

На правах рукописи

Кадим Мохаммед Худаир Кадим



**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ
КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ 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 – 2024

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 **20 ноября 2024 г. в 13:00** 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 № 1171а**.

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

Автореферат разослан 20 сентября 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Керамическая плитка является широко используемым отделочным материалом в промышленном и гражданском строительстве. Однако области ее применения этим не ограничиваются, например, она находит применение в химической промышленности, металлургии, а также при необходимости защиты от радиации. Объем рынка керамической плитки в России, например, в 2019 году составил 200,1 млн.кв.метров и все время показывает тенденции роста.

Естественно, что основные стадии производства: приготовление исходных смесей, формование, глазурирование и обжиг (однократный или двукратный), транспортировка и упаковка – достаточно хорошо автоматизированы, однако стадия выходного контроля плитки на наличие дефектов на ее лицевой поверхности в большинстве случаев проводится операторами визуально. Это сопряжено с большой нагрузкой на зрение операторов и не гарантирует необходимого качества контроля.

При этом дефекты, связанные с внутренними характеристиками материала плитки, контролируются согласно ГОСТам лабораторно, в режиме офф-лайн. Также контролируется уровень естественной радиации материала плитки и ее защитные свойства. В то же время поверхностные и краевые дефекты требуют индивидуального контроля в режиме реального времени (онлайн). Эти дефекты могут возникать на всех стадиях производства плитки, поэтому отслеживание и контроль таких дефектов керамических плиток является актуальной задачей. При этом основным требованием, кроме высокой вероятности обнаружения дефектов, выдвигается достижение высокой скорости обнаружения, что диктуется необходимостью обеспечения соответствующей производительности.

В настоящее время проводится много исследований по возможности использования керамических плиток для защиты от ионизирующего излучения в учреждениях, где присутствует радиация, таких, например, как университетские и исследовательские лаборатории, медицинские учреждения. Было показано, что плитки,

в принципе, обладают лучшими защитными свойствами, чем многие строительные материалы, в частности, бетон. Ряд предприятий по выпуску керамических плиток начал сообщать в сопроводительной документации значение коэффициентов ослабления излучения плитками данной партии. Поэтому в данной работе был рассмотрен и этот вопрос.

Степень разработанности темы исследования

В относительно недалеком прошлом методы, используемые для контроля и выявления дефектов, большей частью выполнялись в лаборатории. Поэтому автоматизации контроля уделялось большое внимание исследователей как у нас, так и за рубежом. Здесь следует отметить работы отечественных авторов Киричука В.С., Косых В.П., Блохина К.О., Матлахова В.П., Хандожко В.А., так и зарубежных: Golkar E., Singh R., Shah H.N.M., Hocenski Ž., Elbehiry H., Karimi M.H., Karhe R.R., Jacob G., Matić T. и др. В то же время, учитывая, что контролируемая плитка находится на движущейся конвейерной ленте для выполнения контроля каждой плитки необходима разработка бесконтактных оптических методов, работающих в реальном времени. Однако до сих пор, к сожалению, в целом ряде источников приводится оценка времени на операции захвата и обработки изображения в диапазоне секунд на плитку, что недопустимо много при организации контроля в реальном времени. Поэтому, несмотря на большое количество публикаций, вопросы контроля дефектов плитки в реальном времени остаются открытыми.

Цель работы - повышение достоверности выявления дефектов однотонной (монохромной) керамической плитки при промежуточном и выпускном контроле в реальном времени и снижение времени оценки ее свойств.

Идея. Разработать классификацию возможных дефектов керамической плитки по однотипности операций, необходимых для их обнаружения, и провести эффективное объединение полученных частных алгоритмов в комплексный алгоритм контроля плитки на конвейере в реальном времени.

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

1. Провести анализ производственного процесса с целью выявления возможных дефектов керамической плитки, разработать их классификацию и сформировать требования к системе диагностики.

2. Проанализировать существующие методы обнаружения и идентификации дефектов с точки зрения оценки степени удовлетворения современным требованиям.

3. Разработать комплексный алгоритм и соответствующее программное обеспечение для обнаружения и идентификации дефектов керамической плитки, а также провести экспериментальное исследование разработанных алгоритмов и программ.

4. На основе экспериментального исследования предложить методику оценки защитных свойств плитки от гамма-излучения.

Объектом являются алгоритмы обработки и анализа оптической информации при контроле и диагностике дефектов керамической плитки на основе технического зрения.

Предметом исследования являются методы обнаружения дефектов керамической плитки в процессе производства на основе технического зрения.

Научная новизна:

1. Разработана методика обнаружения поверхностных дефектов монохроматической керамической плитки на основе обработки изображений, получаемых системой технического зрения, не требующая предъявления эталонных плиток.

2. Разработан реализующий предложенную методику комплексный алгоритм и соответствующее программное обеспечение, имеющие блочную структуру, с возможностью изменения состава в зависимости от конкретных условий, что позволяет расширить виды выявляемых дефектов.

3. Предложен метод контроля в реальном времени дефектов на лицевой поверхности керамических плиток (трещин, царапин, пятен, микропор и т.п.), отличающийся тем, что не предъявляет жестких требований к освещению объекта контроля и работает с малоконтрастными изображениями.

