

На правах рукописи

Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим



**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ
ТРУБОК В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

*Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и
диагностики материалов, изделий, веществ и природной
среды*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Русинов Леон Абрамович

Официальные оппоненты:

Сясько Владимир Александрович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», кафедра теоретической и практической метрологии, профессор;

Манойлов Владимир Владимирович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, лаборатория автоматизации измерений и цифровой обработки сигналов, заведующий лабораторией;

Ведущая организация - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **17 июля 2025 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 мая 2025г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Кварцевое стекло или так называемое Fused Silica glass обладает комплексом таких уникальных свойств, как нечувствительность к термоудару, высокая светопрозрачность в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, радиационная стойкость, химическая инертность по отношению к агрессивным средам (кислоты, соли, расплавы металлов) и др. Его уникальные свойства делают его наиболее подходящим типом стекла для многих отраслей промышленности.

Трубки из кварцевого стекла широко используются в таких отраслях, как электроника, оптика, фотоника (включая волокна и лазерные компоненты) и производство различных полупроводников.

Толщина этих трубок напрямую влияет на их оптические свойства, такие как пропускание и преломление света. Точное измерение толщины и диаметра трубки гарантирует ее соответствие требуемым характеристикам.

Дефекты поверхности, такие как трещины, царапины, пузыри могут поставить под угрозу структурную целостность и надежность трубок из кварцевого стекла. В тех случаях, когда эти трубки подвергаются воздействию высоких температур, давления или агрессивных веществ, обнаружение и определение характеристик поверхностных дефектов становится важным фактором для обеспечения безопасности и долговечности компонентов или систем, в которых они используются.

Более того, соблюдение круглой геометрической формы трубок из кварцевого стекла имеет решающее значение в промышленных применениях, где требуется точное выравнивание и позиционирование. В таких приложениях, как оптоволокно, лазерные технологии и оптоэлектроника, круглая форма трубки

обеспечивает правильную передачу света и выравнивание оптических компонентов. Поэтому точное обнаружение и анализ округлости трубки из кварцевого стекла достаточно важны для поддержания желаемой функциональности этих систем.

Выявляя дефекты трубок в ходе производственного процесса, производители могут минимизировать отходы, повысить эффективность и поставлять своим клиентам продукцию более высокого качества.

Актуальность работы определяется повышением эффективности автоматического обнаружения дефектов и отклонений в трубной продукции из кварцевого стекла. Способы неразрушающего контроля и измерений, позволяющие точно выявлять, оценивать и характеризовать эти дефекты, позволили бы принимать соответствующие меры во избежание возможных рисков для безопасности или выхода изделия из строя.

Скорость линии по производству кварцевых трубок и неблагоприятные условия окружающей среды затрудняют человеческому глазу определение дефектов и их своевременное обнаружение. Таким образом, уровень мониторинга и контроля напрямую влияет на производство высококачественной трубчатой продукции. Использование технического зрения обеспечивает высокую скорость и точность контроля.

Степень разработанности темы исследования

Объем производства трубок из кварцевого стекла в России и мире велик, поэтому проблема контроля, мониторинга и диагностики дефектов трубок представляет интерес для многих исследователей. Раньше для обнаружения дефектов использовалось множество оптических и неоптических способов, в основном, рассчитанных на применение в лаборатории. В то же время современные условия требуют разработки для контроля каждой трубки на предмет отклонений от нормы или наличия дефектов бесконтактных способов, работающих в реальном времени. Здесь можно отметить работы Фотиева Ю.А., Junmin

Bao, Junfeng Jing и Yaohua Xie . Однако до сих пор, к сожалению, во многих случаях предлагаются способы контроля и обнаружения дефектов, рассчитанные на лабораторный анализ, что неприемлемо при организации контроля и измерения в реальном времени.

Цель работы. Целью данной работы является разработка структурного, методологического и алгоритмического обеспечения системы диагностирования дефектов кварцевых трубок в процессе их производства в режиме реального времени.

Идея. Определить наиболее распространенные и наиболее нежелательные потенциальные дефекты трубок из кварцевого стекла в соответствии с приоритетом обнаружения, разработать соответствующие алгоритмы для их обнаружения и далее эти алгоритмы интегрировать в комплексную систему мониторинга, осуществляющую контроль качества трубок в режиме реального времени на этапе вытяжки.

