пучком;

2) новый метод цифровой обработки изображения поперечного сечения трубки, позволяющий определять диаметры, эллипсности и несоосность наружной и внутренней стенок трубки;

3) разработанный метод цифровой обработки изображения теневой проекции прозрачной трубки, обеспечивающий высокую точность измерения при наличии повышенного уровня помех;

4) практическая реализация новых методов и их решений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, приведены результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены известные оптические методы и реализованные на их основе устройства, предназначенные для измерения геометрических параметров прозрачных трубок.

Целью главы является определение основных достоинств и недостатков существующих методов измерения, их анализ с тем, чтобы определить перспективные направления исследования и пути усовершенствования известных методов за счет применения методов цифровой обработки изображений.

Схема оптического измерения (рис. 1) включает первичный преобразователь (ПП), преобразующий измеряемую величину (ИВ) в оптический измерительный сигнал (ОИС), который несет в себе информацию об ИВ. В качестве ПП может выступать оптическая система (ОС) формирующая оптическое изображение объекта измерения (ОИ), которое в свою очередь, и является ОИС. Как правило, форма, в которой представлен ОИС, не удобна для последующей обработки. В связи с этим возникает необходимость применения датчика-

преобразователя (ДП), который представляет собой устройство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации (СИИ) в форме, удобной для его передачи в устройство обработки информации (УОИ).



Рис.1. Схема оптического измерения

В результате аналитического обзора установлено, что по способу первичного преобразования большинство оптических методов измерения геометрических параметров прозрачных трубок могут относиться к одной из четырех основных групп: метод теневой проекции, метод световой проекции, метод поперечного сечения и метод преломления.

По типу используемого ДП измерительные устройства можно подразделить на устройства с одноэлементным фотоприемником, с многоэлементным (одно- или двухкоординатным) фотоприемником, а также с видеодатчиком, который представляет собой устройство, включающее объектив, матричный или линейный фотоприемник и устройство первичной обработки изображения. Одноэлементные фотоприемники, как правило, требуют применения оптико-механической системы развертки светового пучка, что повышает стоимость устройства, ухудшает ее надежность и стабильность работы; более предпочтительным является использование многоэлементных фотоприемников. В последние годы в качестве фотоприемных устройств часто используют видеодатчики; такие устройства хорошо интегрируются в современные вычислительные системы и позволяют существенно упростить конструкцию измерительного устройства.

В результате проведенного обзора, было показано, что для решения поставленной задачи наиболее перспективными являются три группы методов измерения: метод теневой проекции, метод поперечного сечения и метод световой проекции.



Для измерения наружного диаметра, особенно в условиях производства, наиболее простыми и надежными являются устройства, работа которых основана на методе теневой проекции.

Метод поперечного сечения может быть использован для измерения не только диаметров и толщины стенки трубки, как в известных устройствах, но также эллипсности и несоосности профильных кривых сечения.

Основным недостатком метода световой проекции является погрешность, обусловленная отклонением от опорной плоскости лучей, участвующих в построении проекции. Показано также, что данную погрешность можно уменьшить, если подвергать компьютерной обработке оцифрованное с помощью видеодатчика изображение экрана, на котором спроецированы следы широкого пучка лучей, отраженных от поверхности трубки.

**Вторая глава** посвящена разработке метода, который позволяет осуществлять измерение параметров стеклянных трубок посредством обработки цифрового изображения, сформированного на экране отраженным от поверхности трубки плоским пучком лучей. Применение такого подхода позволяет уменьшить погрешность метода световой проекции, возникающую за счет отклонения от опорной плоскости лучей, участвующих в построении проекции.

Если освещать поверхность трубки плоским веерообразным пучком лучей (толщина пучка значительно меньше его ширины) таким образом, чтобы пучок пересекал ее, в отраженном пучке каждому падающему лучу и, следовательно, каждой точке поверхности будет соответствовать «свой» отраженный луч. Если на пути отраженных лучей поставить экран, то каждый отраженный луч оставит на нем след. Этот след можно рассматривать как отображение соответствующей точки поверхности на плоскости. Не вызывает сомнения, что между координатами точек поверхности и отображения существует однозначная взаимосвязь, позволяющая по известным координатам одной точки находить координаты другой.

Для формирования отображения на экране предложено устройство, которое состоит из следующих элементов (рис. 2): осветителя (включающего источник излучения 1 и анаморфотную телескопическую оптическую систему 2,

формирующую веерообразный пучок световых лучей); экрана 4, на который падают лучи, отраженные на поверхности исследуемой трубки 3; видеодатчика 5 с двухкоординатным фотоприемником, осуществляющего анализ и первичную обработку информации о форме и параметрах кривой-отображения. После захвата изображения, сформированного на экране, и его оцифровки с помощью видеодатчика информация передается в компьютер, где осуществляется ее последующая обработка с целью вычисления диаметра.

