

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Русинов Л.А.

Санкт-Петербург –2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ	12
1.1 Основные свойства керамической плитки	12
1.1.1 Объёмы выпуска керамической плитки.....	12
1.1.2 Основные свойства керамической плитки	14
1.2 Технология производства керамической плитки.....	15
1.2.1 Хранение и подготовка сырья.....	15
1.2.2 Формирование или формование плитки методом сухого прессования или путем экструзии.....	18
1.2.3 Сушка, глазуровка и декорирование плитки.....	19
1.2.4 Печной обжиг	20
1.2.5 Классификация и упаковка	21
1.3 Виды дефектов и анализ причин их появления при производстве керамической плитки	22
1.4 Выводы по главе 1	36
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	37
2.1 Обнаружение дефектов механического происхождения на кромках и углах однотонной керамической плитки.....	37
2.2 Методы обнаружения дефектов механического происхождения на поверхности однотонной керамической плитки.....	44
2.3 Методы обнаружения цветовых дефектов поверхности однотонной керамической плитки	57
2.4 Защитные свойства образцов плитки	64
2.5 Выводы по главе 2. Постановка задачи исследования.....	67
ГЛАВА 3 ПРЕДЛАГАЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ.....	70

3.1	Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты.....	70
3.2	Укрупненная структура предлагаемого алгоритма контроля керамической плитки.....	72
3.3	Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты	74
3.4	Построение маски плитки	76
3.5	Обнаружение угловых дефектов и дефектов на гранях плитки.....	80
3.6	Обнаружение дефектов механического происхождения на лицевой поверхности плитки.....	81
3.7	Обнаружение дефектов цвета плитки.....	85
3.7.1	Контроль однородности цвета плитки.....	85
3.7.2	Сравнение цветов разных плиток.....	89
3.8	Оценка эффективности использования керамической плитки для защиты от ионизирующего излучения.....	91
3.9	Выводы по главе 3.....	94
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ		96
4.1	Обнаружение дефектов плитки на гранях и уголках	99
4.2	Обнаружение механических дефектов на лицевой поверхности плитки.....	103
4.3	Обнаружение цветовых дефектов плитки	114
4.3.1	Контроль однородности и равномерности цвета плитки.....	114
4.3.2	Сравнение цветов разных плиток.....	117
4.4	Оценка затрат времени на работу алгоритма обнаружения дефектов керамической плитки	119
4.5	Определение эффективности использования керамической плитки для защиты от ионизирующего излучения.....	120
4.6	Выводы по главе 4.....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		135

ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты внедрения.....	151

ВВЕДЕНИЕ

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 высокой 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., Elbehierу 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 исследования 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 работы:

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 монохроматической 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 работы

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке архитектуры и алгоритмического обеспечения системы диагностики дефектов при промежуточном и выпускном контроле монохромной 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 монохромной керамической плитки с 97% правильных обнаружений;
2. разработке алгоритмов контроля плитки на конвейере в реальном времени (в частности, для одного из распространенных размеров плитки 150x150мм и 200x200мм время контроля составляет 30-50мс при наличии направляющих на конвейере, 50-90 мс – при их отсутствии);
3. разработана методика контроля защитных свойств плитки от гамма-излучения;
4. разработанное программное обеспечение, реализующее предложенный комплексный алгоритм выявления поверхностных дефектов монохромной 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) (Приложение Б).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы цифровой обработки оптических изображений, цифровой обработки сигналов и математического 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 2022г. (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 (пункты списка литературы № 21-28, 30, 104), 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, в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 54) (Приложение А).

Структура и объем диссертации. 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.

ГЛАВА 1 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ

1.1 Основные свойства керамической плитки

Потребность в строительных материалах в настоящее время сохраняется на высоком уровне. В число материалов, которые пользуются стабильно высоким спросом, входит керамическая плитка. Производство плитки относится к мелкозернистой технологии. По назначению плитку делят на напольную и облицовочную для наружной облицовки зданий и сооружений и внутренней облицовки стен помещений. Напольная плитка бывает разных конфигураций и размеров, а ее поверхности могут быть гладкими, рифлеными, декоративными, глазурованными. Плитка бывает разных цветов – монохромная и разноцветная, под мрамор, под гранит и т.п. [16].

1.1.1 Объёмы выпуска керамической плитки

Керамическая плитка остаётся одним из наиболее распространенных в настоящее время облицовочных материалов и находит свое применение там, где необходимо соблюдение гигиены, надежная защита стен или полов от регулярного воздействия влаги. Поэтому объемы ее выпуска практически повсеместно в мире поистине огромны.

Объем рынка керамической плитки в России, например, в 2019 году составил 70,2 млрд. руб. в стоимостном и 200,1 млн. кв. метров в натуральном выражении. Основной объем приходился на отечественную продукцию, доля которой составила 77,2%. Хотя объем экспорта был относительно невелик, но его география охватывает множество стран – ближнее зарубежье, Северную и Южную Америку, Евросоюз [59]. В целом, в объеме реализуемого в стране продукта за 2019-2021 гг., большая часть приходилась на российских производителей (80%) [51]. Среднегодовой прирост производства керамических плиток на протяжении периода 2017-2022 гг. составил 3.1% [35].

Следует также отметить, что все производственные предприятия керамической плитки в России относятся к категории I, что означает, что они считаются высокоопасными и должны получать интегрированные экологические

разрешения и соответствовать технологическим стандартам, основанным на лучших доступных технологиях [196].

Рынок керамогранита и керамической плитки в настоящее время является консолидированным, более половины (53% рынка) принадлежит таким крупным участникам, как ГК «Юнитайл», ООО «Керама Марацци», ГК «Эстима», ООО «Квадро Декор», ООО «Церсанит Трейд», ООО «ЗКС» [51].

В Ираке керамическая промышленность является отраслью, которая в значительной степени определяет развитие строительного сектора. На иракском рынке доступны большие количества керамической продукции различных типов и спецификаций, и спрос на эти продукты в последние годы увеличивается из-за реконструкционных работ и высоких уровней дохода на душу населения.

Статистика показывает, что существует явный дефицит в производстве керамических материалов, чтобы удовлетворить растущий внутренний спрос на три вида продукции: сантехнику, настенные плитки и напольные покрытия. В 2013 году внутренний спрос на сантехнику составил 16 357 тонн, в то время как внутренний спрос на настенные плитки и напольные покрытия составил соответственно 11546160 квадратных метров и 15394880 квадратных метров. Однако доступные производственные мощности трех заводов покрывают лишь 27,5%, 10,5% и 6,5% от этих требований соответственно.

Доступность сырья и квалифицированных кадров в Ираке, а также наличие трех керамических заводов, принадлежащих Генеральной компании по стеклу и керамике в Рамади провинции Анбар в дополнение к другим небольшим заводам, разбросанным по всему Ираку, свидетельствуют о необходимости начинать новые керамические проекты, которые могут компенсировать нехватку для удовлетворения спроса на керамическую продукцию, т.к. по некоторым данным к 2023 году процент производства на трех заводах составит 9,21% от спроса на сантехнику, 8,4% на настенные плитки и 5,2% на напольные покрытия.

Россия запустила проект реконструкции и модернизации крупного стекольно-керамического завода в иракском городе Рамади с помощью российского промышленного консорциума в интересах министерства

промышленности и минеральных ресурсов Ирака. Ожидается, что после запуска завода он станет крупнейшим работодателем в Ramadi и создаст более тысячи новых рабочих мест [48,49,50].

1.1.2 Основные свойства керамической плитки

Свои позиции на рынке стройматериалов плитка сохраняет даже несмотря на то, что технологии развиваются довольно-таки высокими темпами, и постоянно появляется множество других современных способов облицовки поверхностей. Происходит это потому, что керамическая плитка отличается следующими важными свойствами [58].

Универсальность. Керамическую плитку возможно использовать на различных объектах – бассейны, ванные комнаты, напольные покрытия, фасады зданий, стены.

Технологичность. При укладке плитка создает максимально ровную и цельную поверхность.

Гигиенические свойства. Керамика легко моется, не пропускает пары и газы, выдерживает санитарную обработку даже агрессивными химическими средствами.

Долговечность. Керамика отличается высокой устойчивостью к внешним факторам среды и может использоваться в помещениях с высокой проходимостью людей, движением техники и другими механическими воздействиями. Именно поэтому плитка практически незаменима для отделки различных производственных, складских и хозяйственных помещений.

Физико-химические показатели. Керамическая плитка морозостойка и может даже при намокании выдерживать частые оттаивания и замораживания без потери свойств, не допуская, например, растрескивания и отслаивания глазури, расслаивания основы. Морозостойкость плитки зависит от коэффициента водопоглощения – чем он ниже, тем выше показатель морозостойкости. Керамогранит, к примеру, обладает коэффициентом водопоглощения практически равным нулю, а значит может применяться для внешней отделки при любых температурах [18]. Также плитка достаточно хорошо проводит тепло и может

применяться для облицовки каминов, печей, стен жилых помещений – керамика быстро набирает температуру того помещения, где в данный момент находится.

Радиационно-защитные свойства керамической плитки. Исследования показывают, что керамика может быть использована в качестве защиты от радиации в различных областях, таких как промышленность, медицина, приюты, лаборатории и университеты, когда требуется защита от излучения. Некоторые исследования показывают, что керамика может быть эффективным щитом от гамма-лучей и рентгеновских лучей. Кроме того, глазурированная керамика оказалась более эффективной в защите от радиации, чем неглазурированная. Также некоторые компоненты придают керамике больше свойств радиационной защиты, например, введение бора дает защиту от нейтронов [117,76,103,141].

Экологичность. Керамическая плитка не токсична и пожаробезопасна. Также керамика не пропускает электрически ток и не накапливает статическое напряжение.

1.2 Технология производства керамической плитки

Производство керамической плитки для стен и полов включает в себя множество различных процессов в зависимости от разновидности готового продукта. Процесс можно представить в виде последовательных стадий (рисунок.1.1) [92,129,127]:

- хранение сырья и подготовка глины либо сухим помолом, либо мокрым помолом и распылением;
- формирование плитки методом сухого прессования или путем экструзии;
- приготовление глазури;
- сушка, глазуровка и декорирование плитки;
- печной обжиг;
- сортировка и упаковка.

1.2.1 Хранение и подготовка сырья

Используемое сырье может быть пластичным сырьем, таким как глина и каолин, или непластичным, таким как кварц, полевои шпат, шамот, карбонат

кальция (кальцит) и доломит [61]. Непластичное сырье используется из-за различных его функций в составе массы – к примеру, полевой шпат действует как агент плавления, а кальцит используется из-за свойства образовывать кристаллические фазы. Он также используется в остеклении после смешивания с глазурями, оксидами металлов и красителями [4].



Рисунок 1.1– Основные процессы керамического производства

Также в качестве добавок используются такие электролиты, как силикат или дифосфат натрия – они необходимы для снижения потребления энергии в процессе сушки за счет уменьшения количества воды. [92,129].

Частицы, имеющиеся в природном сырье, разнородны по плотности и размеру [127]. Для дальнейшей работы его необходимо гомогенизировать, для этого применяется мокрое измельчение либо сушка шликера распылением. Полученные продукты представляют собой гранулы глины в виде небольших полых шариков, обычно называемых частицами глины. По свойствам готовый продукт походит на жидкость из-за большого количества подвижных шарообразных частиц [127].

Компоненты для производства в основном доставляются на склад сырья в виде сыпучих материалов. Хранятся они на открытом воздухе в ящиках или силосах, которые обычно находятся недалеко от места проведения работ [17].

Небольшие порции сырья доставляются и хранятся в мешках, контейнерах либо резервуарах в жидком виде [61].

Основными методами, используемыми при подготовке сырья, являются [90]:

- предварительная сушка
- предварительное смешивание
- вылеживание/промораживание глины
- операции первичного и вторичного дробления, измельчения и просеивания
- сухое или мокрое измельчение
- сухое просеивание
- распылительная сушка
- кальцинирование
- подготовка фритты и глазури

Во многих случаях предварительная сушка не требуется из-за сухого состояния сырья, поставляемого поставщиком. При необходимости для предварительной сушки часто используют технологию псевдоожиженного слоя и роторные сушилки.

Смешивание компонентов также может начинаться в процессе добычи и продолжаться с первичным и вторичным дроблением, измельчением и просеиванием. Добавление порций продукта обычно происходит автоматически под управлением компьютера.

Некоторые материалы улучшают свои свойства на этапе хранения. Этот процесс называется раскислением (летованием, вылеживанием) и может занять несколько месяцев [31]. Наиболее эффективно это происходит в зимний период, так как происходит промерзание глины и дробление ее частиц.

Можно использовать измельчение на сухих или мокрых валковых мельницах для уменьшения размера частиц, который обычно составляет 2мм или меньше; в процессе производства настенной и напольной плитки размер может достигать 1мм или менее. Используются также шаровые мельницы непрерывного или

периодического действия, что, в свою очередь, может дополнительно уменьшить размер частиц [129].

При помощи дробилок различного вида проводится первичная подготовка глины – производится выравнивание и гомогенизация ее текстуры, истирание, раздавливание крупных частиц. При помощи щековых дробилок измельчается хрупкое твердое сырье. Эти дробилки работают по принципу сжатия и излома материала между подвижной и неподвижной частями аппарата.

На валковых дробилках входная масса подаётся на вращающиеся по направлению друг к другу гладкие валки, которые сминают и перетирают ее. Размер частиц и степень обработки определяется величиной зазора между валками. Молотковые дробилки путем ударного воздействия обрабатывают куски подаваемого материала, которые разбиваются вращающимися молотками. Для помола более пластичных материалов используют бегуны сухого и мокрого помолов, которые позволяют смешивать поступающую глину с водой. Ножевые глинорезки (стругачи), также используемые для пластичного сырья, имеют вращающееся днище и стенки, в которые под углом вставлены ножи, а куски глины выходят в виде стружки [2].

Для улучшения свойств материалов используются электрообогреваемые грохоты, осуществляющие сухое просеивание. Для сортировки сухого порошка используются воздушные классификаторы. В случае, если частицы не достигают максимального размера, необходимого для воздушной классификации или сухого грохочения, их возвращают в процесс измельчения [52].

1.2.2 Формирование или формование плитки методом сухого прессования или путем экструзии

Формование, в зависимости от вида конечного продукта и используемой массы, может осуществляться разными способами.

Экструзия. Для нее используется более увлажненная масса (12-15% влаги). Она уплотняется в специально предназначенном цилиндре высокого давления, выдавливается в форме ленты из него через отверстие заданной формы (от него зависит форма и характеристики плиток) и разрезается на куски. Большую роль

здесь играет пластичность и текучесть глины. Этот процесс очень важен, ведь от конечных свойств массы зависит правильность формования плитки и все дальнейшие операции. Этот метод в основном используется для приготовления пластичных и подвижных масс, а готовый продукт отличается большей толщиной [53].

Преимущество этого способа состоит в более точной геометрии, что конечно важно для правильной укладки, а также такая плитка прочнее, чем выполненная прессованием.

Второй способ формирования керамической плитки называется полусухим прессованием, представляющим собой прессование порошка винтовыми прессами или большими гидравлическими прессами при давлении около 35МПа. Давление это обусловлено оптимальной плотностью получающейся плитки. При уменьшении плотности плитки средний коэффициент фильтрации воздуха будет увеличиваться, что в свою очередь является косвенной характеристикой величины водопоглощения. При слишком высокой же плотности затруднен выход газов из массы в процессе обжига, что может привести к «закипанию» глазури.

Этот метод позволяет производить более одной плитки за один цикл, а усилие пресса можно увеличить при необходимости увеличения размеров плитки [4].

Также используется сочетание этих двух методов для изготовления плитки небольшой толщины либо неправильной формы. К тому же, продукт в итоге появляется более качественным.

1.2.3 Сушка, глазуровка и декорирование плитки

Сразу после формования продукт очень ломкий и должен перемещаться максимально осторожно перед тем, как подвергнется дальнейшей сушке. Этот процесс обычно выполняется в вертикальных или туннельных сушилках. Сушку проводят при температурах, которые варьируются в зависимости от типа технологии, например, в вертикальных сушилках от 200 до 220°C, а в туннельных сушилках от 300 до 350°C. Время высыхания варьируется от одного до четырех часов в зависимости от содержания воды. Требуемая остаточная влажность должна составлять менее одного процента, чтобы избежать трещин и дефектов остекления

в процессе обжига [92,129]. Затем полуфабрикаты обдуваются для очищения от пыли и помещаются в тележку печи автоматически или вручную.

Далее бисквит передается на глазурование, проводимое путем распыления или орошения в кабине, установленной на автоматизированной линии. В декоративных целях можно использовать технику гравировки или печатные машины, а также декорирование можно выполнять с помощью флексографической печати. Есть более 50 разновидностей машин для декорирования, а их длина может достигать 50 метров и более.

Покрытие на плитку (глазурь или ангоб) наносится поливом или распылением. Глазурь может наноситься до обжига или после в зависимости от того, проводится обжиг в одну стадию или в две. Обжигов может быть и три – в случае присутствия дополнительных декоративных элементов, требующих особой обработки. Рисунок на изделие может наноситься на станках трафаретной печати (шелкография), силиконовым валиком, цифровой печатью. Современными методами декорирования можно достаточно точно имитировать природные материалы – сланец, мрамор, оникс и т.д.

Водорастворимые вещества (например, электролиты) часто смешивают, обжигают и измельчают для введения в глазурь в виде фритты – это делается для того, чтобы предотвратить их вымывание [92,129].

1.2.4 Печной обжиг

Обжиг осуществляется в соответствующем для вида плитки режиме, будь то стеклянная или неглазурованная продукция, где процесс обжига, как уже отмечалось, может быть одинарным, двойным или даже тройным.

В течение всего процесса обжига важно с максимальной точностью соблюдать необходимые температурные условия - это необходимо для того, чтобы получить качественный продукт без дефектов. От степени соблюдения параметров обжига зависят основные характеристики плитки – по большей части, прочность. Важна равномерность нагрева, так как в процессе обжига изделие изменяется в размерах (в разной степени, это происходит в зависимости от свойств

используемой глины) и необходимо, чтобы со всеми частями изделия это происходило с одинаковой скоростью, чтобы избежать трещин и разрывов.

От продолжительности и пика температуры зависит такая характеристика продукта как прочность, а значит и водопоглощение. От него, в свою очередь, зависит морозостойкость, так как впитавшаяся в плитку вода, замерзая, будет расширяться и разрушать керамику – это очень важно учитывать при производстве плитки для внешней отделки. Водопоглощение также принимается во внимание при изготовлении плиток для влажных помещений – в постоянно присутствующей влажной среде легче размножаются микроорганизмы.

Не менее чем нагрев важен и процесс охлаждения после выхода плитки из печи – слишком быстрый также может привести к повреждениям изделия, увеличению его хрупкости.

Двойной обжиг осуществляется в классических туннельных печах при температуре от 1050 до 1150°C (от 20 до 50 часов), в современных печах с вращающимся подом за 1-2 часа [92,129]. Существуют также роликовые печи скоростного обжига, весь процесс работы на которых занимает около 60 минут. Фаза выдержки на температурном пике длится 7-8 минут, а быстрое охлаждение длится 3 минуты [53].

1.2.5 Классификация и упаковка

После финального этапа производства плитка проходит через ручной или автоматизированный контроль качества, сортируется, упаковывается и направляется на склад [129].

Промежуточный контроль проводится на всех стадиях производства, финальный контроль качества осуществляется в соответствии с национальным стандартом ГОСТ Р 27180-2001 «Плитки керамические. Методы испытаний» и с международным стандартом EN ISO 10545» [10].

Внешний вид изделий контролируется визуально на расстоянии не более 1м от глаза наблюдателя при рассеянном искусственном свете при освещенности 300-400лк. Для проверки других параметров используется специальное оборудование,

которое может иметься на предприятии либо в специализированной лаборатории.

Проводятся такие мероприятия как:

- контроль геометрических размеров и правильности формы;
- контроль внешнего вида;
- определение разноразмерности;
- определение водопоглощения;
- определение морозостойкости;
- определение термостойкости глазури;
- определение устойчивости к образованию трещин;
- определение водопроницаемости готовой плитки;
- определение устойчивости к глубокому истиранию;
- определение предела прочности при изгибе;
- определение износостойкости глазурованных плиток;
- определение химической стойкости глазури;
- определение твердости лицевой поверхности по Моосу [64].

Укрупнённая блок-схема технологии производства керамической плитки приведена на рисунке 1.2.

1.3 Виды дефектов и анализ причин их появления при производстве керамической плитки

На основании анализа литературных источников были выявлены основные поверхностные дефекты плитки.

Из-за особенностей обнаружения, как будет показано в гл.3, мы отнесли трещины и царапины к механическим дефектам, сколы на углах и по краям плитки – к геометрическим дефектам, а пятна – к цветовым дефектам (Таблица 1.1).

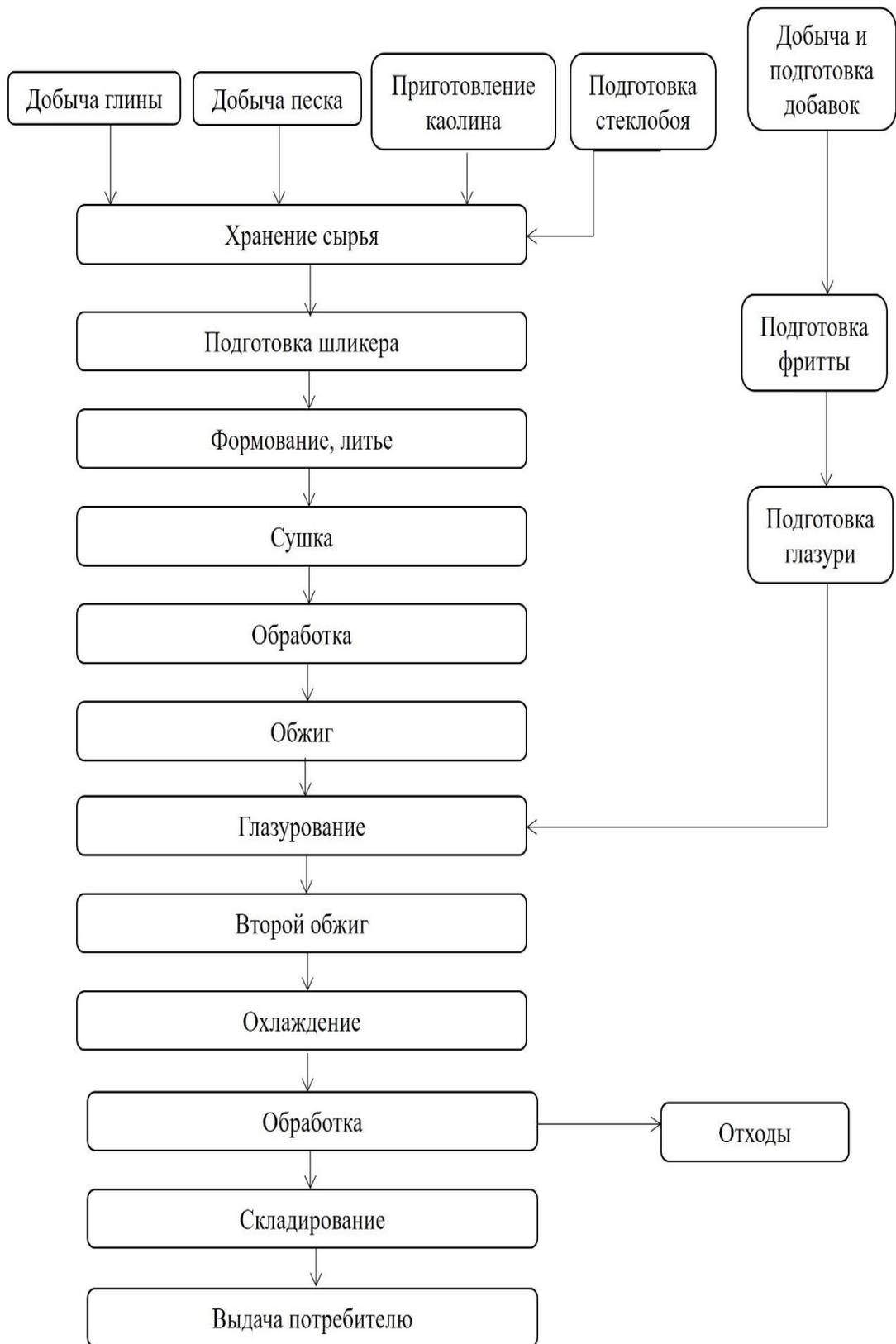


Рисунок 1.2 – Блок-схема процесса производства керамической плитки

Таблица 1.1 – Основные поверхностные дефекты керамической плитки

Типичные дефекты керамической плитки	Характеристики дефекта	
Механические дефекты	Трещины	Тонкие и длинные случайные физические дефекты
	Царапины. Линии	Широкие видимые прямые линии на поверхности плитки, в основном результат контакта производственных линейных стержней
	Наколы, мушки	Очень маленькие отверстия (углубления) и выступы
Геометрические дефекты	Сколы на углах. Сколы по краям плитки	Физические повреждения на углах и краях
Цветовые (тональные) дефекты.	Цветовая градация	Изменения цвета или цветовых оттенков
	Грязь	Мелкие случайные частицы на поверхности
	Капли, пятна (блобы)	Каплеобразные пятна от воды и пятна от неравномерности растекания глазури
	Текстурные проблемы	Изменения плотности

Рассмотрим эти дефекты подробнее.

1.2.1. Царапины, трещины

Трещины - Продольные узкие разрушения верхнего слоя лицевой поверхности плитки (рисунк1.3).

Основные дефекты керамических изделий — включения и трещины. Включения в структуре материала появляются на этапах помола и формования, а трещины возникают в основном при формовании и обжиге. Изредка трещина может образоваться на этапе механической обработки или на последующих операциях от случайного удара [46].



Рисунок 1.3 – Трещина

Одной из причин возникновения трещин может быть резкое изменение размеров плитки при $t = 575^{\circ}\text{C}$. Эта температура соответствует области инверсии кварца – его переходу от α -формы к β -форме (рисунок 1.4). Его содержание в глине часто составляет 10-20%, но может доходить и до 50 %, он на ряду с кристобаллитом является одной из минеральных фаз при обжиге кремнистых глин [33].

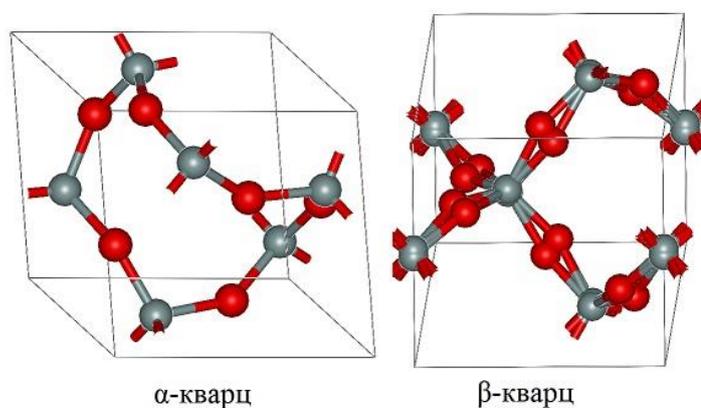


Рисунок 1.4 – Конфигурация кварца

Такой процесс сопровождается небольшим ($\pm 2\%$) увеличением объема, которое является обратимым – при охлаждении кварц восстанавливает свою структуру и объем. Таким образом, процессы нагрева и охлаждения должны выполняться максимально плавно, т.к. неравномерное увеличение/уменьшение объема повреждает изделие. Слишком быстрый нагрев и слишком быстрое охлаждение с большой вероятностью приведет к браку.

Трещина, возникшая при 575°C обычно будет очень острой, а поверхность трещины глянцевой и гладкой. Трещина при более низкой температуре тоже будет острой, но ее поверхность не будет глянцевой [3].

Другой причиной возникновения трещин является возможная неравномерность засыпки порошка в пресс-форму. Изделие дважды проходит через процесс усадки – во время сушки и обжига. Если плитка будет иметь слишком большие перепады толщины, то с одними участками изменения будут происходить быстрее чем с другими, и изделие будет рваться. То же самое произойдет, если разные участки изделия будут засыпаны разной по плотности фракцией. Таким образом, очень важен контроль веса и спрессованности с каждого штампа - не реже двух раз в смену.

Еще одной причиной появления трещин может быть малая влажность пресс-порошка (менее 5%). Недостаточная влажность пресс-порошка при формировании плитки приводит к тому, что не проявляется пластифицирующая способность глинистых материалов и прессование оказывается невозможным. К тому же, излишне сухая масса содержит воздух, который, запрессовавшись, расширяется при обжиге, разрывая изделие. Поэтому на производстве необходимо осуществлять контроль влажности – не реже 1 раза в час.

Большой процент мелкой фракции (проход через сито 025 более 40%) также может послужить причиной образования (точнее, роста) трещин. Трещина, начавшись на поверхности, встречает на пути своего распространения воздушное пространство, которое снимает часть возникающего напряжения и прерывает трещину. В пористой массе это происходит чаще – таким образом, в изделии с высокой плотностью частиц и минимальной пористостью даже микротрещина в процессе обжига может многократно увеличиться в размерах¹. К тому же, изделие с участками с разной плотностью будет сохнуть неравномерно – более мелкие частицы дают больше водных пленок, для высыхания которых нужно время. А

¹Салахов, А.М. Поры и прочностные характеристики строительных материалов / А.М.Салахов, Л.Р.Тагиров, Р.А.Салахова, В.В.Парфенов, Н.М.Лядов // Construction materials, 2011, №12- С 25-28.

плохо просушенное изделие с большой вероятностью даст трещину в более влажном участке при обжиге.

То, каким будет фракционный состав, определяется еще на моменте сушки шликера в БРС – таким образом, производить гранулометрический анализ необходимо начиная еще с этого этапа, а не только перед прессованием.

Так как в процессе обжига изделие будет расширяться, то в размерах будут увеличиваться и различные повреждения – в том числе и трещины. Если плитка претерпела какие-либо повреждения, даже незаметные глазу, то после обжига они могут стать заметнее. Поэтому в процессе загрузки сырца в печь прессовщиком должен осуществляться контроль состояния направляющих и регулирование скоростей комплектования и загрузки сырья.

Наконец, нарушение аэродинамического режима уфельной печи, нестабильная работа горелок в зоне сушки или предварительного нагрева также могут вызвать образование трещин. Равномерность и стабильность нагрева и охлаждения — это важная часть производства керамических изделий. Если эти условия не соблюдаются, то с одними участками изменения будут происходить быстрее чем с другими, и изделие будет рваться [15]. Происходит это потому, что влажная часть изделия в перспективе сжимается больше, чем сухая. И так как сухая часть ограничивает усадку, с влажной стороны будут создаваться растягивающие напряжения. Керамические массы слабо сопротивляются растяжению и, как следствие, в более влажной части образуется трещина.

Кроме того, процесс сушки при нестабильности работы горелок может пройти не полностью. Тогда в предназначенном для обжига сырце останется вода, которая может разорвать изделие. Поэтому обязательно введение процесса контроля температур в зоне сушки и обжига, а также работы вентиляторов.

1.2.2. Пузыри, наколы или точечные выступы (мушки)

Это образования обычно округлой формы, образовавшиеся вследствие скопления газа либо незаполнения газурью пространства (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Пузырьки

Одной из причин возникновения дефектов этого типа является низкое качество фритты, загрязнения глазури или ангоба. Если фритта, используемая для приготовления глазури, будет иметь посторонние включения, не предусмотренные технологией, то это может привести к изменениям на спеченной глазурной поверхности [41].

Также это произойдет, если ангоб или глазурь будут загрязнены каплями масла с оборудования. Для того, чтобы этого не происходило, необходимо осуществлять контроль качества входящего сырья и контроль состояния приводов мешалок дробильщиком-размольщиком. Также нужно еженедельно производить техосмотр оборудования.

Другой причиной может служить несоответствие контрольных точек установленного графика обжига с действительными. Если повышение температуры в печи для обжига было слишком быстрым, то газы, образующиеся в материале (большой частью это происходит из-за разложения карбонатов) не успевают выделиться до того, как глазурь начнет расплываться. Таким образом, в глазурном покрытии могут образовываться пузыри различных размеров либо незаполнения глазурью (ямки) – если произошел разрыв пузырька в период розлива глазури.

Именно поэтому необходимо использовать достоверный и выверенный график обжига, следить за тем, чтобы сырье не было загрязнено примесями,

которые изменяют его свойства, например, температуры в контрольных точках графика [39].

Из-за высокой влажности пресс-порошка, повышенного давления на прессе или увеличения максимальной температуры обжига может быть в итоге снижено водопоглощение плитки, что также может способствовать появлению дефектов [43]. Поэтому сушильщику необходимо проводить контроль влажности пресс-порошка не реже одного раза в час, прессовщику – контролировать давления и засыпки на прессе, обжигальщику – температуры в течение смены.

Ямки могут образовываться при использовании легкоплавкой глазури с низкой вязкостью, способной впитываться в поры плитки, либо же при использовании массы, образующей при спекании крупные поры [43].

Повышение вязкости глазури приводит к образованию пузырей - поверхностное натяжение расплава не позволяет образовавшимся в процессе обжига газам выйти из массы [42].

1.2.3 Пятна

Пятна – это образования, отличающиеся по цвету или текстуре от остального покрытия (рисунок.1.6).



Рисунок 1.6 – Пятна

Пятна могут возникать из-за неравномерности нанесения глазури. Может иметь место «сухая» глазурь (места, где слой покрытия слишком тонкий), либо наоборот, утолщения – в этом случае могут иметь место дополнительные дефекты, связанные с избытком глазури (трещины). Поэтому глазуровщику предписывается

не реже 1 раза в час производить контроль расхода и равномерного нанесения ангоба или глазури.

Иногда расплав глазури способен растворять верхний слой черепка либо ангоба и окрашиваться, поэтому необходимо правильно подбирать материалы, чтобы такого не происходило.

Пятна также могут возникать из-за загрязнения глазури/ангоба/керамической массы. Необходимо использовать качественное сырье и проводить приемочный контроль при его поступлении. Также пятна могут образовываться в том случае, если в глазури, ангобе или массе будет присутствовать углерод, который в норме должен выгореть за время обжига – это можно устранить, например, увеличивая содержание кислорода в печной среде на этапе окисления органики

Опять-таки, если нагрев при обжиге на начальном этапе производить слишком медленно, то это может привести к эффекту “запаривания” - проявляется он в возникновении на глазури пятен в результате конденсации солей, растворенных в воде (если они имеются - это может быть, например, при слишком долгом хранении глазури в жидком состоянии, когда происходит выщелачивание) [42].