Реализация указанной цели предполагает постановку и решение следующих **задач**:

1. Проанализировать технологический процесс производства кварцевых трубок и выявить их потенциальные дефекты.

2. Исследовать существующие методики детектирования и идентификации дефектов и оценить их соответствие требованиям к системе диагностики.

3. Разработать методологическое и алгоритмическое обеспечение для измерения параметров кварцевых трубок в процессе их вытяжки в режиме реального времени.

4. Разработать алгоритмы и способы детектирования и классификации дефектов кварцевых трубок в реальном времени.

5. Создать программное обеспечение для реализации предложенных алгоритмов и выполнить его экспериментальное исследование.

Объектом исследования являются алгоритмы обработки и анализа визуальной информации при контроле и измерении параметров и техническом диагностировании трубок из кварцевого стекла на основе технического зрения.

Предметом исследования являются методы и способы обнаружения на основе технического зрения дефектов трубок из кварцевого стекла в процессе производства

Научная новизна:

1. Обоснован способ и алгоритм дистанционного измерения толщины стенки кварцевой трубки в процессе ее изготовления (волочения), обеспечивающий за счет соответствующего задания параметров инвариантность к возможным колебаниям и вибрациям трубки.

2. Разработан алгоритм контроля круговой геометрии трубки (эллипсности, разнотолщинности, сколов и т.п.) на базе преобразования в полярную систему координат, работающий в реальном времени.

3. Предложен алгоритм обработки изображений контролируемых трубок, позволяющий обнаруживать поверхностные дефекты в режиме реального времени с доверительной вероятностью не менее 95 %.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1, 4, 6, 7 паспорта специальности 2.2.8.

Теоретическая и практическая значимость: Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке архитектуры и алгоритмического обеспечения системы контроля и диагностики дефектов при контроле кварцевых трубок непосредственно в процессе их производства в реальном времени.

Практическая значимость результатов исследования заключается в:

1. разработке способов и алгоритмов контроля основных параметров кварцевых трубок

2. разработке алгоритмов контроля возможных дефектов кварцевых трубок в реальном времени с доверительной вероятностью не менее 95%.

3. Получены акты внедрения от Университета «Университетский колледж Аль-Салама» (Ирак) и от компании «Центр обучения и развития Аль-Равафед» (Ирак)

Методология и методы исследования.

Для достижения поставленных в работе целей использовались методы на основе технического зрения. Получаемые изображения объекта подвергались цифровой обработке и анализу. В процессе обработки данных была задействована библиотека алгоритмических примитивов OpenCV, что значительно ускорило разработку и выполнение необходимых задач.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способы и алгоритмы дистанционного контроля трубок из кварцевого стекла, основанные на проекционном способе и преобразовании координат изображения торца трубки в полярные, обеспечивают погрешность измерения толщины стенки не более 5%, обнаружение отклонений от круглой геометрической формы в реальном времени при вытягивании и инвариантность к возможным вибрациям трубки.

2. Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов структуры трубок из кварцевого стекла проекционным способом, основанный на преобразовании изображений в оттенки серого и градиентном анализе с последующей бинаризацией на базе пороговой обработки Оцу, обеспечивает доверительную вероятность выявления не менее 95 %.

Степень достоверности полученных результатов в определенной степени обусловлена значительным количеством

экспериментального материала, сопоставлением полученных результатов с ранее опубликованными данными.

Апробация работы. Результаты работы отражались в докладах на конференциях разных уровней:

1. V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023;

2. Science and Technology: XXI Century Advances, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Санкт-Петербург, 2023;

3. Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, Россия, Санкт-Петербург, 2023 (2 доклада);

4. XIII Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 194-й годовщине СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, 2022 (2 доклада);

5. XII Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 193-й годовщине СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, 2021;

6. XI Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 192-й годовщине СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, 2020 (3 доклада);

7. Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях»- ММТТ, Санкт-Петербург, 2019.

Личный вклад автора состоит в анализе процессов производства кварцевых трубок с целью выявления типовых дефектов и причин их возникновения, в создании алгоритмов и программного обеспечения для обнаружения и идентификации этих дефектов в режиме реального времени, а также в проведении испытаний для проверки полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в

том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение А).

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 127 страницы машинописного текста, 63 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 106 наименований и 2 приложения на 10 страницах.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность первому научному руководителю доктору технических наук, профессору Харазову Виктору Григорьевичу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования.