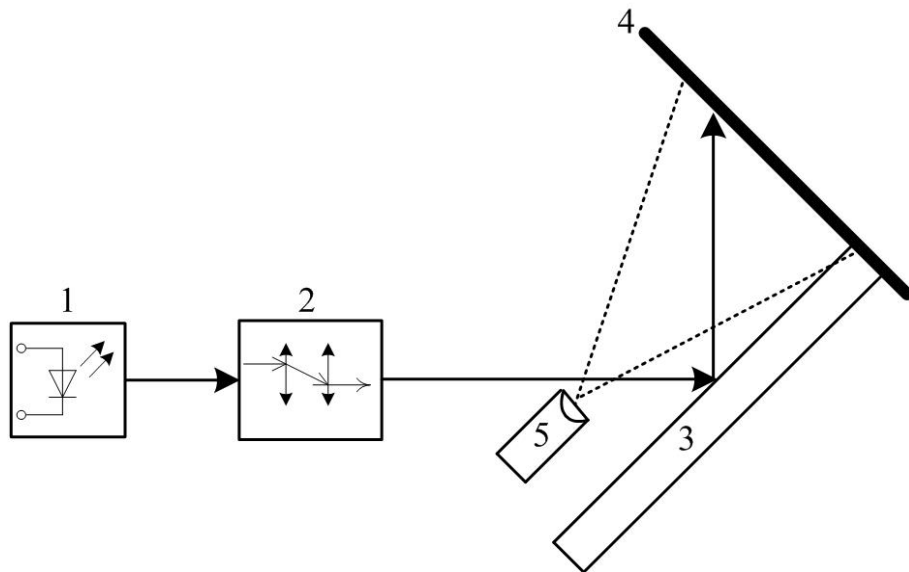


Рис. 2. Схема измерительной установки

Для получения уравнения создаваемой на экране кривой-отображения, была рассмотрена схема, представленная на рис. 3. Здесь световые лучи выходят из точки  $A$  и падают на поверхность цилиндра радиуса  $R$ , ось которого совмещена с осью  $z$  декартовой системы координат. Плоскость, в которой лежат лучи, наклонена к оси  $z$  и, следовательно, к направляющим цилиндра под углом  $\sigma$ . Длина луча  $\overline{AZ_c}$  равна  $l$ ;  $Q$  – расстояние от начала координат до точки  $Z_q$  (точка пересечения экрана с осью  $z$ );  $\vec{N}$  – вектор нормали к поверхности в точке падения луча;  $M_k$ ;  $M_k'$  – точки падения луча соответственно на поверхность цилиндра и на экран.

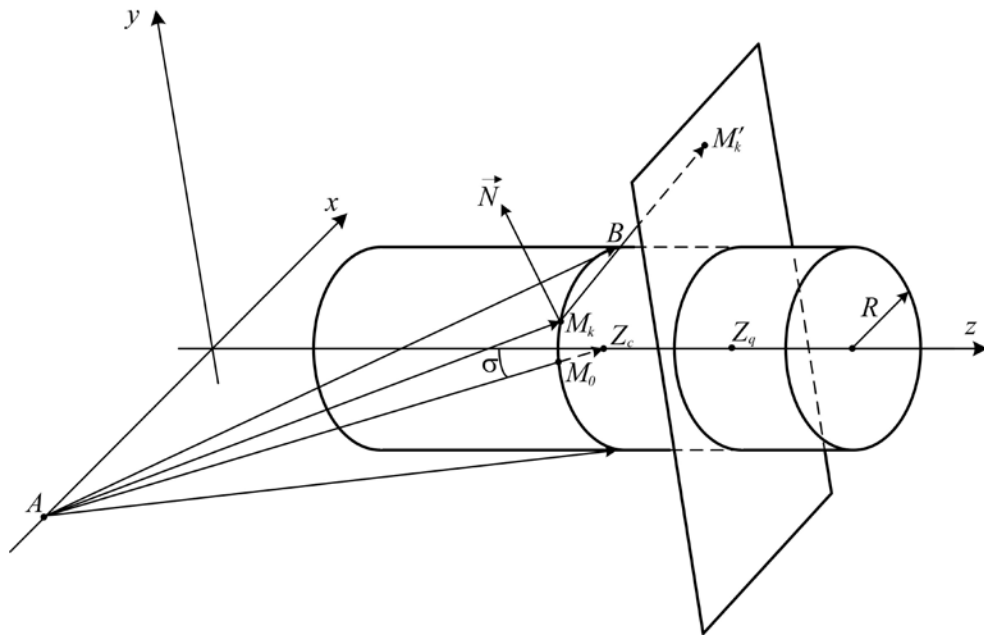


Рис. 3. К выводу формулы (1)