1.2.4 Сколы на углах, сколы (выщерблены) по краям плитки

Эти дефекты (рисунок 1.7) могут возникнуть из-за износа направляющих на линии глазуровки, на линии загрузки в печь и т.п. Чаще всего сколы на углах и выщерблены на гранях возникают на сырой (бисквитной) плитке до обжига. Поэтому целесообразно проводить контроль не только готовой плитки, но и бисквитной плитки, т.к. отбракованную плитку можно просто вернуть обратно в переработку. Необходимо осуществлять контроль направляющих и формирования ряда на всех этапах до загрузки в уфельную печь не реже 1 раза в смену. Замена направляющих должна осуществляться по мере необходимости, но не реже 1 раза в неделю.



Рисунок 1.7 – Сколы на углах

Дефекты указанного типа могут также возникнуть при низкой влажности порошка на прессе менее 5% или более 7%. При несоответствии порошка требованиям содержания влаги углы плиток могут быть сформированы непрочны и повреждаться (отслаиваться) при изъятии из пресс-формы. Необходимо не реже 1 раза в час контролировать влажность и состав пресс-порошка, чтобы этого не допустить.

Износ дисков сухой зачистки граней плитки на линии глазурования, износ штампов на прессе, скопление плиток перед станком – все это является факторами, ведущими к повреждению плиток при соприкосновении друг с другом или с оборудованием. Необходимо следить за состоянием штампов, чтобы не происходило недопрессовки, а также за скоростью протяжки, чтобы расстояние между плитками на линии было не менее 5 см.

Загрязнения на штампах могут приводить к недопрессовке в отдельных местах, поэтому необходимо следить за их чистотой – прессовщик должен делать это в течение смены и замывать штампы по необходимости [47,14].

1.2.5 Разнотон, различие в оттенках и цветах

Цветовой оттенок или разнотон это разница между двумя или более цветовыми объектами. Этот вид дефекта достаточно часто наблюдается между партиями, когда цвет продукции в одной отличается от предыдущей и последующей партий. Причины возникновения этого дефекта можно условно разделить на связанные с материалами и связанные с оборудованием.

Правильный подбор состава мастик, глазурей и исходной глиняной массы, их совместимость оказывает большое влияние на внешний вид готового продукта. В том случае, если изначально глазурь была несовместима с красителями или массой (глазурь растворяет верхний слой материала подложки) могут образовываться различия цвета в слое глазури, непосредственно контактирующем с черепком. Подобное может наблюдаться даже при максимальном соответствии материалов – в том случае, если рецептура была нарушена уже непосредственно в процессе производства. Именно поэтому процесс производства приготовления мастик должен осуществляться в строгом соответствии с разработанной рецептурой, а при разработке составов необходимо осуществлять огневые пробы.

Из-за таких проблем с оборудованием, как износ трафарета или рисовальной ракля, могут возникать цветовые дефекты на готовом изделии. Поэтому необходимо отслеживать состояние оборудования, порядок установки плитки на ленте, а также своевременно производить замену ракля либо трафарета. Немаловажно также контролировать процесс обжига – при несоблюдении температурного режима, неравномерном прогреве печи или наличии в ней разрежения также может пострадать цвет готового изделия.

ГОСТ 27180-2019 устанавливает требования к цветовым отклонениям поверхности плитки, а также методику измерения количественных отклонений цвета посредством приборного измерения. Определяется цветовое различие испытуемого образца ΔE_{CMC} , которое сравнивают с нормированным значением, применяя предварительно согласованный коммерческий фактор cf (допуск, согласованный между всеми сторонами, или обычно применяемый в промышленности по производству керамических плиток для определения приемлемости цветовых различий), для глазурованных плиток он обычно равен $cf=0,75$. Также необходимо понимать, что колориметрия определяет лишь отклонение цвета, но не рисунка, и достоверно о результатах измерений можно судить в случае, если образец и эталон имеют одинаковую структуру поверхности и глянец.

Контроль цвета плиток производится выборочно, при этом измерения осуществляются на отражательном спектрофотометре или трехдиапазонном колориметре с тремя источниками света. Предназначенную для изучения поверхность очищают от пыли и грязи, проводят измерения, результаты обрабатывают в системе CIELab, рассчитывая отклонение цвета плиток от эталона как среднее арифметическое всех измерений [12].

1.2.6 Радиоактивность

Основным сырьем для производства плиток является глина. Даже в случае естественного происхождения массы, в ней могут встречаться естественные радионуклиды, которые могут являться источником ионизирующего излучения. Стройматериалы составляют до 60% всех источников ионизирующего излучения [57], воздействию которых подвергается человек - это обусловлено повсеместным распространением природных радионуклидов: ^{266}Ra , ^{40}K , ^{232}Th [55].

Пески несколько менее радиоактивны глины, но в случае их обогащения ураново-ториевой минерализацией могут показывать значительную радиоактивность [55].

Несмотря на то, что глинистые горные породы, используемые в строительстве, не являются радиационно опасными, при их использовании рекомендовано снижать дозы облучения насколько это возможно. К примеру, увеличение температуры обжига на определенном этапе способствует уменьшению концентрации естественных радионуклидов в готовом продукте [57]. Содержание радионуклидов и порядок его определения устанавливается ГОСТ 30108-94.

В то же время становится важным вопрос о защитных свойствах керамики от ионизирующего излучения. Как уже упоминалось во введении к данной работе в настоящее время проводится много исследований в этой области, определяются возможности использования керамических плиток для защиты от ионизирующего излучения в учреждениях, где присутствует радиация. Это различные университетские и исследовательские лаборатории, медицинские учреждения и др. Было показано, что плитки, в принципе, при малом уровне фонового собственного

излучения обладают лучшими защитными свойствами, чем многие строительные материалы, в частности, кирпич и бетон. Это привело к тому, что ряд предприятий по выпуску керамических плиток начал сообщать в сопроводительной документации значение коэффициентов ослабления излучения плитками данной партии.

1.3 Основные показатели оценки качества керамической плитки

Плитка должна быть изготовлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р57141-2016 и технических регламентов, утвержденных производителем. Как уже упоминалось выше, плитки выпускаются для облицовки наружных стен, внутренних стен и для настила пола. Они могут быть глазурованными, частично глазурованными, неглазурованными, полностью или частично шлифованными, нешлифованными, с гладкими и рельефными поверхностями.

По форме плитки бывают квадратными и прямоугольными, номинальные размеры от 200 до 1200 мм в длину и в ширину. Номинальная толщина должна быть не менее 7,0 мм. Радиус блокировки плитки устанавливается производителем. Значение радиуса блокировки не является флагом отклонения.

Предельное отклонение длины и ширины пластины от номинального размера должно соответствовать таблице технических характеристик, а отклонение по толщине не должно быть больше $\pm 0,5$ мм. В партии должна быть плитка только одного калибра. Отклонение формы плитки от прямоугольной (наклон), кривизна краев, отклонение лицевой поверхности от плоскости (кривизна поверхности) не должны превышать 1,5 мм. Монтажная поверхность должна иметь гофры. Размер, форма и количество гофр определяются изготовителем в технической документации, при этом высота (глубина) гофр должна быть не менее 0,5 мм.

Цветовое решение поверхности плитки должно соответствовать утвержденному типовому образцу. Различия цветового оттенка и фактуры (рисунка) не регламентируются [56].

Согласно международному стандарту EN98, качество плитки характеризуется её сортностью. Выделяют три сорта керамической плитки. В некоторых случаях на упаковке не указывается сорт прямо, а имеется цветовая

маркировка, например, красный цвет соответствует 1-ому сорту (дефектов плитки не более 5%, в России это определяется согласно ГОСТ 13996-2019 ПЛИТКИ КЕРАМИЧЕСКИЕ. Общие технические условия) [32]. Синий цвет указывает на 2-ой сорт, что означает, то дефектов не более 25%, зеленый (либо черный) – дефектов более 25%, что соответствует 3-ему сорту.

Плитка второго и третьего сорта не выпускается целенаправленно, партии этих сортов состояются из продукции, которая не отвечает высоким требованиям для первого сорта. Такая плитка не подходит для жилых помещений, так как значительно хуже по качеству, но часто применяется для технических помещений, где важна экономия денежных средств, а не эстетика.

Конечно же, плитка второго и третьего сортов не является приоритетной продукцией для производителей, большинство предприятий, выпускающих керамическую плитку и керамогранит, в своих рекламных кампаниях и деятельности в целом акцентируют внимание на, так называемом, «первом сорте плитки». Он безопаснее, эстетичнее и, соответственно, дороже, а потому приносит предприятию больше прибыли и даёт конкурентное преимущество. Кроме того, спрос зависит от размера плитки и от того, насколько потребителям нравится дизайн, внешний вид и цветовая гамма при принятии решения о покупке [32], а значит качество продукции необходимо рассматривать в качестве важного аспекта всего производства.

Самыми точными и объективными методами контроля качества являются автоматические, которые работают без участия человека, так как в этом случае будут исключены факторы пристрастности, пропуска дефектов из-за больших нагрузок на зрительный аппарат, увеличится скорость обработки продукции. К тому же, некоторые дефекты невозможно увидеть невооруженным взглядом.

Таким образом, как показано в материале этой главы, дефекты при производстве керамической плитки могут иметь самые разные причины, начиная от проблем с сырьем и заканчивая неправильной настройкой и эксплуатацией оборудования. И в области производства керамической плитки осмотр, классификация и обеспечение качества конечного продукта имеют первостепенное

значение. Поверхностные дефекты такие, как трещины, царапины, сколы и мушки, не только компрометируют эстетическую привлекательность плиток, но и влияют на их структурную целостность. Это еще раз подчеркивает важность выпускного контроля плиток на возможное наличие дефектов.

1.4 Выводы по главе 1

1. Производство керамической плитки в мире огромно и имеет тенденцию к расширению, что объясняется ее свойствами, обеспечивающими ее успешное применение в самых разных областях. При этом показано, что дефекты различного происхождения существенно влияют на сортность и возможность использования плитки, сужая области ее применения. Даны ссылки на стандарты, в которых приведены требования к общему виду керамической плитки,

2. Рассмотрены типовые стадии производства керамической плитки с точки зрения возможности возникновения дефектов на этих стадиях. При этом определялись параметры, несоблюдение которых и являлось возможными причинами возникновения дефектов.

3. Рассмотрены основные дефекты плитки и приведена их классификация. Из краткого анализа технологии производства керамической плитки следует вывод, что часто одни и те же дефекты могут иметь разные причины, начиная от проблем с сырьем и заканчивая неправильной настройкой и эксплуатацией оборудования.

4. Показана важность замены визуального контроля плитки человеком на автоматический ее контроль на основе технического зрения.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже приводится проведенный на основании рассмотрения литературных источников анализ методов обнаружения дефектов керамической плитки. В зависимости от характера методов, используемых для обнаружения конкретных дефектов керамической плитки, обзор был разделен на несколько групп по классам обнаруживаемых дефектов:

- Обнаружение дефектов механического происхождения на кромках и углах керамической плитки.
- Обнаружение дефектов механического происхождения на поверхности керамической плитки.
- Обнаружение дефектов, связанных с дефектами цвета поверхности монокромной керамической плитки.

Были также рассмотрены вопросы, связанные с защитными свойствами керамической плитки от ионизирующего излучения. Это было связано с тем, что такие металлы, как свинец, железо и сталь, обычно применяемые для защиты от ионизирующего излучения, практически не используются в строительстве из-за их высокой плотности и высокой стоимости. В то же время применение ионизирующего излучения, в частности, в медицине все расширяется. Поэтому изучение и анализ методов оценки эффективности материалов, считающихся дешевыми материалами, таких как керамическая плитка, для защиты от ионизирующего излучения представляется важным.

2.1 Обнаружение дефектов механического происхождения на кромках и углах однотонной керамической плитки

Сломанные углы, сколы, трещины по краям, неровные грани, выщерблины или даже отсутствие определенных участков в керамической плитке — это дефекты, которые существенно нарушают структурную целостность, снижают качество, внешнюю привлекательность и стоимость плитки. Не следует недооценивать значение выявления дефектов на углах и гранях плитки, кроме того, своевременное выявление этих недостатков и последующее устранение дефектных

плиток до выпуска гарантирует положительный результат, минимизирует потери ресурсов и уменьшает необходимость последующих замен.

В данном параграфе приводятся результаты анализа литературных источников на предмет обнаружения сколов на краях и углах прямоугольных или квадратных керамических плиток. При этом в большинстве случаев рекомендуется эту контрольную операцию проводить первой, поскольку любая сколотая плитка уже должна быть удалена и переработана [8], что делает ненужным дополнительный контроль. Бисквитная плитка (плитка перед обжигом) очень склонна к сколам. Приняв дополнительные меры по обнаружению сколов на этом этапе, можно выявить и отбраковать дефектные плитки еще до процесса обжига. Эти отклоненные плитки затем могут быть отправлены обратно на переработку [36].

Мониторинг дефектов в режиме реального времени необходим в связи с предположением, что контролируемая плитка находится на движущейся конвейерной ленте. Это подчеркивает первостепенную необходимость уменьшения времени, затрачиваемого на получение и анализ изображения плитки. Однако, в ряде источников приводится оценка времени на операции захвата и обработки изображения в диапазоне 2 секунды на плитку [115], что недопустимо много при организации контроля в реальном времени. Продолжительность этих процедур, конечно, зависит от методов, используемых для получения и манипулирования изображением плитки, а также от типов дефектов, выявленных алгоритмом интегрированной системы проверки.

Для контроля наличия сколов на краях и углах плитки применялись различные методики, различающиеся по способности точно обнаруживать эти недостатки и по времени, необходимому для обработки изображения. Для начала важно выделим методы, требующие наличия эталонных плиток [46]. Эти методы используют сравнение конкретных свойств тестовых и эталонных плиток и требуют предварительной калибровки в случае необходимости изменения стандарта. Далее будут представлены методы выявления дефектов по краям и углам без необходимости предъявления эталонных плиток.

Каждый подход требует определения внешней границы плитки и тщательного изучения прямых линий, образующих границу, для определения их целостности. Для создания контура используются различные методы. По периметру распознанных областей создаются контуры, подобные тем, которые определены методом Кэнни, и впоследствии исследуются на наличие разломов [130]. Также используется преобразование Хафа для создания контуров, идентификации прямых линий и предоставления информации об их количестве, углах и положениях [133]. Полученные прямые линии изображают исследуемую форму, а степень неровности краев можно определить с помощью дополнительного геометрического анализа. Тем не менее, преобразование Хафа имеет тот недостаток, что оно сравнительно медленно обнаруживает прямые линии и непригодно для изображений с высоким разрешением, где объем данных, обрабатываемых в среде обработки в реальном времени, значителен [128]. Однако преобразование Хафа в основном использовалось исследователями во вторичных временных контекстах. Более подробно особенности методов Кэнни и Хафа рассмотрены в следующем параграфе.

Дефекты керамической плитки обычно выявляют путем установки камер, расположенных под прямым углом к лицевой поверхности плитки. Тем не менее в работе [6], используются камеры, перпендикулярные торцевым поверхностям плитки. Первый вариант позволяет использовать установку для выявления дополнительных параметров и дефектов поверхности плитки, второй вариант дает возможность дистанционного измерения размеров плитки и определения отклонений и угловых дефектов.

Морфологические операторы обычно используются для улучшения изображения, сглаживания и уменьшения шума. Также с их помощью могут быть обнаружены границы дефектов [99], однако они, как правило, требуют значительных затрат времени и применение их при работе в режиме реального времени затруднительно.

Авторами работы [93] использован градиентный алгоритм обнаружения дефектов керамической плитки. Этот алгоритм выполняет операцию уменьшения

размера изображения и впоследствии преобразует его в оттенки серого. Обнаружение края осуществляется путем применения оператора обнаружения края с фиксированным пороговым значением. Затем к тестовому и эталонному изображению был применен морфологический оператор. Чтобы выявить любые дефекты изображения, алгоритм количественно определяет количество белых пикселей как в тестовом, так и в эталонном изображении, а затем сравнивает их значения. Основным ограничением этого алгоритма является значительное время вычислений, поскольку он проводит попиксельное сравнение тестовых и эталонных изображений.

Для определения прямоугольности плитки и возможных сколов на уголках применялся простейший метод на основе теоремы Пифагора [108,135-136]. Если сумма квадратов сторон плитки, образующих с ее диагональю треугольник, не равнялась квадрату этой диагонали (гипотенузы), то плитка имела либо сколотый угол (квадрат гипотенузы меньше суммы квадратов катетов – «внутренний» дефект [108]), либо имела на уголке приставший кусок керамики (квадрат гипотенузы больше суммы квадратов катетов – «внешний» дефект [108]), либо угол в вершине не равен 90° (рисунок 2.1). Последнее легко вычислялось по значениям обратных тригонометрических функций углов треугольника.

В работе [137] предложен достаточно простой метод контроля прямоугольности плиток. Метод использует скалярное произведение двух векторов, в качестве которых выступают стороны выделенного при предобработке изображения собственно плитки. Учитывая, что скалярное произведение векторов A и B равно (2.1):

$$A \cdot B = |A| |B| \cos \theta, \quad (2.1)$$

где $|A|$ и $|B|$ соответствуют длине векторов A и B , а θ - угол между ними, то по значению $\arccos \theta$ можно определить прямоугольность контролируемых плиток. Однако, следует учитывать, что точность метода существенно зависит от точности определения длины сторон плитки, кроме того, метод определяет значения углов между сторонами плитки, но не учитывает возможные дефекты на этих углах.

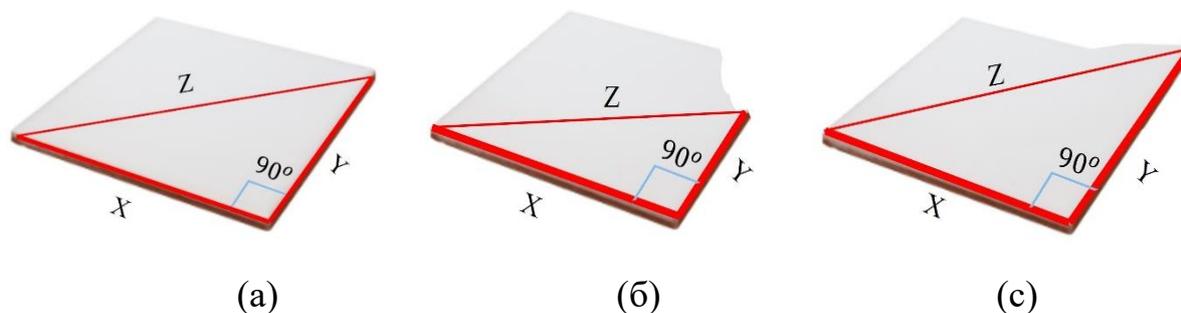


Рисунок 2.1– (а) Хорошая плитка; (б) плитка со сколом; (с) плитка с выщерблиной

При применении этого метода, однако, следует помнить, что предварительные операции по выделению изображения собственно плитки из исходного изображения с фоном, определению положения углов и длины сторон и диагоналей должны быть проведены.

Для определения сторон плиток применялись алгоритм Брезенхема и преобразование Хафа — широко используемые в этой области методы для эффективного обнаружения наиболее точного представления линии и обнаружения линий внутри изображения [96,119,120].

Алгоритм Брезенхема находит наиболее точное представление линии, итеративно выбирая пиксель, ближайший к желаемому ходу линии.

Основные различия между линейным алгоритмом Брезенхема и линейным преобразованием Хафа заключаются в методологиях и практической реализации. Линейный алгоритм Брезенхема используется для выполнения таких задач, как рисование линий и аппроксимация линий, а линейное преобразование Хафа используется для распознавания краев, обнаружения полос и обнаружения сегментов линий [96].

Эти два алгоритма демонстрируют различную применимость и возможности в зависимости от конкретной рассматриваемой задачи. Методика линий Брезенхема известна своей вычислительной эффективностью, что делает ее хорошо подходящей для реализации на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами. С другой стороны, линейное преобразование Хафа демонстрирует устойчивость к шуму и способно обнаруживать линии, которые могут быть частично перекрыты или разорваны [119,120,86].

Несмотря на простоту метода, принятие решения о качестве плитки с помощью геометрических и тригонометрических операций может быть затратным в вычислительном отношении, а также определение диагонали плитки на изображении может быть затруднено и подвержено ошибкам, особенно при наличии сколов на углах плитки.

В работе [133] предложены методы обнаружения дефектов в торцевых поверхностях плитки. При использовании одного из предложенных методов строятся графики координат как верхнего, так и нижнего края торцевой стороны плитки, а метод аппроксимации полиномиальной кривой используется для выбора линии наилучшего соответствия для каждых 20 точек интервала.

Другой метод, предполагает получение качественного изображения торца после выявления краев методом Канни и проведения процедуры морфологического расширения. Кроме того, вносятся корректировки в фокус камеры и условия освещения, если процесс выделения краев оказывается неадекватным и неправильным. Определяются координаты края и создается изображение, с которым далее производится сравнение изображений тестовых плиток. При этом, естественно, изображение тестовых плиток масштабируется и перемещается для выравнивания с положением эталонного изображения.

Аналогичные методы использованы и в работе [93]. Однако авторы не отказались от возможности обнаружения дефектов механического происхождения на поверхности плитки. Для этого помимо боковых источников света они использовали и традиционные варианты освещения плитки сверху.

Метод контурной трассировки эффективно использовался в качестве стратегии обнаружения и изоляции дефектов краев керамической плитки [99]. Алгоритм трассировки края контура включает в себя генерацию направления каждого отслеживаемого пикселя относительно предыдущего пикселя. Включение информации о направлении пикселя позволило точно охарактеризовать форму, определяя абсолютную ориентацию прослеживаемого контура по отношению к базовой системе координат, которая представлена изображением полученной керамической плитки.

Представление прорисованного контура плитки достигается за счет использования вектора углов, присвоенного каждому пикселю вдоль контура, который назван дескриптором формы. Дескрипторы контуров характеризуют различные контурные структуры, соответствуя конкретным формам и их геометрии. Резкие изменения форм можно отнести к конкретным участкам контура, имеющим прямоугольную или многоугольную конфигурацию. В отличие от многоугольных форм, круглые или изогнутые формы имеют значительно меньше вариаций в своих контурных дескрипторах. Дескрипторы предложено использовать в качестве детектора для исследования кромок керамической плитки. Это достигается путем проведения прямого сравнения дескриптора эталонного контура и контура контролируемой плитки.

Этот метод показал в эксперименте себя достаточно быстрым, даже при обработке изображений высокого разрешения. Однако достигнутые в эксперименте времена выполнения все еще были велики для обработки в реальном времени, особенно для обнаружения границ. В дополнение к этому следует учитывать необходимость использования эталонных плиток.

Следует также отметить попытки применения нейронных сетей для выявления дефектов керамической плитки. При этом использовалась вероятностная четырехслойная нейронная сеть из-за ее высокой скорости обучения [116]. Однако следует отметить, что предварительная обработка изображений, необходимая для возможности предъявления их сети, значительно превышает необходимую предобработку при традиционных подходах к обнаружению дефектов. Так в работе [116] было выделено 9 шагов предобработки:

Шаг 1: Получение изображения либо из обучающей базы данных (на этапе обучения сети), либо с камеры.

Шаг 2: Группирование изображений в соответствии с дефектом, к которому они относятся (в рабочем режиме этот шаг пропускается).

Шаг 3: Уменьшение размера каждого изображения до 128x128 пикселей, чтобы сократить время обработки.

Шаг 4: Определение границ и проведение сегментации изображения с измененным размером.

Шаг 5: Выполнение для сегментированного изображения следующих вычислений:

1. параметров гистограмм (среднего и СКО) для каждой цветовой области (R, G и B) отдельно;
2. энергии текстуры и энтропии текстуры (для плоских монохромных плиток этот шаг может быть пропущен);
3. средней контрастности изображения;
4. горизонтальных и вертикальных краев (с помощью детектора Собеля) и диагоналей (с помощью детектора Робертса);
5. центра тяжести изображения собственно плитки.

Шаг 6: Формирование объектового вектора для изображения, расположив значения, вычисленные на шаге 5, в одну строку.

Шаг 7: Индексация каждого объектового вектора в соответствии с соответствующим им классом дефектов изображения.

Шаг 8: Обучение вероятностной нейронной сети, используя все вычисленные векторы признаков и их метки.

Шаг 9: Использование обученной нейронной сети в качестве классификатора для обнаружения дефектов.

По приведенным в работе данным такая сеть позволила получить высокий уровень обнаружения дефектов механического происхождения и блобов (более 90-95%), обученная сеть обнаруживала дефекты в два раза быстрее традиционных методов, но при этом не учитывалось время предобработки. Сеть требует большого объема памяти и наличия обучающего массива со всеми видами дефектов. Все это делает данный метод не очень подходящим для использования в реальном времени.

2.2 Методы обнаружения дефектов механического происхождения на поверхности однотонной керамической плитки

Для обнаружения дефектов механического происхождения на поверхности однотонной керамической плитки используются разные методы обработки

изображений плитки, но единого алгоритма, позволяющего обнаружить все виды дефектов поверхности, к сожалению, нет. Эти методы включают получение (захват) изображения плитки, предварительную обработку, извлечение признаков и классификацию с использованием таких операций, как обнаружение границ, определение порога, анализ текстур и т.п. Большинство методов основываются на сравнении изображений плиток, при котором в качестве стандарта используется эталонная плитка без дефектов.

Прежде всего после предобработки нужно выделить интересующие области изображения, отделив их от фона. Это производится пороговой обработкой. Этот процесс включает в себя установление заранее определенного порогового значения и классификацию пикселей на передний план и фон в соответствии со значениями их интенсивности. Пикселю присваивается определенное значение (обычно - белое), если его интенсивность превышает пороговое значение; в противном случае ему присваивается другое значение (обычно – черное), как показано на рисунке 2.2.

Другими словами, сегментированное бинарное изображение $g(x,y)$ можно получить из исходного $f(x,y)$, применяя следующее пороговое преобразование (2.2) [128, 5]:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{если } f(x,y) > T \\ 0 & \text{если } f(x,y) \leq T \end{cases}, \quad (2.2)$$

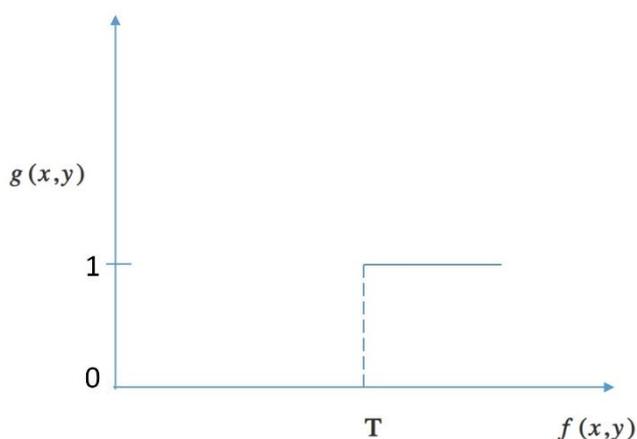


Рисунок 2.2 – Пороговый оператор

Если значение порога T остается постоянным на протяжении обработки всего изображения, то мы имеем глобальный порог. Одной из основных проблем при использовании глобального порога является его зависимость только от значений

интенсивности пикселей без учета каких-либо межпиксельных взаимодействий. Другая проблема с глобальным порогом, как уже упоминалось выше, заключается в том, что изменения освещенности объекта могут сделать некоторые области ярче (на свету), а некоторые темнее (в тенях) способами, не связанными с объектами на изображении [20]. В то же время, устанавливая пороговые значения локально, можно хотя бы частично решить проблему неравномерного освещения. Это означает, что вместо единого глобального порога используется порог, меняющийся по изображению в зависимости от окружающих пикселей – адаптивный порог. Одним из наиболее распространенных типов адаптивных порогов является порог Оцу [128]. Подход М. Otsu представляет собой расширение оригинальной методики до многоуровневой пороговой обработки [60,44].

Автоматическое определение порога играет решающую роль в сегментации изображений и приложениях машинного зрения. Автоматическое определение порога включает автоматический выбор оптимального порогового значения уровня серого для отделения интересующих объектов на изображении от фона. Этот выбор основан на распределении объектов по уровням серого. В промышленности широко используется этот метод определения порогов для автоматизированного визуального контроля дефектов. В области машинного зрения этот метод широко известен как контрастное зондирование. Из-за его широкой применимости в различных областях и приложениях обработки изображений существует значительный объем исследований по автоматическому установлению порогов, которые можно использовать. Были проведены комплексные исследования и оценки различных методов определения порогов.

Методы автоматического определения порогов можно в общих чертах также разделить на две категории: определение глобальных и определение локальных порогов. Использование глобальных порогов — это, естественно, более простой и удобный метод, но его результат зависит от наличия хорошо и равномерно освещенной среды. Методы локального порогового определения способны справиться с неоднородным освещением, хотя они, как правило, сложнее и отнимают много времени.

Предложенный Оцу в 1979 году метод выбора пороговых значений оказался одним из наиболее эффективных методов. Этот метод выбирает пороговые значения, которые максимизируют межклассовую дисперсию. Метод Оцу особенно эффективен для отделения крупных объектов от фона путем определения оптимального порога. В частности, он хорошо подходит для определения пороговых значений гистограмм, демонстрирующих бимодальное или мультимодальное распределение. Однако метод Оцу неэффективен, когда гистограмма имеет унимодальное распределение или находится в непосредственной близости от унимодального распределения. Чтобы эффективно выявлять дефекты в при реализации автоматического визуального контроля с использованием метода Оцу, необходимо модифицировать метод, чтобы он одинаково обрабатывал как унимодальные, так и бимодальные распределения [38].

Одним из ограничений метода Оцу является то, что он может не работать должным образом при сегментации слабых объектов или при больших вариациях внутри класса переднего плана или фона.

Чтобы сосредоточить проверку на конкретных интересующих областях изображения и добиться эффективности после порогового процесса, часто использовались морфологические преобразования.

Морфология охватывает широкий спектр процессов обработки изображений, которые манипулируют изображениями путем анализа и управления их формой. Морфологические операции включают применение структурного элемента к входному изображению, в результате чего создается выходное изображение, сохраняющее те же размеры. В контексте морфологических операций определение значения пикселя выходного изображения зависит от сравнительного анализа соответствующего пикселя входного изображения и соседних с ним пикселей. Расширение и эрозия считаются наиболее часто используемыми морфологическими действиями [100, 40].

Процесс морфологического расширения включает добавление пикселей к границам объектов внутри изображения. Значение выходного пикселя определяется путем выбора самого высокого значения из всех пикселей в его

окрестностях. В контексте бинарных изображений значению пикселя присваивается значение 1, если любой из соседних пикселей (в пределах структурного элемента) имеет значение 1. Процесс морфологического расширения улучшает видимость предметов и эффективно устраняет наличие небольших пробелов внутри этих объектов (рисунок 2.3) [62, 95].

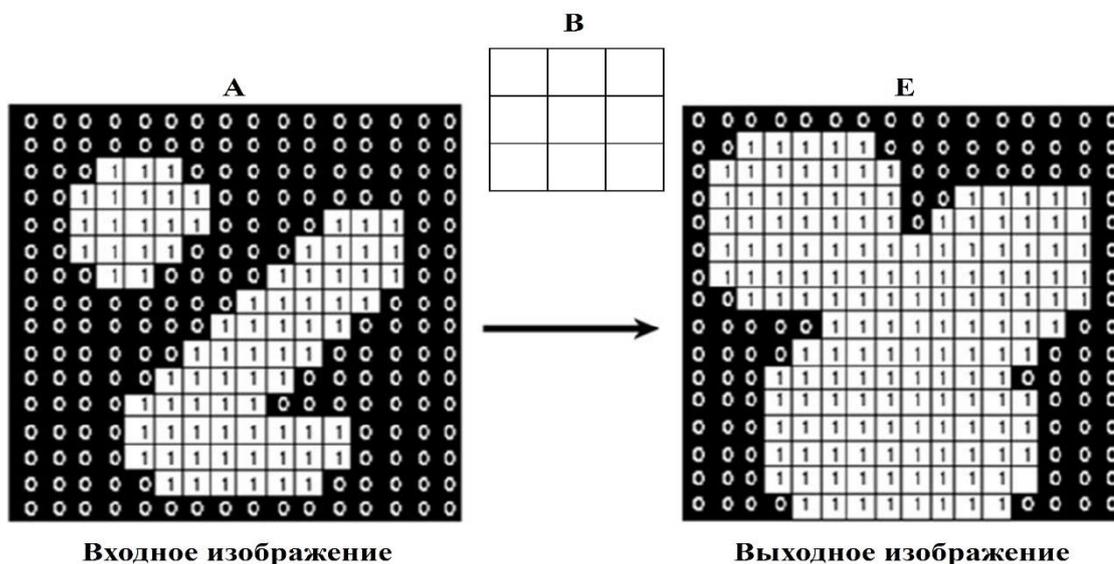


Рисунок 2.3 – Пример морфологической операции расширения на бинарном изображении

Эрозия, наоборот, влечет за собой удаление пикселей за границы этих объектов. При этом значение выходного пикселя определяется как минимальное значение среди всех пикселей в его окрестности (в пределах структурного элемента). В контексте бинарных изображений значение пикселя устанавливается равным 0, если любой из соседних с ним пикселей имеет значение 0. Процесс морфологической эрозии включает удаление плавающих пикселей и тонких линий, в результате чего сохраняются только существенные объекты, остальные линии уменьшают толщину, а формы уменьшаются в размерах (рисунок 2.4).

Следует отметить, что структурный элемент, используемый для обработки входного изображения, является важнейшим компонентом морфологических операций расширения и эрозии. Изменение количества пикселей в изображении зависит от его размеров и конфигурации. Структурный элемент определяет матрицу, которая служит для идентификации конкретного пикселя внутри

изображения, подвергающегося обработке, а также определяет окрестности, которые будут учитываться при обработке каждого отдельного пикселя.