4. Предложен метод и алгоритм контроля в реальном времени тональных дефектов однотонных керамических плиток и возможного

изменения оттенков плиток при формировании партий, отличающийся тем, что для обеспечения устойчивой работы использует параметры гистограмм в качестве показателей, характеризующих дефекты цвета, с переходом в цветовые системы координат HSV и CIElab.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности:

1 Методика обнаружения поверхностных дефектов монокроматической керамической плитки, не требующая предъявления эталонных плиток (п.1 паспорт 2.2.8. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды).

2 Методика комплексирования частных алгоритмов обнаружения и идентификации разных типов дефектов керамической плитки, отличающаяся максимальным использованием результатов одинаковых промежуточных операций без их повторения, что позволило существенно уменьшить время обработки и обеспечить возможность работы в реальном времени (п.6 паспорт 2.2.8. Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии).

3 Алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее адаптацию к конкретным условиям контроля керамической плитки (п.4 паспорт 2.2.8. Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды).

Теоретическая и практическая значимость:

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке архитектуры и алгоритмического обеспечения системы диагностики дефектов при промежуточном и выпускном контроле монокромной керамической плитки в реальном времени, не требующих предъявления эталонной плитки.

Практическая значимость результатов исследования заключается в:

1. Разработке методик и алгоритмов контроля механических и цветовых дефектов лицевой поверхности монокромной керамической плитки с 97% правильных обнаружений.

2. Разработке алгоритмов контроля плитки на конвейере в реальном времени (в частности, для наиболее распространенного размера плитки 150x150мм и 200x200мм время контроля составляет 30-50мс при наличии направляющих на конвейере, 50-90 мс – при их отсутствии).

3. Разработке методики контроля защитных свойств плитки от гамма-излучения.

4. Разработанное программное обеспечение, реализующее предложенный комплексный алгоритм выявления поверхностных дефектов монокромной керамической плитки, может быть применено для тех же целей в других производствах, например, в кожевенном производстве.

5. Результаты работы внедрены в деятельность АО «Нефрит-керамика» (акт внедрения от 24.01.2024) и НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (акт внедрения от 24.01.2024).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы цифровой обработки оптических изображений, цифровой обработки сигналов и имитационного моделирования, а также открытая библиотека алгоритмических примитивов OpenCV.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение достоверности выявления дефектов однотонных керамических плиток различной природы, достигается применением комплексного алгоритма и программного обеспечения,

обеспечивающих эффективный контроль плиток на конвейере в реальном времени, не требующих наличия эталонных плиток, и дающих до 97% правильных обнаружений.

2. Измерение основных параметров ослабления излучения керамической плиткой с достаточной точностью измерений в 3-5% при различной мощности источников гамма-излучения в зависимости от расстояния плитка-детектор время экспозиции может быть снижено до 10 минут.

Достоверность полученных результатов в определенной степени обусловлены значительным количеством экспериментального материала, сопоставлением полученных результатов с ранее опубликованными данными, а также результатами математического моделирования.

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

1. IV Международной научно-практической конференции «Энергетика и автоматизация в современном обществе». Санкт-Петербург, 21 мая 2021 г.

2. IV Международной научной конференции по проблемам управления в технических системах CTS'21. Санкт-Петербург, 21-23 сентября 2021 г.

3. XII научной конференции «Традиции и Инновации», посвященной 193-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). Санкт-Петербург, 1-3 декабря 2021

4. XIII научной конференции «Традиции и Инновации», посвященной 194-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). Санкт-Петербург, 30 ноября-2 декабря 2022 г. (2 доклада).

Личный вклад автора состоит в анализе процессов производства керамической плитки с целью определения вида и возможных источников дефектов, в разработке алгоритмов и программы их выявления и идентификации в реальном времени, а также апробации достигнутых результатов и подготовке публикаций.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 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), в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 152 страницы машинописного текста, 53 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 144 наименований и 2 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава диссертационной работы содержит описание процесса производства монокромной керамической плитки, а также описания основных дефектов плитки с привязкой их к возможным местам возникновения в технологической схеме производства.

Во второй главе приведены результаты аналитического обзора состояния предметной области, проанализированы методы обнаружения различных видов дефектов керамической плитки на основе технического зрения. Выявлено, что разная природа дефектов и их проявлений не дает возможности создания одного алгоритма для их обнаружения и идентификации. Проведенный анализ дал возможность условно классифицировать дефекты плитки, объединив их в классы по однотипности требуемых для их обнаружения и идентификации операций.

Формулируются требования к системе диагностики, цель исследования и задачи, которые нужно решить для достижения этой цели. Учитывая, что алгоритмы обработки изображений содержат типовые элементарные операции обработки (алгоритмические примитивы), 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 дефектов однотонных

керамических плиток различной природы. Приводится анализ предлагаемых методов обнаружения дефектов керамической плитки, удовлетворяющих сформированным требованиям к алгоритмам обработки.

В четвертой главе оценивалась эффективность использования керамической плитки для защиты от ионизирующего излучения. При контроле свойств керамической плитки в части защиты от ионизирующего излучения в качестве показателя ее защитных свойств чаще всего применяется линейный (реже, массовый) коэффициент ослабления излучения, а также значения HVL (half-value layer - слой половинного ослабления, обеспечивающий половинное ослабление мощности исходного излучения от первоначальной величины).