Из анализа хода лучей на рис. 3 с учетом переноса начала системы координат в точку  $Z_q$  было получено параметрическое уравнение плоской кривой, образованной пересечением отраженных лучей с плоскостью экрана:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{Z_q(-2l \cos^2 t \sin \sigma - R \cos t + l \sin \sigma)}{R \cos t \frac{\cos \sigma}{\sin \sigma} + l \cos \sigma} + 2l \cos^2 t \sin \sigma + 2R \cos t - l \sin \sigma; \\ y = \frac{Z_q(-2l \cos t \sin t \sin \sigma - R \sin t)}{R \cos t \frac{\cos \sigma}{\sin \sigma} + l \cos \sigma} + 2l \cos t \sin t \sin \sigma + 2R \sin t, \end{array} \right. \quad (1)$$

где параметр  $t$  представляет собой угол между положительным направлением оси  $x$  и радиус-вектором точки сечения цилиндра пучком лучей. В общем случае эта кривая имеет две петли (рис. 4). На рисунке  $M'_k$  – текущая точка (след луча) на экране;  $M'_0$  – точка экстремума, являющаяся световой проекцией опорного луча  $\overline{AZ_c}$  на экран. Для поставленной задачи интерес представляет только левая часть внешней петли (показана сплошной линией), где параметр  $t$  принимает допустимые значения. Часть кривой, показанная пунктиром, соответствует мнимым лучам, отраженным от внутренней поверхности бесконечно тонкого прозрачного цилиндра.

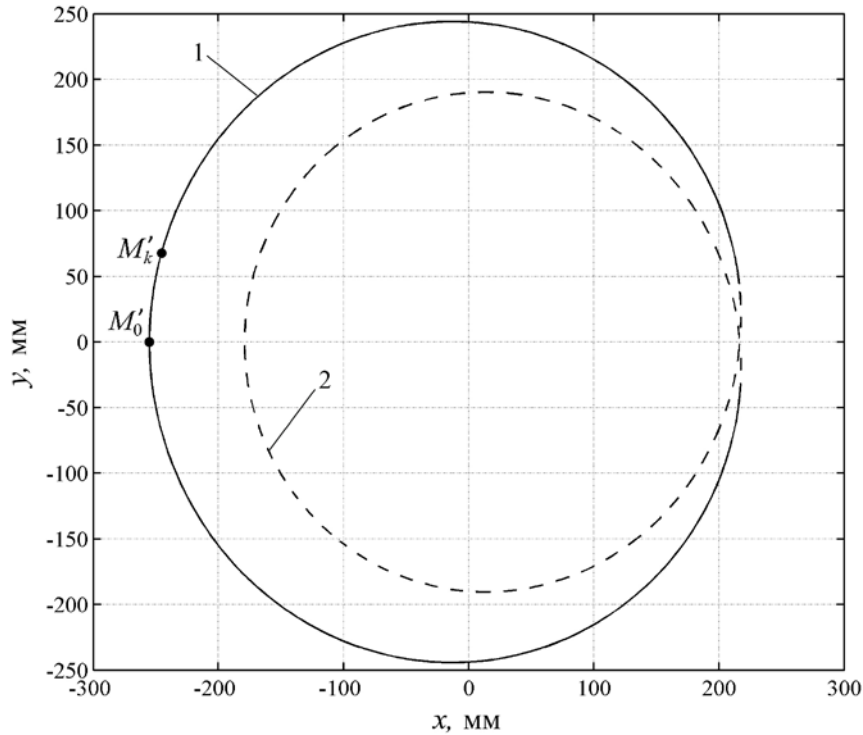


Рис. 4. Следы лучей, отраженных на внешней (1) и внутренней (2) цилиндрических поверхностях, на плоскости

Применение параметрического уравнения (1) для решения обратной задачи – восстановления образа по отображению – вызывает значительные затруднения. С этой целью полученную кривую-отображение предложено аппроксимировать зависимостью

$$[(x + a)^2 + ky^2 - 2a(x + a)]^2 - (2R)^2 \cdot [(x + a)^2 + y^2] = 0, \quad (2)$$

где  $a = (Q - l \cos \sigma) \cdot \operatorname{tg} \sigma$ ;  $k$  – близкий к единице корреляционный коэффициент, приближающий аппроксимирующую кривую (2) к действительной кривой (1).

С целью повышения точности, значение диаметра предлагается вычислять для относительно большого количества точек на кривой в окрестности экстремума и окончательный результат находить усреднением:

$$D = \frac{\sum_i D_i}{n}, \quad (3)$$

где  $i$  – номер измерения,  $n$  – количество измерений,  $D$  – искомый диаметр ( $D = 2R$ ).