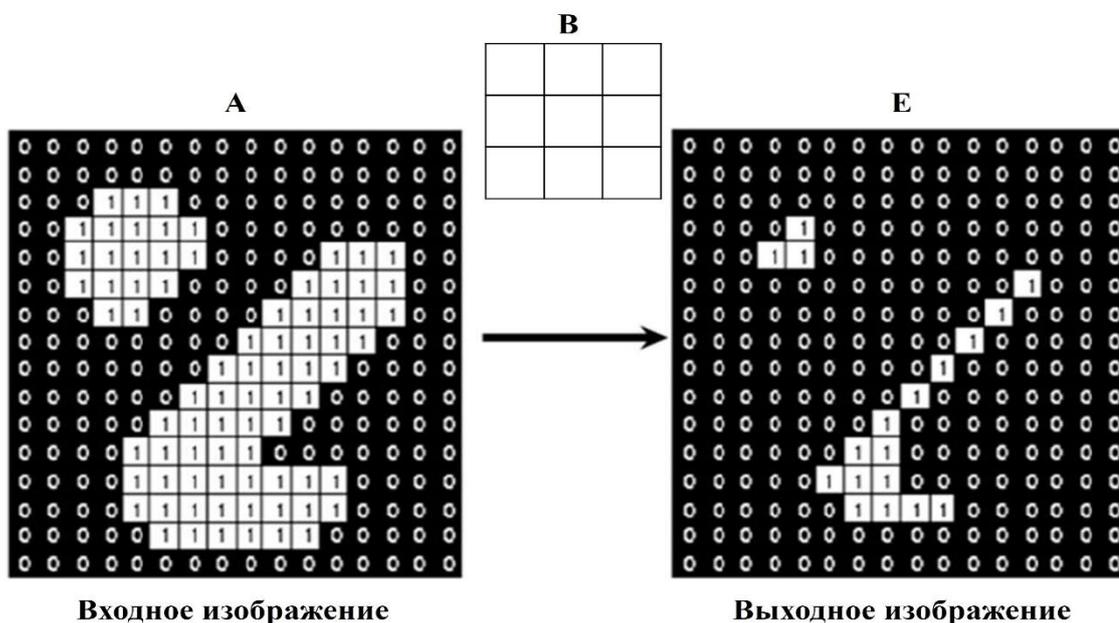


Рисунок 2.4 – Пример морфологической операции эрозии на бинарном изображении

Другими типами морфологических операций, используемых при обнаружении дефектов керамической плитки по ее изображению, являются операции открытия и закрытия [62, 95].

Операция открытия представляет собой конструкцию, которая формируется за счет объединения операций эрозии и расширения. В процессе открытия предметы подвергаются разделению. Первоначальный процесс — это эрозия, за которой следует расширение. В результате процесс открытия смягчает контуры объекта на изображении (рисунок 2.5).

Операция закрытия представляет собой комбинацию операции расширения, за которой следует эрозия. В результате операции закрытия предметы приближаются друг к другу. Таким образом операция закрытия служит цели слияния мелких несплошностей и удлиненных зазоров, а также устранения мелких пустот и заполнения недостающих участков (рисунок 2.6).

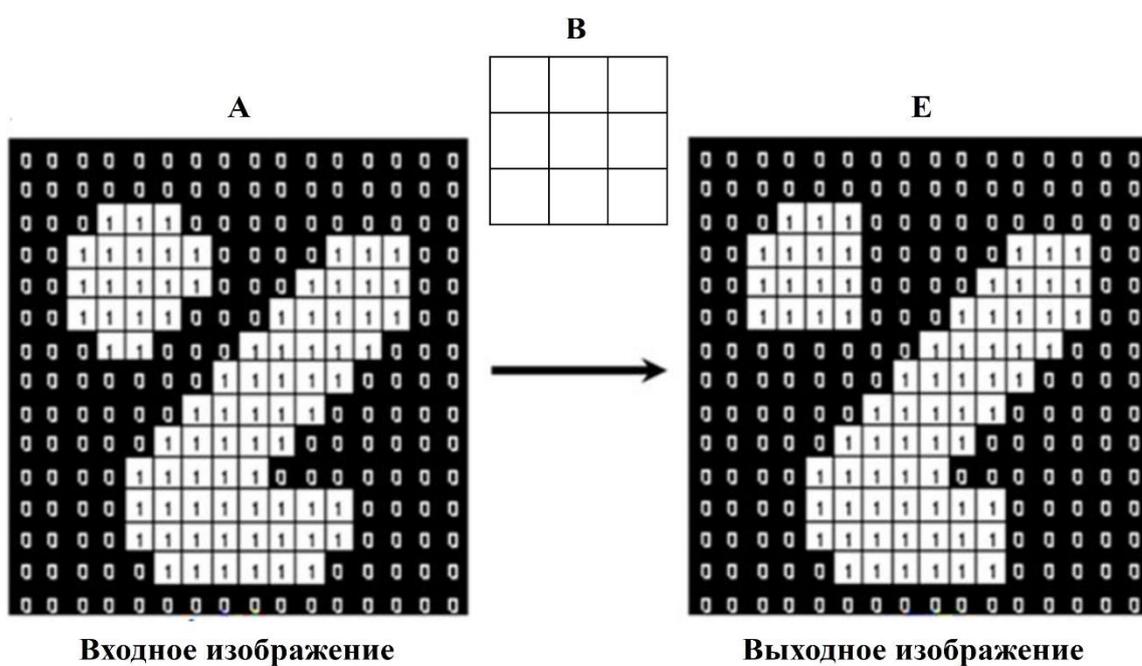


Рисунок 2.5 – Пример морфологической операции открытия на бинарном изображении

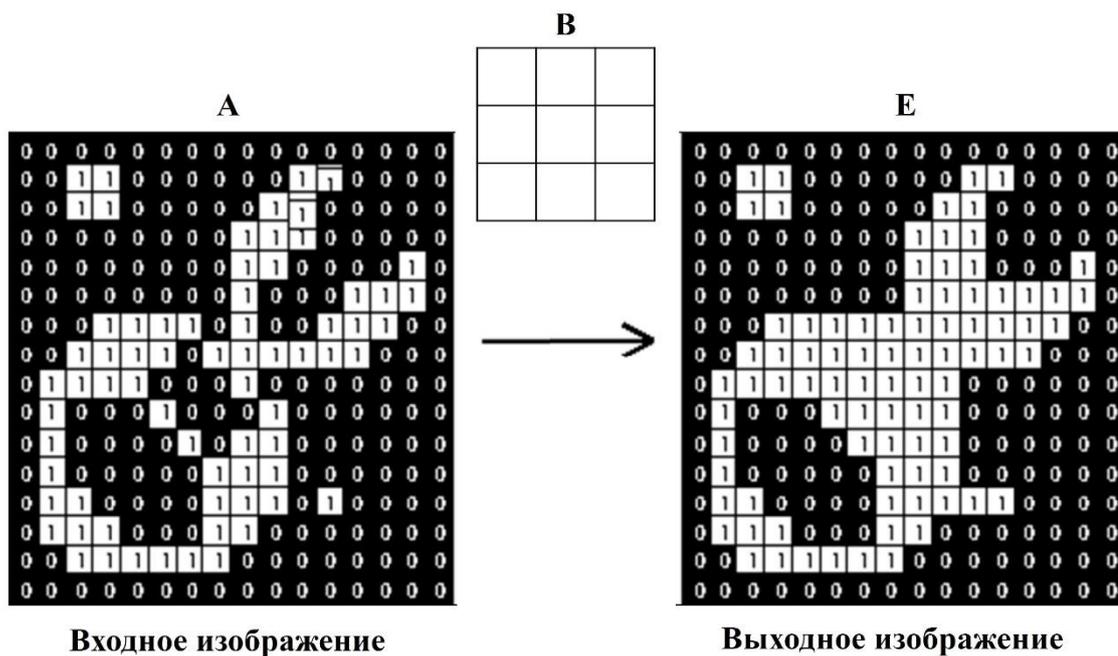


Рисунок 2.6 – Пример морфологической операции закрытия на бинарном изображении

Морфологические операции использовались в основном для выделения признаков формы при идентификации дефектов [133,102]. Кроме того, морфологические операции применяются как подготовительные для алгоритмов

непосредственного обнаружения механических дефектов и блобов на поверхности плитки. Например, в работе [21] морфологическая операция закрытия применяется к результатам обнаружения границ. Закрытие, как отмечалось выше, приводит к сглаживанию контура объекта. Закрытие, как правило, устраняет узкие разрывы, устраняет небольшие отверстия и заполняет пробелы в контуре.

В работе [106] представлена система обнаружения дефектов, работающая в режиме реального времени для выявления трещин с помощью оператора эрозии. Точность алгоритма зависит от порогового значения, которое варьируется в зависимости от типа дефектов и изображений простых и текстурированных плиток. Процесс выделения морфологических ребер для обнаружения различных дефектов затратен по времени [95].

Методы обнаружения границ используются для определения четких границ, разделяющих различные части изображения. Поверхностные разломы часто проявляют изменения в интенсивности или текстуре по сравнению с прилегающей областью, что приводит к появлению обнаруживаемых краев. Известные алгоритмы обнаружения границ включают в себя детектор границ Кэнни и оператор Собеля и широко используются при предварительной обработке изображений плитки [70,126]

Алгоритм обнаружения краев Кэнни — это вычислительный метод, который преобразует «размытые» края изображения на основе величин градиента в «острые» края. Это достигается за счет сохранения всех локальных максимумов при исключении всех других немаксимальных точек. В алгоритме используется метод, известный как двойная пороговая обработка и отслеживание фронтов посредством гистерезиса, чтобы обнаружить и сохранить как сильные, так и слабые фронты в результирующем выходе. Алгоритм обнаружения границ Кэнни содержит 5 шагов (рисунок 2.7):

1. Сглаживание изображения для удаления шума.
2. Поиск градиентов. Границы отмечаются там, где градиент изображения приобретает максимальное значение.

3. Подавление немаксимумов. Только локальные максимумы отмечаются как границы.

4. Двойная пороговая фильтрация. Потенциальные границы определяются порогами.

5. Трассировка области неоднозначности. Итоговые границы определяются путём подавления всех краёв, несвязанных с определенными (сильными) границами.

Для подавления шума используется сглаживание чаще всего с использованием фильтра Гаусса – матричного фильтра, для расчета которого используется Гауссиан с настраиваемыми параметрами (2.3):

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.3)$$

где x, y – координаты точки, а σ – СКО – параметр, управляющий степенью размытия. Новое значение каждого пикселя устанавливается равным средневзвешенному значению окрестности этого пикселя.

Далее алгоритм Кэнни производит поиск градиентов, используя оператор Собеля. Начальный этап включает оценку градиента как в направлении x , так и в направлении y посредством использования ядер как в уравнении (2.4):

$$K_{GX} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -2 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad K_{GY} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

Градиенты в направлениях x и y обозначаются как G_x и G_y соответственно. Тем не менее, границы, как правило, широки, поэтому нет точности в определении их конкретного местоположения. Чтобы облегчить это определение, необходимо определить и сохранить направление ребер, как показано в уравнении (2.5):

$$\theta = \arctan\left(\frac{|G_y|}{|G_x|}\right), \quad (2.5)$$

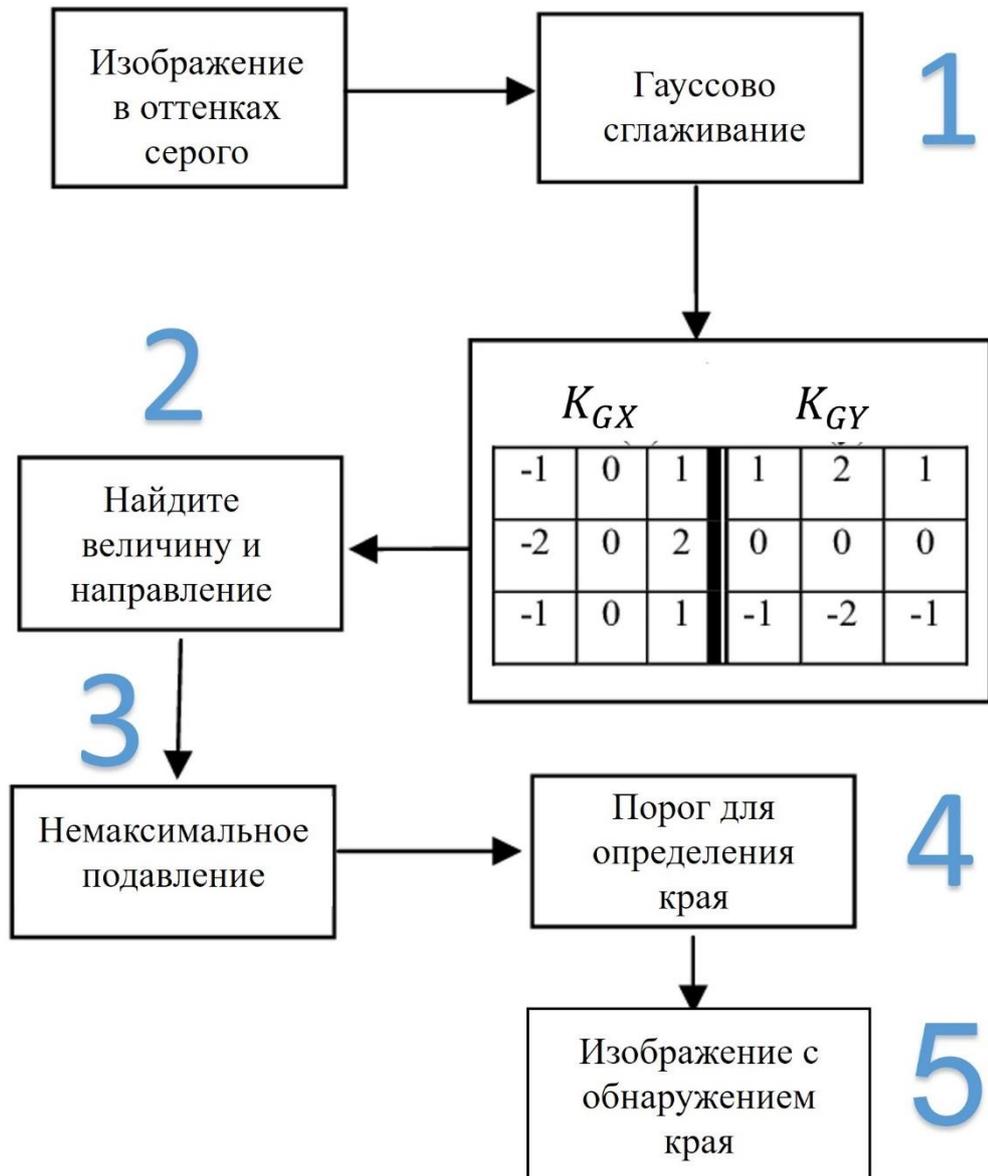


Рисунок 2.7 – Последовательность работы алгоритма обнаружения границ Кэнни

Подавление не-максимумов — это вычислительный подход, используемый для повышения качества градиентных изображений путем избирательного сохранения локальных максимумов и устранения немаксимальных значений, что превращает размытые края в резкие. Алгоритм состоит из процесса, в котором направление градиента округляется до ближайших 45 градусов. Затем он переходит к сравнению текущего пикселя с пикселями как в положительном, так и в отрицательном направлении градиента.

Метод обнаружения границ Кэнни использует технику, известную как двойная пороговая обработка, чтобы различать подлинные и ложные края внутри изображения.

После получения величины и направления градиента проводится комплексное исследование изображения для исключения любых нежелательных пикселей, которые не являются частью края. Для этого каждый пиксель исследуется, чтобы определить, имеет ли он самое большое значение в окружающей его области в направлении градиента, например, на рисунке 2.8 точка А расположена на вертикальной границе, направление градиента перпендикулярно краю. Точки В и С расположены в противоположных направлениях градиента. Точка А оценивается вместе с точками В и С, чтобы определить, является ли она локальным максимумом. Если условие выполнено, оно учитывается на следующем этапе; в противном случае оно игнорируется (устанавливается на ноль). По сути, результатом является бинарное изображение с «узкими краями» [98].

Метод Кэнни подходит для прецизионных задач, поскольку он обеспечивает субпиксельную точность при точной локализации границ. Тем не менее, поскольку для этого требуется несколько этапов, это может быть объемным в вычислительном отношении, а потому малоприспособным для приложений реального времени [98,112].



Рисунок 2.8 – Иллюстрация подавления не-максимумов [74].

Обнаружение границ Кэнни чувствительно к шуму изображения, поэтому перед обнаружением краев необходимо сглаживание, чтобы снизить шум и повысить качество результатов обнаружения краев. Кроме того, этапы определения порогов и проведение сглаживания включают настройку параметров, что может

быть достаточно сложной процедурой и потребовать использования метода проб и ошибок, что также затрудняет использование метода при работе в реальном времени.

Дефекты поверхности керамической плитки также предлагали обнаруживать с помощью метода анализа текстуры, а именно с помощью матрицы совпадения уровней серого (GLCM) [69]. Это - статистический метод, который дает представление о повторении уровней серого при определенном расстоянии смещения и ориентации между двумя пикселями. Эта функция использует по умолчанию восемь уровней серого.

Матрица GLCM состоит из пар координат, которые соответствуют уровням серого двух пикселей. Эти пиксели разделены определенным смещением и расположены под определенным углом. Информация, содержащаяся в ячейке матрицы GLCM, указывает относительную частоту появления пар пикселей в изображении, которые соответствуют этой конкретной ячейке.

Условное расстояние пикселя по отношению к эталонному пикселю таково, что оно постепенно увеличивается вправо с увеличением количества столбцов и вниз с увеличением количества строк в матрице GLCM. Для эффективного анализа изображений с разнообразными текстурами предполагается использование различных смещений и ориентаций. Этот подход позволяет исследовать статистические свойства, характерные для различных смещений и ориентаций. Значение пар смещений можно описать следующим образом: пара со смещением 0 градусов обозначается как $[0D]$, пара со смещением 45° обозначается как $[-DD]$, пара со смещением 90° представляется как $[-D0]$, а пара со смещением на 135° - как $[-D-D]$. В этих представлениях D представляет расстояние между двумя пикселями.

Таким образом, матрица совпадения уровней серого (GLCM) — это представление, которое количественно определяет частоту появления пар соседних пикселей с определенными уровнями серого на изображении; направления смещения матрицы совпадения уровней серого (GLCM) обозначаются парами пикселей, расположенных под углами 0° , 45° , 90° и 135° как в рисунке 2.9.

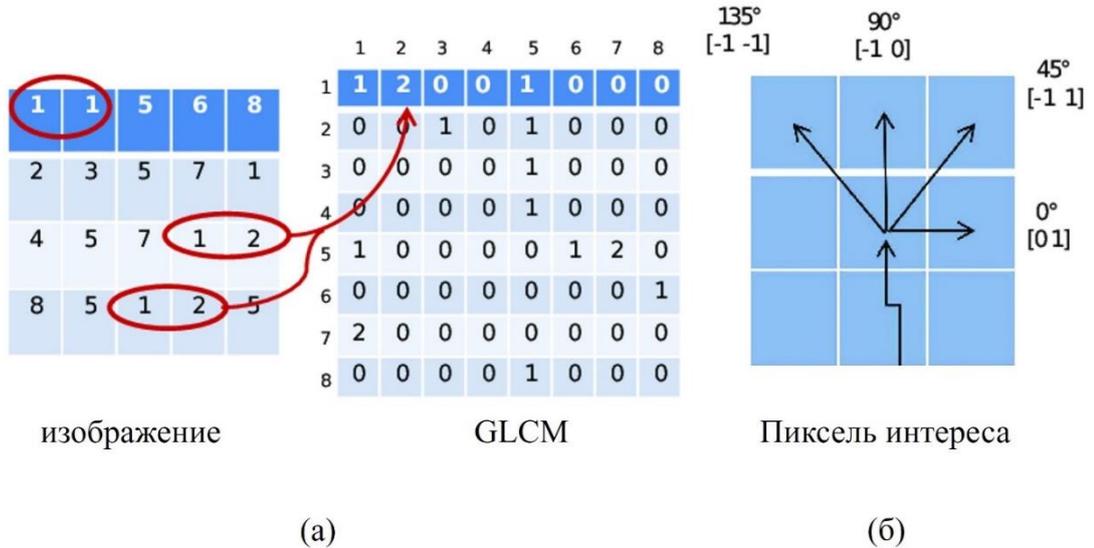


Рисунок 2.9 – (а) - Матрица совпадения уровней серого (GLCM); (б) - направления смещения матрицы GLCM обозначаются парами пикселей, расположенных под углами 0°, 45°, 90° и 135°.

Классификация дефектов осуществляется с использованием четырех статистических дескрипторов второго порядка: контраста, корреляции, однородности и энергии [69].

Сопоставляя самые высокие и самые низкие значения непрерывного набора пикселей, контраст количественно определяет пространственную частоту изображения и величину локальных изменений в изображении (2.6):

$$\text{Контраст} = \sum_{i,j=0}^{N-1} |i - j|^2 p(i, j), \quad (2.6)$$

Сумма квадратов элементов матрицы GLCM представляет собой энергию (иногда называемую однородностью или вторым угловым моментом) (2.7):

$$\text{Энергия} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i, j)^2, \quad (2.7)$$

Гомогенность количественно определяет дисперсию элементов внутри матрицы GLCM по отношению к ее диагонали и достигает своей наивысшей величины, когда все элементы обладают равными значениями (2.8):

$$\text{Гомогенность} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{p(i, j)}{1 + (i - j)^2}, \quad (2.8)$$

Взаимосвязь между пикселем и окружающими его пикселями на изображении измеряется корреляцией (2.9):

$$\text{корреляция} = \frac{\sum [(x - \mu_x) / \sigma_x][(y - \mu_y) / \sigma_y]}{n}, \quad (2.9)$$

где i — интенсивность одного пикселя, а j — интенсивность следующего. Символ Σ обозначает операцию суммирования, которая означает требование агрегировать значения, связанные с каждой парой соответствующих значений x и y , переменные μ_x , μ_y и σ_x , σ_y — их средние значения и СКО соответственно. Переменная n указывает количество точек или пар данных, доступных для переменных x и y ; $p(i,j)$ — нормализованная запись в строке i и столбце j GLCM [71].

Эти статистические показатели могут использоваться для обнаружения и описания текстур и, в нашем случае, дефектов на изображениях. Поскольку GLCM устойчива к изменениям яркости и освещенности, ее можно использовать для анализа при различных условиях освещения. Однако она существенно зависит от разрешения изображения. Определение правильных параметров, включая расстояние и угол между парами пикселей, может быть сложным, времязатратным. При анализе множества объектов или больших изображений возникает затратное в вычислительном отношении извлечение признаков текстуры (в нашем случае — наличия дефекта).

Для обнаружения дефектов на поверхности керамических плиток также, как и для контроля уголковых дефектов (п.2.1), могут использоваться нейронные сети. Использование нейронных сетей для контроля дефектов на поверхности керамической плитки требует наличия массива плиток с определенными дефектами и без них, что необходимо для обучения НС [131].

2.3 Методы обнаружения цветовых дефектов поверхности однотонной керамической плитки

Первичные этапы изготовления плитки механизированы, после чего операторы проводят визуальный осмотр на наличие дефектов на лицевой поверхности плитки. Операторы испытывают значительную нагрузку на зрение, особенно при отслеживании отклонений цвета и других дефектов цвета [89]. Эти дефекты, даже в случае производства однотонной плитки, могут возникнуть при незначительных изменениях состава ангобов или глазури в процессе глазурования и обжига. К дефектам такого рода относятся пятна, кляксы, размытия и вариации

оттенков на поверхности плитки [21]. Поэтому, весьма вероятно, что их присутствие наблюдается на стадиях обжига и глазурования [125].

В последнее время предпринимаются попытки автоматизировать этап окончательной проверки плитки. Эта автоматизация не только освобождает операторов от рутинной и утомительной работы, но также позволяет осуществлять контроль в режиме реального времени даже при более высоких скоростях конвейера [140, 83].

Однако обычно начинается и, к сожалению, зачастую заканчивается контроль керамической плитки на производственной линии выявлением дефектов, вызванных механическими факторами, такими как царапины и сколы. При этом, как отмечалось выше, используются различные методы, такие как обнаружение границ, усиление контраста, фильтрация шума и морфологические операции [105, 107]. Эти методы также позволяют выявить дефекты цвета, такие как пятна, вызванные скоплением глазури, размер которых обычно составляет несколько миллиметров [21].

Однако эти методы не позволяют выявить другие дефекты цвета плитки, например, типа неравномерности цвета на поверхности плитки (часто встречающиеся у одноцветной плитки) или вариации цветовых оттенков внутри партии плиток.

Для автоматического обнаружения цветовых дефектов, как это следует из анализа литературных источников, требуется решение нескольких проблем, в частности, нужно выбрать систему цветовых координат, которая наилучшим образом отображает цветовое восприятие человека. Это связано с тем, что проблемы, связанные с цветовым восприятием человека, проявляются при установке плиток рядом друг с другом.

Чтобы выявить дефекты цветовых тонов керамической плитки, необходимо описать цвета цифрового изображения плитки с помощью той или иной математической структуры, известной как цветовое пространство, причем каждое пространство имеет свои особенности и характеристики. Выбор подходящего цветового пространства оказывает существенное влияние на точность и

эффективность используемых методов и алгоритмов оценки цветных дефектов [22, 30].

Реализация выбранного метода описания цветового пространства для определения цветового тона керамической плитки влечет за собой различные практические проблемы. К ним относятся такие факторы, как условия освещения, калибровка цвета, шумоподавление и т.п. Выбор цветового пространства оказывает непосредственное влияние на свойства, которые извлекаются для последующего изучения, например, цветовые гистограммы или цветовые градации [22,30]..

Модель RGB (рисунок 2.10) широко используется в области компьютерной графики для многих приложений, таких как цветовая фильтрация, сегментация и обработка изображений. Пользовательский интерфейс программного обеспечения предназначен для облегчения создания цветов и манипулирования ими, что делает его очень доступным и удобным для пользователя. Следовательно, он считается оптимальным выбором для всех, кто занимается рисованием и раскрашиванием. Тем не менее, существует множество недостатков, связанных с его применением при обработке изображений. К ним относится создание нелинейного и прерывистого пространства, что затрудняет точное отслеживание изменений цвета. Кроме того, метод очень чувствителен к изменениям освещенности, что еще больше усложняет анализ и интерпретацию изображений [75].

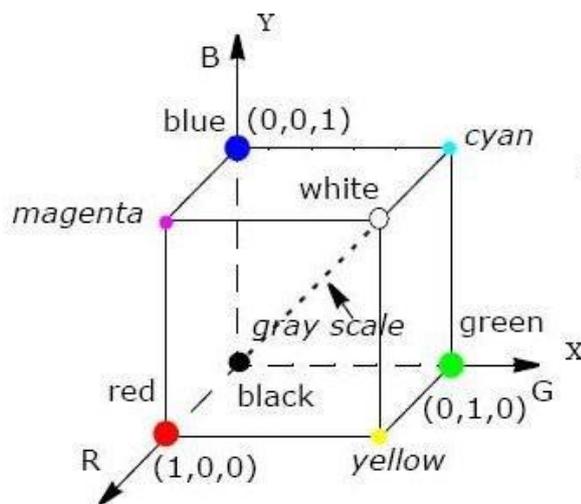


Рисунок 2.10 – Модель цветового пространства RGB [75]

Чтобы уменьшить влияние освещенности, предложено использовать нормированную модель RGB так, что сумма нормированных цветов всегда равна единице (2.10), (2.11) и (2.12) [34, 37]:

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad (2.10)$$

$$g = \frac{G}{R+G+B} \quad (2.11)$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} \quad (2.12)$$

Однако такое преобразование снижает возможности обнаружения объектов, т.к. при этом снижается контрастность.

Перцептивные цветовые пространства строятся на основе моделей, которые представляют цвет в соответствии с человеческим восприятием. Для достижения этой цели каждый цвет обозначается отдельным тоном или оттенком, степенью насыщенности оттенка и интенсивностью [63]. К этой категории относятся модели HSV (Hue, Saturation, Value), HSL (Hue, Saturation, Lightness) и HSI (Hue, Saturation, Intensity). Все эти цветовые модели имеют схожее описание цветового оттенка, хотя и различаются с точки зрения определений насыщенности и освещения (рисунок 2.11б) [75,37].

Модели HSV и HSL, в частности, одинаково интерпретируют оттенок (2.13):

$$H = \begin{cases} 60 * \left(\frac{G-B}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)} \right) & R = \max(R, G, B) \\ 60 * \left(\frac{2+(B-R)}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)} \right) & G = \max(R, G, B), \\ 60 * \left(\frac{4+(R-G)}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)} \right) & B = \max(R, G, B) \end{cases} \quad (2.13)$$

Однако модель HSV по-другому определяет насыщенность и интенсивность (component Value) (2.14) и (2.15):

$$S = \frac{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)}{\max(R,G,B)} \quad (2.14)$$

$$V = \max(R, G, B) \quad (2.15)$$

Поскольку HSV имеет более реалистичное геометрическое представление и позволяет лучше манипулировать цветом и оттенком, эту модель выбирают чаще.

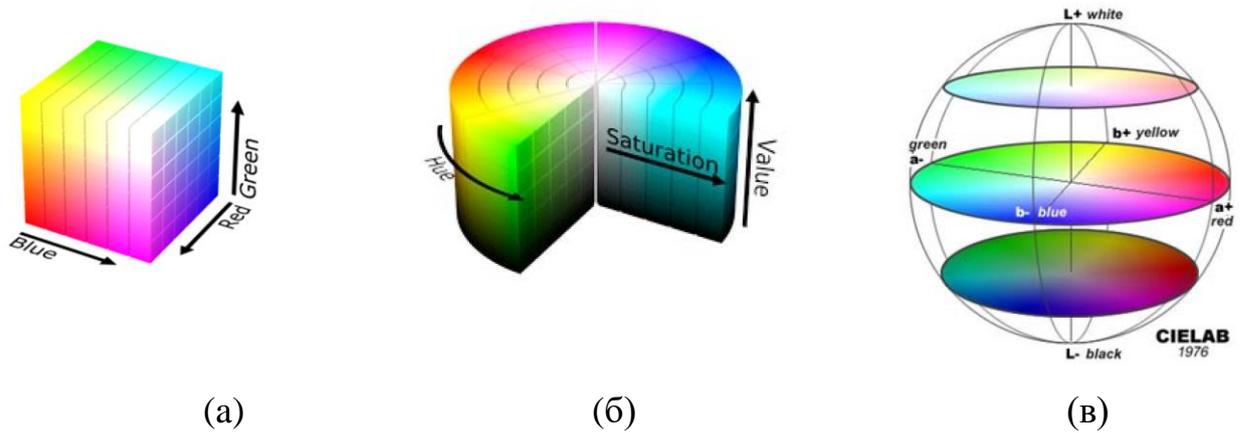


Рисунок 2.11– а) Модель цветового пространства RGB; б) Модель цветового пространства HSV ; в) Цветное изображение в цветовом пространстве CIE Lab[91]

Большей частью эти модели используются для оценки цветов объектов, сравнения цветов и т.п. операций. Однако, в литературе сообщается о попытках использования подобных моделей для выполнения операций обработки изображений. Так в работе [113] оценивалось качество обнаружения краев керамической плитки алгоритмом Собеля по ее изображению в цветовом пространстве модели HIS, которая фактически очень близка к модели HSV. Эксперимент показал, что, хотя при этом удаляется много ложных краев и краевой эффект становится более четким, но наблюдались потери кромок из-за появления разрывов.

Представление оттенка, которое обычно выражается в виде угла наклона окружности, создает проблемы для восприятия цветовых пространств. Это приводит к неравномерности оттенка цвета, которую можно исправить, используя два диапазона для оттенка в точке перезапуска — обычно это красный цвет.

Международная комиссия по освещению (CIE) создала цветовые модели CIE RGB, CIE XYZ и CIE Lab, основанные на физике света. Эти модели объясняют, как при заданной интенсивности освещения цвета могут проявляться на плоскости. В то время как CIE Lab является косвенным производным от CIE XYZ. CIE XYZ и CIE RGB рассчитываются с использованием длины волны света из физического представления цвета. Популярная модель семейства CIE Lab (иногда называемая $L^*a^*b^*$ - рисунок 2.11 в) состоит из двух хроматических или цветовых компонентов (a и b) и одного компонента яркости. Уравнения можно использовать для

получения Lab из базовой модели CIE XYZ (CIE XYZ — универсальное цветовое пространство, представляющее цветовой спектр, видимый человеку), где $X_n=95,047$; $Y_n=100,0$; $Z_n=108,883$ (2.16), (2.17) и (2.18) [37]:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (2.16)$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \quad (2.17)$$

$$b^* = 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \quad (2.18)$$

Теоретически модель CIELab может представлять бесконечное количество хроматических комбинаций; она также может отображать цвета, которые другие модели не могут передать. К сожалению, в отличие от RGB или перцептивных цветовых пространств, цветовое пространство, которое она создает, не воспринимается людьми естественным образом [37]. Тем не менее для автоматического сравнения оттенков и интенсивностей окраски плиток в процессе производства эта модель достаточно эффективна.

В работе [143] сравнение цвета плиток на производственной линии предложено проводить с помощью цветовых гистограмм, даже используя стандартную цветовую модель RGB. Как отмечается в работе цветовые гистограммы занимают много памяти и их сравнение также времязатратно, так, например, для сравнения двух гистограмм (т.е. 32 Мбайт памяти) необходимо проанализировать все ячейки памяти, соответствующие всем цветовым комбинациям. Поэтому авторами было предложено для сравнения цветовых гистограмм несколько критериев, а именно: норма $L1$, норма $L2$, расстояние Бхаттачарья, расстояние Матусита, критерий χ^2 и коэффициент корреляции.

Норма $L1$ - это сумма абсолютных разностей между соответствующими элементами двух гистограмм; норма $L2$ - это сумма квадратов разностей между соответствующими элементами двух гистограмм; расстояние Бхаттачарьи - это мера сходства двух гистограмм; расстояние Матуситы - это мера расстояния между двумя распределениями; расхождение - это сумма абсолютных разностей между элементами двух гистограмм (в формулах ниже: s_i - это количество событий в

каждом бине гистограммы для первого сравниваемого изображения, r_i - количество событий в том же бине для второго изображения) (2.19), (2.20), (2.21), (2.22), (2.23), (2.24), (2.25) и (2.26):

$$L1 = \sum_i |s_i - r_i| \quad (2.19)$$

$$L2 = \sqrt{\sum_i (s_i - r_i)^2} \quad (2.20)$$

$$B = -\ln \sum_i \sqrt{s_i r_i} \quad (2.21)$$

$$M = \sqrt{\sum_i (\sqrt{s_i} - \sqrt{r_i})^2} \quad (2.22)$$

$$D = \sum_i (s_i - r_i) \ln \frac{s_i}{r_i} \quad (2.23)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_i \min(s_i, r_i)}{\sum_i r_i} \quad (2.24)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_i (s_i - r_i)}{s_i + r_i} \quad (2.25)$$

$$\text{Коэффициент корреляции} = \frac{\sum_i (s_i - \bar{s}_i)(r_i - \bar{r}_i)}{\sqrt{\sum_i (s_i - \bar{s}_i)^2 \sum_i (r_i - \bar{r}_i)^2}} \quad (2.26)$$

Чтобы уменьшить проблемы с определением пороговых значений, так как специалисты зачастую не могут задать порог, определяющий отнесение отслеживаемых плиток к той или иной категории, то для облегчения определения порога лучше использовать индекс с ограниченным диапазоном возможных значений, например, в пределах $[0,1]$ или $[-1,1]$. Этому условию удовлетворяют коэффициенты корреляции гистограмм и тесты их пересечения [143]. Экспериментальное исследование метода показало, что коэффициент корреляции оказался наиболее подходящим для сравнений цветных гистограмм, т.к. обеспечил наиболее стабильную производительность, позволил априорно определять пороговые значения, к тому же он измеряет сходство между гистограммами, а не их несходство, как критерий χ^2 .