В заключении отражены обобщенные выводы по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Повышение достоверности выявления дефектов однотонных керамических плиток различной природы, достигается применением комплексного алгоритма и программного обеспечения, обеспечивающих эффективный контроль плиток на конвейере в реальном времени, не требующих наличия эталонных плиток, и дающих до 97% правильных обнаружений.

Укрупненная структура предлагаемого комплексного алгоритма контроля керамической плитки (рисунок 1). Алгоритм состоит из трех модулей.

Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты. Для освещения рабочей зоны предложено использовать светодиодные источники с нейтральным или холодным белым светом, диаметром 5 мм с интенсивностью света 3,4 кд. При установке их необходимо расположить их на двух панелях или по четырем сторонам над наблюдаемой плиткой, а не непосредственно над нею. Светодиоды размещаются на уровне камеры, чтобы избежать теней и/или отражений.

Камера для уверенной работы должна иметь не менее 4MP, при этом высота подвеса камеры над конвейерной лентой с плитками должна выбираться согласно величине минимально допустимого дефекта.

После предварительной обработки изображения и перехода в оттенки серого выполняется комплекс операций первого модуля по выявлению механических дефектов на гранях и уголках плитки. Плитка, у которой такие дефекты обнаруживаются, бракуется и выталкивается с конвейера.

Операции второго модуля проводят контроль на предмет выявления дефектов на лицевой поверхности плитки (это в основном дефекты механического происхождения) и далее (третий модуль) контролируются возможные цветные дефекты.

Все эти операции выполняются над однотонными плоскими керамическими плитками в реальном времени без необходимости предъявления эталонных плиток. Ниже эти операции будут рассмотрены подробнее.

Обнаружение дефектов плитки начинается с формирования ее маски (рисунок 2). Для увеличения скорости и эффективности обработки изображение переводится в полутоновое монохромное (оттенки серого). Для удаления шума используется медианный фильтр, а для формирования маски применена пороговая обработка с глобальным порогом Отсу. В результате получается изображение маски плитки, заполненное белыми пикселями. При этом возможны две ситуации:

А) Если на конвейере, например, с помощью соответствующих направляющих фиксируется положение плитки, то строится прямоугольник вокруг объекта, не учитывая возможные небольшие отклонения положения плитки относительно осей, что значительно ускорит работу.

Б) Если положение плитки на конвейере не фиксируется и отклонения положения плитки могут быть большие, то используется соответствующая функция, которая возвращает в числе прочих параметров угол необходимого поворота контура. Вращение изображения выполняется в три этапа. Сначала определяется центр вращения, затем строится матрица 2D-вращения и затем на

основании этой матрицы производится аффинное преобразование (рисунок 3). После выполнения вращения алгоритм формирует маску плитки.

Обнаружение угловых дефектов и дефектов на гранях плитки производится с помощью функции `cv2.BoundingRect()`. При этом из всего изображения выделяется область, занимаемая собственно плиткой (рисунок 3), в результате вокруг маски образуется идеальный контур и дефекты (сколы) на углах и гранях определяются простым подсчетом числа черных пикселей и сравнением их числа с некоторым пороговым значением γ , которое, зависит от сортности плитки.

Для обнаружения дефектов на лицевой поверхности плитки алгоритм опять возвращается к монохромному («в оттенках серого») изображению и, если необходимо, производит вращение (рисунок 4).

Низкоконтрастные изображения могут возникнуть в нашем случае из-за небольшой разности в контрасте между дефектом и тоном поверхности плитки. Для увеличения контраста используется эквализация гистограммы. При этом удобно использовать простой метод, основанный на преобразовании исходного изображения (1):

$$\begin{cases} y_{max} = \alpha x_{max} + \beta \\ y_{min} = \alpha x_{min} + \beta \end{cases} \quad (1)$$

где y_{max} и y_{min} — максимальное и минимальное значения интенсивности преобразованного изображения; x_{max} и x_{min} — максимальное и минимальное значения интенсивности пикселей исходного изображения; α и β — коэффициенты.

Для выделения дефектов применена адаптивная бинаризация с использованием вычисления локальных порогов по средневзвешенному значению интенсивностей соседних пикселей. При этом, т.к. координаты изображения собственно плитки уже известны, то бинаризация производится только на нем.

Для определения дефектная плитка или нет алгоритм подсчитывает среднеквадратичное отклонение СКО и сравнивает с порогом γ (2):

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{(i,j)} - K_{(i,j)})^2} \geq \gamma, \quad (2)$$

где M, N - количество пикселей в строке и столбце соответственно, а $I_{(i,j)}, K_{(i,j)}$ - интенсивности пикселей маски и обработанного изображения соответственно. Значение порога γ определяется требованиями к качеству плитки.

Обнаружению дефектов цвета плитки начинается с контроля однородности ее цвета. В работе выбрана цветовая модель HSV. В качестве показателей, характеризующих цветовые дефекты, предложено использовать гистограммы из-за их инвариантности к перемещениям и поворотам, а также нечувствительности к точности пространственного распределения цветовых пикселей. В качестве классификатора предложено использовать их корреляцию.