Первая глава диссертационной работы содержит описание процесса производства кварцевых трубок, а также описания основных дефектов трубок с привязкой их к возможным причинам возникновения в технологической схеме производства.

На основании результатов обзора формулируются требования к системе диагностики, из которых наиболее важными являются обеспечение высокой эффективности обнаружения дефектов, работы в реальном времени, робастности и дистанционных измерений необходимых параметров кварцевых трубок.

Во второй главе приведен аналитический обзор состояния предметной области, проанализированы способы выявления различных видов дефектов кварцевых трубок на основе системы технического зрения. Выявлено, что разная природа дефектов и их проявлений не дает возможности использования одного алгоритма для их обнаружения и идентификации. Кроме того, ряд параметров кварцевых трубок не имеет средств для измерения в производственных условиях.

Формулируется цель исследования и задачи, которые нужно решить для достижения этой цели. При этом, учитывая, что алгоритмы обработки изображений содержат типовые элементарные операции обработки (алгоритмические примитивы), которые уже хорошо проработаны и объединены в соответствующие библиотеки, было решено при создании алгоритмов обнаружения дефектов использовать открытую библиотеку алгоритмических примитивов OpenCV.

В третьей главе диссертации проведена разработка комплексного алгоритма и ПО для контроля параметров и дефектов трубок из кварцевого стекла в реальном времени фактически на производственной линии. Приводится анализ предлагаемых способов обнаружения дефектов, удовлетворяющих сформированным требованиям к алгоритмам обработки.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов и программ. Показано, что при измерении толщины трубки в процессе вытягивания и даже при наличии вибраций обеспечивается погрешность не более 5%, а при обнаружении дефектов различного происхождения - 95% правильных обнаружений.

В заключении отражены обобщенные выводы по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Способы и алгоритмы дистанционного контроля трубок из кварцевого стекла, основанные на проекционном способе и преобразовании координат изображения торца трубки в полярные, обеспечивают погрешность измерения толщины стенки не более 5%, обнаружение отклонений от круглой геометрической формы в реальном времени при вытягивании и инвариантность к возможным вибрациям трубки.

Блок-схема предлагаемого комплексного алгоритма приведена на рисунке 1.

Алгоритм производит измерение толщины, обнаружение отклонений от круглой геометрии трубок и выявление поверхностных дефектов. Все эти дефекты объединены в три группы согласно необходимым операциям по их обнаружению.

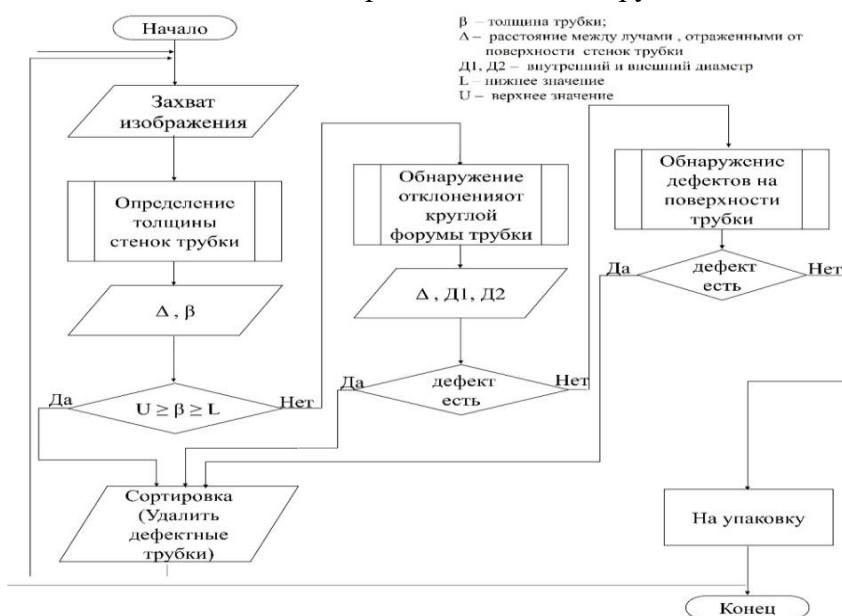


Рисунок 1 – Блок-схема комплексного алгоритма контроля трубок из кварцевого стекла

Для измерения толщины трубки лазерный луч отражается от внутренней и внешней поверхностей передней и задней стенок трубки и захватывается камерой, а затем передается на компьютер для последующей обработки (рисунок 2а и 2б). Важно отметить, что расстояние от трубки до камеры должно быть не менее полуметра, значит нужно, чтобы у камеры был достаточно длиннофокусный объектив или камера должна быть защищена тепловой защитой, так как температура в печи в процессе вытягивания может достигать 1000–1300°C.