Коэффициент корреляции также использовался в работе [73], но метод обнаружения цветных дефектов был другой. По-прежнему использовалась модель RGB, но обработка велась отдельно для красного, зелёного и синего цветов. В результате по изображению плитки строили три матрицы размерностью $m \times n$. Далее вычислялась корреляция для каждого элемента в этих трех матрицах R, G и B

между исходными эталонными изображениями керамической плитки (изображение плитки без дефектов) и изображением тестируемой плитки. Изменением порога регулировалась чувствительность к небольшим вариациям оттенка.

Однако все-таки в большинстве работ сравнение цветов производилось при преобразовании изображения из пространства RGB в цветовое пространство, описываемое одной из перцептивных моделей, чаще моделью HIS [88,138,139,144].

Также можно использовать Обобщенную матрицу совпадения уровней серого (GLCM). Цветовые характеристики содержат ценную информацию. цветное изображение всегда разделено на три отдельные цветовые плоскости: красную, зеленую и синюю. Статистические параметры, включая среднее значение, медиану и стандартное отклонение, могут быть рассчитаны для каждой цветовой плоскости. Эти характеристики можно сформулировать следующим образом: Среднее значение рассчитывается путем суммирования всех наблюдаемых результатов выборки и последующего деления этой суммы на общее количество событий (2.27):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.27)$$

Медиана определяется как центральное значение отсортированного списка результатов выборки.

Стандартное отклонение — это статистическая мера, которая количественно определяет отклонение точек данных от среднего значения(2.28):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (2.28)$$

где n — общее количество событий, а x — наблюдаемый результат [69]

2.4 Защитные свойства образцов плитки

Керамическая плитка благодаря своей высокой плотности и атомному номеру может использоваться для защиты от радиации [23]. Оценить эффективность защитных материалов в снижении радиационного воздействия можно путем измерения атомного номера материалов. Поскольку атомный номер не может быть просто представлен одним значением, как в случае с чистыми элементами, было введено понятие «эффективного атомного номера» (Z_{eff}) [118].

Чтобы оценить значение Z_{eff} образца плитки, фракционный вес каждого элемента, присутствующего в смеси, определяется с помощью энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDX).

Для вычисления этого параметра нужно определить относительный вес каждого элемента в смеси и число электронов на грамм каждого элемента по формуле (2.29):

$$N_e = \frac{N_A Z}{A_w(W_i)} \quad , \quad (2.29)$$

где N_A = число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$), Z = атомный номер, A_w = атомный вес и W_i = доля веса каждого элемента смеси.

Долевой вклад электронного числа (a) каждого элемента в смеси можно найти по формуле (2.30):

$$a = \frac{N_e}{N_{et}} \quad , \quad (2.30)$$

где N_{et} – общее число электронов смеси (т.е. $N_{e1} + N_{e2} + N_{e3} + \dots$).

Используя уравнение, предложенное Мейнордом, вычислим эффективный атомный номер смеси (2.31) [109]:

$$Z = (a_1 Z_1^m + a_2 Z_2^m + \dots + a_n Z_n^m)^{\frac{1}{m}} \quad , \quad (2.31)$$

где a_n - массовые доли каждого элемента в исследуемой смеси, Z_n = атомный номер каждого элемента, содержащегося в смеси, m = принятое значение для фотона, обычно 2,94 [141].

Одним из потенциальных ограничений, связанных с использованием эффективного атомного номера Z_{eff} при расчете ослабления гамма-лучей для керамической плитки, является потенциальное несоответствие между рассчитанным Z_{eff} и истинным поведением гамма-лучей внутри материала. Эффективный атомный номер служит ценным показателем для предварительных оценок и сравнительного анализа. Однако, стремясь к более точным расчетам, необходимо обязательно учитывать дополнительные элементы, такие как состав и плотность материала.

Процесс измерения коэффициента ослабления (линейного и массового) гамма-излучения в керамической плитке с помощью детекторов HPGe или NaI включает в себя проверку правильности калибровки детектора, выбор соответствующих радиоактивных источников, излучающих гамма-излучение различной энергии. Обычные источники, используемые при работе с гамма-излучениями, включают Am241 (59 КэВ), Cs137 (661 КэВ) и Co60 (1173 КэВ и 1332 КэВ).

Радиоактивный источник размещают на известном расстоянии от образца керамической плитки и с помощью детектора измеряют интенсивность гамма-излучения, испускаемого источником. Это измерение представляет собой начальную интенсивность I_0 гамма-излучения. Затем образец керамической плитки вводится между радиоактивным источником и детектором. Измеряется интенсивность гамма-излучения I , которое проходит через плитку и достигает детектора за то же время счета.

Керамические плитки размещаются на некотором расстоянии от источника гамма-излучения во время измерения коэффициента ослабления, чтобы уменьшить эффекты помех и рассеяния, обеспечить однородное поле излучения и избежать насыщения детектора гамма-излучением высокой интенсивности.

Далее рассчитываются радиологические параметры: линейный коэффициент ослабления, массовый коэффициент ослабления, HVL (толщина материала, при которой интенсивность прошедшего фотона становится половиной первоначальной интенсивности) и RPE (эффективность радиационной защиты). Коэффициент линейного ослабления (m) измеряет изменение интенсивности из-за поглощения и рассеяния в зависимости от траектории луча. Часто используемый на практике независимый от плотности массовый коэффициент ослабления рассчитывается по уравнению (2.32) [141].

$$\mu/\rho = \left(\frac{1}{\rho x}\right) \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.32)$$

Для данной энергии, чем ниже HVL плитки, тем лучше экранирующая способность этой конкретной плитки (2.33) [17].

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (2.33)$$

RPE исследованных образцов плитки определяли по уравнению:

$$RPE = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 \quad (2.34)$$

Измерения и расчеты повторяются для разных радиоактивных источников с различной энергией гамма-излучения для получения диапазона коэффициентов ослабления для разных энергетических уровней [14].

Здесь следует отметить, что на точность измерений и расчетов могут влиять такие факторы, как эффективность детектора, фоновое излучение и конкретный состав керамической плитки. Для минимизации помех и повышения точности измерений следует использовать надлежащие методы экранирования и вычитания фона.

Предыдущие исследования изучали эффективность керамической плитки и материалов в защите от радиации, но не рассматривали и не обсуждали поведение гамма-лучей в керамических материалах [7,68].

Также в литературе описаны исследования самоизлучения (фона) керамической плитки, вызванные наличием радиоактивных элементов в материале плитки [85, 124]. Поскольку концентрации активности урана, тория и калия варьируются от одного материала к другому в зависимости от сырья (кварц, полевой шпат, глина, циркон, каолин, гросс, боксит, глинозем, бадалит, самородок, доломит и красная глина) фоновое излучение также может меняться. Также, материалы могут содержать соли урана для окраски. Исследования подчеркивают важность учета естественной радиоактивности керамических материалов при использовании керамической плитки в качестве защиты от радиации.

2.5 Выводы по главе 2. Постановка задачи исследования

1. Анализ литературы по выявлению дефектов керамической плитки показал, что задача разработки комплексного алгоритма, способного эффективно обнаруживать различные дефекты поверхности керамической плитки в реальном времени, по-прежнему является актуальной. При этом система диагностики,

выполняющая обнаружение дефектов керамической плитки, должна работать в реальном времени, чтобы обеспечить высокую эффективность производственного процесса. Система должна успешно работать в производственных условиях, при различных условиях освещения, в частности, различиях в интенсивности получаемых изображений плитки с конвейера.

2. Как следует из анализа литературных источников большинство алгоритмов обнаружения дефектов керамической плитки не рассчитаны на использование в реальном времени, используя, хотя и эффективные, но времяёмкие процедуры, в частности морфологические преобразования. При обнаружении цветowych дефектов также использовался целый ряд времяёмких процедур.

3. В большинстве случаев при контроле керамической плитки использовались эталонные плитки, что с одной стороны, несколько упрощало процедуры обнаружения дефектов сравнением контролируемых параметров эталонной и тестируемой плитки. Но с другой стороны, увеличивало время на дополнительные настроечные действия при смене марки, типа и даже более мелких изменений в производственном процессе, т.к. требовало введения новых эталонов в систему контроля. Эта же проблема возникает и при использовании методов, требующих обучения, в частности, нейронных сетей.

В связи с этим, **целью** данной работы, является разработка структуры, методики и алгоритмического обеспечения системы диагностики нарушений и выявления дефектов при промежуточном и выпускном контроле керамической плитки в реальном времени, что обеспечит снижение брака за счет раннего их обнаружения.

Для достижения указанной цели в работе должны быть поставлены, обоснованы и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ производственного процесса с целью выявления возможных дефектов керамической плитки, разработана их классификация и сформированы требования к системе диагностики;

2. Проанализированы существующие методы обнаружения и идентификации дефектов с точки зрения оценки удовлетворения современным требованиям;

3. Разработаны комплексные методы и алгоритмы обнаружения и идентификации дефектов керамической плитки;

4. Разработано соответствующее программное обеспечение и проведено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов и программ;

5. На основе экспериментального исследования предложена методика ускоренной оценки защитных свойств плитки от гамма-излучения.

При этом, учитывая большое количество стандартных операций, участвующих в процедурах обработки изображений контролируемой керамической плитки, представляется целесообразным:

– максимально использовать открытые библиотеки алгоритмических примитивов, в частности OpenCV, PyCharm, а при применении популярного языка программирования Python 3.7, и большую библиотеку Python;

– в качестве рабочей среды выбрать PyCharm 2021.3.1 (Community Edition) из-за ее широких возможностей и простого в использовании интерфейса.

ГЛАВА 3 ПРЕДЛАГАЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ

3.1 Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты

Как уже говорилось выше, несмотря на то что большинство этапов производства керамической плитки осуществляются автоматически, заключительный этап производства все еще включает ручную инспекцию, чтобы отсортировать плитки по разным категориям или отклонить те, которые имеют дефекты. Для автоматизации процесса контроля дефектов плитки прежде всего необходимо получить ее изображение. Если в настоящее время как с аналоговыми, так и с цифровыми цветными камерами особых проблем нет, то для получения высококачественных снимков плитки на конвейере в реальном времени, на которых бы четко были видны контролируемые дефекты, необходимо создать соответствующие условия. Прежде всего это касается организации освещения поля съемки.

Для обеспечения высококачественного визуального контроля керамических плиток при использовании системы машинного зрения важно использовать правильное освещение. Вместо использования обычных ламп накаливания или газоразрядных ламп, для обеспечения необходимого освещения целесообразно применить светодиоды (Light Emitting Diodes или LED).

Использование технологии LED для освещения имеет множество преимуществ по сравнению с традиционными источниками света. Светодиоды легко объединять в панели и располагать их так, чтобы обеспечивать как можно более равномерное освещение поля съемки. [97].

При установке светодиодных панелей, как показала практика, лучше расположить их на сторонах вокруг камеры, т.е. над боковыми областями наблюдаемой плитки, а не непосредственно над ней (рисунок 3.1). Это помогает избежать проблем с отражением от поверхности плиток и дает лучшие результаты. Благодаря использованию такого освещения с помощью светодиодных панелей

можно наблюдать малозаметные повреждения и достичь высокого уровня контроля качества керамических плит.

Для освещения рабочей зоны предложено использовать светодиоды с нейтральным или холодным белым светом с силой света 3,4 кд и под углом 15° к вертикали.

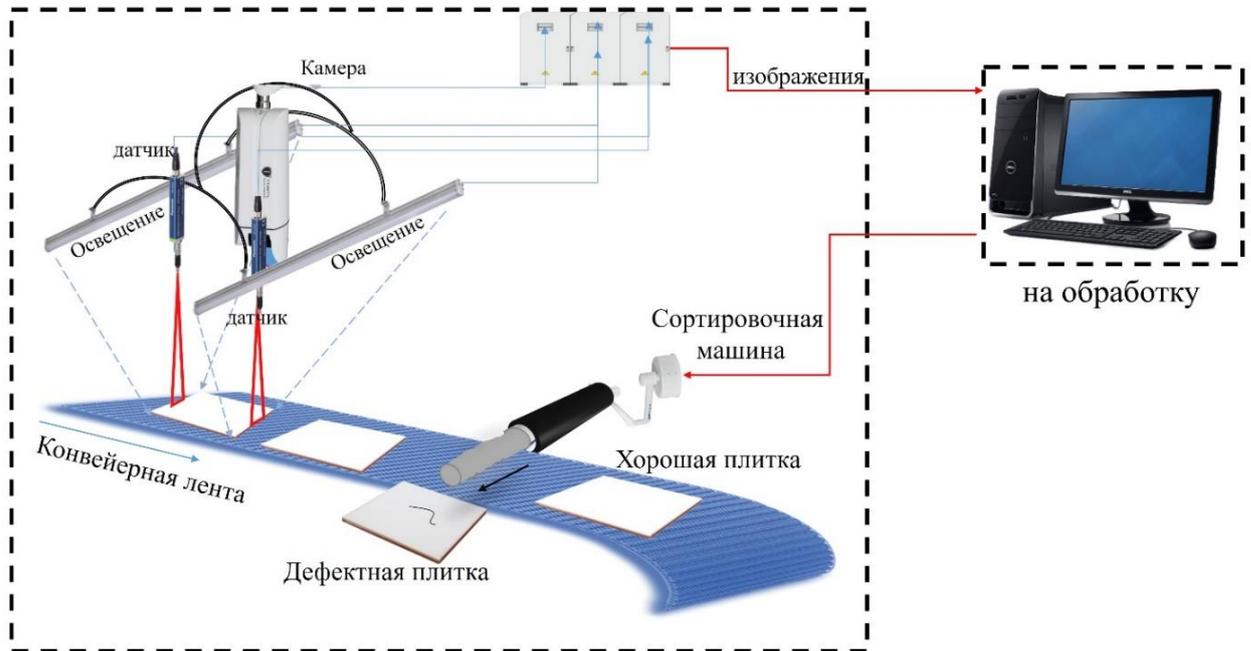


Рисунок 3.1– Структура системы визуального контроля на производственной линии

Что касается камеры для получения изображения, то для уверенной работы она должна иметь не менее 4MP (для плиток размером не более 40x40см), при этом высота подвеса камеры над конвейерной лентой с плитками должна выбираться из ожидаемой величины минимального дефекта, который нужно обнаружить. Как правило, достаточно обеспечить расстояние между центрами двух соседних пикселей, фиксируемое на уровне поверхности плитки, порядка 0,2-1мм.

Используемая камера может функционировать как на базе технологии CCD, так и на основе CMOS-технологии. Последняя имеет относительно более низкую стоимость по сравнению с технологией CCD, так как содержит большинство чипов, таких как чипы памяти, что и делает эту технологию намного дешевле, чем технология CCD. Кроме того, она меньше по размеру и потребляет очень мало энергии по сравнению с технологией CCD.

Однако использование этой технологии имеет недостатки, так как чувствительность этой камеры к освещению низкая. Это означает, что потребуется хорошая освещенность поля съемки, и эта проблема решается с помощью соответствующего светодиодного освещения. Кроме того, отношение шума в изображении выше по сравнению с технологией CCD, что нужно учитывать при обработке полученных изображений.

Предварительная обработка полученных изображений плитки практически не отличается от ставшей уже стандартной обработки в случаях, где требуется решать такие задачи, как удаление шумов на изображении, переход в оттенки серого, морфологические преобразования, поиск контуров объекта, и т.п. Естественно, что алгоритмы выполнения этих операций уже хорошо отработаны и собраны в библиотеки. Некоторые популярные библиотеки включают алгоритмы для выполнения определенных задач и естественно, ими целесообразно воспользоваться. Например, в библиотеке NumPy собраны алгоритмы для научных вычислений, в OpenCV и Scikit-Image - для задач, связанных с компьютерным зрением; Matplotlib содержит алгоритмы для отображения данных, хранящихся в массивах NumPy. Далее в работе в основном будет использована библиотека OpenCV.

3.2 Укрупненная структура предлагаемого алгоритма контроля керамической плитки

На рисунке 3.2 приведена последовательность работы предлагаемой системы контроля керамической плитки на предмет выявления возможных дефектов, рассмотренных во второй главе. Соответственно система контроля располагается у конвейера (а камера и осветители – над конвейером) перед упаковочными машинами. Кроме этого основного местоположения системы для контроля уже готовой плитки, система может использоваться для контроля бисквитной плитки перед обжигом.

Фактически представленная на рисунке 3.2 блок-схема алгоритма контроля содержит набор необходимых укрупненных операций обработки изображений

плитки, объединенных в три группы по типу используемых для их реализации операций.

Прежде всего после предварительной обработки изображения и перехода в оттенки серого выполняется комплекс операций по выявлению механических дефектов на гранях и уголках плитки. Плитка, у которой такие дефекты обнаруживаются, бракуется и выталкивается с конвейера. Затем проводится контроль на предмет выявления дефектов на поверхности плитки. Это в основном дефекты механического происхождения, например, царапины, и дефекты от неравномерности распределения глазури. Последний вид дефектов может проявляться как неравномерность цвета поверхности и может быть выявлен алгоритмами контроля цветových дефектов.

Все эти операции выполняются над однотонными плоскими керамическими плитками в реальном времени и, как будет показано далее, без необходимости предъявления эталонных плиток. Однако в алгоритме предусмотрена еще и операция контроля цветových тонов разных плиток. Она может выполняться по-разному. Если важно обеспечить однотонность в пределах одной или нескольких упаковок, то эталонная плитка не требуется. Первая плитка партии, как будет показано ниже, становится эталоном и остается им пока цвета очередных плиток на конвейере будут такими же. Если цвет очередной плитки будет отличаться, то эта плитка станет вторым эталоном и будет формировать другую партию (упаковку). Однако, производитель может установить в качестве эталона плитку по своему выбору и не допустить появления второго эталона.

Периодически, в частности, при возможных отключениях-включениях печей обжига, смене партии сырья и т.п. причин, во вторичном времени контролируются защитные свойства плиток от радиации.

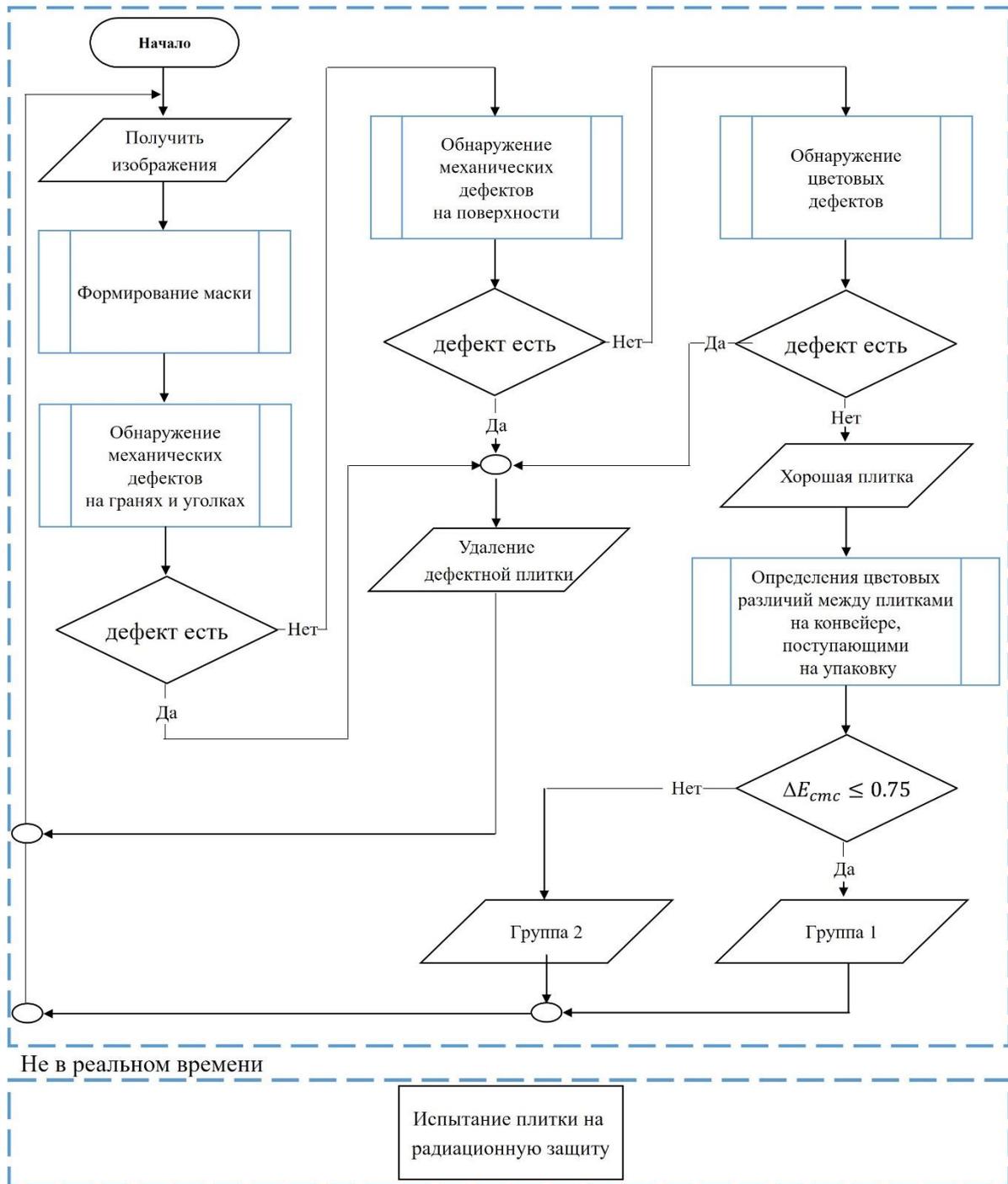


Рисунок 3.2 – Укрупненная блок-схема предлагаемого алгоритма

3.3 Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты

Первой серьезной проблемой в автоматизации производства с использованием цифровых изображений является получение полноразмерных изображений плитки на конвейерной ленте. Это может быть выполнено двумя способами:

Первый способ предполагает наличие датчиков, фиксирующих моменты прохождения плиткой поля, контролируемого камерой. В момент появления в зоне видимости первого датчика плитки происходит подготовка к съемке, а фиксация края плитки вторым датчиком вызывает съемку. В принципе при соответствующей настройке камеры достаточно одного датчика, фиксирующего момент достижения поля передним краем плитки на конвейере.

Второй способ рассчитан на использование видеокамеры, работающей непрерывно, а так как обработка изображений, поступающих с камеры, производится в библиотеке с открытым исходным кодом OpenCV, то для чтения изображения с камеры используется функция `get, image=camera read ()`. Первой операцией обработки каждого полученного изображения является стандартный перевод приходящего с камеры цветного изображения в оттенки серого, затем производится бинаризация с использованием адаптивного порога Отцу. После этого производится поиск контуров, для чего использована функция OpenCV `Bounding rect`. Эти операции повторяются в цикле для каждого нового изображения, поступающего с камеры. Конец цикла определяется по превышению количеством пикселей в сторонах контура, обнаруженного функцией `Bounding rect`, некоторых пороговых значений. Эти значения задаются априорно и зависят от разрешающей способности камеры, масштаба изображения и размера плитки. При превышении этих пороговых значений текущее изображение будет содержать полноразмерное изображение плитки и может быть передано в память системы диагностики и на дальнейшую постобработку для выявления возможных дефектов.

Для повторного запуска цикла требуется выдержать некоторую паузу, чтобы текущая плитка успела хотя бы частично уйти из кадра. Это время определяется скоростью конвейера. Затем цикл повторяется [24].

Первый способ представляется более простым в реализации, но в результате использования любого из перечисленных способов съемки получаем изображение плитки на конвейере, на котором фоном будут присутствовать близлежащие к плитке части конвейера (рисунок 3.3)

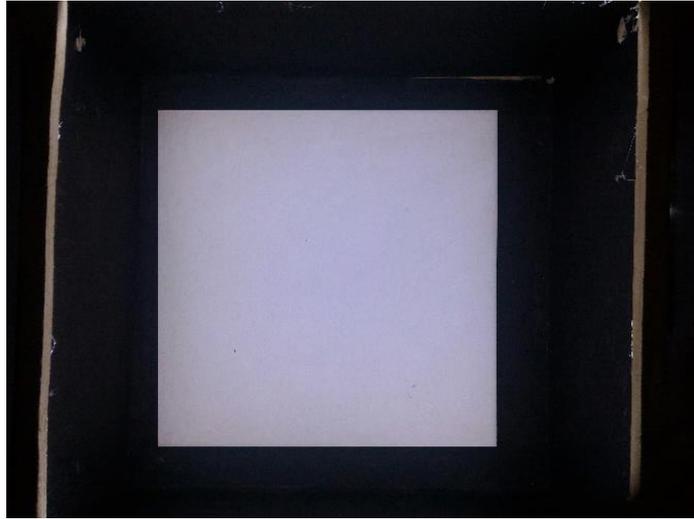


Рисунок 3.3 – Исходное изображение плитки (вертикальные полосы – края конвейерной ленты)

3.4 Построение маски плитки

Для выявления дефектов плитки в отсутствии эталонной плитки, с которой можно было бы для выявления дефекта сравнивать тестируемую плитку, необходимо сформировать некоторое идеальное изображение плитки, которое заменило бы эталонную плитку. Назовем это изображение маской плитки [125].

Алгоритм построения маски начинает работу с получения изображения плитки с фоном в виде окружающих ее частей конвейера (см. выше на рисунке 3.3). Сначала будем считать, что конвейер оснащен направляющими и датчиком, обеспечивающим адекватное (относительно камеры) положение плитки. Это ускоряет обработку изображения, так как нет необходимости в дополнительных манипуляциях, призванных привести изображение собственно плитки в нужное положение.

Исходное изображение (цветное) представляется системой, которая использует основные спектральные компоненты красного, зеленого и синего для представления каждого цвета. Каждый пиксель определяется комбинацией этих компонентов, известных как цветовые каналы или цветовые плоскости. Интенсивность пикселя I_{RGB} в красном канале обозначается как $F_R(x, y)$, в зеленом канале обозначается как $F_G(x, y)$, а в синем канале обозначается как $F_B(x, y)$ (3.1):

$$I_{RGB} = (F_R, F_G, F_B), \quad (3.1)$$

Интенсивность каждого цветового канала обычно кодируется с использованием восьми бит, в результате чего уровень квантования равен 256.

Для увеличения скорости и эффективности обработки изображения оно переводится в полутоновое монохромное - другими словами, различные оттенки цвета в различные интенсивности серого. В результате оттенки серого представляются в виде числового массива размерностью $(m \times n)$. Их интенсивность представляется 8 битами и, иногда, 16 битами [1,111,132].

Ниже представлены самые простые методы преобразования цветных изображений в полутоновые (3.2), (3.2) и (3.2) [6, 111,132,94,134,13,81]:

$$Gray1 = (R + G + B) / 3; \quad (3.2)$$

$$Gray2 = 0,2989 \times R + 0,5870 \times G + 0,1140 \times B; \quad (3.3)$$

$$Gray3 = 0,2126 \times R + 0,7152 \times G + 0,0722 \times B, \quad (3.4)$$

Для преобразования изображений RGB в изображения в оттенках серого можно использовать функции `cvtColor BGR2GRAY` из библиотеки `OpenCV`. `OpenCV` использует взвешенный метод (3.4), также известный как метод яркости [81].

Для удаления шума в большинстве случаев применяется медианный фильтр. В этом случае за сглаженное значение интенсивности пикселя принимается средний член вариационного ряда интенсивностей пикселей, окружающих сглаживаемый пиксель в пределах некоторого окна (чаще всего размером 3×3 или 5×5) [6,120].

Для формирования маски применим технику бинаризации изображения с использованием порога Оцу [50,54,104,26] В этом случае задается некое пороговое значение для интенсивности пикселя, и в случае, если оно не достигается, пиксел становится черным (обнуляется), в ином случае - белым. Базовая идея метода Оцу заключается в том, чтобы найти оптимальное значение порога, которое минимизирует взвешенную сумму дисперсий двух классов пикселей [104]. Этот метод позволяет автоматически выбирать порог без какого-либо вмешательства пользователя или предварительного знания об изображении.

Область, которую на изображении занимает собственно плитка, можно определить при помощи такой функции из библиотеки `OpenCV`, как поиск

контуров (`cv2.findContours`)[79] с реализацией её разных вариантов, которые определяют режим (`mode`) и метод применения. Первым показателем определяется характеристика возвращаемого результата (учитывается ли иерархия найденных контуров). Для экономии времени обработки можно ограничиться наибольшим внешним контуром без полного выделения их иерархии. OpenCV предоставляет различные режимы поиска контуров, включая `RETR_LIST`, `RETR_TREE` и `RETR_FLOODFILL`.

`RETR_LIST` подходит для приложений, которым не требуются подробности иерархии контуров. `RETR_TREE` обеспечивает полную связь между контурами, но требует больше вычислительных затрат. Количество контуров может быть большим, что делает невозможным ручное чтение строк. `RETR_EXTERNAL` — это еще один режим поиска, в котором `findContour` строит список контуров и иерархии, фокусируясь на самом внешнем контуре [79,80,123].

Другой аргумент в функции `cv.findContours` относится к методу аппроксимации контура, который хранит координаты (x,y) границы фигуры. В OpenCV предусмотрено 2 типа аппроксимации: сначала выполняется `cv.CHAIN_APPROX_NONE`, при котором все граничные точки сохраняются. Однако для прямого контура необходимы только две конечные точки. А второй тип — `cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE` удаляет лишние точки, экономя память [123]. В данной работе принят второй тип.

В нашем случае было решено использовать режим `RETR_LIST`, тем более, что он показал самое низкое время обработки среди других типов [27]. В этом режиме извлекаются все обнаруженные линии на изображении без создания иерархических связей, гарантируя, что каждый контур является независимым объектом [27]. Используя `cv2.drawContours`, внутренняя часть обнаруженного контура заполняется для создания маски белыми пикселями [54,121,78].

В результате получаем изображение маски плитки, но пока с окружающим контур плитки фоном (блок-схема этой части алгоритма обработки приведена на рисунке 3.4, а результат – на рисунке 3.5). Далее управление передается модулю

выявления угловых дефектов и дефектов на краях (выход А), там же производится «вырезание» изображения маски из фона.

После выделения контура и построения маски (или, при наличии маски плитки, если она была сформирована ранее) алгоритм, как было сказано выше, переходит к модулю поиска дефектов на уголках и гранях плитки. При этом возможны две ситуации.

а) Если на конвейере с помощью соответствующих направляющих предусмотрена фиксация положения плиток, то можно использовать вариант функции `cv2.boundingRect()` [82] (рисунок 3.6), строящей прямоугольник вокруг объекта, не учитывая возможные незначительные отклонения положения плиток относительно осей, что значительно увеличивает скорость обработки.

б) Если положение плитки на конвейере не фиксируется и есть большие отклонения от ее нормального положения, то можно использовать другой вариант функции `cv2.minAreaRect()`. Эта функция помимо других параметров возвращает угол поворота контура [101].

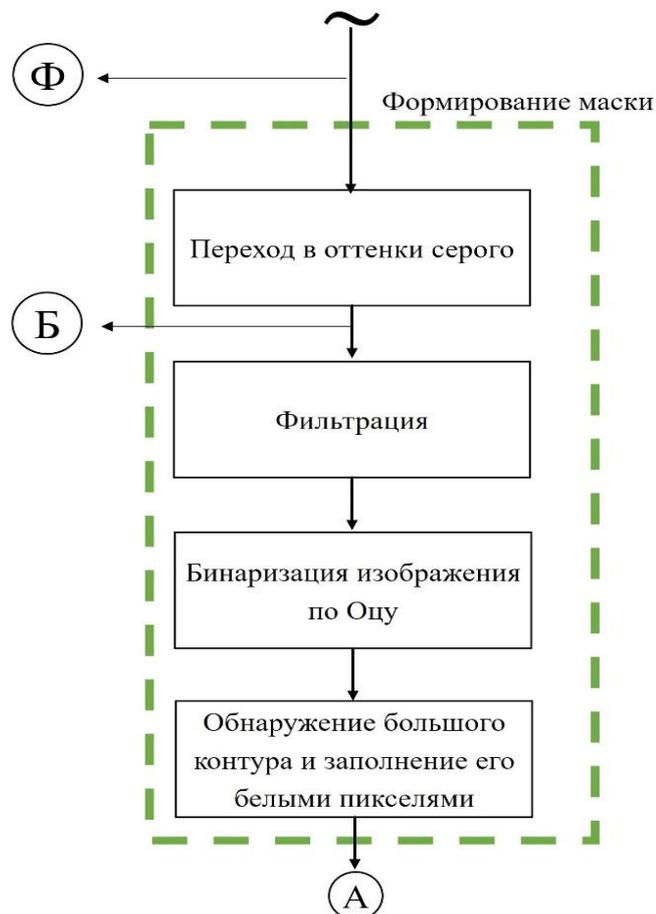
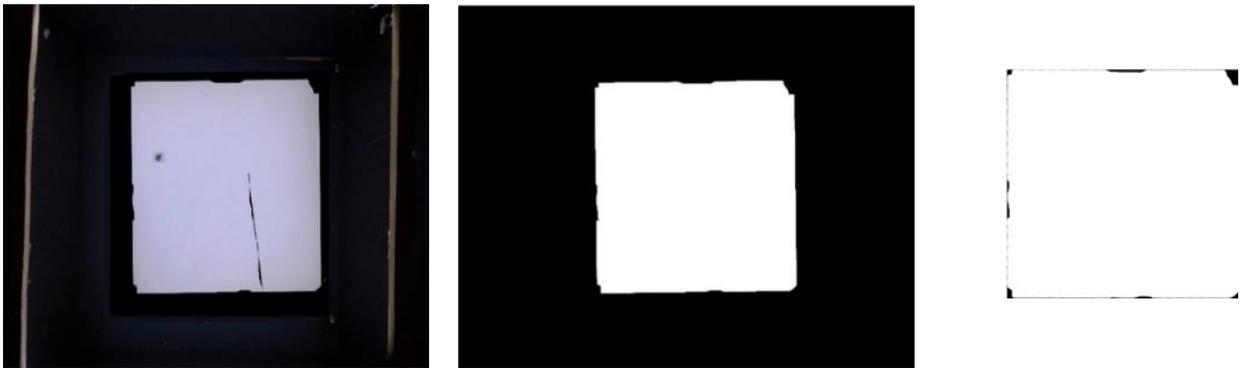


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма формирования маски

Вращение изображения представляет собой трехэтапную операцию. Сначала определяется центр вращения, затем строится матрица 2D-вращения (функция `cv2.getRotationMatrix2D`) [101,28] и затем на основании этой матрицы производится аффинное преобразование (функция `cv2.warpAffine()`). Далее алгоритм возвращается к функции `cv2.boundingRect()`, как в первом случае при отсутствии необходимости поворота изображения. (), в результате выделяется область собственно плитки и определяются (и запоминаются) ее координаты (операция «вырезать» на рисунке 3.6), т.е. формируется маска тестируемой плитки.