Блок-схема алгоритма, реализующего предлагаемый метод контроля цветовых различий однородности и равномерности интенсивности цвета плитки, приведена на рисунке 5а. Изображение плитки делится на несколько частей, количество которых определяется размерами плитки и качеством покрытия. Т.к. задача данного этапа контроля выявить небольшие по интенсивности и оттенку, но значительные по площади отклонения в равномерности распределения цвета по поверхности плитки, то оказалось, что для плиток с размерами стороны до 20см достаточно 4 участков (квадрантов, зон). Для каждого из выделенных участков строятся гистограммы и определяется их близость расчетом корреляционной зависимости.

Если обозначить количество событий в I -й ячейке (бине) первой гистограммы через $H_1(I)$, а количество событий в аналогичном бине второй гистограммы через $H_2(I)$, то коэффициент корреляции $d(H_1, H_2)$ между гистограммами будет (3):

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)(H_2(I) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)^2 \sum_I (H_2(I) - \bar{H}_2)^2}} \geq \gamma_3, \quad (3)$$

где $\bar{H}_1(I)$ среднее значение $H_1(I)$ и $\bar{H}_2(I)$ среднее значение $H_2(I)$, γ_3 - пороговое значение. Если $d(H_1, H_2) = 1$, то это свидетельствует фактически о равенстве гистограмм; если $d(H_1, H_2) = 0$ - гистограммы существенно различаются. Выполнение приведенного неравенства свидетельствует о неравномерности распределения цвета на поверхности плитки.

В процессе производства плитки используются элементы из натуральной глины, они обжигаются при очень высокой температуре и, в зависимости от материалов и условий, могут вызывать небольшие изменения цвета от партии к партии. Поэтому различие в оттенках или цвете между плитками возможно и, хотя это не дефект, но такие плитки не могут быть помещены в одну упаковку.

На рисунке 5б приведена блок-схема метода определения цветовых различий между плитками на конвейере (цветовых различий цветов двух плиток), поступающими на упаковку. Исходные изображения из модели цвета RGB конвертируются в модель цвета CIE Lab, которая более точно соответствует восприятию цвета человеком и может быть использована для характеристики и сравнения цветов на основе их визуальных различий и в ней вводится количественный показатель различия цветовых оттенков ΔE_{CMC} (ГОСТ 27180-2019) (4):

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}, \quad (4)$$

где $\Delta L = L_1 - L_2$; $\Delta C = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} - \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$; $\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2}$; индексы 1,2 относятся к сравниваемым изображениям; S_L, S_C, S_H – корректирующие факторы. При этом, если значения ΔE_{CMC} находятся в диапазоне:

$\Delta E_{CMC} \leq 1,0$, то различие в цветах не воспринимается человеческим зрением;

- при $1 \leq \Delta E_{CMC} \leq 2$ – различие в цвете становится заметным только при внимательном наблюдении;
- при $2 \leq \Delta E_{CMC} \leq 10$ – различия заметны с первого взгляда, а при больших значениях можно с уверенностью говорить о серьезных различиях.

Изображение следующей плитки на конвейере сравнивается с изображением предыдущей, принятой за эталон, и рассчитывается ΔE_{CMC} . Первая плитка считается эталоном до того момента, пока цвет следующей плитки не совпадет с ее цветом ($\Delta E_{CMC} \geq \gamma$), тогда эта плитка становится вторым эталоном и формируется другая партия. Далее сравнение идет уже с двумя плитками.

Экспериментальное исследование комплексного алгоритма контроля дефектов однотонных керамических плиток проводилось на однотонных плитках размером 150x150мм и 200x200мм. Для исследования были частично использованы плитки с реальными дефектами, частично дефекты были симитированы, причем разные варианты однотипных дефектов отличались размерами и формой.

Эксперимент показал, что сколы на уголках и выщерблены на гранях плитки размерами уже от 0,7мм² обнаруживаются алгоритмом, независимо от положения плитки на конвейере.

Следующим этапом контроля плитки был контроль на наличие дефектов на лицевой поверхности плитки. Чтобы снизить требования к равномерности освещения плитки в алгоритме использовалась адаптивная бинаризация с локальными порогами. В результате эксперимента уверенно определялись (100%) пятна и блобы (сгустки глазури), как и наколы и мушки в предположении их примерно круглой формы, с R=0,6-0,7мм; при уменьшении радиуса до 0,5мм число правильных обнаружений снижалось до 50-70% (что допустимо, т.к. с расстояния 1м, а это требование ГОСТа, эти дефекты просто не видны).

Что касается трещин и царапин, то требования к их обнаружению с допустимыми по ГОСТу значениями параметров, алгоритмом выполняются уверенно со стопроцентным результатом. Однако очень длинные трещины, пересекающие все поле изображения плитки, этим блоком алгоритма не обнаруживаются. Объясняется это тем, что алгоритм при определении контура плитки на изображении принимает контур, ограниченный трещиной, за максимальный, а потому считает трещину естественной гранью плитки. На практике эти плитки будут отбракованы после работы еще первого блока алгоритма, при выделении контура плитки и проверке размеров граней.

Для контроля однородности и равномерности распределения цвета на поверхности однотонной плитки изображение плитки разделялось на 4 квадранта, для каждого строились 2D-гистограммы и определялась их близость расчетом коэффициентов корреляции

$d(H_1, H_2)$. Алгоритм подтвердил свою работоспособность, обеспечив уверенное определение неравномерности и однородности цвета в 100% экспериментов. При этом анализ данных показал, что при значениях $d(H_1, H_2) \geq 0,7-0,8$ различить неравномерности цвета поверхности плиток невооруженным глазом не удаётся.