Следует отметить, что координаты точек исследуемой кривой (1) и аппроксимирующей кривой (2) различаются тем меньше, чем ближе полярная координата  $t$  приближается к  $\pi$ , а точки экстремумов кривых при  $t = \pi$  совпадают. Поэтому, если в процессе измерения существует возможность определить координаты точки экстремума  $M_0'$ , то измерять координаты  $(x, y)$  других точек не требуется. Это приводит к упрощению расчетов и, как следствие, увеличению быстродействия измерительного устройства. В этом случае диаметр поверхности можно определить по координате  $x$  единственной точки (координата  $y$  точки  $M_0'$  равна нулю):

$$D = x - a. \quad (4)$$

Для цифровой обработки оцифрованного изображения кривой разработан алгоритм, включающий этапы фильтрации нижних частот, бинаризации, морфологической обработки (закрытие и скелетизацию), определения координат точек объекта и вычисления диаметра по формулам (2, 3) или (4). Программа, написанная согласно разработанному алгоритму, реализована в пакете MatLab 7.

С целью проверки разработанного метода осуществлено компьютерное моделирование условий эксперимента в программном пакете 3DS Max 8, в результате которого установлено, что погрешность измерения, определяемая аппроксимацией и влиянием обработки изображения, составляет 1-1,5%. По результатам разработок подана заявка на патент 2071143578, РФ G01 B11/08.

Целью **третьей главы** является разработка устройства измерения наружного диаметра трубок-колб ЛЛ в процессе вытяжки и его внедрение в производство.

Среди геометрических параметров колб ЛЛ именно наружный диаметр имеет первостепенное значение, так как он оказывает существенное влияние на последующие операции сборки ламп. Исходя из результатов литературного и патентного обзора, сделан вывод, что наиболее оптимальным для измерения данного параметра является использование метода теневой проекции. Приме-

нение измерительного устройства в условиях производства накладывает дополнительные требования к быстродействию и помехоустойчивости.

Был разработан метод, основанный на получении изображения теневой проекции с помощью двухкоординатного фотоприемного устройства и его цифровой обработке, включающей этапы кадрирования («обрезания» изображения по краям), бинаризации, фильтрации шумов, определения угла наклона трубки и поворота изображения на этот угол с использованием преобразования Хафа (Hough transform). На последнем этапе разработанного алгоритма осуществляется вычисление диаметра из высоты прямоугольника, описывающего теневое изображение исследуемой трубки. Метод позволяет уменьшить погрешность измерения, вызванную наклонами трубки. Однако процесс обработки двумерного изображения достаточно трудоемок, что ухудшает быстродействие устройства измерения, и как следствие, ограничивает возможность его применения в условиях производства. Таким образом, более целесообразным является применение видеодатчиков с линейным фотоприемником.

Был исследован метод, в котором подход к измерению диаметра заключается в определении координат границ полученного с помощью линейного фотоприемника изображения трубки. В качестве границ принимают самую левую и самую правую точки, соответствующие уровню яркости  $0,5g_{cp}$ , где  $g_{cp}$  – усредненная по всем элементам изображения яркость. Проведенные исследования показали, что метод имеет ряд недостатков: нестабильность уровня средней яркости в кратковременный период за счет импульсных помех и в длительный период за счет запыленности и расфокусировки объектива, неизбежных в условиях производства. Иными словами, разработанный метод обладает низкой помехоустойчивостью, что ограничивает его применение.

Указанные недостатки определили необходимость разработки альтернативного способа определения координат краев теневого изображения трубки. В основу разработанного метода положен поиск в изображении участков с максимальным изменением яркости, или, иными словами, определении точек максимальной крутизны на графике распределения яркости. Предложено определять такие участки дифференцированием сигнала. В случае, когда яркость  $g$  за-

дана в виде последовательности дискретных значений, производная приближенно может быть получена с помощью выражения

$$\frac{dg(x_i)}{dx} \approx \frac{g(x_i) - g(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}}, \quad (5)$$

где  $x_i$  и  $x_{i-1}$  соответственно текущая и предыдущая линейные координаты точки в пикселах. Проведенные исследования показали, что наилучшая помехоустойчивость обеспечивается, если осуществлять дифференцирование скользящим окном с маской  $M_2 = \frac{1}{2}[1, 0, -1]$  или  $M_2' = \frac{1}{2}[-1, 0, 1]$ . На рис. 5а показано изображение стеклянной трубки, полученное с помощью видеодатчика с линейным фотоприемником (для наглядности строка продублирована 250 раз), на рис. 5б – график распределения яркости в изображении, на рис. 5в – результат дифференцирования маской  $M_2$ .

Непосредственно в процессе измерения удобно, чтобы как левая, так и правая границы определялись максимумами первой производной. Эта задача решается разбиением изображения на 2 части, при этом правую часть обрабатывают маской  $M_2$ , а левую – маской  $M_2'$ . Координаты границ теневого изображения исследуемой трубки в этом случае определяют по максимумам суммарной функции  $dg(x)/dx$ .

Разработанный метод положен в основу производственного комплекса автоматизированного контроля диаметра трубок ЛЛ на линиях вытяжки ОАО «ОСРАМ». Структурная схема комплекса представлена на рис. 6.