а)

б)

в)

Рисунок 3.5 – Результат алгоритма формирования маски
а) исходное; б) маски; в) Маска после использования функции `cv2.BoundingRect()`.

3.5 Обнаружение уголковых дефектов и дефектов на гранях плитки

Задавая соответствующие параметры функции `cv2.BoundingRect()`, описывающей вокруг контура маски прямоугольник (или квадрат, если маска квадратная), из всего изображения выделяется область, занимаемая собственно плиткой, при этом сколы на уголках или выщерблины на гранях плитки будут черными, а остальная поверхность плитки – белой. Фактически это соответствует наложению изображения контура плитки на маску идеальной плитки (без дефектов). Поэтому размеры дефектов на уголках и гранях плитки определяются простым подсчетом числа черных пикселей по периметру и краям и сравниваются с некоторым порогом γ_1 , величина которого зависит от сорта плитки (рисунок 3.6) [28].

Следует также отметить, что этот алгоритм эффективно использовать для контроля угловых дефектов и дефектов на гранях сырой (бисквитной) плитки, что позволит удалять выявленные дефектные плитки с линии до обжига и сразу возвращать их на переработку.

3.6 Обнаружение дефектов механического происхождения на лицевой поверхности плитки

Дефекты механического происхождения обычно достаточно контрастны по сравнению с общим тоном плитки, однако ряд дефектов, например, пятна из-за неравномерности распределения глазури, создают низкоконтрастное изображение. Для обнаружения таких дефектов алгоритм опять возвращается к монохромному («в оттенках серого») изображению (выход Б на рисунке 3.4).

Так как после работы первого блока алгоритма уже известно нужен ли поворот изображения или нет, то в первом случае после бинаризации изображение подвергается операции аффинного преобразования (угол и центр поворота известны). В случае, если поворот не нужен, то эта операция пропускается и из полученного изображения производится «вырезание» изображения собственно плитки, которое затем после улучшения будет сравниваться с маской (рисунок 3.7).

Если увеличить число интенсивных пикселей в районе хорошо видимого «хвоста» на кривой гистограммы, можно улучшить контраст там, где количество пикселей мало (например, менее 1-2%). Это позволит определить x_{\max} и x_{\min} , найти α и β из уравнений (3.5) и провести контрастирование для оставшейся части гистограммы. При этом отсечку удобно производить, задавшись процентной долей отсекаемой части интегральной кривой (`clip_hist_percent`)[67].

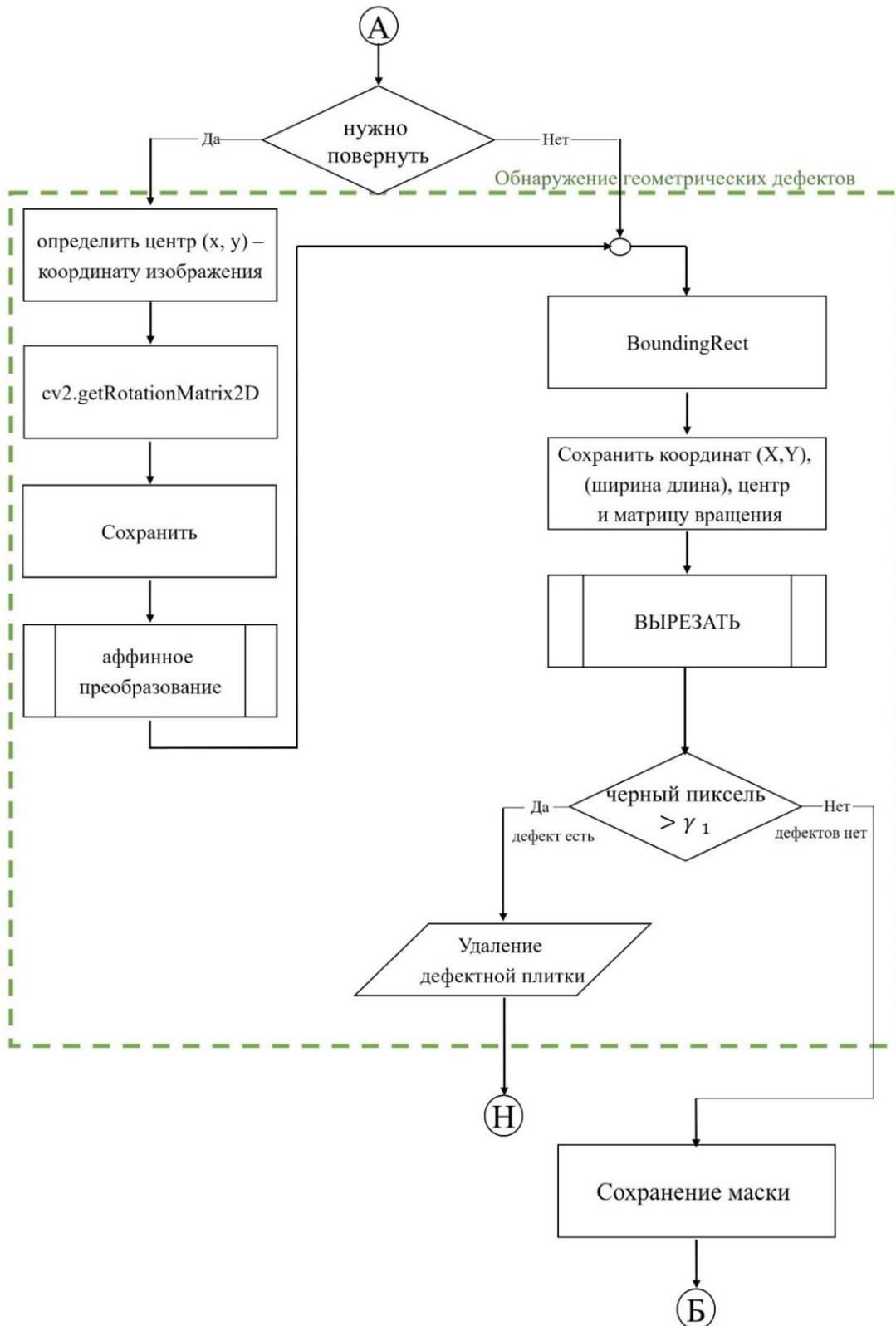


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритма для выявления механических дефектов на гранях и уголках плитки (пояснения приведены в тексте)

Если требуется повысить контраст низкоконтрастных участков плитки можно выделить и растянуть требуемую часть динамического диапазона исходного

изображения. Участки, не попавшие в эту часть, будут черными. Достоинство метода – высокая скорость обработки.

Для выделения дефектов также применена бинаризация изображения. Однако, учитывая часто невысокую контрастность поверхностных дефектов и к тому же возможные неравномерности освещения, было решено использовать при бинаризации не глобальные, а локальные пороги, т.е. использовать адаптивную бинаризацию [87]. При этом, т.к. координаты изображения собственно плитки уже известны, то бинаризация производится только на нем. В OpenCV предлагается для такой бинаризации использовать варианты вычисления локальных порогов по среднему значению или по средневзвешенному значению интенсивностей соседних пикселей. Во втором случае веса $w(i,j)$ определяются функцией Гаусса (3.6) [6]:

$$w(i, j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (3.6)$$

Соседние пиксели определяются квадратным блоком с преобразуемым пикселем в его центре. Размеры блока обычно варьируются в широких пределах и определяют зону задания функции б σ . Именно этот вариант вычисления порогов при бинаризации наиболее удобен и принят в предлагаемом алгоритме. OpenCV позволяет настраивать метод, вводя константу C. Тогда пороговое значение будет представлять собой взвешенную по Гауссу сумму значений интенсивностей соседних пикселей за вычетом константы C [104]. Размер блока подбирается экспериментально (как будет показано ниже в главе 4 при экспериментальном исследовании размер блока был подобран равным 39x39 и C=14 [104]).

Далее операцией попиксельного сравнения с маской с одновременным выполнением логической операции И (Bitwise_and) получаем изображение с выделенными дефектами на лицевой поверхности плитки, фактически это сводится к наложению исходного изображения на маску (рисунок 3.7).

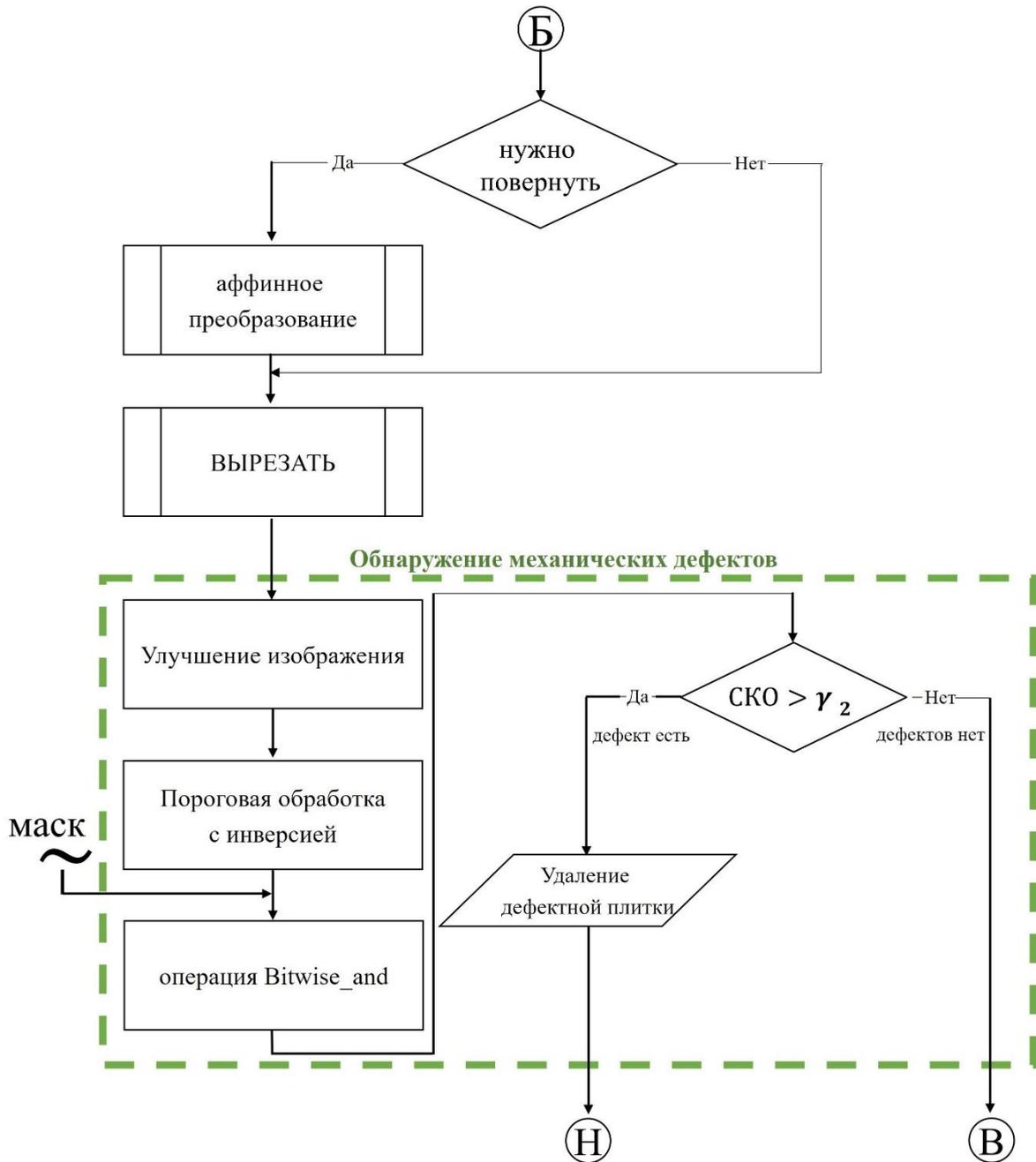


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма обнаружения поверхностных дефектов плитки механического происхождения.

Функция (bitwise_and) работает с двоичным представлением пикселей и возвращает новое изображение, в котором каждому пикселю присвоено значение 255 (белый), если оба соответствующих пикселя во входных изображениях ненулевые, и 0 (черный) в противном случае (рисунок 3.8).

Bitwise_AND		
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Рисунок 3.8 – Таблица истинности (представляет один входной бит и его выходной бит) для bitwise_and

Для определения дефектная плитка или нет алгоритм подсчитывает среднеквадратичное отклонение СКО и сравнивает с порогом γ_2 (3.7) [29]:

$$\text{СКО} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{(i,j)} - K_{(i,j)})^2} \geq \gamma_2 \quad , \quad (3.7)$$

где M, N - количество пикселей в строке и столбце соответственно; $I_{(i,j)}, K_{(i,j)}$ - интенсивности пикселей маски и обработанного изображения соответственно. Значение порога γ_2 определяется требованиями к качеству плитки.

3.7 Обнаружение дефектов цвета плитки

3.7.1 Контроль однородности цвета плитки

Цветовые дефекты контролируются после проверки механических дефектов. Алгоритмы, реализующие выявление этих дефектов, позволяют выявлять и некоторые цветовые дефекты, например, пятна, вызванные скоплением глазури (обычно порядка нескольких миллиметров [21]). Однако, такие дефекты цвета плитки, как неравномерность распределения интенсивности цвета по поверхности плитки (имеется ввиду рассматриваемая в данной работе однотонная плитка), эти методы не выявляют.

Для контроля однородности цвета плитки необходимо преобразовать обычную цветовую модель RGB в модель, наибольшим образом отражающую восприятие цветов, свойственное человеку. В данной работе была выбрана модель HSV. В этой системе оси координат соответствуют: H (hue) –цвету (тону) $[0,360^\circ]$; S (saturation) – насыщенности $[0,1]$; V (color value) – интенсивности (значению) $[0,255]$.

Библиотека OpenCV предоставляет функцию для преобразования изображения из RGB\BGR в HSV. Тогда с учетом того, что в OpenCV свои диапазоны параметров модели HSV: оттенков H — $[0,179]$, насыщенности S — $[0,255]$, значений V — $[0,255]$ и изображение RGB читается в формате BGR, получим: $HSV = cv2.cvtColor(\text{изображение BGR}, cv2.COLOR_BGR2HSV)$.

В качестве показателей, характеризующих цветовые дефекты, предложено использовать гистограммы из-за их инвариантности к перемещениям и поворотам вокруг оси вращения, перпендикулярной плоскости изображения, а также нечувствительности к точности пространственного распределения цветовых пикселей. В качестве классификатора предложено использовать их корреляцию, т.к. коэффициент корреляции имеет ограниченный диапазон изменения $[-1,1]$, что облегчает принятие решений при контроле.

Блок-схема алгоритма, реализующего предлагаемый метод контроля цветовых различий приведена на рисунке 3.9. На вход этого блока алгоритма подается исходное изображение. Как и в предыдущем случае при необходимости осуществляется его поворот на известный угол, для чего используется операция аффинного преобразования, а затем производится «вырезание» изображения собственно плитки, которое и поступает на вход блока контроля цветности (рисунок 3.10).

Изображение плитки делится на несколько зон, 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 – рисунок 3.11). Для каждого из выделенных участков строятся гистограммы и определяется их близость расчетом корреляционной зависимости.

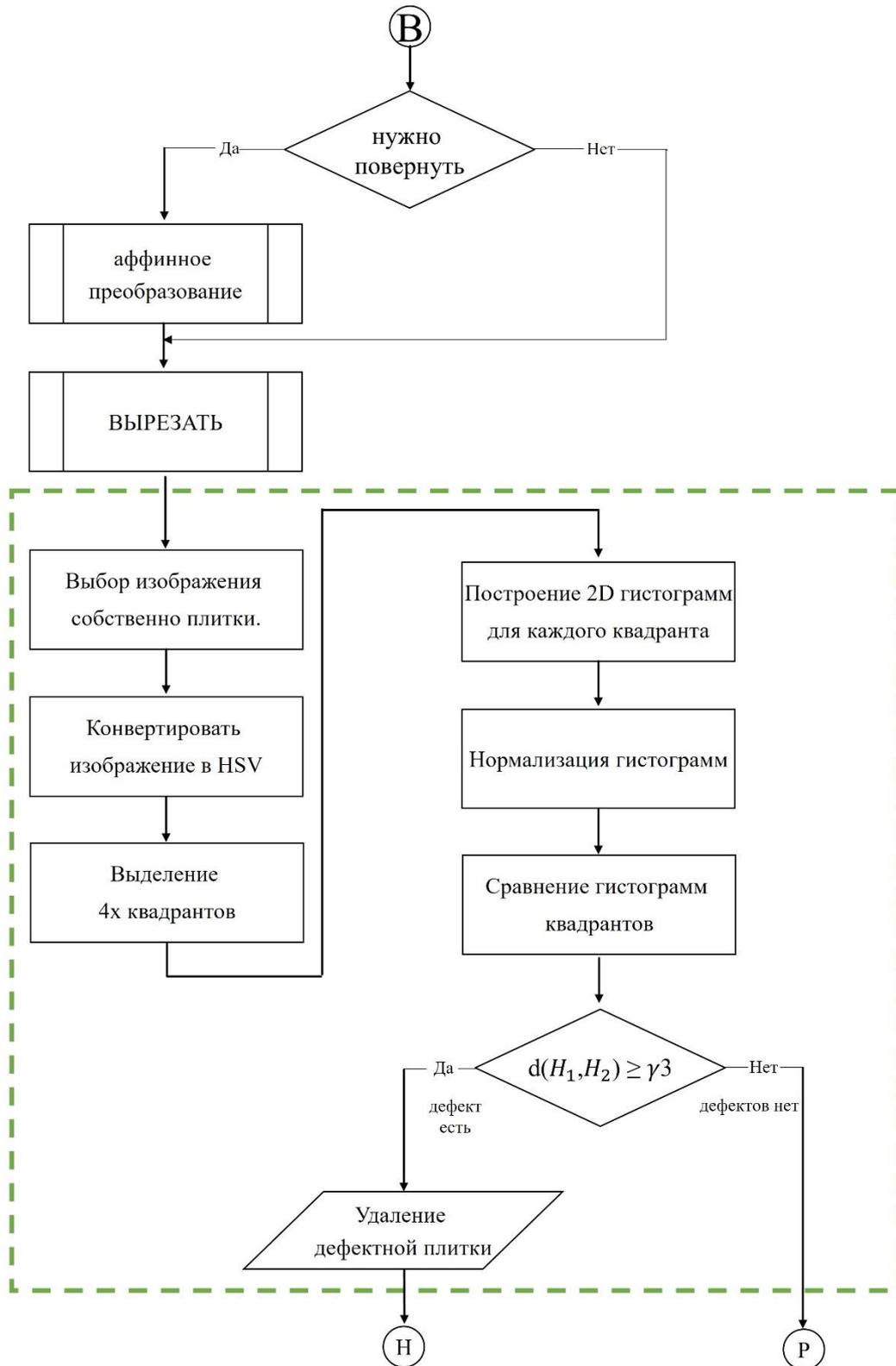


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма контроля цветových различий: однородности и равномерности интенсивности цвета плитки

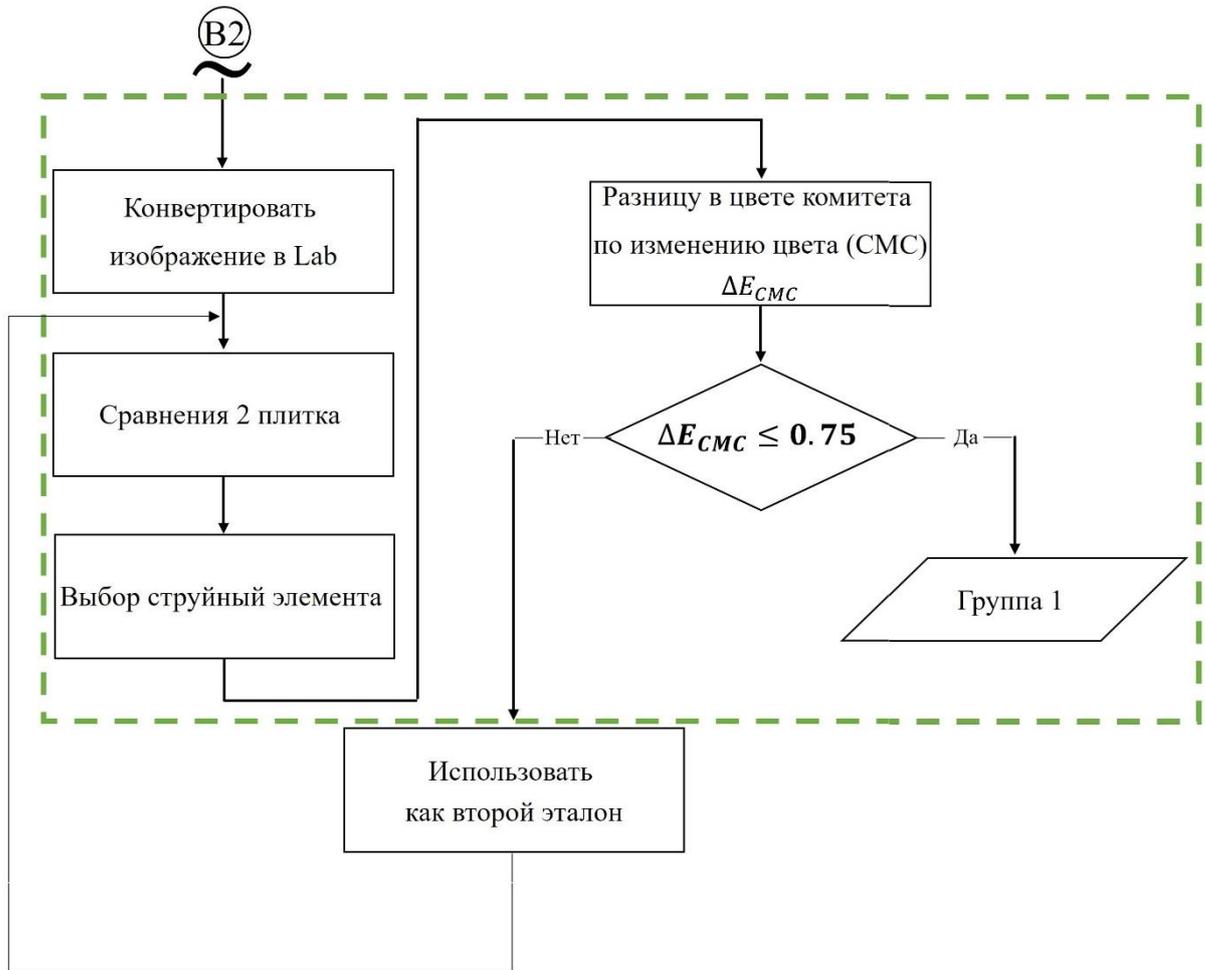


Рисунок 3.10 – Блок-схема алгоритма контроля цветовых различий цветов двух

ПЛИТОК

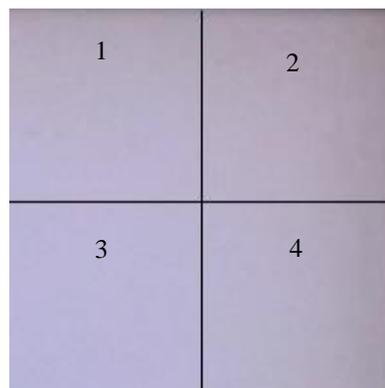


Рисунок 3.11 – Выделение участков плитки для построения локальных гистограмм

Учитывая, что насыщенность цвета воспринимается глазом опосредованно через оттенок (при малых значениях насыщенности S глаз воспринимает все оттенки цвета, как серые) или интенсивность (при высоких значениях насыщенности начинает проявляться цвет), канал насыщенности при построении

гистограмм не учитывался, а учитывались только каналы оттенка H и интенсивности V , т.е. строились 2D-гистограммы в координатах H и V . OpenCV предоставляет функцию `cv2.calcHist` для расчета таких гистограмм [142].

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 (3.8) [142, 122]:

$$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)(H_2(I) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_I (H_1(I) - \bar{H}_1)^2 \sum_I (H_2(I) - \bar{H}_2)^2}} \geq \gamma_3, \quad (3.8)$$

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.

3.7.2 Сравнение цветов разных плиток

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 3.9б представлена блок-схема алгоритма определения цветовых различий между плитками на конвейере, поступающими на упаковку. Для характеристики в восприятии двух цветов или сравнения цветов на основе их визуальных различий использовался количественный показатель различия цветовых оттенков ΔE_{CMC} (ГОСТ 27180-2019).

В цветовом пространстве HSV вычисления дельта E_{CMC} неприменимо напрямую, поскольку это цилиндрическое цветовое пространство, которое не обеспечивает единообразного по восприятию представления цвета [136]. Поэтому здесь было решено использовать модель CIE Lab, тем более, что эта модель используется в вышеупомянутом ГОСТе.

Модель цвета CIELab характеризует цвета с помощью трех компонент. Первая компонента, называемая яркостью (L^*), изменяется в диапазоне от 0 до 100, где $L^*=0$ и 100 соответствуют черному и белому цветам, соответственно. Две другие компоненты, a^* и b^* , обозначают хроматичность цвета. Значение a^* определяет расстояние через ось красного-зеленого, где положительные и отрицательные значения указывают на красный и зеленый цвета, соответственно. Значение b^* обозначает расстояние через ось желто-голубого, где положительные и отрицательные значения указывают на желтый и синий цвета, соответственно. При этом, значения ΔE_{CMC} вычисляются по-разному, чтобы ближе соответствовать восприятию цветов зрением человека. Соответственно в формулу для расчета вводятся различные корректирующие весовые коэффициенты (3.9)[72,65,84]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L_S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H}\right)^2}, \quad (3.9)$$

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 находятся в диапазоне:

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

при $1 \leq \Delta E_{\text{CMC}} \leq 2$ – различие в цвете становится заметным только при внимательном наблюдении;

при $2 \leq \Delta E_{\text{CMC}} \leq 10$ - различия заметны с первого взгляда, а при больших значениях можно с уверенностью говорить о серьезных различиях..

Так как в библиотеке Scikit-Image функция `Lab_image=color.rgb2lab(RGBimage)` выполняет преобразование изображений из RGB в CIELab быстрее и точнее, чем функции библиотеки OpenCV, то решено было использовать эту функцию. Далее изображение следующей плитки на конвейере сравнивается с изображением предыдущей, принятой за эталон, и рассчитывается предложенная в модели CIELab разность цветности ΔE_{CMC} (CMC – Color Measurement Committee). Соответствующая функция есть в библиотеке OpenCV:

```
delta_E_cmc = color.delta_E(image1_lab, image2_lab).
```

Первая плитка считается эталоном и как только цвет следующей плитки не совпадет с предыдущей, то она становится вторым эталоном и далее сравнение идет уже с двумя плитками[66,77].

3.8 Оценка эффективности использования керамической плитки для защиты от ионизирующего излучения

Длительное воздействие гамма-излучения может привести к нескольким потенциальным проблемам для некоторых материалов, включая выцветание, деградацию поверхности и структурные повреждения. Это может возникнуть в результате взаимодействия высокоэнергетических фотонов гамма-лучей с атомами материала, потенциально вызывая изменения в его структуре. Это также может повлиять на способность материала ослаблять гамма-лучи, в результате чего ослабление интенсивности гамма-лучей может уменьшиться.

Прежде всего необходимо измерить фоновое излучение керамических плиток. Учитывая его ожидаемый низкий уровень важно выбрать соответствующий высокочувствительный детектор. В качестве такого детектора можно рекомендовать детектор из высокочистого германия (HPGe) совместно с пассивной защитой фирмы Canberra, как указано в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики электронной операционной системы и германиевого детектора Canberra

Модель детектора	GC3020
Геометрия	Закрытая – конец коаксиальный
Диаметр	59,5 мм
Длина	58,5 мм
Расстояние от окна	5 мм
Рабочее напряжение	+4000 вольт
Относительная эффективность	30%
Разрешение	2,0 кэВ (FWHM) при 1,332 МэВ

Для работы предполагалось использовать установку измерения защитных свойств материалов (рисунок 3.12). Детектор закреплен внутри цилиндрического щита, сделанного из свинца толщиной 11см. Защита спроектирована с использованием внутреннего слоя меди толщиной 0,1 см, с тем чтобы свести к

минимуму воздействию рентгеновской флюоресценции Рb. Детектор охлаждается с использованием криостата жидкого азота для минимизации утечки тока.

Для создания параллельного пучка гамма-лучей, подаваемых на тестируемый объект (в нашем случае плитку) между источником излучения и объектом иногда устанавливается решетка из свинца, играющая роль коллиматора. Аналогично непосредственно перед детектором устанавливается узкая свинцовая трубка, вырезающая из рассеянного плиткой излучения параллельный пучок, подаваемый на детектор.

Детектор соединяется с усилителем и источником высокого напряжения. В работе необходимо использовать многоканальный анализатор (МСА) с числом каналов не менее 4096 для преобразования высот импульсов в дискретные численные значения. В качестве программного обеспечения можно рекомендовать Genie2000, которое обеспечит и накопление спектров гамма-излучения.



Рисунок 3.12 – Установка измерения защитных свойств материалов Система защиты включает в себя следующие компоненты: (а) дверца, плотно прилегающая к корпусу экрана, (б) криостат с жидким азотом, (в) детектор, расположенный в центре экрана, (г) цилиндр свинцовый толщиной 10 см и (д) внутренний слой из меди толщиной 0,1 см.

Для нормальной работы детектор необходимо откалибровать. Для получения точных измерений активности гамма-излучения важно установить корреляцию между числом каналов детектора и энергетическим спектром излучения. Использование многопиковых и многоядерных эталонных радиоактивных источников, генерирующих гамма-лучи с определенным уровнем точности, является обязательным для процесса энергетической калибровки. Определение положения пика в каналах, связанных с этими энергиями, служит для установления корреляции между номерами каналов и энергетической шкалой.

Измерение уровней фонового излучения играет решающую роль в определении минимальной обнаруживаемой активности (MDA) источников с низким уровнем активности. Это объясняется тем, что фоновое излучение может возникать из радионуклидов, которые существуют внутри и вблизи детектора, охватывающих атмосферу Земли и космическое излучения.

Уровень фонового излучения германиевого детектора определяется путем измерения излучения в отсутствие поблизости каких-либо источников излучения. Это измерение имеет решающее значение для оценки MDA для источников низкой активности.

Типичный фон детектора состоит из составляющих: естественная радиоактивность материалов детектора, вспомогательного оборудования и защитных барьеров, установленных в зоне, непосредственно окружающей детектор, земное излучение от земной поверхности и строительных материалов лаборатории, воздуха, окружающего детектор, и первичное излучение и вторичные компоненты космического излучения. Эти излучения могут поглощаться детектором, что влияет на его работу.

Чтобы рассчитать коэффициент ослабления и измерить естественную радиоактивность, излучаемую плиткой, необходимо выполнить следующие действия. После калибровки детектора HPGe и подготовки тестируемой плитки, расчета фона детектора, обеспечения адекватной защиты для предотвращения любых других радиационных помех и насыщения детектора, тестируемые плитки проверяются на предмет собственного излучения, чтобы гарантировать, что оно

находится в заданных пределах и, таким образом, собственное излучение, испускаемое плиткой, не будет мешать излучению радиоактивных источников, таких как Am^{241} , Cs^{37} и Co^{60} . Способность керамической плитки защищать от гамма-излучения проверяется на следующих этапах.

Источник должен быть установлен на достаточном расстоянии от детектора во избежание рассеяния, помех и насыщения детектора. В эксперименте как раз и необходимо определить оптимальное расстояние источника от детектора.

Далее необходимо измерить радиацию, испускаемую источником без керамической плитки. Затем разместить тестируемую керамическую плитку между радиоактивным источником и детектором HPGe (опытным путём, как будет показано в 4 главе, было найдено расстояние плитки от детектора в 3см – рисунок 4.23) и опять измерить интенсивность радиации. Расчет коэффициента ослабления интенсивности излучения производится для всех импульсов излучения источника.

3.9 Выводы по главе 3

1. Разработаны алгоритмы для обнаружения основных типов дефектов керамической плитки (угловые и краевые дефекты, дефекты поверхности и цветовые дефекты). Эти частные алгоритмы объединены с алгоритмом создания маски в комплексный алгоритм. При комплексировании алгоритмов максимально использовались результаты одинаковых операций, это позволило сократить время обработки, что важно для обеспечения работы в реальном времени.

2. Создание маски для каждой плитки значительно повысило точность обнаружения дефектов и избавило от необходимости наличия эталонов.

3. Использование адаптивного порога при бинаризации изображения позволило повысить робастность работы алгоритмов в различных условиях освещения рабочей зоны, а эквализация гистограммы – повысить надежность обнаружения дефектов.

4. Деление поверхности плитки на зоны, построение двумерных гистограмм в цветовом пространстве HSV и использование коэффициентов их взаимной корреляции позволило эффективно определять однородность и равномерность цвета поверхности плитки.

5. Учитывая, что цветовые различия между плитками определяются после выяснения однородности и равномерности цвета их поверхности, сравнение можно производить не попиксельно, а через каждые N пикселей (число N определяется экспериментально).

6. Использование детектора HPGe для проверки керамической плитки на радиационную защиту позволяет измерять как фоновое излучение самой плитки, так и коэффициент ослабления излучения керамической плиткой.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ

Так как предполагалось, что контроль дефектов керамической плитки будет производиться на основании обработки изображений плитки, получаемых в реальном времени с конвейера, то для исследования была создана установка, имитирующая положение плитки на конвейере (рисунок 4.1).