Определение количественной характеристики различия цвета разных плиток ΔE_{CMC} имеет значительную вычислительную сложность, что затрудняет работу в реальном времени. Однако, учитывая, что цветовые различия между плитками определяются после определения однородности и равномерности цвета их поверхности, сравнение можно производить не попиксельно, а через каждые N пикселей. Экспериментально было установлено, что при $N \leq 100$ различия в цвете плиток, соответствующие пороговым значениям алгоритма, визуально не определялись. Поэтому было решено принять $N=50$. Это обеспечило высокую скорость и не привело к ухудшению качества работы алгоритма.

Методы обнаружения были протестированы на плитках разного цвета с теми же результатами.

Робастность алгоритма к неблагоприятным условиям освещения проверялась при нормальном равномерном освещении (300лк) и неравномерном освещении с перепадами 50лк. Анализ результатов показал, что освещенность влияет в основном на качество определения мелких дефектов (наколов, мушек), и может снизить эффективность их обнаружения на 15 - 30%, общая эффективность работы комплексного алгоритма была оценена в 97%

Время, затрачиваемое на обработку изображения, естественно, зависело от используемого процессора, размера плитки и наличия или отсутствия необходимости вращения изображения плитки и составляло для плиток размером 150x150мм и 200x200мм 30 - 50мс при наличии направляющих на конвейере и 50-90мс при их отсутствии. Время, необходимое для контроля однородности и равномерности распределения цвета плитки и время на определение цветовых различий между плитками при сортировке на стадии упаковки составило в среднем около 15мс. Это позволяет использовать предлагаемый алгоритм в реальном времени.

2. Измерение основных параметров ослабления излучения керамической плиткой с достаточной точностью измерений в 3-5% при различной мощности источников гамма-излучения в зависимости от расстояния плитка-детектор время экспозиции может быть снижено до 10 минут.

При контроле свойств керамической плитки в части защиты от ионизирующего излучения в качестве показателя ее защитных свойств чаще всего применяется линейный (реже, массовый) коэффициент ослабления излучения, а также значения HVL (half-value layer - слой половинного ослабления, обеспечивающий половинное ослабление мощности исходного излучения).

Для исследования радиационно-защитных свойств использовался детектор из высокочистого германия, который имеет более высокую точность разделения энергетического спектра при высоких энергиях (рисунок 6).

Т.к. химический состав и геометрические размеры в партии выпускаемых плиток не меняются, то радиационный контроль можно проводить не индивидуально для каждой плитки, а контролируя несколько образцов из партии в режиме офф-лайн.

В эксперименте была оценена и изучена возможность контроля защитных свойств плиток на установке рис.6. Были отобраны образцы плиток, популярных на рынке Ирака, различающихся по составу материала, цвету, толщине и плотности. Предварительно был откалиброван детектор из германия высокой чистоты (HPGe), помещенный в среду с низким фоном внутри защитного щита, это помогает повысить отношение сигнал-шум детектора и уменьшить влияние фонового излучения.

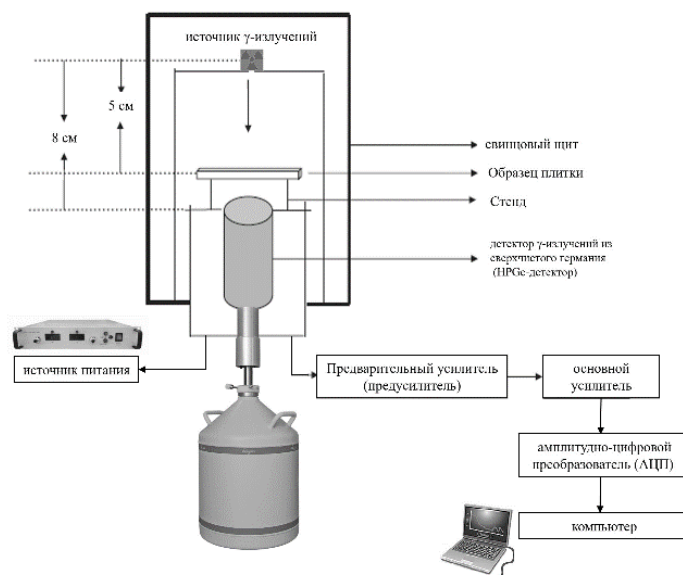


Рисунок 6 – Структура системы контроля и измерения радиационной защиты керамической плитки

Оценка естественного излучения плитки оказалась в пределах референтного уровня, рекомендованного в Руководстве по безопасности Protection of the Public Against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation (Серия норм безопасности МАГАТЭ - Специальные руководства по безопасности // Атомная энергия № SSG-32, 2015 г.).

Для измерения линейного и массового коэффициента ослабления излучения, а также величины слоя половинного ослабления и эффективности радиационной защиты использовались источники гамма-излучения с известным энергетическим спектром с изотопами Am241, Cs137 и Co160.

Определение оптимального расположения тестируемой плитки относительно детектора показало, что вследствие непараллельности пучка при приближении плитки к источнику и, таким образом, некоторого увеличения мощности пучка за счет

меньшего рассеяния, значения измеренных коэффициентов несколько уменьшаются. Учитывая, что для целей контроля обычно достаточно точности 3-5%, на основании эксперимента можно рекомендовать работу без дополнительной сетки при достаточно широком диапазоне расстояний плитка-детектор от 3 до 10см (рисунок 7).