Основным блоком системы контроля диаметра является теневое измерительное устройство (измеритель), которое включает в себя установленные на оптической скамье осветитель и оптико-электронную систему регистрации теневого изображения (видеодатчик) с линейным ФПЗС, содержащим 2048 светочувствительных ячеек.

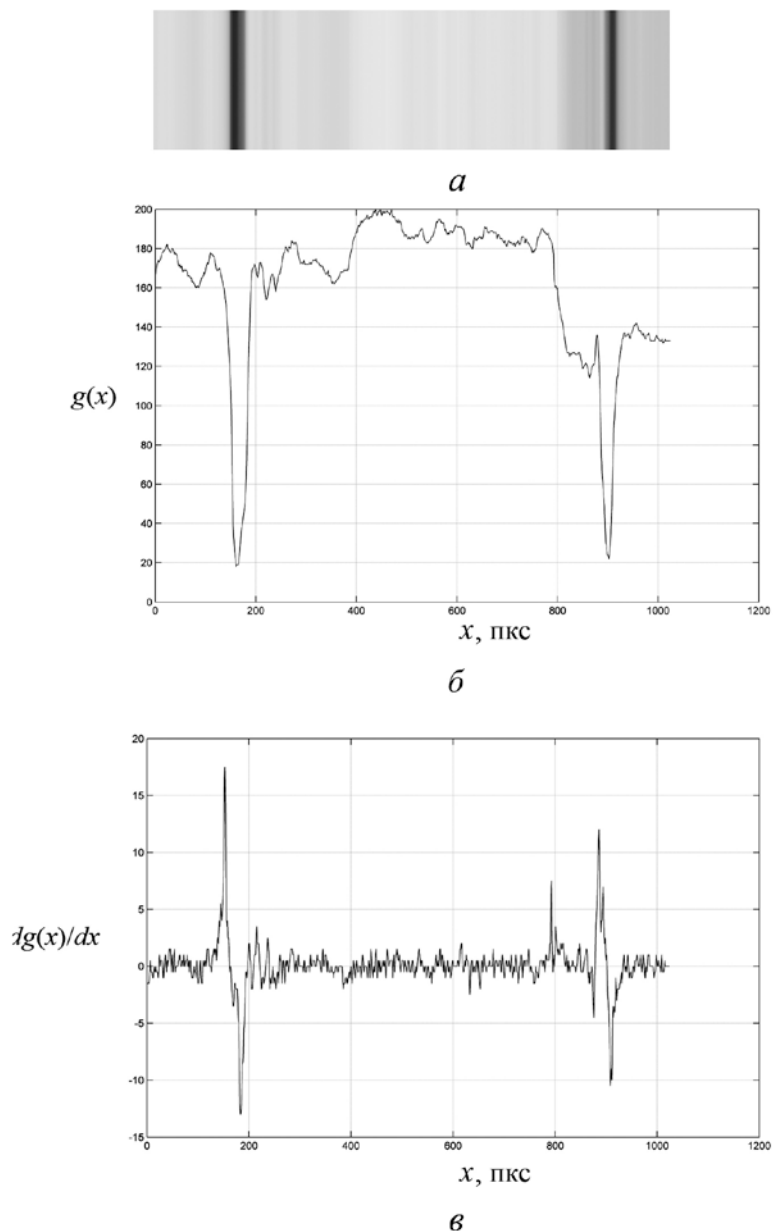


Рис. 5. Изображение стеклянной трубки (*a*), график распределения яркости в изображении (*б*) и результат дифференцирования (*в*)

Данные от видеодатчика передаются в контроллер, где, согласно описанной выше методике, осуществляется обработка оцифрованного изображения. С регистров контроллера по запросу промышленной ЭВМ (ПрЭВМ) передается пакет данных, содержащих массив сигнала, полученного от видеодатчика, а также координаты левой и правой границ объекта на теневом изображении. Регистры контроллера обновляются каждые 384 мкс; таким образом, дискретные измерения осуществляются с частотой 2604 раза в секунду.