На рисунке 3 пояснено измерение толщины стенки трубки β . Луч от источника, падающий под углом i относительно образующей трубки, претерпевает отражение при встрече с поверхностями стенки трубки, в результате чего образуются два луча. Расстояние между этими лучами Δ , прямо пропорционально толщине трубки β .

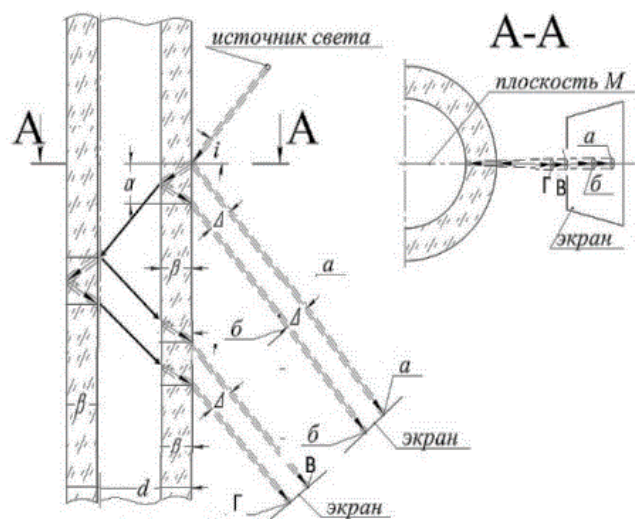


Рисунок 3 – Иллюстрация работы способа

Зависимость Δ от угла падения i определяется как: $\Delta = \alpha \cos i$, величина $\alpha = 2\beta \operatorname{tg} j$, где j — угол преломления: $j = \arcsin(\sin i / n_c)$, где n_c — коэффициент преломления стекла. Отсюда получаем (1):

$$\Delta = 2\beta \operatorname{tg}(\arcsin(n_b \sin i / n_c)) \cos i \quad (1)$$

n_b — показатель преломления воздуха. Откуда для β получим (2):

$$\beta = \frac{\Delta \sqrt{n_c^2 - (n_b \sin i)^2}}{\sin 2i} \quad (2)$$

Для ускорения процесса обработки изображение преобразуется в оттенки серого, а для фильтрации шумов использован медианный фильтр, для определения границ лучей производится бинаризация изображения с использованием адаптивного порога Оцу. В результате получаются две белых параллельных полосы на черном фоне, ширина которых определяется шириной луча.

Алгоритм определяет расстояние Δ между центрами этих полос и далее по выражению (2) толщину стенки трубки β . При этом погрешность измерения не превышала 5% при времени на обработку изображений менее 30мс, что позволяет контролировать толщину по длине трубки непосредственно в процессе вытягивания.

Кроме того, как показал эксперимент алгоритм инвариантен по отношению к возможной вибрации трубки при вытяжке, а располагая три лазерных установки через 120° по окружности трубки, можно, в случае необходимости, контролировать дефекты разнотолщинности трубки, сканируя ее за счет ее движения в процессе вытягивания. Кроме того, такая структура системы может использоваться далее для контроля поверхностных дефектов.

Исследование качества алгоритма определения значений толщины трубок показало возможность работы в реальном времени с обеспечением погрешности не более 5% при углах падения луча в диапазоне 40-45° и возможных отклонениях трубки при вибрации в процессе вытяжки в пределах 5°.

Для определения дефектов круглой формы трубок соответствующий блок системы контроля устанавливают так, как показано на рисунке 4.

Учитывая круглую форму поперечного сечения трубки, целесообразно перейти от декартовых координат к полярным, где идеальный круг представляется в виде прямой линии. Тогда все отклонения от прямой будут характеризовать торцевые дефекты трубки. Блок-схема этого блока алгоритма обработки представлена на рисунке 5.

При этом, чтобы легко извлечь контур торца трубки, изображение преобразуется в пространство HSV. Т.к. тон (цвет излучения лазера источника) известен, то с помощью порогового преобразования и функции `cv2.inRange()` на изображении выделяется интересующая область (в нашем случае – торец трубки) и заполняется белыми пикселями (Рисунок 6). В результате получается черно-белое изображение - маска торца трубки.