Анализ результатов показал, что при измерениях как линейного, так и массового коэффициента ослабления, не требующих очень высокой точности, время экспозиции может быть снижено до 10 минут.

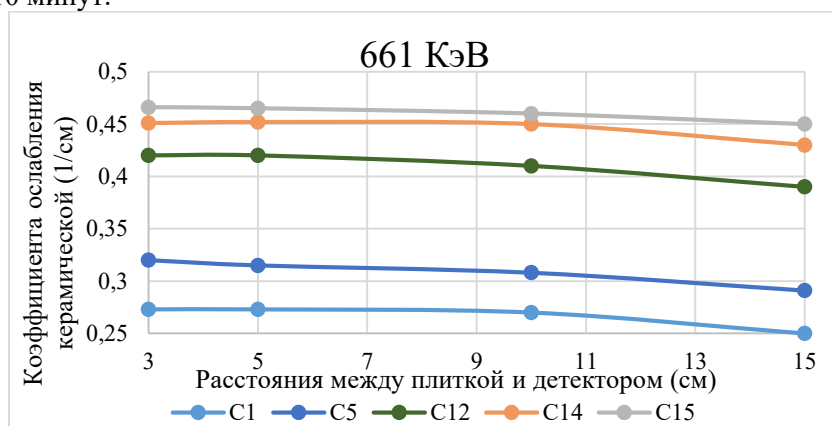


Рисунок 7 – Результаты измерения коэффициента ослабления при разных расстояниях между плиткой и детектором.

Эксперимент также показал, что имеющиеся в широкой продаже керамические плитки обычной толщины обеспечивают значительную степень защиты (60%) населения от низкоэнергетических гамма- и, соответственно, рентгеновских лучей и, к сожалению, существенно меньшую защиту (20%) при энергии 1332кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Предложен комплексный алгоритм для автоматического обнаружения дефектов однотонной керамической плитки таких, как

сколы на уголках, выщерблины на гранях, царапины и пятна на лицевой поверхности, неоднородности цвета плитки. Алгоритм работает на основе технического зрения в реальном времени и обеспечивает до 97% правильных обнаружений.

2. Особенностью применённых методик контроля является отсутствие необходимости в наличии эталонных плиток. При этом контролируемые плитки находятся на конвейере. Общее время цикла контроля, естественно, зависит от размера плитки и составляет, например, для распространённых размеров плиток 150x150мм и 200x200мм 45–65мс при наличии направляющих на конвейере и 50–90мс при их наличии.

3. Предложен способ определения одинаковости тона разных плиток для формирования упаковочных партий, на основе вычисления показателя цветовой разности ΔE_{cmc} , определяемого с использованием системы цветовых координат CIE Lab. В этом случае первая плитка очередной партии считается эталоном и, если цвет одной из последующих плиток не совпадет с первым эталоном, то далее та плитка становится вторым эталоном.

4. Были экспериментально измерены параметры, характеризующие защитные свойства керамических плиток, популярных в Ираке. При этом, т.к. для целей контроля обычно достаточно погрешности 3-5%, то при измерениях массового коэффициента ослабления оказалась возможной работа без дополнительной сетки для формирования параллельного пучка при достаточно широком диапазоне расстояний плитка-детектор (от 3 до 10см) и снижении времени экспозиции до 10 минут. Также показано, что имеющиеся в широкой продаже керамические плитки обычной толщины обеспечивают значительную степень защиты (60%) населения от низкоэнергетических гамма- и, соответственно, рентгеновских лучей и, к сожалению, существенно меньшую защиту (20%) при высоких энергиях излучения.

5. Алгоритм, реализующий предлагаемую технологию контроля, имеет модульную структуру, что позволяет легко настраивать его в конкретных условиях производства. Программа (регистрационный номер 2023681782) написана на языке Python 3.7 с

использованием библиотеки алгоритмов OpenCV с привлечением других библиотек, которые применяются для анализа 2D-изображений.

6. Таким образом, разработаны методика и комплексный алгоритм по обнаружению дефектов однотонной керамической плитки в реальном времени. Однако на рынке керамических плиток существенный процент приходится на разноцветные плитки и плитки с рисунком. Разработка методик и алгоритмов контроля для обнаружения дефектов таких плиток является, таким образом, важной пока еще нерешенной проблемой, решение которой – предмет будущих работ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Кадим, М.Х.** Автоматическое обнаружение поверхностных дефектов керамической плитки / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 7. – С. 50-55.

2. **Кадим, М.Х.** Автоматизация контроля керамической плитки на наличие угловых дефектов и дефектов на гранях / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022. – № 4. – С.3-7.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **Kadhim, M.H.** Automation of the Control of Ceramic Tiles Surface Defects / M.H Kadhim, L.A.Rusinov // 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – Saint Petersburg, Russian Federation. – 2021. – PP. 68-71. – DOI: 10.1109/CTS53513.2021.9562801

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681782 Российская Федерация. Обнаружение дефектов на поверхности однотонной керамической плитки: заявлено 09.10.2023: опубликовано 18.10.2023 / Русинов Л. А., Кадим М. Х./ Бюл. № 10. – 1 с. : ил.