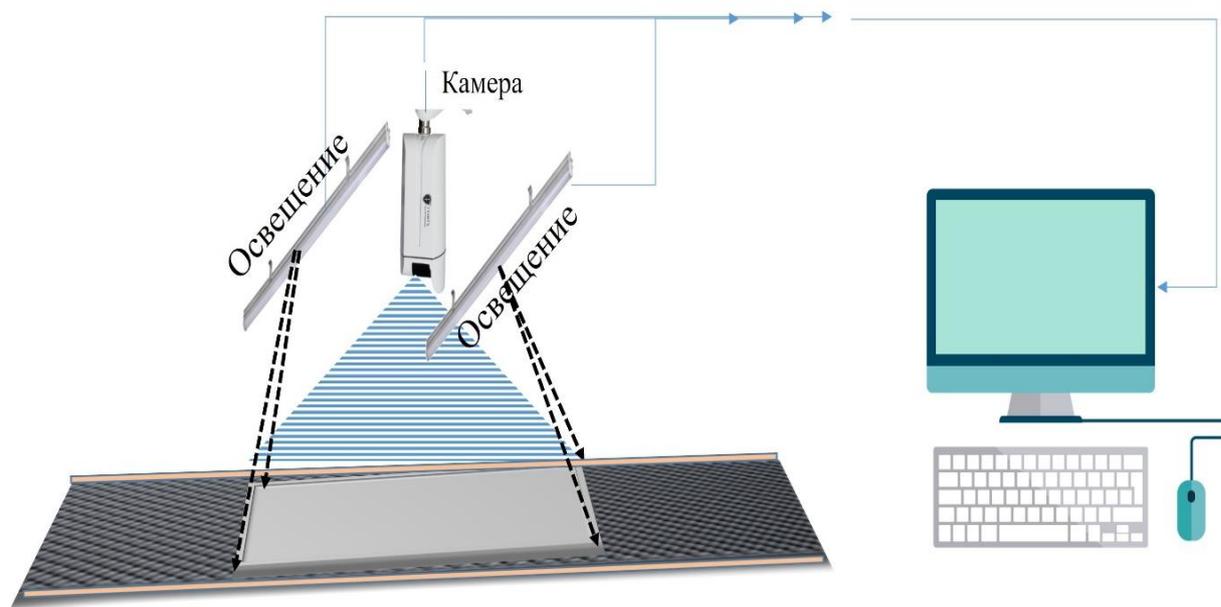


Рисунок 4.1 – Структура лабораторной установки для получения изображения керамической плитки

Обрабатывались изображения плитки, находящейся на подложке, имитирующей ленту конвейера, с фиксацией ее положения относительно края ленты направляющими и без фиксации, размер изображений 1320x1520 пикселей. Обработка велась на компьютере с процессором Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU 1.60GHz и оперативной памятью 8.00 GB. Программа, как упоминалось выше, была написана на языке Python 3.7 с использованием библиотеки алгоритмов OpenCV с привлечением других библиотек, которые применяются для анализа 2D-изображений.

Требования к внешнему виду обычной керамической плитки в разных странах практически одинаковы. Например, в иракском стандарте требуется проводить визуальный осмотр лицевой стороны плитки невооруженным глазом с

расстояния 1 метр при освещенности 300 люкс. Это требование было учтено при создании экспериментальной установки, но уже при использовании технического зрения.

Для освещения рабочей зоны использовались светодиодные источники с нейтральным или холодным белым светом с интенсивностью света 3,4 кд и радиационным углом 15°. Светодиоды были установлены на двух панелях с двух сторон камеры, но не непосредственно над наблюдаемой плиткой. Светодиоды размещены на уровне камеры, чтобы избежать теней и/или отражений. Это позволяет обнаруживать малозаметные повреждения плитки.

Использовалась камера модели HT-SUF401GC-T. Высота подвеса камеры над конвейерной лентой с плитками и число пикселей в поле цифровой камеры, как это уже отмечалось выше, выбираются с учетом ожидаемого размера контролируемых плиток и минимального дефекта, который нужно обнаружить. На основании требований стандартов на керамическую плитку, в принципе, оказалось достаточным обеспечить величину расстояния между центрами двух соседних пикселей, фиксируемого на уровне поверхности плитки, порядка 0,2-1мм. В эксперименте использовались квадратные плитки 150x150мм и 200x200мм, а высота подвеса камеры составляла 40 - 65 см. Это обеспечило для плиток соответствие 1мм \leftrightarrow 5 пикселям.

Для подключения камеры была использована библиотека OpenCV на Python для захвата изображения с камеры. Функция `cv2.VideoCapture()` и `read()` использовались для создания объекта и захвата кадров с камеры. Затем захваченное изображение сохранялось в файл для дальнейшей обработки. Тип изображения JPG.

Ввиду сложности получения с предприятия плиток с дефектами (блобы, пятна, царапины, трещины, сколы, сколы на углах и сколы по граням плитки) большинство дефектов при исследовании работы алгоритма было симитировано или реализовано на нормальных плитках.

Использование камеры с CMOS-сенсором, как уже указывалось в третьей главе, для целей исследования предлагаемых алгоритмов, вполне допустимо с учетом обеспечения соответствующего освещения.

На рисунке 4.2 показано изображение двух монохромных плиток разного размера. Две вертикальные линии по обе стороны от плиток – изображения краев подложки, на которой лежит контролируемая плитка, имитирующей конвейерную ленту.

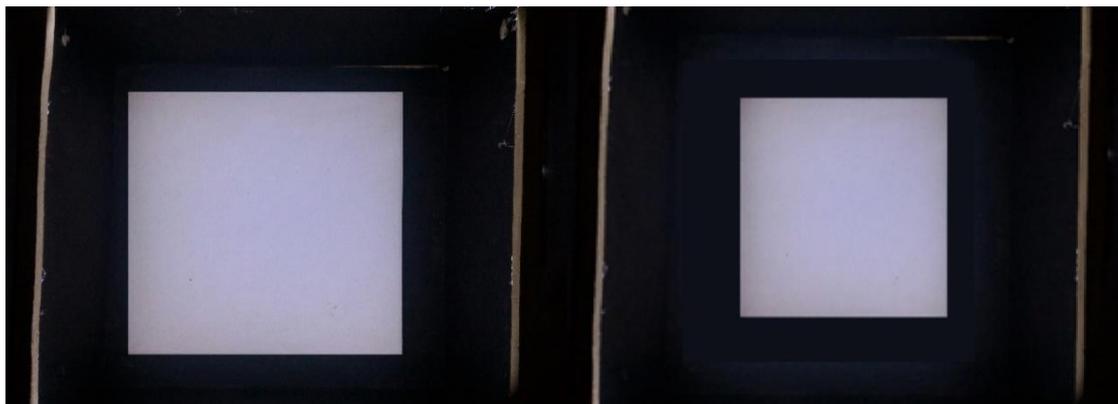


Рисунок 4.2 – Исходное изображение (слева плитка размером 200×200мм; справа - размером 150×150мм). Две полосы по сторонам изображения – края имитированной конвейерной ленты

Как сказано было выше для реализации предлагаемых алгоритмов контроля керамических плиток целесообразно использовать функции из популярных открытых библиотек, например, NumPy для научных вычислений, Matplotlib для отображения данных, хранящихся в массивах NumPy, OpenCV для задач, связанных с компьютерным зрением, что и было использовано в экспериментах.

В качестве языка программирования был выбран Python 3.1" - это версия языка программирования Python, которая была выпущена в 2010 году. Программа была протестирована с Python 3.7 и Python 3.10 (последняя стабильная версия Python 2021 года, включающая множество новых функций и улучшений по сравнению с Python 3.1). Кроме того, использовалась PyCharm 2021.3.1 (Community Edition) - интегрированная среда разработки (IDE) для Python, которая предоставляет множество функций для помощи в процессе разработки, независимо от используемой версии Python.

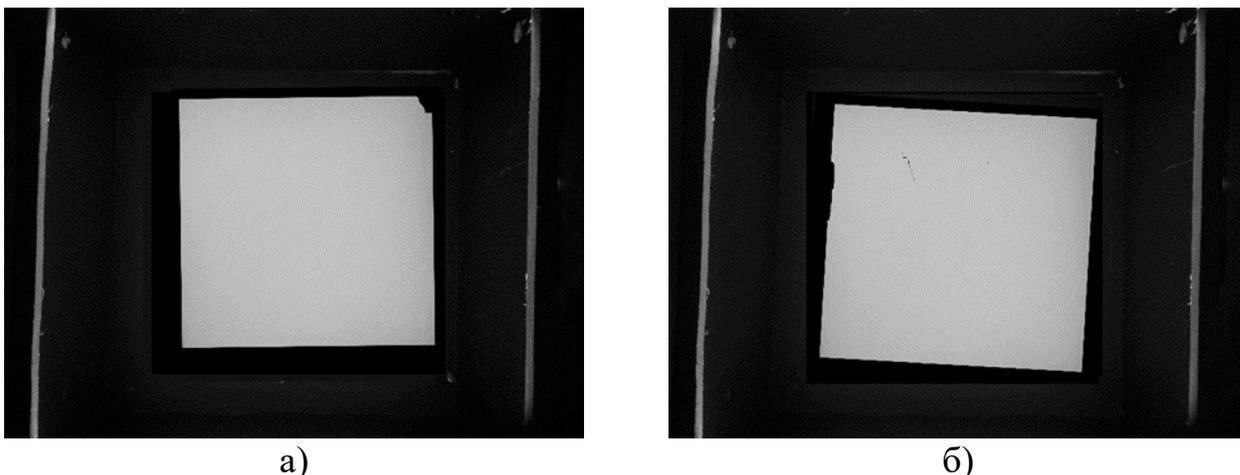
4.1 Обнаружение дефектов плитки на гранях и уголках

Согласно требованиям стандарта к внешнему виду керамической плитки для самых распространённых плиток размеров 150мм и 200мм и настенной укладки (при этом дефекты будут наиболее заметны) [9,11] для первого сорта трещины и щербинки на гранях и уголках не допускаются, а для плиток второго сорта - допустимы трещины по граням шириной не более 1мм и длиной не более 10мм, сколы на углах допустимы чуть более широкие – до 2мм, но в количестве не более двух. Это, как было отмечено выше, соответствовало 5-10 пикселям и позволило оценить необходимую чувствительность алгоритма обнаружения этих дефектов.

В эксперименте испытывались соответствующие блоки комплексного алгоритма, блок-схема которого приведена на рисунках 3.5 (первая часть алгоритма - получение маски тестируемой плитки) и 3.7 (собственно обнаружение дефектов на гранях и уголках плитки).

Первой операцией обработки был переход в серое изображение, как было выбрано выше, по третьему методу (выражение (3.4)) с помощью функции `cvtColor_BGR2GRAY` из библиотеки `OpenCV` (рисунок 4.3). Т.к. такая реализация этой операции, судя по литературным источникам, достаточно хорошо себя зарекомендовала, то дополнительных исследований с другими методами не проводилось. По подобным основаниям для подавления шума был выбран медианный фильтр со структурным элементом размером 3x3, а для бинаризации изображения – порог `Отсу`.

Для выделения на изображении области, занимаемой плиткой (построения контура плитки) использовалась функция `cv2.findContours` из библиотеки `OpenCV`. При этом исследовались различные режимы работы, а т.к. искался наибольший контур, то лучшие результаты показал режим `RETR_LIST`, для которого не требовалась информация о иерархии контуров. Варианты аппроксимации контуров не исследовались, т.к. оператор `cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE` экономит время и память.



а) б)
Рисунок 4.3 – Изображения плитки в оттенках серого (а - плитка с угловыми дефектами, б - с дефектами на гранях; по-прежнему вертикальные полосы по бокам кадров – имитация конвейерной ленты)

При очистке выделенного поля от мелких шумовых точек сравнивались два метода. Первый метод предполагал выполнение процесса закрытия. При этом сначала происходит расширение. Использовался структурный элемент квадратной формы размером 3×3 , в результате чего получалась белая квадратная форма с четкими границами. Этот процесс потребовал больших вычислительных затрат, и существенно зависел от структурного элемента, который в свою очередь, требовал для своего выбора учета количества и размера дефектов, присутствующих на плитках.

При использовании второго метода для очистки выделенного поля плитки от мелких шумовых точек предлагалось внутреннюю часть большего контура заполнять белыми пикселями. Второй метод доказал свою скорость, точность и стабильность при всех размерах дефектов. Так получалась маска тестируемой плитки, хотя еще и не отделенная от фона (рисунок 4.4).

Далее в эксперименте сначала использовался вариант, требующий поворота плитки (имитация отсутствия на конвейере направляющих) – рисунок 4.4б. Естественно, необходимость поворота плитки влияет на общее время обработки, но т.к. направляющие на конвейере в реальных условиях могут отсутствовать, то эта ситуация тоже рассматривалась в эксперименте.



Рисунок 4.4 – Бинарное изображение плитки с угловыми дефектами (а) и дефектами на гранях (б) после определения наибольшего контура

В этом случае для определения угла поворота контура в алгоритме использовалась функция `cv2.minAreaRect()`, возвращающая значения необходимого угла поворота. Углы отклонения положения плитки от нормального задавались в диапазоне 0-90°. Правильность отработки угла поворота отдельно не контролировалась, а определялся конечный результат определения дефектности плиток.

На рисунке 4.5 показаны изображения плиток после выполнения в случае необходимости операции поворота и применения функции `cv2.boundingRect()` для выделения собственно изображения и наложения маски плитки. Дефекты определяются путем подсчета черных пикселей.

Для исследования были частично использованы плитки с реальными дефектами, частично дефекты были симитированы, причем разные варианты однотипных дефектов отличались размерами и формой. Число повторных экспериментов при каждом виде и варианте дефекта было не менее 10. Как отмечено было выше, часть плиток предъявлялась алгоритму не в стандартном положении, что требовало дополнительно поворота изображения. Как выяснилось в результате экспериментов проведение операции поворота не отразилось на результатах работы алгоритма: дефекты на уголках и на гранях были обнаружены в 100% опытов. В таблице 4.1 приведены результаты работы алгоритма обработки изображений для

обнаружения дефектов на уголках и гранях керамических плиток (допустимые дефекты означают, что плитка полностью не бракуется, а переходит во второй сорт).

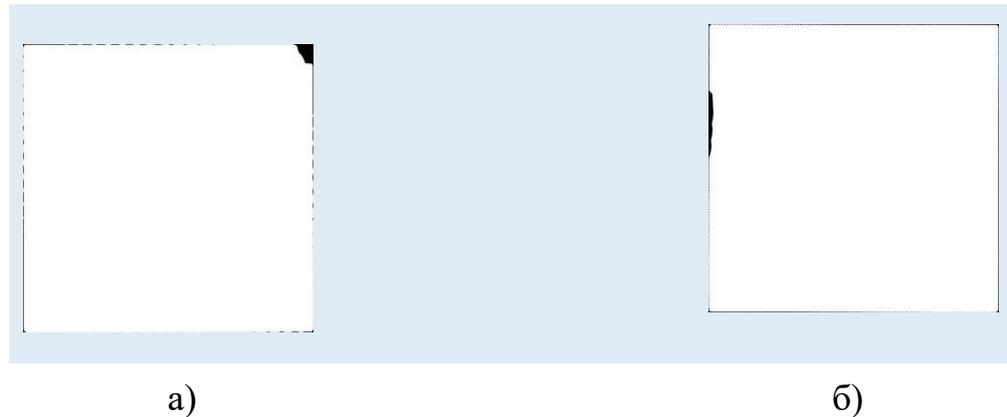


Рисунок 4.5 – Выделенное изображение собственно плитки с угловыми дефектами (а) и с дефектами гранях (б) после наложения маски (фон на рисунке использован для визуального выделения изображения плитки, черные пиксели соответствуют дефектам)

Таблица 4.1 – Результаты проверки работы алгоритма обнаружения дефектов на уголках и гранях плиток

Вид плиток	Тип дефекта	Количество вариантов дефекта	Размер дефекта	
			пикселей	мм ²
Дефектные плитки 200x200мм	Сколы на уголках	10	16 - 58	0,7 – 2,4
	Выщерблены на гранях	23	17 - 27	3.4 - 5.4
Годные плитки 200x200мм	Допустимые дефекты	34	0 - 11	0 – 0.5
Дефектные плитки 150x150мм	Сколы на уголках	6	15 - 38	0.7 – 1,5
	Выщерблены на гранях	11	14 - 56	0.6 – 2.4
Годные плитки 150x150мм	Допустимые дефекты	26	0 - 9	0 - 0.4
Процент дефектов, обнаруженных правильно			100%	

4.2 Обнаружение механических дефектов на лицевой поверхности плитки

Учитывая, что этот блок комплексного алгоритма активируется после успешного прохождения плиткой первого блока, то операции перехода в оттенки серого на входе плитки в блок оказывается уже выполненной и маска сформирована. Что касается поворота (если требуется), то угол и центр – известны и остается выполнить лишь аффинное преобразование (см. блок-схему алгоритма на рисунке 3.7).

Однако, возможное низкое качество изображения, неравномерное или недостаточное освещение во время съемки, как отмечалось в п.3.7, могут привести к снижению контрастности и потере деталей на изображении. Поэтому в алгоритме предусмотрена операция эквализации гистограммы для улучшения изображения (см. блок-схему блока алгоритма по обнаружению дефектов на лицевой поверхности керамической плитки – рисунок 3.7). Таким образом, изображения можно будет интерпретировать, что облегчает их анализ, понимание и обнаружение мельчайших дефектов или неровностей керамической плитки. В эксперименте исследовалось качество изображения при разных уровнях отсечения интегральной кривой гистограммы.

Метод эквализации гистограммы предполагает ограничение значений интенсивности изображения в заранее заданном диапазоне. Этот метод предполагает использование заранее определенных верхнего и нижнего порогов интенсивности для усечения гистограммы, что приводит к сжатию или расширению диапазона интенсивности изображения. Важным аспектом использования метода является четкое определение границ, чтобы добиться желаемого повышения контрастности без потери важных деталей изображения. Регулировка диапазона интенсивности может радикально изменить внешний вид и содержание изображения.

Был изучен диапазон обрезки интегральной гистограммы от 1% до 10% и получен вывод, что ее можно использовать без потери деталей. На рисунке 4.6 показана гистограмма как до (синий график), так и после (оранжевый график)

обрезки 2%, что оказалось достаточным. При этом незначительно возросло время обработки, но существенно улучшалось качество изображения.

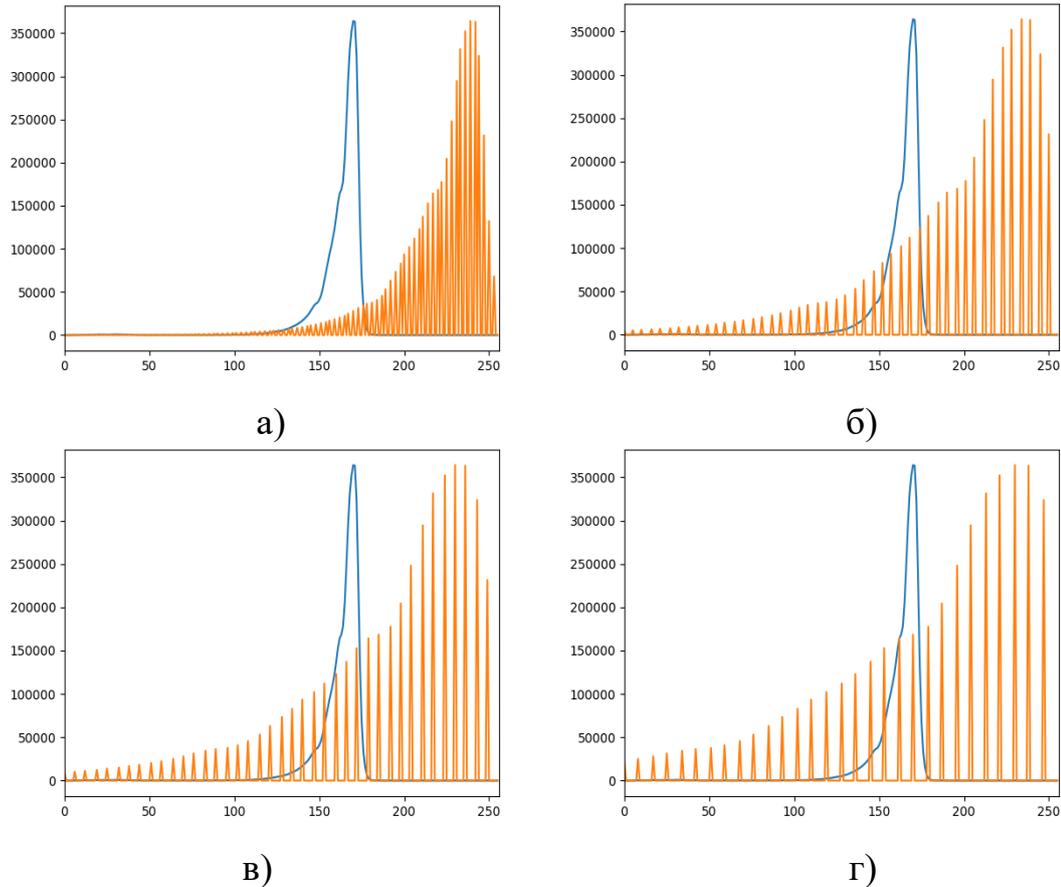


Рисунок 4.6 – Гистограммы до (синяя) и после (красная) обрезки 1% (а), 3% (б), 5% (в) и 10% (г) хвостов исходной гистограммы

На рисунке 4.6 показано, что увеличение степени обрезки исходной гистограммы приводит к увеличению размытия изображения и усилению шума, поэтому сильно увеличивать уровень обрезки гистограммы нежелательно. На основании анализа изображений рисунка 4.7 решено было рекомендовать 2% уровень обрезки. Для выделения дефектов здесь также использовалась бинаризация изображения. Однако, как было отмечено в п.3.7, учитывая часто невысокую контрастность поверхностных дефектов и к тому же возможные неравномерности освещения, было решено использовать при бинаризации не глобальные, а локальные пороги, т.е. использовать адаптивную бинаризацию.

Для определения значений адаптивного порога в OpenCV имеется функция `cv2`. При сравнении двух вариантов реализации функций `cv2` для адаптивного порога с различными подходами к установлению пороговых значений, а именно

`cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C` и `cv2.ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C`, учитывались конкретные характеристики и результирующие воздействия, связанные с каждым вариантом.

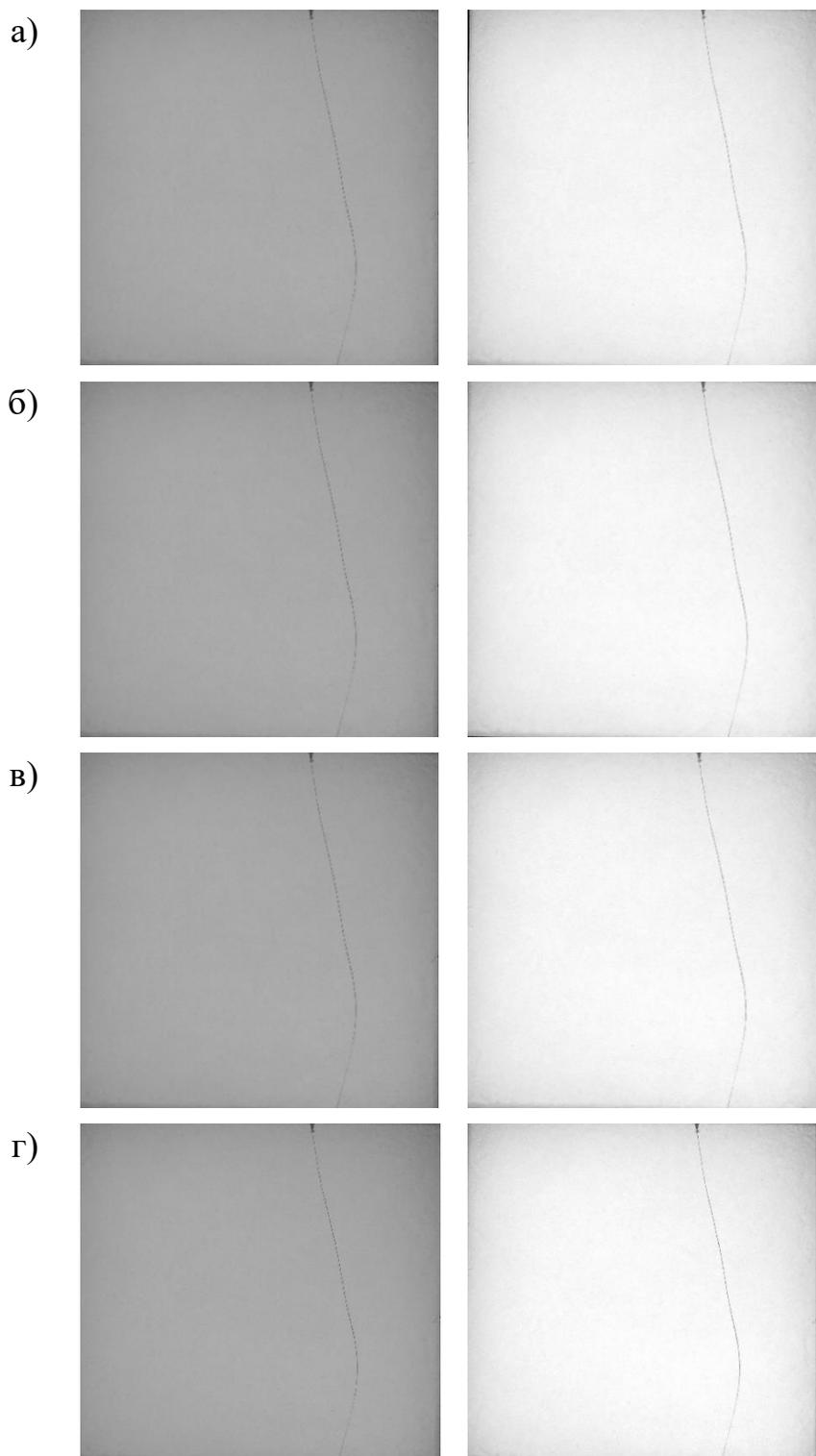


Рисунок 4.7 – Серое изображение до и после (справа) улучшения контраста при обрезке изображением при обрезке 1% (а), 3% (б), 5% (в) и 10% (г) хвостов исходной гистограммы

Метод `cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C` использует окно Гаусса для вычисления порогового значения для каждого пикселя, которое определяется путем взвешивания суммы соседних пикселей. Окно Гаусса присваивает более высокие веса пикселям, расположенным вблизи центра окрестности (блока). Соседние пиксели определяются обычно квадратным блоком с преобразуемым пикселем в его центре. Размеры блока обычно варьируются в широких пределах и определяют зону задания функции бс. Этот метод применим в тех случаях, когда существует прогрессивный сдвиг между основным объектом и окружающей средой или когда изображение неравномерно освещено.

Метод `cv2.ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C` вычисляет пороговое значение для каждого пикселя путем усреднения значений пикселей в его локальной окрестности (блоке). Подход, используемый в этом методе, предполагает присвоение одинаковых весов каждому пикселю в блоке. Этот метод подходит в тех случаях, когда существует явный контраст между основным объектом и окружающим фоном или когда освещение на изображении достаточно равномерное.

Чтобы выбрать наиболее подходящий метод, важно учитывать особенности рассматриваемого изображения. Если изображение содержит постепенные переходы или меняющиеся условия освещения, использование метода `cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C` может дать более благоприятные результаты. Альтернативно, в случаях, когда изображение демонстрирует отчетливые переходы или постоянные условия освещения, метод `cv2.ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C` может считаться более подходящим.

OpenCV позволяет настраивать метод, вводя константу C . Тогда пороговое значение будет представлять собой взвешенную по Гауссу сумму (первый метод) или среднее (второй метод) значений интенсивностей соседних пикселей за вычетом константы C . Таким образом, на результаты определения порога будут влиять размер блока и константа C .

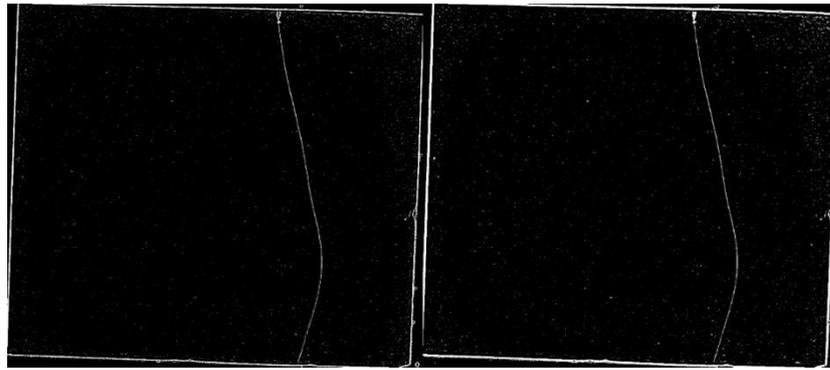
Гауссово определение адаптивного порога по окну Гаусса или среднего — это два популярных метода, которые предлагает OpenCV. Для выбора конкретного

типа определения значений адаптивного порога было проведено их сравнение с точки зрения устойчивости к изменениям освещения, четкости изображения и точности сегментации объектов. Чувствительность и точность процесса определения адаптивного порога контролируются путем настройки параметров, а именно, как было сказано выше, размера блока и константы C .

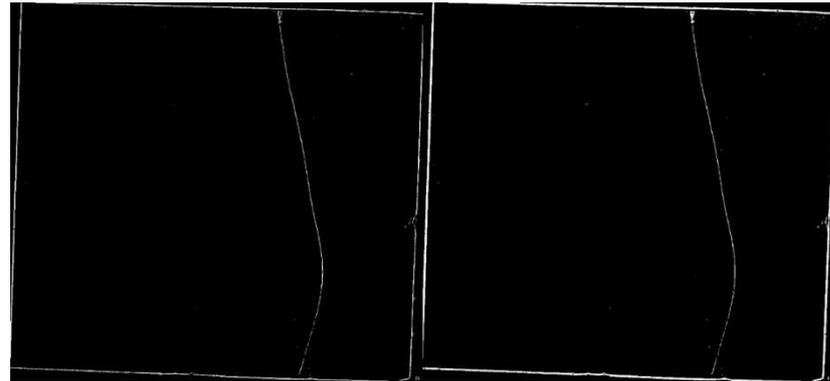
Параметр « C » влияет на пороговое значение, рассчитываемое путем добавления или вычитания фиксированного значения из среднего или средневзвешенного значений пикселей в локальной окрестности. Положительное значение делает датчик более чувствительным к изменениям плотности пикселей, что полезно для улавливания мелких деталей или различий в освещении. С другой стороны, отрицательное значение снижает чувствительность, что полезно для обеспечения равномерного освещения или уменьшения влияния шума на порог. Для определения мелких деталей и изменений освещения важны оба значения.

Было изучено влияние значений « C » и размера блока и выбрано лучшее, исходя из характеристик изображения и необходимого уровня чувствительности. Способность отличать объекты от фона и сохранять важные детали тестировалась с различными значениями размера блока и C для каждого подхода к пороговому определению (рисунок 4.8).

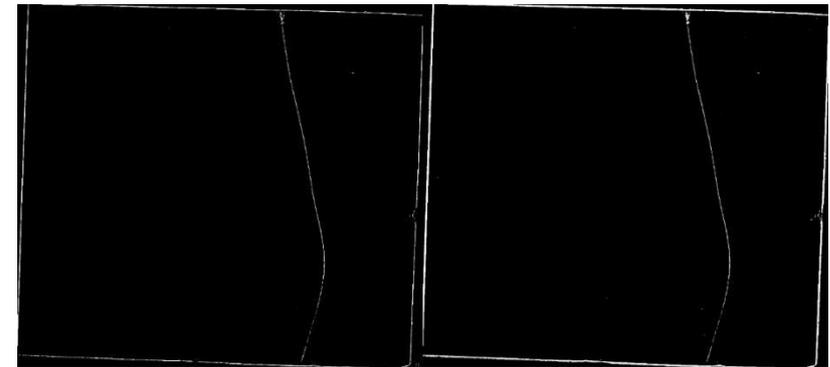
Согласно графикам рисунков 4.9 и 4.10, меньшее значение СКО означает более четкое изображение при сохранении деталей изображения. Из анализа графиков выбираем пороги по Гауссу, т.к. при его использовании СКО значительно меньше, чем при использовании порогов по среднему. Что касается сравнения изображений рисунка 4.8 с графиками СКО, можно заметить, что при $C \geq 19$, теряются некоторые детали дефектов. Поэтому были выбраны значения $B=29$ и $C=14$.



а)



б)



в)

Рисунок 4.8 – Изображение после обработки с адаптивным порогом по Гауссу (слева) и по среднему (справа) при размерах блока и значениях параметра C : 29×29 , $C = 14$ – а); 39×39 , $C = 14$ – б); 19×19 , $C = 14$ – в)

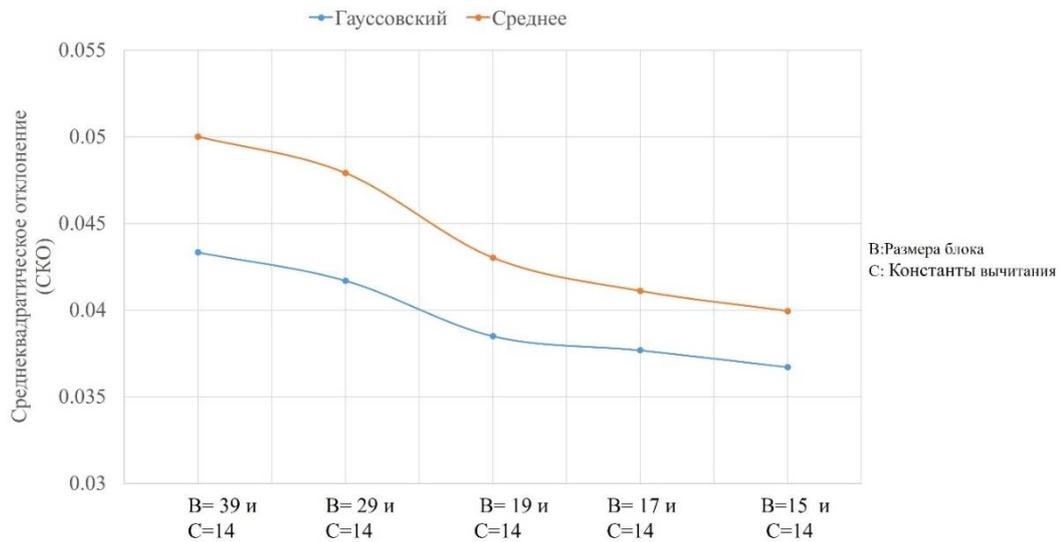


Рисунок 4.9 – Сравнение СКО изображения после обработки с адаптивными порогами по Гауссу и по среднему при изменении размера блока

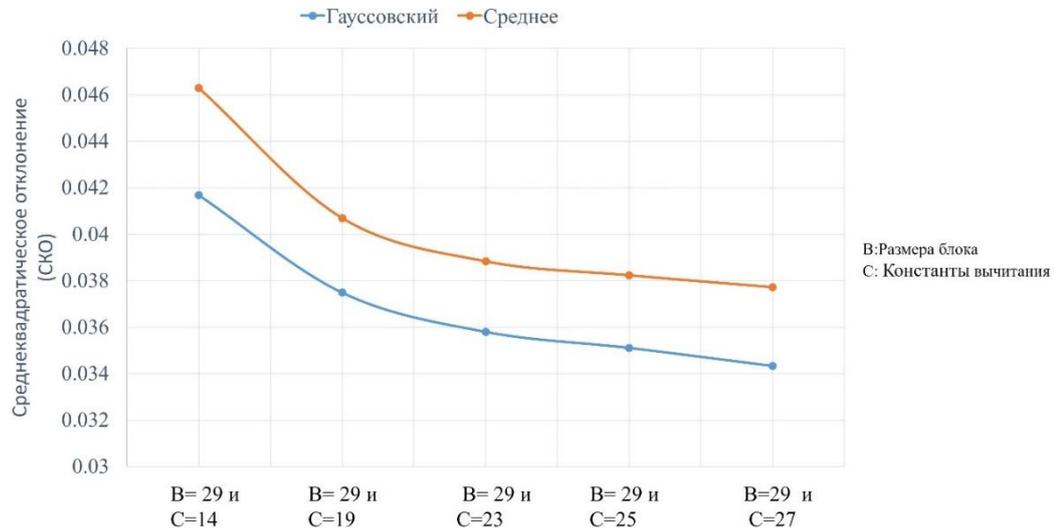


Рисунок 4.10 – Сравнение СКО изображения после обработки с адаптивными порогами по Гауссу и по среднему при изменении размера параметра С

После бинаризации изображения, проведенного с адаптивным порогом, операцией попиксельного сравнения с маской с одновременным выполнением логической операции И (Bitwise_and) получаем изображение с выделенными дефектами на лицевой поверхности плитки, т.е. фактически проводится наложение исходного изображения на маску. Здесь следует отметить, что осуществляется переход к изображению-маске с помощью Bitwise_and(.) и задается черный цвет внешнего контура с помощью функции drawcontours() (рисунок 4.11).