Так как внешний и внутренний контуры маски, могут быть не соосными, т.е. не будет общего центра, и кроме того, профиль поперечного сечения внешней и внутренней стенок трубки может отличаться от профиля идеального круга, то в качестве полюса было решено использовать центр описанной окружности для профиля сечения внешней стенки (функция `cv2.minEnclosingCircle()`).

В качестве результата эта функция возвращает данные о центре описанной окружности и ее радиусе, которые и используются при переходе в полярную систему координат, а резуль-

татом перехода является изображение, где вертикальная ось соответствует полярному углу, а горизонтальная - полярному радиусу.

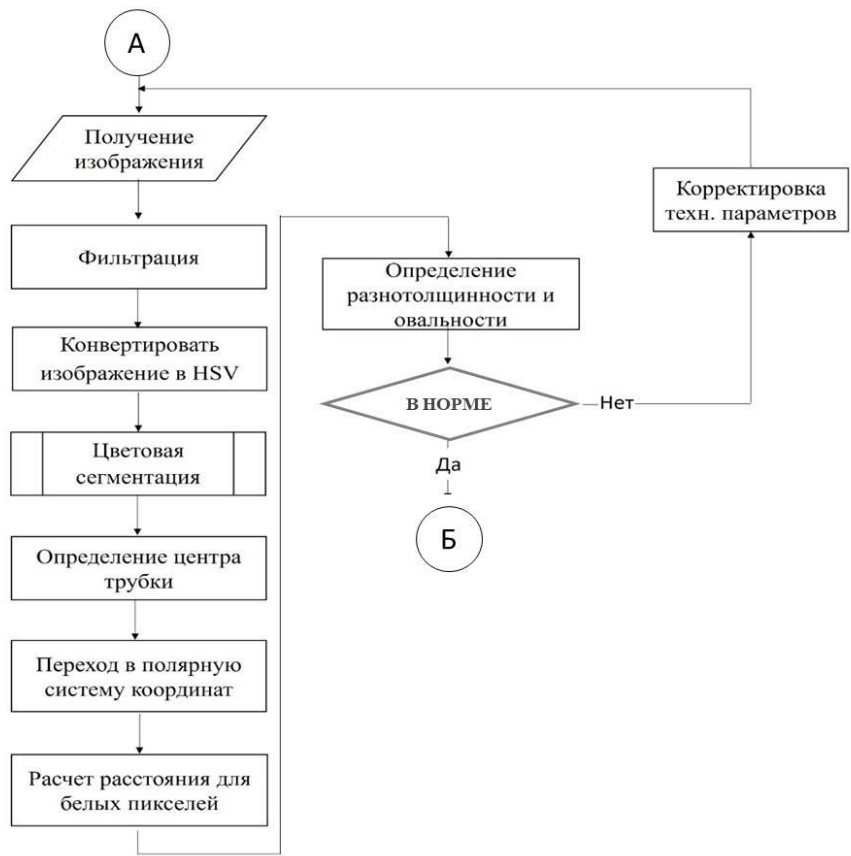


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма определения дефектов толщины

Для определения овальности трубки контролируется выход внешнего контура трубки за заданные пороговые значения, определяемые стандартами или соответствующими ТУ, т.е. отклонения от прямой (рисунок 6г).

Для определения разнотолщинности оценивается выход за пороговые значения толщины стенки, полученной как разность значений контуров внешней и внутренней поверхности стенки при соответствующих значениях полярного угла. Так как важно определить максимальные отклонения толщины по окружности сечения трубки, то, пробегаая все значения полярного угла в пределах одного периода и определяя разности координат белых пикселей на изображении, которые соответствуют толщине трубки в данном сечении, программа находит максимальное и минимальное значения толщины стенки (функции DistanceTransform() и minMaxLoc()) и сравнивает с пороговыми значениями.

Предложенный способ контроля торцевых дефектов кварцевой трубки тестировался на трубках с толщиной стенки 1,2,3 и 4 мм и с различными торцевыми дефектами (разнотолщинностью, наличием скола, овальностью). Обработка проводилась на персональном компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40ГГц. Алгоритм продемонстрировал свою работоспособность: все предъявленные при тестировании способа торцевые дефекты были определены. При этом среднее время, затраченное на обработку изображения размером 700×700 пикселей с разрешением 300dpi, составило 125мс.

2. Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов структуры трубок из кварцевого стекла проекционным способом, основанный на преобразовании изображений в оттенки серого и градиентном анализе с последующей бинаризацией на базе пороговой обработки Оцу, обеспечивает достоверную вероятность выявления не менее 95 %.

В этой части работы, алгоритм опять возвращается к работе в оттенках серого, так как здесь основным является градиент изображения, а не цвет. Далее изображение подвергается бинаризации на базе пороговой обработки Оцу (рисунок 7).

Функции OpenCV используются для извлечения характерных параметров каждого дефекта в изображении трубки, например, площади, минимального ограничивающего прямоугольника, координат центра и т.п. В частности, для выделения на изображении области, занимаемой дефектом, используется функция поиска контуров (`cv2.findContours`), а для их отображения - функция `cv.drawContours()`. Кроме того, для выделения возможных протяженных дефектов типа трещин или царапин используется функция `cv2.minAreaRect()`, определяющая прямоугольник с минимальной площадью, повернутый на некоторый угол.

Площадь и периметр дефекта вычисляются путем определения его контура и последующего применения соответствующих функций `cv2.contourArea()` и `cv2.arcLength()`. Функция `cv2.boundingRect()` используется для выбора области интереса после получения контуров объекта на изображении.

Площадь, периметр и другие параметры дефектов извлекаются в виде векторов признаков. По соотношениям этих параметров контуров, описывающих дефекты, можно определить вид дефекта и, соответственно, необходимость отбраковки трубки. Разработанный алгоритм обнаружения не позволяет распознавать пересекающиеся и близко расположенные дефекты по отдельности, они воспринимаются как одиночные дефекты, однако в большинстве случаев это не принципиально. Способ обладает достаточно высокой чувствительностью.

При разработке алгоритма обнаружения поверхностных дефектов трубок из кварцевого стекла удалось избежать использования морфологических преобразований, хотя они имеют целый ряд положительных качеств.

Однако морфологическое преобразование зависит от параметров, используемых для выбора структурных элементов, что приводит к потере мелких деталей изображения или потере чувствительности к другим мелким деталям, а также требует больших вычислительных ресурсов, что влияет на скорость и эффективность обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации получены следующие основные результаты работы:

1. Обоснован способ и разработаны алгоритм и программа для измерения толщины стенок трубок из кварцевого стекла проекционным способом в реальном времени (25-30мс) непосредственно во время процесса вытягивания с погрешностью не более 5%, и выработаны рекомендации по выбору параметров для обеспечения инвариантности к возможным вибрациям контролируемых трубок.

2. Обоснован и предложен способ обнаружения отклонений от круглой геометрической формы трубки на базе преобразования изображения торца трубки из декартовых координат в полярные, что позволило обнаруживать такие дефекты, как овальности, скосы и сколы, при затратах времени на эти операции в среднем 125мс.

3. Разработан и исследован алгоритм обнаружения поверхностных дефектов трубки, таких как трещины, царапины, пузыри и др. позволяющий обнаруживать до 95% указанных дефектов, не требующий использования эталонных изображений и морфологических преобразований.

4. Разработан и исследован комплексный алгоритм и программное обеспечение для автоматического измерения геометрических параметров и обнаружения и идентификации дефектов трубок из кварцевого стекла проекционным способом

в реальном времени, объединяющий алгоритмы, перечисленные выше, модульная структура которого позволяет легко адаптироваться к конкретным условиям производства. Программное обеспечение (регистрационный номер 2024681180) было написано на Python 3.10 с использованием библиотек с открытым исходным кодом OpenCV, scikit-image и Numby, а также других библиотек, используемых для анализа 2D-изображений.

5. Таким образом, были разработаны комплексный алгоритм и программное обеспечение для автоматического измерения и контроля параметров и дефектов в прозрачных кварцевых стеклянных трубках с использованием оптических методов в реальном времени, включая модули измерения толщины, отклонения от круговой геометрии и обнаружения поверхностных дефектов. Однако некоторые трубки из кварцевого стекла непрозрачны, а некоторые имеют некруглую (ребристую) форму, что полезно для некоторых применений. Важно разработать методы обнаружения и мониторинга таких труб. Этот вопрос пока не решен и является предметом будущей работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации из перечня ВАК:

1. Аль-Гурайбави, А. Автоматическое обнаружение дефектов толщины круглых кварцевых трубок оптическим методом / А. Аль-Гурайбави, Н.В.Воробьев, М.Х.Кадим, Л.А.Русинов // Южно-Сибирский Научный Вестник, 2023. – № 3 (49). – С. 186–191.