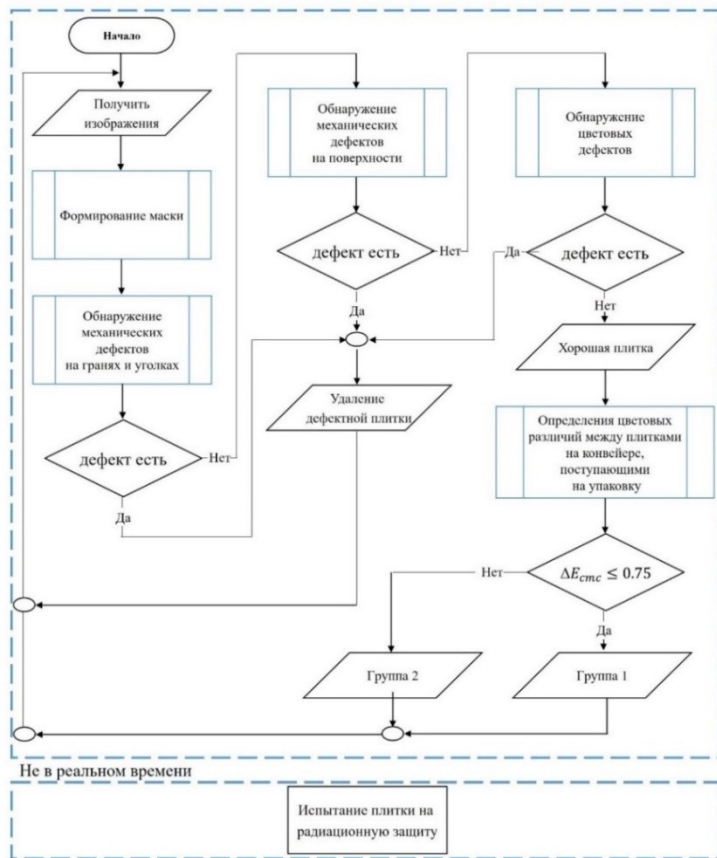


Рисунок 1 – Укрупненная блок-схема предлагаемого комплексного алгоритма контроля



Рисунок 2 – Формирование маски

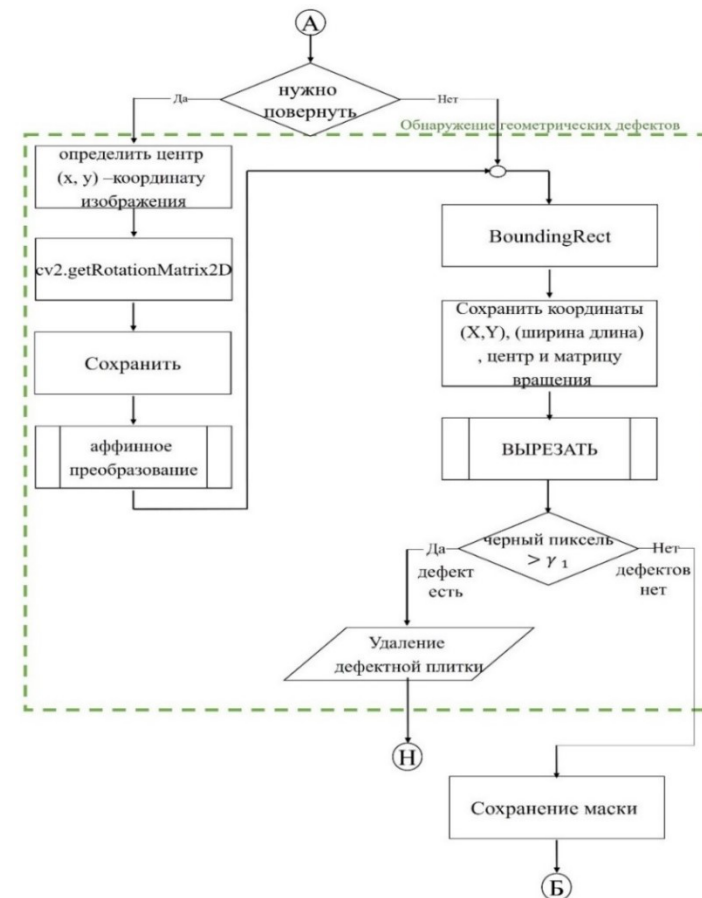


Рисунок 3 – Обнаружение механических дефектов на гранях и уголках плитки

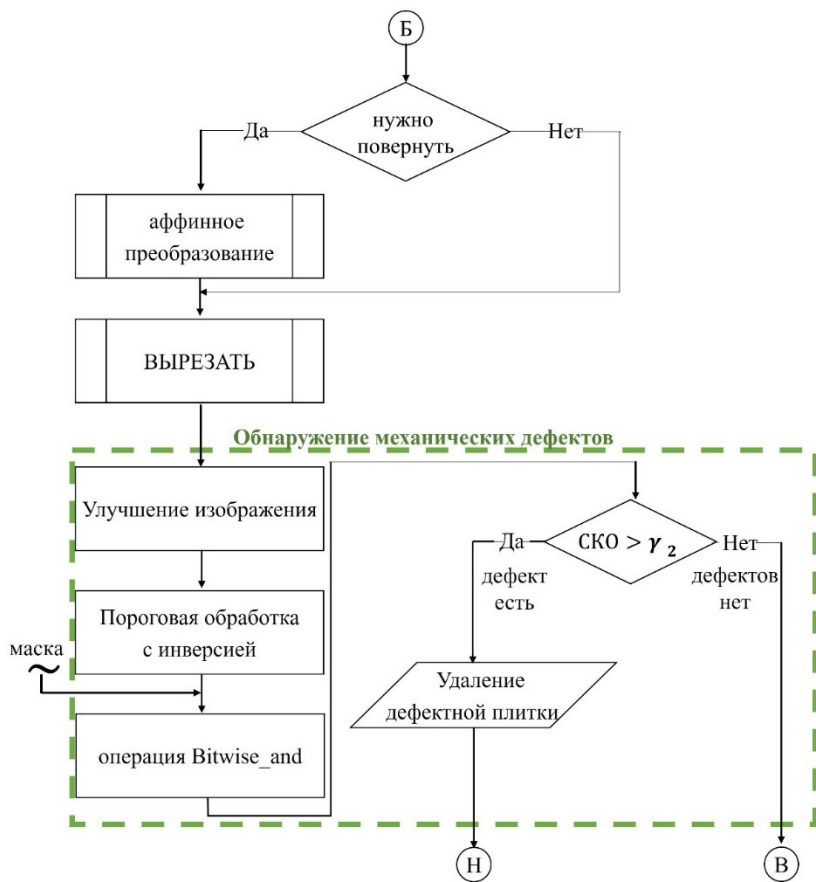