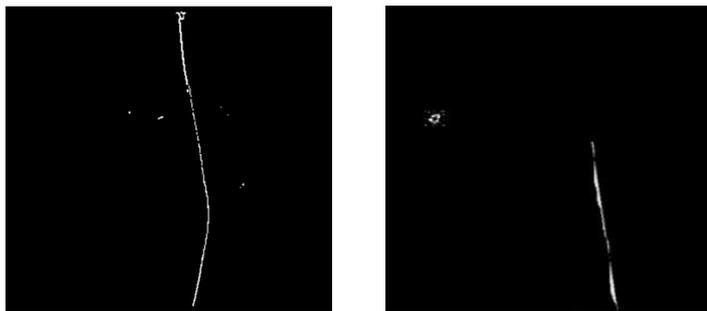


Рисунок 4.11 – Изображения выявленных поверхностных дефектов плитки

Для исследования возможностей второго блока предлагаемого алгоритма были подготовлены плитки с реальными и имитированными дефектами. В частности, были подготовлены 8 вариантов плиток с блобами и пятнами разной размера от $R=0,3\text{мм}$ до $R=17\text{мм}$. С каждым вариантом дефекта было проведено по несколько (не менее 5) экспериментов. При этом вычислялось также и СКО, косвенно свидетельствующее о чувствительности метода (хотя, к сожалению, далеко не всегда). Усредненные результаты приведены в таблице 4.2.

Как следует из таблицы при очень малых размерах дефекта число правильных обнаружений уменьшается. Так при радиусе пятен и блобов менее $0,4\text{мм}$ число их обнаружений уменьшилось вдвое, что, однако, допустимо, т.к. с расстояния 1м (а это требование ГОСТа) эти дефекты просто не видны, а потому допустимы. В то же время заметные пятна в 1мм и более определяются уверенно (100%).

Таблица 4.2 – Результаты тестирования плиток с поверхностными дефектами в виде блобов и пятен

Тип дефекта	Размер дефекта, мм*	Правильные обнаружения		С К О
		Количество	Процент	
Блобы	0,3	4	40	0,004
	0,8	7	100	0,007
	0,9	7	100	0,010
	1,1	7	100	0,014
	1,5	7	100	0,014
Пятна	0,4	5	50	0,004
	1,1	10	100	0,009
	1,7	10	100	0,015
Всего			86	
*Приведен радиус дефекта в предположении, что блобы и пятна имеют примерно круглую форму				

Аналогичным образом изучалась работа второго блока предлагаемого алгоритма на определение наколов и мушек. Было подготовлено 10 вариантов этих дефектов разных размеров радиусами от 0,5мм до 1мм, что соответствовало примерно площади, занимаемой 20-80 пикселями. Результаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты тестирования плиток с поверхностными дефектами в виде наколов и мушек

Тип дефекта	Размер дефекта, мм*	Правильные обнаружения		С К О
		Количество	Процент	
Наколы/мушки	0,5	7	70	0,004
	0,5**	9	90	0,006
	0,6	9	90	0,005
	0,6**	10	100	0,008
	0,9	10	100	0,008
	1,0	10	100	0,009
*Приведен радиус дефекта в предположении, что наколы и мушки имеют круглую форму				
** Дефект состоит из нескольких наколов и мушек (до 10)				

Из таблицы видно, что алгоритм успешно справился с задачей. При этом, при наличии множественных наколов или мушек, а это обычно и наблюдается в действительности, алгоритм работает устойчивее, что и следовало было ожидать.

Анализ работы второго блока предлагаемого алгоритма на определение трещин и царапин на поверхности плитки проводился также по подготовленным образцам дефектов. Всего было подготовлено по 10 образцов каждого типа дефектов, отличающихся формой и размерами. Что касается царапин, то они были либо однонаправленные (прямолинейные и криволинейные), узкие и отличались длиной, либо зигзагообразные. Трещины были только однонаправленные и различались еще и по ширине. Результаты тестирования работы алгоритма по обнаружению царапин и трещин на поверхности керамической плитки приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты тестирования плиток с поверхностными дефектами в виде царапин и трещин

Тип дефекта	Размер дефекта, мм*	Правильные обнаружения		С К О
		Количество	Процент	
Царапины/ трещины	0,4x21	10	100	0,019
	0,4x25***	10	100	0,021
	0,4x31***	10	100	0,019
	0,5xL	---	0	0,048
	0,6x19	10	100	0,022
	0,6xL	---	0	0,052
	0,8x7	10	100	0,016
	0,8x40	10	100	0,028
	0,8xL	----	0	0,055
	1,6x4	10	100	0,015
	2,2x10	10	100	0,024
*Приведены ширина и длина прямоугольника, описывающего фигуру дефекта.				
***Для зигзагообразных и криволинейных царапин указывается общая длина.				
L- длина грани тестируемой плитки (150 или 200мм)				

Анализ данных таблицы показал, что требования к обнаружению царапин и трещин 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 за максимальный контур, ограниченный трещиной, а потому считает трещину естественной гранью плитки. На практике эти плитки будут отбракованы после работы еще первого блока алгоритма, при выделении контура плитки и проверки размеров граней. Этот случай здесь был приведен, чтобы показать необходимость хотя бы грубой оценки размеров выделенных контуров плитки.

Для проверки робастности алгоритма к неблагоприятным условиям освещения сравнивались результаты обнаружения механических дефектов при нормальном равномерном освещении (300лкс) и неравномерном освещении с перепадами 50лкс.

Из данных таблицы 4.5 видно, что освещенность влияет в основном на качество определения мелких дефектов. Поэтому если присутствие этих дефектов, например, вследствие технологических причин ожидается с большой долей вероятности, то необходимо обеспечить равномерное освещение рабочей зоны.

Таблица 4.5 – Результаты работы алгоритма в условиях неравномерной освещенности рабочего поля

Тип плитки	Тип дефекта	Реальные дефекты плиток	Выявлено дефектов при освещенности	
			равномерной	неравномерной
Дефектные плитки	Блоб	5	4	4
	Пятна	3	2	2
	Трещины	17	13	13
	Царапины	21	21	21
	Наколы, мушки	49	49	35
	Сколы на углах	16	16	16
	Выщерблины на гранях плитки	34	34	34
Годные плитки	–	60	60	60
Общий итог		205	199	190
Доля обнаруженных дефектов		0,970		0,902

Результаты работы первых двух блоков комплексного алгоритма представлены на рисунке 4.12 в графической форме.

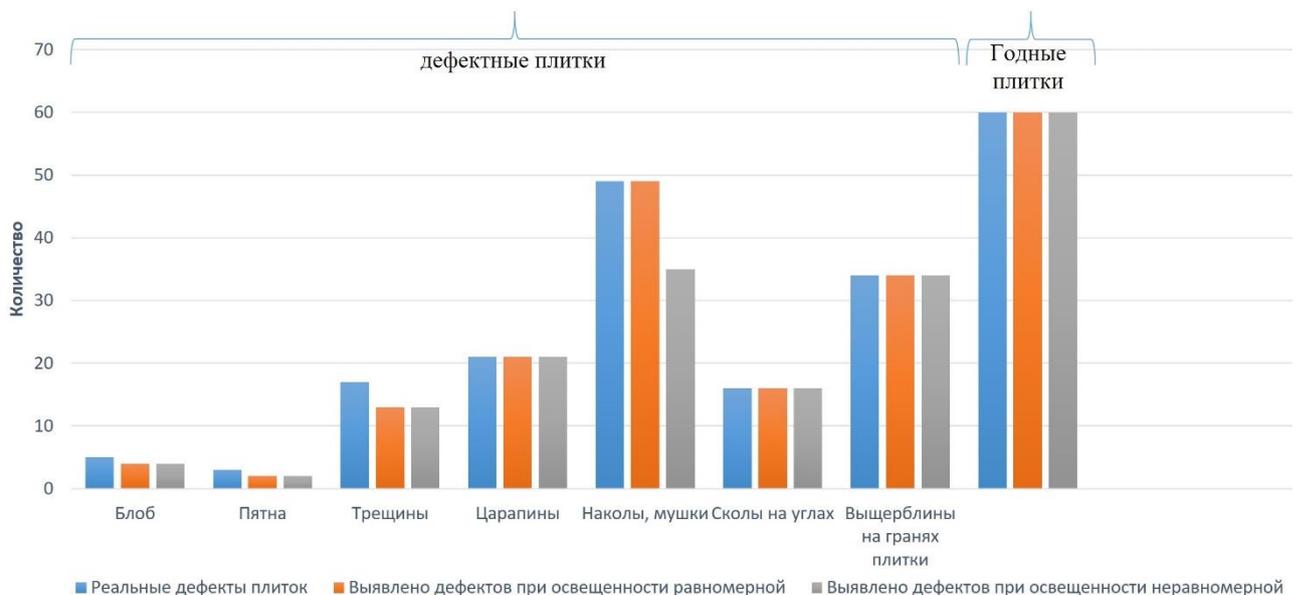


Рисунок 4.12 – Результаты работы первых двух блоков комплексного алгоритма (нормальное освещение)

Методы обнаружения были протестированы на плитках разного цвета при одинаковых условиях освещения, были выбраны изображения плиток, содержащих дефекты поверхности, угловые дефекты и отклонения кромок, и результаты оказались независимыми от исходного цвета плитки. Этого следовало было ожидать, т.к. первой операцией алгоритма был переход в оттенки серого.

Однако такие дефекты, как пятна, мушки и тому подобные дефекты, все-таки должны контрастировать с общим тоном плитки. В случае трещин и царапин этого можно добиться, например, соответствующим освещением. Важно также, чтобы лента конвейера контрастировала с цветом плитки.

Особый случай составляют черные плитки или плитки темных (близких к черному) цветов (рисунок 4.13). В этом случае необходимо на этапе работы второго блока алгоритма провести инверсию интенсивности и далее продолжить работу.



а)

б)

в)

Рисунок 4.13 – Примеры тестируемых цветных плиток, где

а) исходное изображение; б) обнаружение дефектов на уголках; в) обнаружение дефектов поверхности

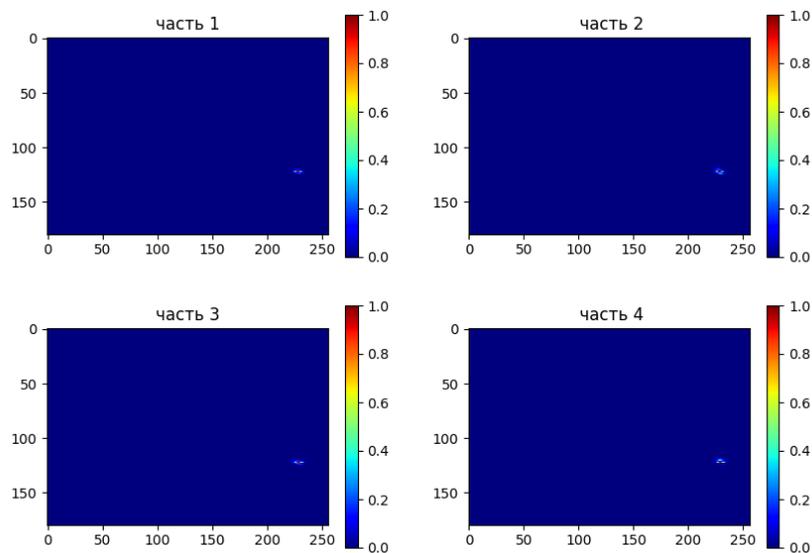
4.3 Обнаружение цветовых дефектов плитки

4.3.1 Контроль однородности и равномерности цвета плитки

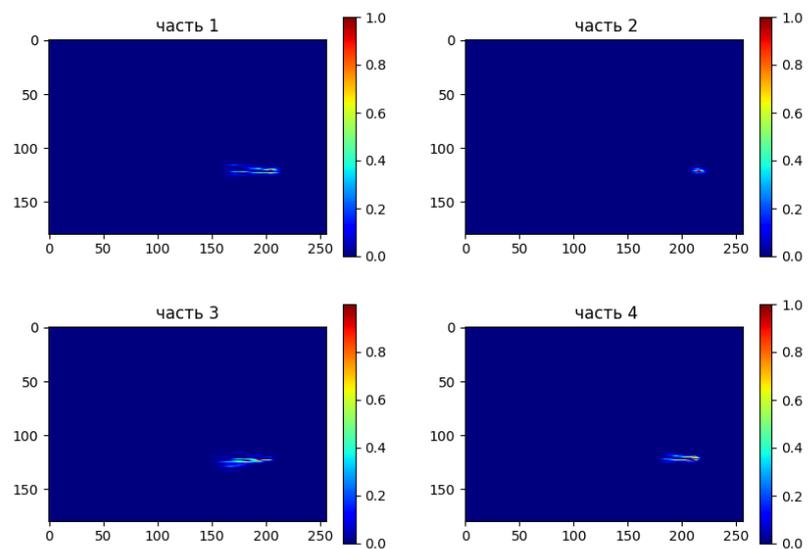
Для контроля однородности и равномерности распределения цвета на поверхности однотонной плитки использовался первый субблок третьего блока разработанного комплексного алгоритма, блок-схема которого приведена на рисунке 3.9. Прежде всего предполагался переход из пространства RGB в пространство HSV. Для контроля поверхность плитки разделяется на ряд участков (зон). При этом для плиток размером до 200x200мм, используемых в эксперименте,

оказалось достаточным четырех участков (квадрантов). Для каждого из выделенных участков строятся гистограммы и определяется их близость расчетом корреляционной зависимости. При этом, строились 2D-гистограммы в координатах $H(0-180^\circ)$ и $V(0-255)$.

Распределение цвета на изображении можно узнать, изучив сгенерированную 2D-гистограмму, основанную на этих значениях оттенка (ось Y) и интенсивности (ось X). Количество пикселей с определенными значениями пар H и V (частота их появления на изображении) большей частью отображается цветом (рисунок 4.14).



(a)



(б)

Рисунок 4.14 – 2D-гистограмма четырех частей изображения: хорошая плитка (а); плитка с неравномерным распределением цвета (б)

2D-гистограмма любой части изображения рассчитывается с помощью OpenCV и отображается с помощью matplotlib. Для расчета гистограммы изображения используется функция cv2.calcHist из OpenCV.

На гистограмме видны высокие значения около $H = (120^\circ - 130^\circ)$ и $V = (150 - 230)$. Это соответствует тональности цвета поверхности тестируемых плиток. Далее рассчитывался коэффициент корреляции по выражению (3.9) – функция cv2.calcHist. Всего было проведено 50 экспериментов (из них 33 с плитками, у которых искусственно были смоделированы неравномерности цвета). Значение порога $\gamma_3 \approx 0,75$ было определено эмпирическим путем.

В таблице 4.6 в качестве примера приведены коэффициенты корреляции $d(H_1, H_2)$ для каждой пары выделенных квадрантов плитки и их сравнение для плиток с однородным и неоднородным цветом поверхности. Алгоритм подтвердил свою работоспособность, обеспечив уверенное определение неравномерности и однородности цвета в 100% экспериментов. При этом анализ данных таблицы показал, что при значениях $d(H_1, H_2) \geq 0,7-0,8$ различить неравномерности цвета поверхности тестируемых плиток невооруженным глазом не удаётся.

Время, необходимое для контроля цвета, определяется следующими составляющими:

- а) временем на преобразование изображения из RGB в HSV;
- б) временем на построение гистограмм и вычисление коэффициентов корреляции, которое зависит от размера плитки.

Всего требуется около 15мс на плитку размером 200x200мм (1320x1500 пикселей).

Таблица 4.6 – Примеры значений коэффициентов корреляции $d(H_1, H_2)$ для пар квадрантов плиток с однородным и неоднородным цветом поверхности

Плитка	Сравнение цветов квадрантов плитки	коэффициенты корреляции $d(H_1, H_2)$		Результат
1	metric_val_1_2	0.98	+	Однородный цвет
	metric_val_1_3	0.98	+	
	metric_val_1_4	0.91	+	
	metric_val_2_3	0.95	+	
	metric_val_2_4	0.89	+	
	metric_val_3_4	0.92	+	
2	metric_val_1_2	0.89	+	Однородный цвет
	metric_val_1_3	0.92	+	
	metric_val_1_4	0.75	+	
	metric_val_2_3	0.87	+	
	metric_val_2_4	0.88	+	
	metric_val_3_4	0.91	+	
3	metric_val_1_2	0.87	+	Неоднородный цвет
	metric_val_1_3	0.45	-	
	metric_val_1_4	0.56	-	
	metric_val_2_3	0.81	+	
	metric_val_2_4	0.73	-	
	metric_val_3_4	0.04	-	
4	metric_val_1_2	0.91	+	Неоднородный цвет
	metric_val_1_3	0.17	-	
	metric_val_1_4	0.07	-	
	metric_val_2_3	0.41	-	
	metric_val_2_4	0.53	-	
	metric_val_3_4	0.64	-	

4.3.2 Сравнение цветов разных плиток

Для количественной характеристики различия в восприятии двух цветов, т.е. количественного сравнения цветов на основе их визуальных различий, как было сказано выше (п.3.8.2) используется разность ΔE_{CMC} (ГОСТ 27180-2019). Для ее вычисления было решено применить модель цвета CIE Lab, т.к. вычисление ΔE_{CMC} в пространстве HSV затруднительно. Для конвертации изображения из RGB в CIE Lab использовалась функция `Lab_image=color.rgb2lab(RGBimage)` из библиотеки Scikit-Image, как более быстрая и точная. Расчёт ΔE_{CMC} выполнялся с помощью функции `color.delta_E(image1_lab, image2_lab)`.

Однако, хотя показатель ΔE_{CMC} в CIE Lab эффективен при обнаружении цветовых различий, чувствителен к небольшим изменениям цвета и соответствуют человеческому восприятию, но его определение имеет значительную вычислительную сложность, что затрудняет работу в реальном времени. Тем не менее, учитывая, что цветовые различия между плитками определяются после выяснения 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.

Кроме того, согласно алгоритму (рисунок.3.10) при сравнении цветов двух плиток первая плитка считается эталоном до того момента, пока разность ее цвета с цветом следующей плитки не превысит некоторое пороговое значение. С этого момента эта плитка становится вторым эталоном и далее сравнение идет уже с двумя плитками (рисунок 4.15).

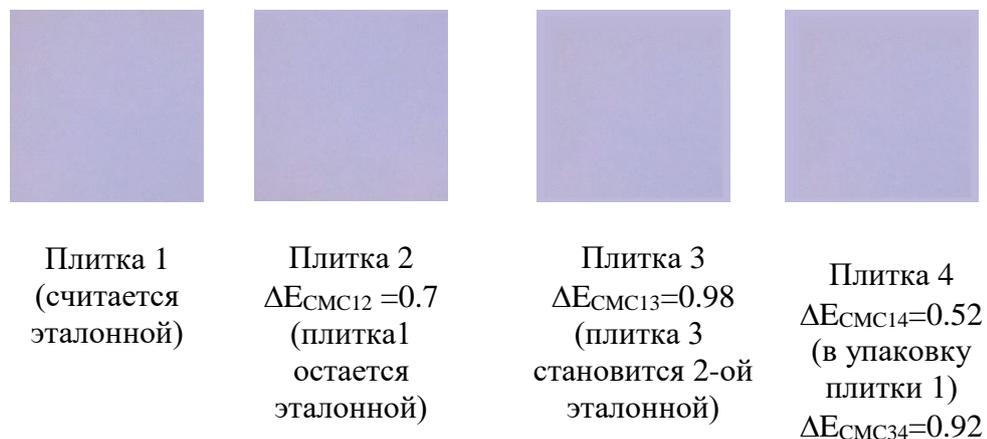


Рисунок 4.15 – Значения ΔE_{CMC} при сравнении цвета плитки с цветом плиток, считающихся в данный момент эталонными

Таблица 4.7 – Значения $\Delta E_{\text{СМС}}$ при сравнении цвета плитки с цветом плиток, считающихся в данный момент эталонными

Плитки		$\Delta E_{\text{СМС}}$
Плитка 1	Плитка 2	$\Delta E_{\text{СМС}12}=0.7$ остается эталонной
Плитка 1	Плитка 3	$\Delta E_{\text{СМС}13}= 0.98$ Плитка 3 становится 2-ой эталонной
Плитка 1	Плитка 4	$\Delta E_{\text{СМС}14}=0.52$
Плитка 3		$\Delta E_{\text{СМС}34}=0.8$ в упаковку плитки 1

4.4 Оценка затрат времени на работу алгоритма обнаружения дефектов керамической плитки

Время, затрачиваемое на обработку изображения, естественно, зависело от размера плитки и наличия или отсутствия необходимости вращения изображения плитки. Оценка времени выполнения операций алгоритма также определялась скоростью работы процессора и зависела от размеров керамической плитки. Как уже было сказано выше, в работе использовался процессор Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU 1.60GHz; программа была написана на языке Python 3.7 с использованием библиотеки алгоритмов OpenCV и привлечением других библиотек, которые применяются для анализа 2D-изображений. Эксперименты проводились с квадратными плитками 150x150мм и 200x200мм.

В этом случае время работы первых двух блоков алгоритма (создание маски тестируемой плитки и выявление механических дефектов на уголках и гранях, а также механических дефектов и пятен на поверхности плитки) составило для большинства 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 цвета плитки после глазурирования определяется, в основном, временем преобразования координат изображения из RGB в HSV и временем на построение гистограмм и их сравнения. Это время также зависит от размера плиток и для плитки размером 200x200мм (грубо 1000x1000 пикселей) составило около 15мс.

Таким образом, если нет необходимости поворота изображения плитки (на конвейере есть направляющие) время на контроль плиток составляет 45-65мс без участия в формировании упаковки и 60-80мс с контролем на операции упаковки. При отсутствии направляющих и необходимости поворота изображения плитки во время его обработки, естественно работа алгоритма замедляется и время обработки увеличивается до 65-105мс и 80-120мс в тех же ситуациях. Естественно, что допустимая скорость конвейера в этом случае несколько замедляется, но все равно еще остается высокой, т.е. и здесь реализуется работа в реальном времени.

Сравнение с литературными данными, например, с данными в источнике [114] показало, что время обработки предложенными в данной работе методами обнаружения поверхностных, угловых и краевых дефектов (при отсутствии необходимости поворота изображения) в 7-10 раз быстрее. При необходимости поворота время обработки все равно в 3-7 раз меньше, чем в упомянутом источнике.

4.5 Определение эффективности использования керамической плитки для защиты от ионизирующего излучения

Как было сказано в п.3.8 для измерения защитных от гамма-излучения свойств керамической плитки применена установка измерения защитных свойств материалов, структура которой показана на рисунке 3.12 и в более полном виде на рисунке 4.16. Для проведения измерений прежде всего нужно было откалибровать детектор.

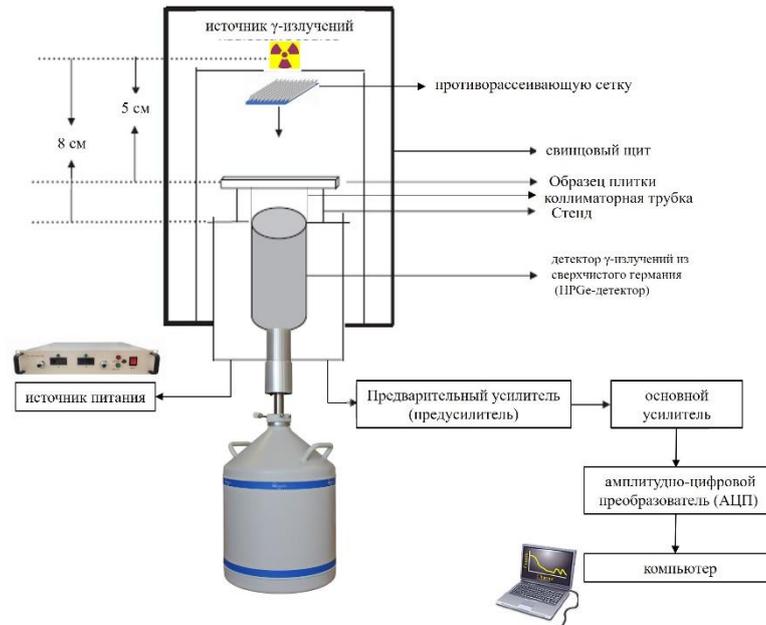


Рисунок 4.16 – Структура системы контроля и измерения степени радиационной защиты с использованием керамической плитки

Для этого был выбран источник гамма-излучения, состоящий из комбинации радионуклидов, включая Eu152 . Чтобы свести к минимуму неточности определения пиковой энергии, калибровочный источник располагался внутри 1-литрового стакана Маринелли как показано на рисунке 4.17. Энергия пиков Eu152 затем использовалась для определения калибровочной кривой детектора. Спектр энергий излучения Eu152 показан на рисунке 4.18, а на рисунке 4.19 приведена калибровочная кривая энергии, предоставленная компанией Canberra.



Рисунок 4.17 – Стакан Маринелли

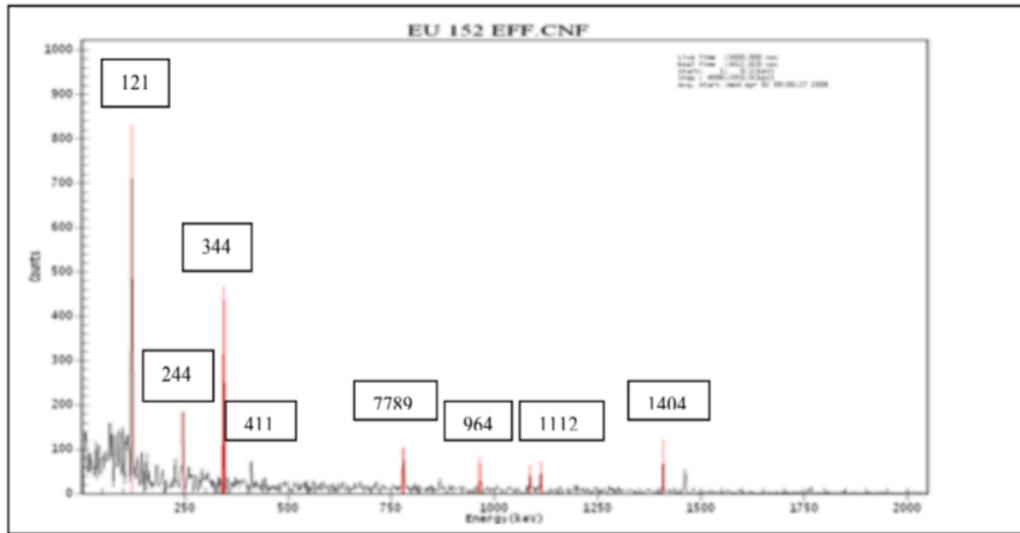


Рисунок 4.18 – Спектр энергий гамма-излучения Eu^{152}

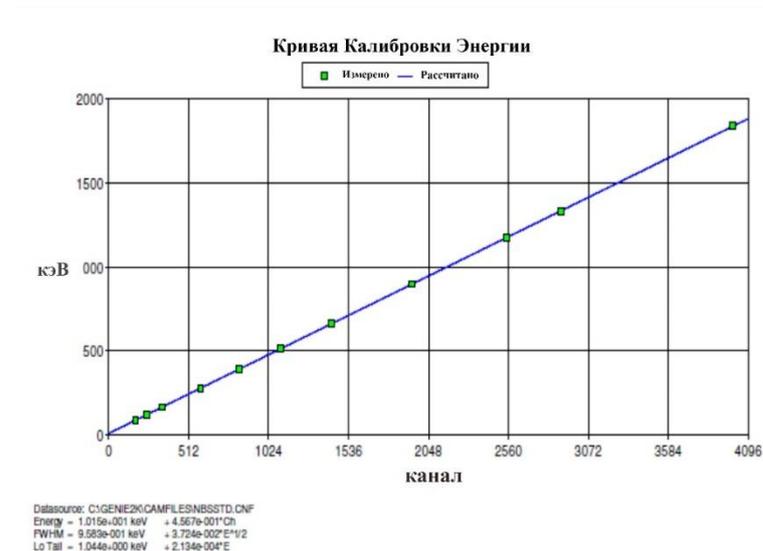


Рисунок 4.19 – Калибровочная кривая энергии, предоставленная компанией Canberra

Калибровка эффективности детектора была дополнительно проверена с использованием источников Eu^{152} , которые обладали той же геометрией. Затем эти измерения были оценены в соответствии со стандартами, установленными Международным агентством по атомной энергии (IAEA) [110]

В таблице 4.8 указаны активность и период полураспада радиоизотопных источников, использованных в тесте. Активность различных элементов измерялась 12.12.2022.

Таблица 4.8 – Характеристики, использованных источников излучения

Источники	Энергия (КэВ)	Период полураспада (год)	Активности (μ Кюри)
Am241	59.5	432.2	4.92
Cs137	661.07	30.05	5.92
Co60	1173	5.27	6.52
	1332	5.27	

Для исследования были отобраны образцы плиток, популярных на рынке Ирака, различающихся по составу материала, цвету, толщине и плотности. При этом оценка естественного излучения плиток 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).

В таблице 4.9 приведены значения среднего массового коэффициента ослабления гамма-излучения для разных материалов. При сравнении этих данных с данными таблицы 4.9 видно, что керамическая плитка обладает значительно лучшими защитными свойствами по сравнению с традиционными материалами.

Таблица 4.9 – Показатели экранирования для различных образцов плиток, популярных на рынке Ирака. Время измерения (время счета 60 минут)

Код	Страна происхождения	Энергия излучения	Плотность $г.см^{-3}$	Массовый коэффициент ослабления $\mu/\rho \text{ } г^{-1}см^2$	Слой половинного поглощения HVL см	Эффективность радиационной защиты (%) RPE
С1	Иран	59	1.7	0.473	0.862	53.69
		661		0.158	2.580	22.12
		1173		0.166	2.456	23.662
		1332		0.144	2.831	16.89
С2	Иран	59	1.74	0.471	0.845	54.159
		661		0.156	2.553	26.655
		1173		0.194	2.053	25.918
		1332		0.141	2.825	18.127

Продолжение таблицы 4.9

С3	Иран	59	1.96	0.410	0.862	53.56
		661		0.152	2.326	25.174
		1173		0.168	2.105	26.140
		1332		0.166	2.130	26.655
С4	Иран	59	1.96	0.423	0.836	55.514
		661		0.171	2.068	27.747
		1173		0.163	2.169	25.174
		1332		0.124	2.851	19.748
С5	Иран	59	1.99	0.412	0.845	54.159
		661		0.153	2.276	26.655
		1173		0.187	1.862	30.65
		1332		0.169	2.061	28.323
С6	Испания	59	2.04	0.422	0.805	55.067
		661		0.157	2.164	27.385
		1173		0.161	2.110	27.530
		1332		0.167	2.034	28.823
С7	Турция	59	2.1	0.414	0.797	57.216
		661		0.145	2.276	25.174
		1173		0.161	2.050	25.918
		1332		0.125	2.640	19.748
С8	Турция	59	2.13	0.378	0.860	54.159
		661		0.148	2.198	26.655
		1173		0.175	1.859	30.65
		1332		0.128	2.542	23.891
С9	Индия	59	2.15	0.399	0.808	57.641
		661		0.150	2.149	27.747
		1173		0.151	2.135	25.918
		1332		0.116	2.779	22.119
С10	Китай	59	2.17	0.397	0.804	57.726
		661		0.149	2.143	28.179
		1173		0.151	2.115	26.729
		1332		0.12	2.661	22.895
С11	Россия	59	2.2	0.396	0.795	57.684
		661		0.148	2.128	25.918
		1173		0.149	2.114	25.918
		1332		0.110	2.864	20.547
С12	Китай с А1	59	2.41	0.371	0.775	61.596
		661		0.172	1.672	35.596
		1173		0.148	1.943	36.237
		1332		0.132	2.178	34.949
С13	Китай с В4С	59	2.53	0.371	0.738	59.948
		661		0.175	1.565	35.274
		1173		0.167	1.640	33.635
		1332		0.142	1.929	29.531

Продолжение таблицы 4.9

С14	Китай с В4С	59	2.55	0.372	0.730	59.747
		661		0.176	1.544	34.95
		1173		0.176	1.544	27.385
		1332		0.134	2.028	28.108
С15	Китай имеет SiC	59	2.57	0.371	0.726	60.898
		661		0.180	1.498	36.237
		1173		0.180	1.498	36.237
		1332		0.155	1.740	31.613

Таблица 4.10 – Значения среднего массового коэффициента ослабления гамма-излучения для разных материалов [14]

Исследуемая выборка	Значения коэффициентов средней ослабленности массы (μ/ρ) ($\text{см}^2/\text{г}$) при энергиях фотонов	
	1173 кэВ	1332 кэВ
Кирпич	0,055	0,051
Почва	0,057	0,054
Цемент	0,057	0,052
Бетон	0,060	0,055
Мраморный камень	0,078	0,081
Сталь	0,05	0,045
Свинец Рb	0,0618	0,0562
Плитка(данная работа)	0,153	0,126
Плитка содержит бор (эта работа)	0,169	0,143

Массовые коэффициенты ослабления излучения плиткой измерялись с расположением плитки на разных расстояниях от детектора и сначала при отсутствии сетки между источником и тестируемой плиткой для параллелизации пучка. На рисунке 4.20 приведены результаты измерения массового коэффициента ослабления для средней энергии источника излучения в 661кэВ. Как и следовало было ожидать вследствие расходящегося пучка с увеличением расстояния от плитки до детектора (приближением плитки к детектору и, таким образом, некоторым увеличением мощности пучка за счет меньшего рассеяния) значения измеренных коэффициентов несколько уменьшаются. Поэтому наличие сетки все-таки желательно.