2. Аль-Гурайбави, А. Измерение и контроль толщины кварцевых трубок оптическим методом/ А. Аль-Гурайбави, Н.В. Воробьев, Л.А.Русинов // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26. – № 9 (303). – С. 50–57.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618180 Российская Федерация. Измерение толщины трубки из кварцевого стекла на основе технического зрения: № 2024616863 заявлено 25.03.2024: опубликовано 09.04.2024 / Русинов Л. А., Аль Гурайбави А.О. / Бюл. № 6.

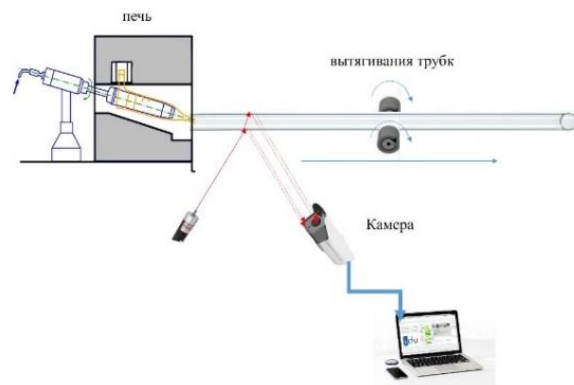
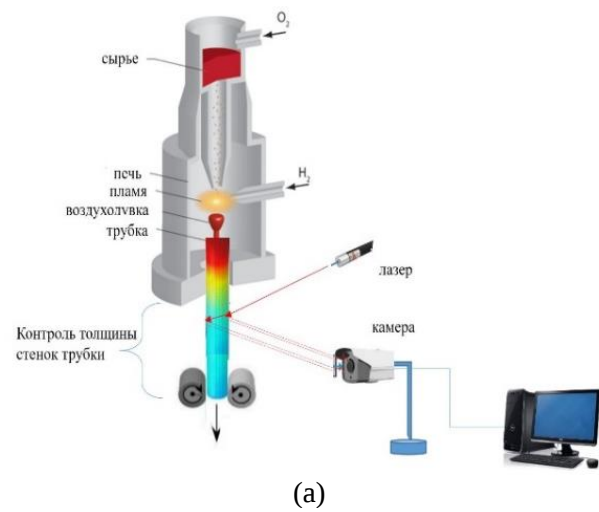


Рисунок 2 – Схема контроля толщины стенок трубки: а) при вертикальном вытягивании трубки; б) при горизонтальном вытягивании трубки