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма обнаружения поверхностных дефектов плитки

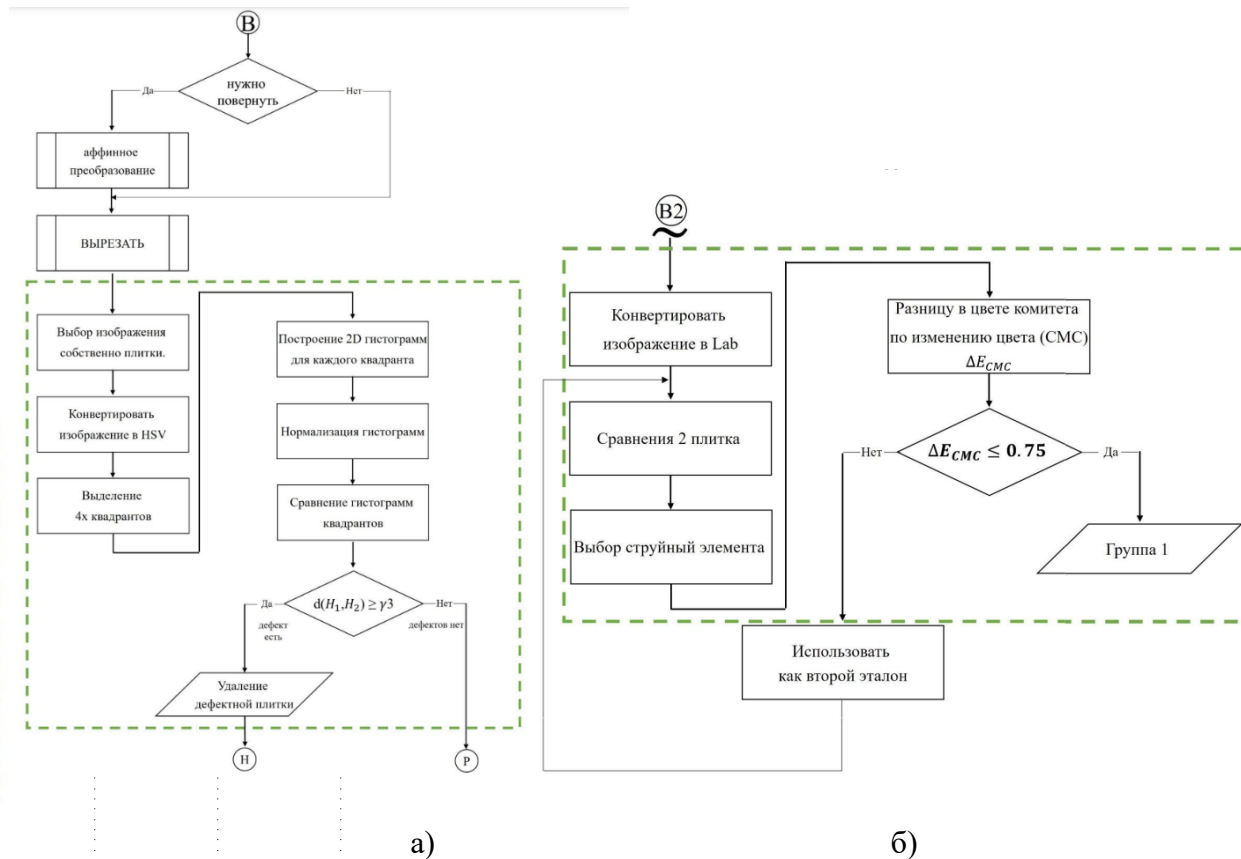


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма контроля: а) цветовых различий однородности и равномерности интенсивности цвета плитки; б) цветовых различий цветов двух плиток