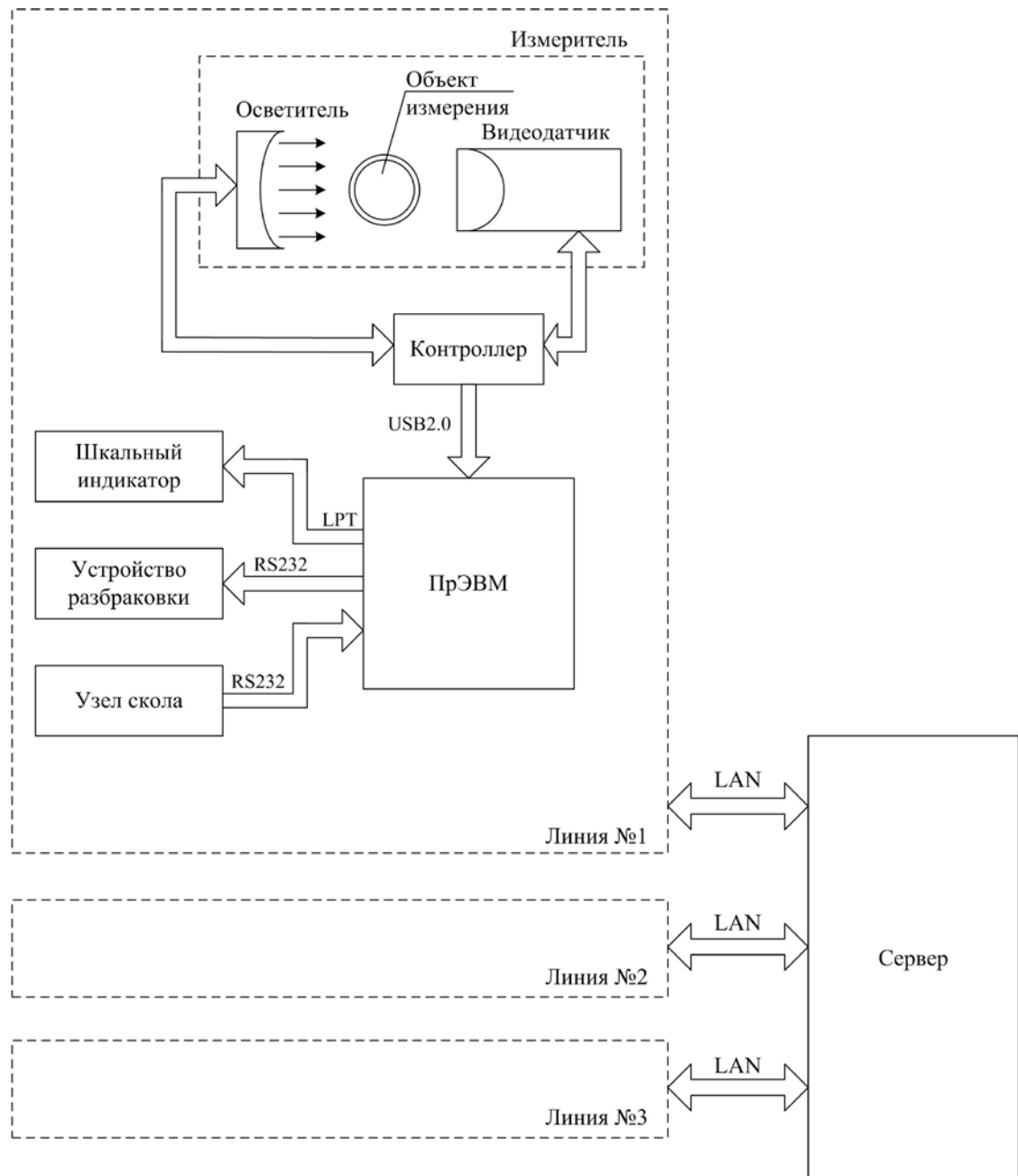


Рис. 6. Структурная схема комплекса измерения диаметра трубок-колб ЛЛ

В памяти ПрЭВМ хранится программа, которая на основании полученных от контроллера данных выполняет ряд процедур:

- 1) вычисление диаметра трубки  $D_i$  для каждого дискретного измерения;
- 2) обработка последовательности измерений (динамического массива)  $\{D_i\}$  фильтром нижних частот для демпфирования всплесков, возникающих в момент скола трубки и вследствие ряда других технологических причин;
- 3) определение, на основании результатов расчетов, попадает ли диаметр контролируемого изделия в заданный диапазон, и выставление на выходе последо-

вательного порта ПрЭВМ сигнала на устройство разбраковки: «0» – годная трубка, «1» – брак;

4) вывод с выходов параллельного порта ПрЭВМ данных на светодиодный шкальный индикатор, которой позволяет оператору производственной линии следить за качеством работы линии вытяжки в непосредственной близости от органов управления;

5) формирование базы данных, содержащей размеры диаметров, усредненные по длине отреза трубки;

6) получение от сервера набора данных, устанавливающих условия измерения и параметры контролируемого изделия;

7) передача через определенный промежуток времени базы данных на сервер.

Для синхронизации работы измерительной системы и узла скола используется опико-электронный датчик положения, с выхода которого через преобразователь уровня на вход последовательного порта ПрЭВМ поступает строб, сигнализирующий о прохождении ножом определенного положения.

Подобным образом реализованы системы на трех производственных линиях, каждая из которых по локальной сети связана сервером. Результаты контроля выводятся на дисплей сервера в виде диаграмм, которые за разные промежутки времени отображают количество (в штуках и процентах) годных трубок и трубок с диаметром больше максимально допустимого и меньше минимально допустимого.