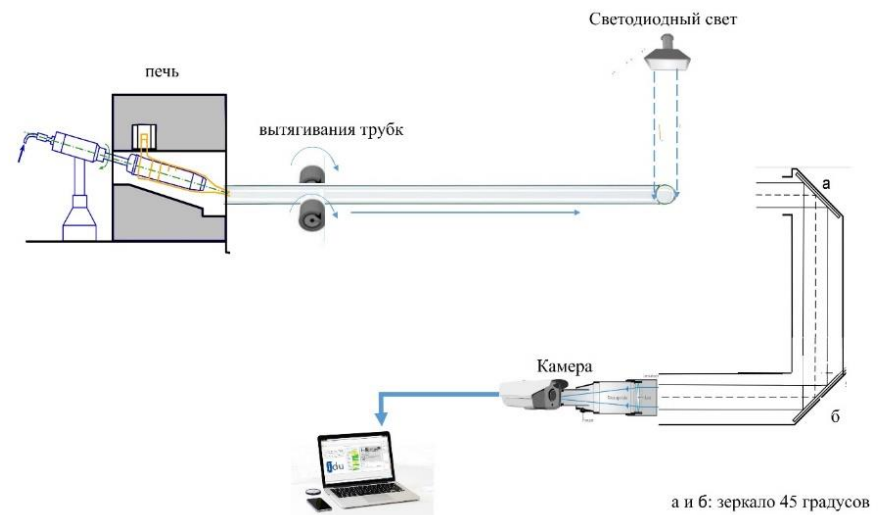


Рисунок 4 – Схема контроля торцевых дефектов кварцевой трубки

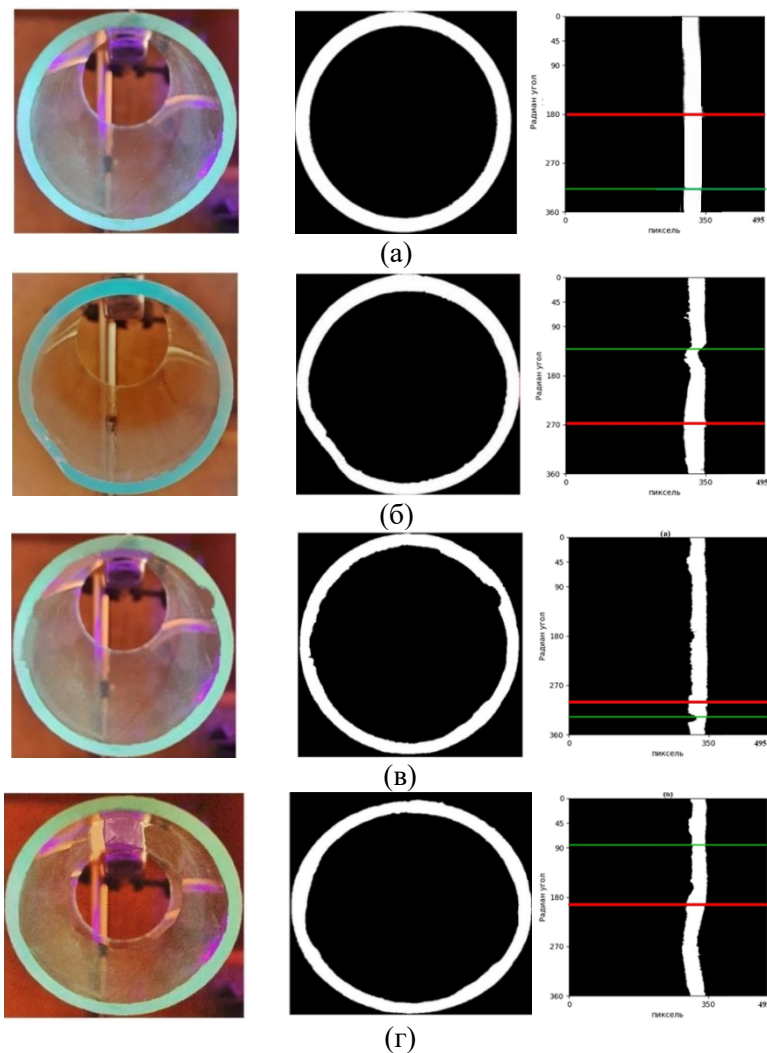


Рисунок 6 – Изображения торца трубок в декартовых и полярных координатах (без дефектов (а) и с различными дефектами: сколом (б), сколом (в) и овальностью (г))

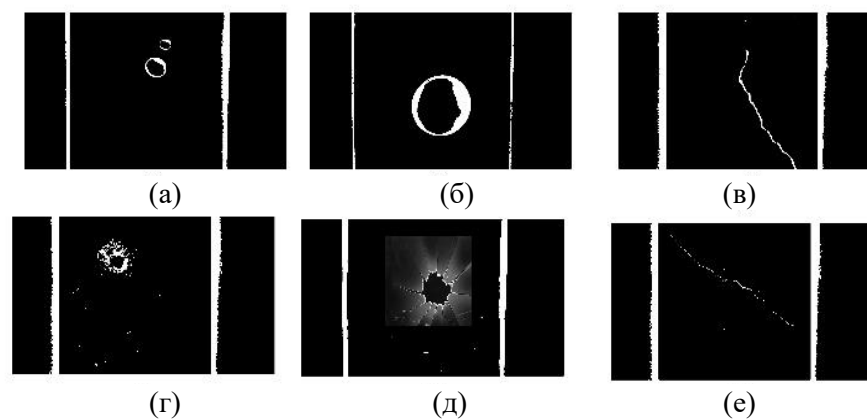


Рисунок 7 – Изображения дефектов трубки из кварцевого стекла после бинаризации по Оцу (а) мошка; (б) пузыри; (в) трещины; (г) вмятины; (д) вмятины; (е) царапина