Проведенные оценки показали, что величина абсолютной погрешности измерительного устройства при работе на технологических линиях лежит в пределах  $\pm 25 \dots \pm 28$  мкм. Внедрение разработанной системы позволило повысить эффективность производства: экономический эффект от внедрения составил 407620 рублей, срок окупаемости – 1,8 года, что подтверждено Актом о внедрении научных положений и выводов диссертации от 21.12.2007 г.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода измерения геометрических параметров поперечного сечения трубки. В результате проведенного аналитического обзора установлено, что известные устройства, основанные на методе поперечного сечения, позволяют определить диаметры и толщину стенки

трубки. Целью главы является расширение возможности метода за счет определения не только указанных параметров, но и эллипсности образующих наружной и внутренней поверхностей, а также их несоосности.

В общем случае профильные сечения наружной и внутренней поверхностей трубок, полученных в процессе вытяжки, по форме наиболее близки к эллипсу. Поэтому, для более полного и точного описания сечения трубки после получения и оцифровки оптического изображения поперечного сечения необходимо аппроксимировать ее границы уравнениями, описывающими эллипс, при этом для определения параметров профильных кривых необходимо использовать общее уравнение кривых второго порядка

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + H = 0, \quad (6)$$

а затем приводить его к каноническому виду  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ .

Разработан математический аппарат и алгоритм решения сформулированной задачи, который содержит 3 этапа.

1) Зная координаты точек  $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$  исследуемых кривых в декартовой системе координат ДСК, находят коэффициенты  $A, B, C, D, E$  и  $H$  уравнения (6), для чего решают переопределенную систему  $n$  уравнений

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & \dots & x_n^2 \\ 2x_1^2 y_1^2 & \dots & 2x_n^2 y_n^2 \\ y_1^2 & \dots & y_n^2 \\ 2x_1 & \dots & 2x_n \\ 2y_1 & \dots & 2y_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -H \\ -H \\ -H \\ -H \\ -H \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где свободному члену придают любое (ненулевое) значение, например  $H = 1$ .

2) Находят ДСК<sub>1</sub>, в которой оси эллипса параллельны осям системы координат, а уравнение кривой не содержит члена, составленного из произведения различных координат:  $x_1 y_1$ . При этом слагаемое  $2Bxy$  исключают поворотом ДСК на угол  $\alpha$ . Таким образом, получают систему ДСК<sub>1</sub>, координаты которой  $x_1$  и  $y_1$  связаны координатами  $x$  и  $y$  системы ДСК соотношением

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha - y_1 \sin \alpha; \\ y = x_1 \sin \alpha + y_1 \cos \alpha. \end{cases} \quad (8)$$

где  $\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2B}{A-C}$ .

Переход от старых координат к новым определяется соотношением

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \\ E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \cos^2 \alpha + C \sin^2 \alpha + 2B \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ 0 \\ A \sin^2 \alpha + C \cos^2 \alpha - 2B \cos \alpha \cdot \sin \alpha \\ D \cos \alpha + E \sin \alpha \\ E \cos \alpha - D \sin \alpha \\ H \end{pmatrix}. \quad (9)$$

3) При помощи параллельного переноса ДСК<sub>1</sub> находят ДСК<sub>2</sub>, в которой уравнение кривой будет иметь простейший вид. Координаты точки в этих двух системах связаны соотношениями  $x_1 = x_2 - \frac{D_1}{A_1}$  и  $y_1 = y_2 - \frac{E_1}{C_1}$ . Начало координат ДСК<sub>2</sub> в ДСК<sub>1</sub>, таким образом, переносится в точку с координатами

$$\begin{cases} x_{c,1} = -\frac{D_1}{A_1}; \\ y_{c,1} = -\frac{E_1}{C_1}. \end{cases} \quad (10)$$

В результате преобразований уравнение кривой принимает вид

$$A_2 x_2^2 + C_2 y_2^2 + H_2 = 0. \quad (11)$$

Переход к новым коэффициентам осуществляют согласно уравнению

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ C_2 \\ D_2 \\ E_2 \\ H_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ C_1 \\ 0 \\ 0 \\ H_1 - \frac{D_1^2}{A_1} - \frac{E_1^2}{C_1} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где  $H_2 \neq 0$ , а знаки  $A_1$  и  $C_1$  одинаковы и противоположны знаку  $H_2$ .

Из (11) получают выражения для нахождения длин полуосей:

$$\begin{cases} a = \sqrt{-\frac{H_2}{A_2}}; \\ b = \sqrt{-\frac{H_2}{C_2}}. \end{cases} \quad (13)$$

Был разработан и изготовлен макет устройства, в котором оптическое изображение поперечного сечения трубки оцифровывается с помощью видеодатчика с двухкоординатным фотоприемником и передается в компьютер, где осуществляется его обработка и вычисления. Алгоритм предварительной обработки включает этапы фильтрации нижних частот (сглаживание), бинаризации и морфологической обработки.

По завершении предварительной обработки изображения программа осуществляет обход наружного и внутреннего контуров объекта с целью определения координат  $(x_1, y_1) \dots (x_n, y_n)$  его границ. После определения точек, соответствующих профильным кривым, их значения подставляют в уравнение (7), откуда находят значения коэффициентов уравнения (6)  $A, B, C, D, E$  ( $H = 1$ ). Далее, используя выражения (9) и (12), находят коэффициенты уравнения (11)  $A_2, C_2$  и  $H_2$ , а затем по (13) вычисляют размеры полуосей эллипсов.

Для каждого из эллипсов (соответствующих внутренней и наружной стенкам трубки) по (10) находят координаты центра  $(x_{c,1}^B, y_{c,1}^B)$  и  $(x_{c,1}^H, y_{c,1}^H)$  в ДСК<sub>1</sub>, а затем по (8) – координаты  $(x_c^B, y_c^B)$  и  $(x_c^H, y_c^H)$  в ДСК. Параметр  $\Delta_C$ , определяющий несоосность эллипсов, вычисляют по формуле:

$$\Delta_C = \sqrt{(x_c^B - x_c^H)^2 + (y_c^B - y_c^H)^2}. \quad (14)$$

Проведенные в лабораторных условиях исследования и оценки показали, что разработанное устройство позволяет осуществлять измерения с абсолютной погрешностью не более  $\pm 10$  мкм. Точность измерения определяется разрешающей способностью видеодатчика и, в большей степени, непараллельностью геометрической оси исследуемой трубки и оптической оси объектива видеодатчика. Разработанный метод измерения может быть использован в автоматизированных производственных системах при изготовлении прозрачных трубок, а также для измерения параметров непрозрачных труб, например в нефтегазовой промышленности, строительстве, водоснабжении, отоплении и т.п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен аналитический обзор литературных и патентных источников оптических методов измерения геометрических параметров прозрачных трубок, в результате которого установлены перспективные направления их усовершенствования за счет использования методов цифровой обработки изображения.

2. Предложен новый метод измерения диаметра трубок – метод отображения, основанный на получении и последующей обработке оптического изображения, создаваемого на экране следами лучей, отраженных от поверхности трубки при ее освещении плоским пучком.

3. Предложен новый метод цифровой обработки изображения поперечного сечения трубки, который впервые позволил определять не только диаметры и толщину наружной и внутренней стенки трубки, как в известных способах, но также эллипсности и несоосность стенок.

4. Разработан метод обработки изображения теневой проекции трубки, позволивший повысить помехоустойчивость измерительного устройства.

5. Осуществлена практическая реализация новых методов и их схемотехнических решений, в том числе разработан, изготовлен и внедрен в стекольное производство ОАО «ОСРАМ» (г. Смоленск) оптико-электронный комплекс измерения диаметра стеклянных трубок-колб ЛЛ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. **Старостин Е.М.,** Алещенков И.В. Оптический метод измерения диаметра цилиндрических изделий в процессе производства. [Текст] // XII Международная научн.-техн. конф. Радиоэлектроника, электроника и энергетика.: Тез. докл. В 3-х т. Т. 1. – М: МЭИ, 2006, с. 234-235.
2. **Старостин Е.М.,** Алещенков И.В. Метод измерения геометрических параметров стеклянных труб по восстановлению изображений их каустических кривых. [Текст] // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов III Межрегиональной научн.-техн. конф. В 3 т. Т. 2 – Смоленск: 2006, с. 188-192.

3. **Старостин Е.М.,** Алещенков И.В., Мартыненко Г.В. Теневое устройство для контроля диаметра стеклянных трубок-колб в электроламповом производстве. [Текст] // Техника и технология №6, 2006. – М.: Изд-во Спутник-плюс, с.19-22.
4. **Старостин Е.М.** Детектирование краев стеклянной трубы на изображении теневой проекции. [Текст] // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов IV Межрегиональной научн.-техн. конф. В 3 т. Т. 2 – Смоленск: 2007, с. 68-70.
5. **Алещенков И.В.,** Гавриленков В.А., Старостин Е.М. Метод измерения диаметра цилиндрических направленно отражающих поверхностей. [Текст] // Светотехника №5, 2007, с. 43-44.
6. **Старостин Е.М.** Методика оценки погрешности производственных измерительных систем. [Текст] // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов V Межрегиональной научн.-техн. конф. В 3 т. Т. 1 – Смоленск: 2008, с. 137-140.
7. **Старостин Е.М.,** Гавриленков В.А. Зиенко С.И. Способ измерения диаметра цилиндрических объектов. [Текст] // Математические методы в технике и технологиях. Сб. трудов XXI Международной научн. конф. В 10 т. Т. 7. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008, с.47-49.
8. **Старостин Е.М.,** Гавриленков В.А. Зиенко С.И. Применение методов цифровой обработки оптических изображений при измерении геометрических параметров поперечного сечения труб. [Текст] // Известия ОрелГТУ №1-3, 2008, с. 262-266.