Однако, для целей контроля обычно достаточно точности 3-5%, поэтому на основании эксперимента можно рекомендовать работу без дополнительной сетки при достаточно широком диапазоне расстояний плитка-детектор от 3 до 10см. В таблице 4.9 приведены именно эти значения.

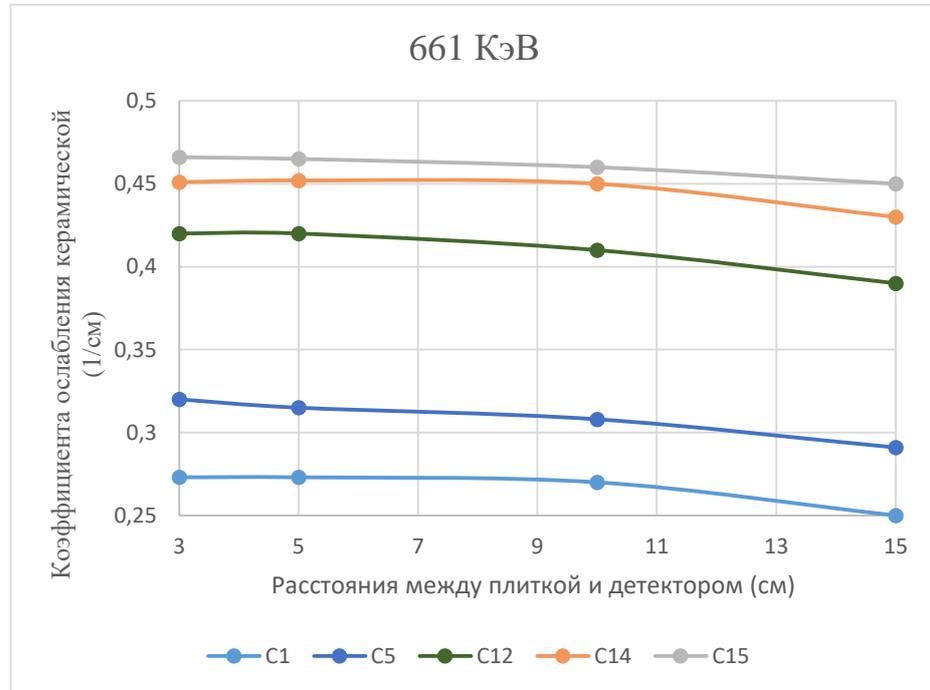


Рисунок 4.20 – Результаты измерения коэффициента ослабления при разных расстояниях между плиткой и детектором

На рисунке 4.21, показаны результаты измерения массового коэффициента ослабления гамма-излучения керамическими плитками (из таблицы 4.9) при энергиях (661 кэВ, 1173 кэВ и 1337 кэВ) при разных экспозициях.

Анализ результатов показал, что при измерениях массового коэффициента ослабления (μ/ρ), не требующих очень высокой точности, время экспозиции может быть снижено до 10 минут.

Одновременно с измерениями массового коэффициента ослабления на опытной установке были измерены и другие, не менее важные параметры, характеризующие защитные свойства керамических плиток, а именно величины слоя половинного поглощения HVL и эффективности радиационной защиты PRE (%). На рисунках 4.22 и 4.23 показаны результаты при разных энергиях источников излучения.

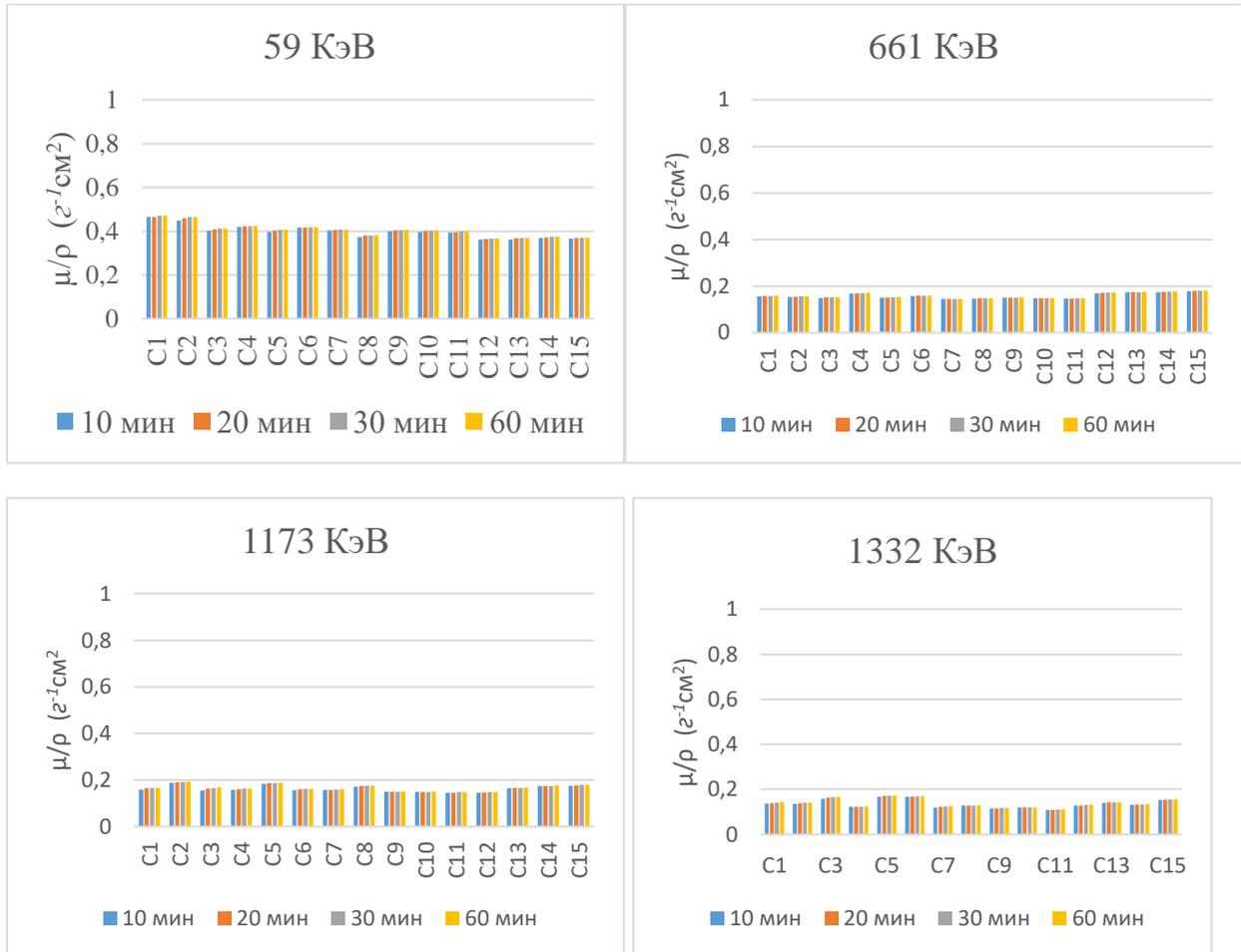


Рисунок 4.21 – Результаты измерения массового коэффициента ослабления (μ/ρ) гамма-излучения керамическими плитками при разных энергиях источников

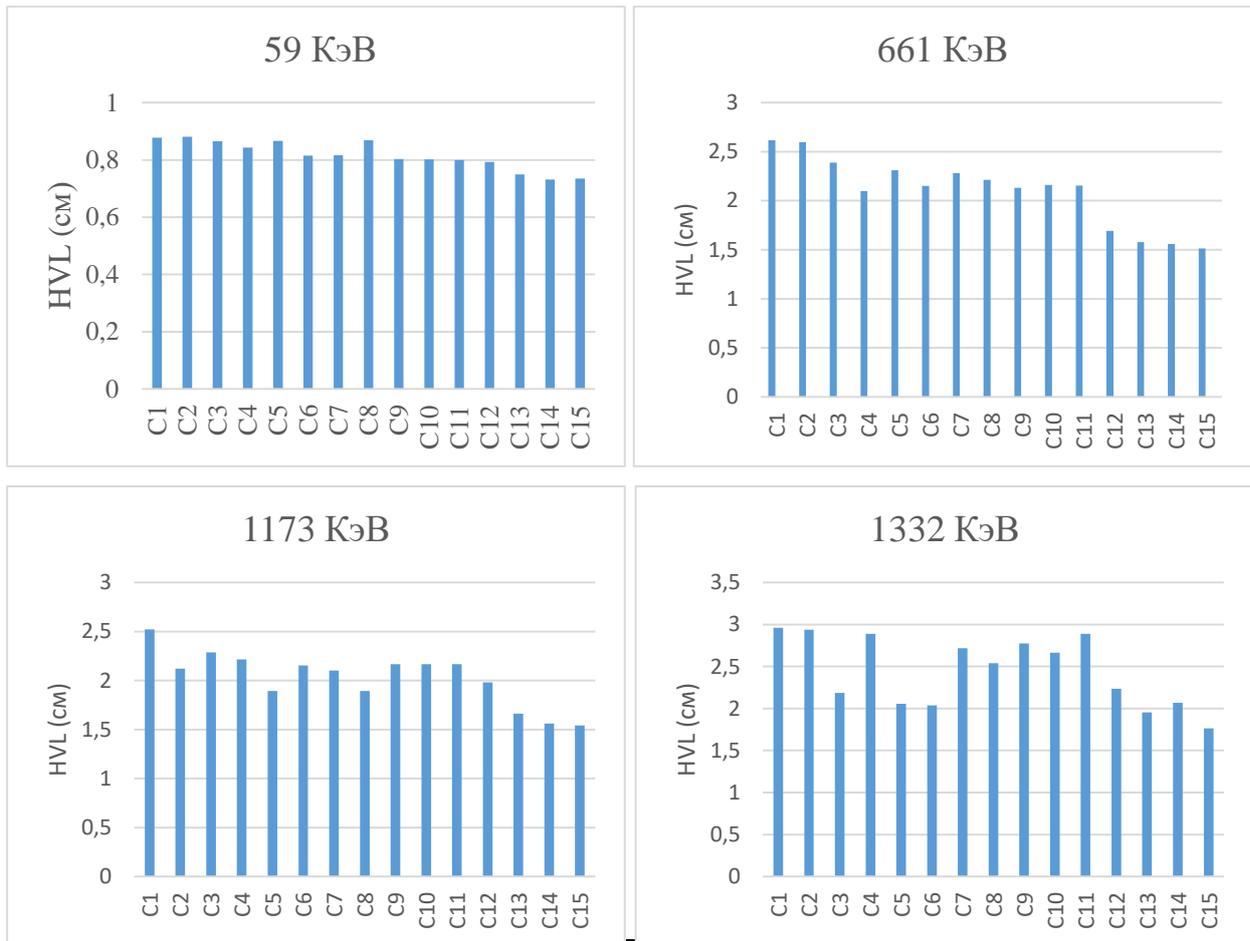


Рисунок 4.22 – Результаты измерения HVL для плиток из таблицы 4.9 при разных энергиях источников излучения (время счета 10 секунд)

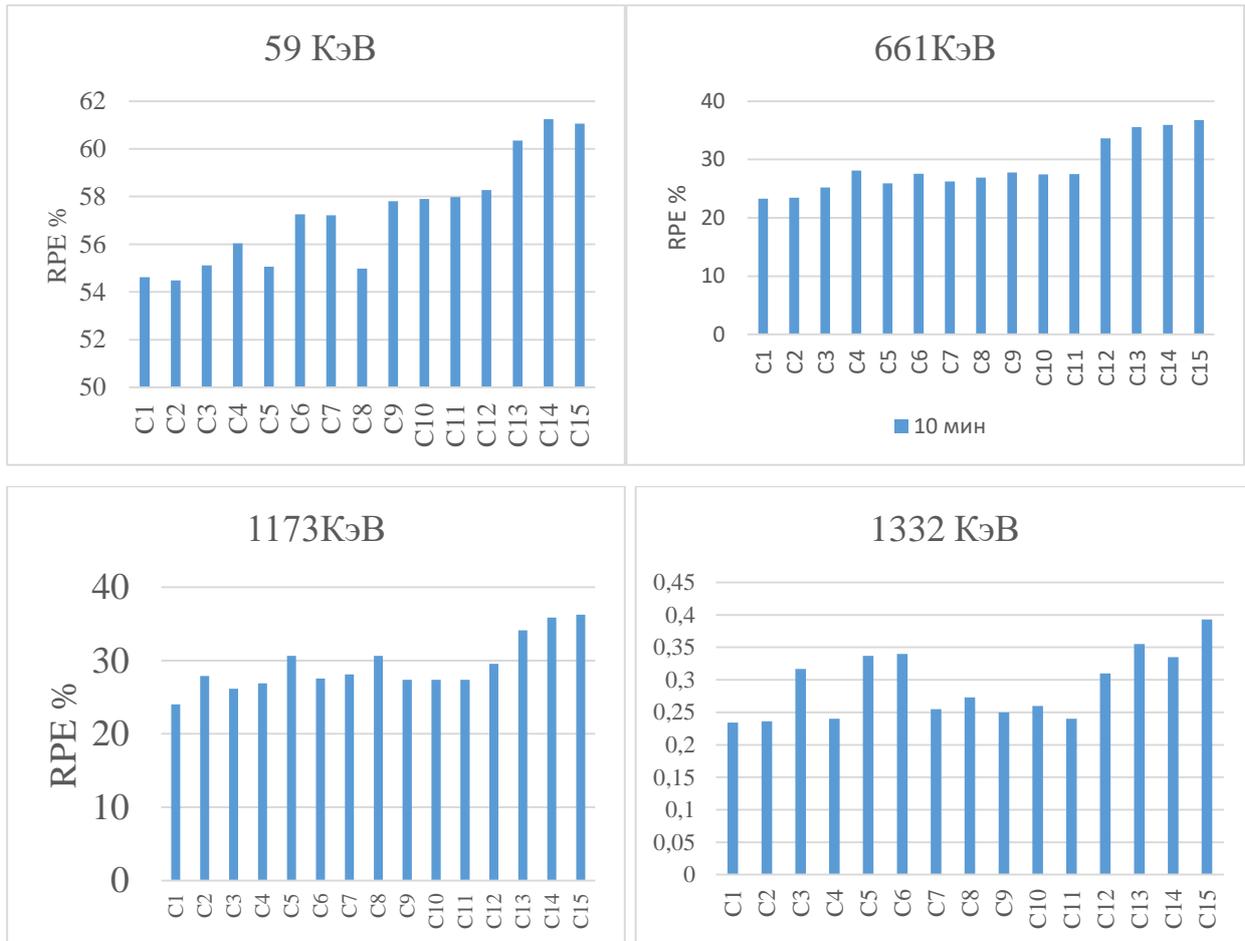


Рисунок 4.23 – Эффективность радиационной защиты образцами плитки при различных энергиях гамма-излучения (время счета 10 секунд)

Как и следовало было ожидать более эффективными, особенно для фотонов высоких энергий, оказались плитки, в составе которых были бор и алюминий. При относительно малых энергиях фотонов значения RPE для керамических плиток были высокими (50% - 60% при энергии 59кэВ). Это указывает на то, 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, т.е. если ожидается такое мощное излучение, то толщину плиток необходимо увеличивать.

4.6 Выводы по главе 4

1. Для исследования работы алгоритма обнаружения дефектов монохроматической керамической плитки была собрана установка с имитацией ленты конвейера и источниками света 3,4кд, камерой модели HT-SUF401GC-T с разрешением на уровне поверхности плитки, порядка 0,2-1мм (1мм \Leftrightarrow 5пкс). В эксперименте использовались квадратные однотонные плитки 150x150мм и 200x200мм. Обработка велась на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU 1.60GHz; программа была написана на языке Python 3.7 с использованием библиотеки алгоритмов OpenCV с привлечением других библиотек, которые применяются для анализа 2D-изображений.

2. При исследовании алгоритма обнаружения дефектов на уголках и гранях были использованы плитки с реальными и имитированными вариантами дефектов этого вида, отличающимися размерами, а также варианты расположения плиток на рабочем поле, требующие поворота и не требующие поворота. Число повторных экспериментов при каждом виде и варианте дефекта было не менее 10. Во всех случаях дефекты были алгоритмом обнаружены.

3. При исследовании алгоритма обнаружения дефектов типа блобов и пятен, мушек и наколов на поверхности керамической плитки была показана необходимость во многих случаях улучшения изображения, что достигалось эквализацией гистограммы. Для снижения требований к равномерности освещения плитки была использована адаптивная бинаризация с локальными порогами. Было подготовлено 8 вариантов плиток с блобами и пятнами разной формы и размера от R=0,3мм до R=17мм, выполнено около 60 экспериментов. Аналогично было подготовлено 10 вариантов плиток с наколами и мушками с радиусами от 0,5мм до 1мм. В результате во всех случаях алгоритм обеспечил обнаружение 100% дефектов, соответствующих задаваемым ГОСТом пороговым значениям.

4. При исследовании алгоритма обнаружения дефектов типа трещин и царапин на поверхности плитки было подготовлено по 10 образцов каждого типа дефектов, отличающихся формой и размерами. Трещины, длина которых была соразмерна с длиной грани плитки, уверенно определялись при определении

контура плитки по длине его сторон, мелкие царапины и трещины определялись соответствующим блоком алгоритма.

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

6. Равномерность и однородность цвета поверхности плитки определялась делением ее на зоны (для плиток тестируемого размера – на квадранты) и сравнением с эмпирическим порогом коэффициентов взаимной корреляции 2D-гистограмм этих зон в пространстве HSV. Всего было проведено 50 экспериментов (из них 35 с плитками, у которых были смоделированы неравномерности цвета) и было определено значение порога $\gamma_3 \approx 0,75$. Алгоритм подтвердил свою работоспособность, обеспечив уверенное определение неравномерности и неоднородности цвета в 100% случаев.

7. Для количественной характеристики различия цветов разных плиток использовалась разность $\Delta E_{\text{СМС}}$ в цветовом пространстве в CIE Lab. Чтобы ускорить операцию было учтено, что эта операция выполняется после выяснения однородности и равномерности цвета поверхности плитки, поэтому сравнение производилось 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 $N=50$, что обеспечило высокую скорость и не привело к ухудшению качества работы алгоритма.

8. При сравнении цветов двух плиток первая плитка считается эталоном до того момента, пока разность $\Delta E_{\text{СМС}}$ ее цвета и цвета очередной плитки не превысит порог γ_3 . С этого момента эта плитка становится вторым эталоном и далее сравнение идет уже с двумя плитками. Это позволяет формировать упаковки плиток с одинаковыми оттенками цвета.

9. Время, затрачиваемое на обработку изображения, естественно, зависело от размера плитки и наличия или отсутствия необходимости поворота изображения плитки и составляло при обнаружении механических дефектов и пятен для плиток 150x150мм и 200x200мм (при процессоре см. выше, п.1) 30-50мс при наличии фиксации положения плитки на конвейере и 50-90мс при необходимости поворота. При проведении контроля равномерности и однородности цвета плитки, а также контроля цвета последовательности плиток, например, при формировании упаковочных партий, добавляется еще по 15мс. Это позволяет использовать предлагаемый алгоритм в реальном времени.

10. Были экспериментально измерены параметры, характеризующие защитные свойства керамических плиток, популярных в Ираке. Измерялись массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения, значения слоев половинного поглощения и эффективности радиационной защиты при 4-х энергиях источников гамма-излучения. Было показано, что керамическая плитка обладает значительно лучшими защитными свойствами по сравнению с традиционными материалами. Эксперимент показал, что, т.к. для целей контроля обычно достаточно точности 3-5%, то при измерениях массового коэффициента ослабления можно рекомендовать работу без дополнительной сетки при достаточно широком диапазоне расстояний плитка-детектор (от 3 до 10см) и снизить время экспозиции до 10 минут. 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, выщербины на гранях, царапины и пятна на лицевой поверхности, неоднородностей 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 цветowych 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахунджанов, У.Ю. Об инвариантности цифрового описания рукописной подписи/ У.Ю.Ахунджанов, В.В.Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-invariantnosti-tsifrovogo-opisaniya-rukopisnoy-podpisi> (дата обращения: 04.11.2023)
2. Беляков, А.В. Методы получения композиционных керамических материалов на основе AlN-BN(обзор) / А.В.Беляков, Р.Ю.Куфтырев, И.Г.Кузнецова // Новые огнеупоры. 2013. № 4. — С. 61–69.
3. Бердин-Лазурский, А. Хорошая книга по керамике: пропедевтика для студийных керамистов / А. Бердин-Лазурский. // М:Бюро Маяк, 2019. 288 с.
4. Галенко, А.А. Совершенствование технологии производства керамических строительных материалов однократного обжига/ А.А.Галенко, А.В.Верченко // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2011. №4. - С88-91.
5. Галкин, С.А. Исследование алгоритмов пороговой обработки изображений для решения задачи выделения объекта в последовательности видеок кадров / С.А.Галкин, А.А.Селяев // Современные технологии в науке и образовании-СТНО, 2017, С.53-57.
6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р.Гонсалес, Р.Вудс // Москва: Техносфера, 2012. – 1104с.
7. Горбачев, В.И. «Радиографический контроль сварных соединений» Учебно-методическое пособие / В.И. Горбачев. А.П.Семенов. // М.; Из-во «Спутник» 2009.- 486 с.
8. ГОСТ 13996-2019. Плитки керамические. Общие технические условия (ISO 13006: 2018, NEQ) // М.: Стандартиформ, 2019 - 42с.
9. ГОСТ 6141-91«Плитки керамические глазурованные для внутренней облицовки стен. Технические условия» ипк издательство стандартов москва,1991,- С.12.
10. ГОСТ Р 27180-2001 «Плитки керамические. Методы испытаний» // М.: (МНТКС), 2019 - 30с.

11. ГОСТ 6787-2001. Плитки керамические для полов. Технические условия. (МНТКС),2001,-С.13.
12. ГОСТ 27180-2019. Межгосударственный стандарт. Плитки керамические. Методы испытаний // М.: Стандартиформ 2019 N1018. 58с.
13. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С.Грузман, В.С.Киричук, В.П.Косых, Г.И.Перетягин, А.А.Спектор. // Новосибирск.: Новосиб. гос. техн. ун-т., 2003. – 352 с.
14. Двилис, Э.С. Аналитическая и модельная оптимизация кинематических схем равномерноплотного прессования порошковых материалов / Э.С.Двилис, П.Чартпук, О.Л.Хасанов, В.М.Соколов, Б.А.Ешетов // Известия ТПУ. 2013. №2. С.49-55.
15. Демидов, Р.В. Экспериментальное исследование процессов обжига и изоморфизм в керамических материалах / Р.В.Демидов, И.В.Ковков, Е.С.Абдрахимова, В.З.Абдрахимов // Баш. хим. журнал, 2006, №5 - С 30-34.
16. Дятлова, Е.М. Химическая технология керамики и огнеупоров. / Е.М.Дятлова, Ю.А.Климош. // Минск: БГТУ, 2014. — 224 с.
17. Зарипова, Л.Д. И 83 Защита от ионизирующего излучения: Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета/ Л.Д. Зарипова. — Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та . 2008..-48 с.
18. Зубёхин, А.П.Зависимость прочности керамогранита от фазового состава / А.П. Зубёхин, А.В.Верченко, Н.Д.Яценко // Construction materials. 2014. №8. – С.30-32.
19. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 4-2015 "Производство керамических изделий" // URL: https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/NDT/sprav_NDT_2015
20. Ипатов, И.Н. Использование адаптивного алгоритма пороговой обработки для получения контура раската / И.Н. Ипатов, О.В. Юдина // Вестник Череповецкого государственного университета, 2013. Т. 3. № 4. С.8-12.

21. **Кадим, М.Х.** Онлайн-контроль равномерности цвета поверхности однотонной керамической плитки / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов, А.О. Аль Гурайбави // Известия СПбГТИ(ТУ) – 2023. – № 65 91. – С.112-116.
22. **Кадим, М.Х.** Автоматическое обнаружение поверхностных дефектов керамической плитки / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов // Контроль. Диагностика. – 2022. – № 7. – С. 50-55.
23. **Кадим, М.Х.** Автоматическое обнаружение дефектов поверхности плитки, используемой в радиационной защите / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов // XIII Научной конференции «Традиции и Инновации», посвященная 194-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – 2022. – С.207.
24. **Кадим, М.Х.** Получение полноразмерного изображения керамической плитки с конвейерной ленты / М.Х. Кадим, Л. А. Русинов // Материалы научной конференции «Традиции и Инновации», посвященной 193-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – 2021. – С.230.
25. **Кадим, М. Х.** Автоматизация контроля керамической плитки на наличие поверхностных дефектов механического происхождения / М. Х. Кадим, Л. А. Русинов // Энергетика и автоматизация в современном обществе: Материалы IV Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. – 2021. – С. 3-9.
26. **Кадим, М. Х.** Контроль и диагностика в производстве керамической плитки / М. Х. Кадим // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2021. – Т. 1. – С. 41-43.
27. **Кадим, М.Х.** Автоматизация контроля поверхностных дефектов керамической плитки / М.Х. Кадим, Л.А. Русинов // IV Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2021). – СПб. – 2021. – С.99-102.
28. **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.

29. Кокошкин, А.В. Сравнение Объективных Методов Оценки Качества Цифровых Изображений. / А.В. Кокошкин, В.А.Коротков, К.В.Коротков, Е.П. Новичихин // Журнал радиоэлектроники, 2015. №6.
30. Колпащикова, А. П. Автоматическое определение неравномерности цвета керамической плитки / **М.Х. Кадим**, А.П. Колпащикова // Материалы XIII научной конференции «Традиции и Инновации», посвященная 194-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – 2022. – С. 209.
31. Крупа, А.А. Химическая технология керамических материалов. / А.А. Крупа, В.С.Городов — Киев: Высшая шк., 1990. — 399с.
32. Куташева, С.С. Разработка состава массы для производства глазурованного керамического гранита: магистерская диссертация / С.С.Куташева // Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Институт новых материалов и технологий, Кафедра химической технологии керамики и огнеупоров. — Екатеринбург, 2019. — 46 с.
33. Лапунова, К.А. Фазовые преобразования при обжиге кремнистых глин / К.А.Лапунова, Я.В.Лазарева, Ю.А.Божко, М.Е.Орлова // Construction materials, 2019, №4. – С. 8-11.
34. Майстренко, Н. В. Мультимедийные технологии в информационных системах: учебное пособие / Н. В. Майстренко, А. В. Майстренко. — Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. — 81 с.
35. Маркетинговое исследование. Рынок керамической плитки в России 2017-Цифры, тенденции, прогноз. // ТК Solutions. 2023. 25с.
36. Маркушина, А.А. Изучение потребительских предпочтений на Краснодарском рынке керамической плитки и керамогранита / А.А.Маркушина, М.А.Дубинина // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты, 2014. №16. С.211-217.
37. Медведев, В.Ю.Цветоведение, колористика: учеб. пособие (курс лекций). / В.Ю.Медведев // СПб.: ИПЦ СПГУТД, 2005. — 116 с.

38. Мосин, Д.А. Разработка информационной системы анализа плотностных характеристик годичных колец хвойных деревьев / Д.А.Мосин. — Красноярск: СФУ, 2018. 85с.

39. Надточий, Л.А. Влияние температурного режима на вязкостные свойства глазури / Л.А. Надточий, А.И. Лепешкин, Е.Д. Дудник, Проскура А.В., Мурадова М.Б., Мельчаков Р.М. // Вестник Камчатского ГТУ, 2018. №45. - С.43-49.

40. Огнев, И.В. Обработка изображений методами математической морфологии в ассоциативной осцилляторной среде / И.В.Огнев, Н.А.Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2007. Вып. 4. - С. 87 – 97.

41. Павлюкевич, Ю.Г. Интенсификация процесса декарбонизации керамических масс при однократном обжиге облицовочной плитки / Ю. Г. Павлюкевич, С. К. Мачучко // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. 2013. №3. С.102-105.

42. Плешко, М. В.Технология производства керамической плитки на основе долерита и легкоплавкой глины / М.В. Плешко, М.С. Плешко, А.А. Ревякин // Вестник МГСУ, 2018. №1 (112). С.87-94.

43. Позняк, А.И. Базальтовые и гранитоидные породы как компоненты керамических масс для плиток внутренней облицовки стен / А.И. Позняк, И.А.Левицкий, С.Е. Баранцева // Стекло и керамика. – 2012. №8. - С. 17-22.

44. Прадун, Д.В. Автоматическая бинаризация градиентных изображений на основе кластерного метода определения пороговой величины / Д.В.Прадун, Б.А. Залесский // Информатика, 2010, № 1. С.5-12.

45. Производство керамических изделий // Москва, Бюро, НДТ, 2015. 222с.

46. Пыжова, А.П. Дефекты тонкокерамических изделий: причины возникновения и способы устранения. / А.П.Пыжова, В.В.Коробкина, В.С.Косов // М.: Легпромбытиздат, 1993. 176с.

47. Ревенок, Т.В. Подбор глазури для керамической массы с учетом вязкости расплава при обжиге / Т.В. Ревенок, Е.С. Соловьева // Инновации и инвестиции, 2019, №4. С.267-270.

48. Россия реконструирует в Ираке стекольно-керамический завод // URL: <https://susanin.news/world/business/20221106-297070/> (дата обращения: 10.5.2023).

49. Россия займется модернизацией крупного завода в Ираке <https://iz.ru/1421327/2022-11-06/rossiia-planiruet-zaniatsia-modernizatsiei-krupnogo-zavoda-v-irake> (дата обращения: 10.5.2023).

50. Россия начала модернизировать крупный завод в Ираке <https://lenta.ru/news/2022/11/06/zavod/> (дата обращения: 10.5.2023).

51. Российский рынок керамической плитки и керамогранита: итоги 2019г., прогноз до 2022 г. // NeoAnalytics, 2020. 66 с.

52. Руденко, Т.С. Печи для скоростного обжига керамических материалов: Учебно-практическое пособие. / Т.С.Руденко // Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002 - 62 с.

53. Салахов, А.М. Исследование фазового состава изделий строительной керамики при повышенных температурах / А.М. Салахов, В.П. Морозов, К.А. Арискина, М.В. Пасынков, Зайтов Т.Р. // "Вестник технологического университета". 2017. №12. С. 69-71.

54. 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.

55. Соколов, П.Э. Необходимость контроля радиоактивности строительных материалов/ П.Э.Соколов, О.П.Сидельникова, Ю.Д.Козлов // Строительные материалы, 1995. - №9. С.18-19.

56. Соколов, П.Э. Естественная радиоактивность глинистых горных пород применяемых для производства строительных материалов / П.Э.Соколов, В.Ю.Дрик // МНИЖ. 2017. №12-5 (66), С.148-151.

57. Талалай, А.Г. Естественная радиоактивность флюоритовых руд Вознесенского месторождения / А.Г.Талалай, Ж.Н.Александрова, М.Ю.Жарников, Д.Ю.Демежко // Известия УГГУ. 1996. №5. С.144-146.

58. Таскаев, В.И. Керамическая плитка как объект таможенного контроля // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. 2012. №4 (61). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/keramicheskaya-plitka-kak-obekt-tamozhennogo-kontrolya>

59. Фиговский, О.Л. Новое в жилищном строительстве за рубежом. Часть III / О.Л. Фиговский, А.З. Штейнбок // ИВД. 2020. №11 (71). С 225-239.

60. Халецкая, И.А. Алгоритмы бинаризации медицинских изображений / И.А.Халецкая, О.Ю. Лысак, А.Ю. Латышев // ТУСУР, РТФ. 2012. С.1-21.

61. Химическая технология керамики / Под ред. И. Я. Гузмана. — М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2012. — 496 с.

62. Шашев, Д.В. Морфологическая обработка бинарных изображений с использованием перестраиваемых вычислительных сред / Д.В.Шашев, С.В.Шидловский // Автометрия. 2015. Т. 51, № 3. С. 19–26.

63. Abdolmaleky, M.Red-green-blue multi-channel quantum representation of digital images/ M. Abdolmaleky , M. Naseri, J.Batle, A.Farouk, L. H. Gong Optik— International Journal for Light and Electron Optics//2017,128, pp. 121–132.

64. Abellán-Nebot, J. V. Derivation and application of the stream of variation model to the manufacture of ceramic floor tiles / J.V. Abellán-Nebot // Quality Engineering, 2018. Vol.30, № 4. P.719-729.

65. Adams, R.M. Color Management Handbook / R.M.Adams, A.Sharma, J.Suffoletto // Graphic Arts Books. Printing Industries Pr , 2008, 204 pp

66. A simple review of Cie ΔE^* (color difference) equations // URL:<https://techkonusa.com/a-simple-review-of-cie-%CE%B4e-color-difference-equations/> (дата обращения: 10.06.2023).

67. Adaptive Brightness Contrast Adjustment // URL: <https://www.programmingsought.com/article/9935110603/> (Дата обращения 01.07.2021 г.).

68. Asal, S. Bentonite based ceramic materials from a perspective of gamma-ray shielding: Preparation, characterization and performance evaluation / S.Asal, S.A.Erenturk, S.Haciyakupoglu. // Nuclear Engineering and Technology, 2021-№53(5), - P.1634–1641.

69. Ashfaq, M. Performance Analysis of Low-Level and High-Level Intuitive Features for Melanoma Detection / M.Ashfaq, N.Minallah, Z.Ullah, A.Ahmad, Aamir Saeed, Abdul Hafeez // Electronics, 2019. №8. P.672.

70. Bhagyashree, RK. Crack Detection in Ceramic Tiles using Zoning and Edge Detection Methods / R.K.Bhagyashree, S.A.Angadi // International Journal of Trend in Scientific Research and Development, June 2018. Vol.2 №4. P.2844-2847.

71. BinoSebastian, V. Grey level co-occurrence matrices: generalisation and some new features / V.BinoSebastian, A.Unnikrishnan, K.Balakrishnan // International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology (IJCEIT), 2012. Vol.2, No.2, P.151-157.

72. Bora, D. J. Comparing the Performance of L*A*B* and HSV Color Spaces with Respect to Color Image Segmentation/ D.J.Bora, A.K.Gupta, F.A.Khan // ArXiv abs/1506.01472 (2015): P.192-203.

73. Boukouvalas, C. Color grading of randomly textured ceramic tiles using color histograms / C.Boukouvalas, R.Marik, M.Petrou // IEEE transactions on industrial electronics, 1999. V.46, N.1. P.219-226.

74. Canny Edge Detection // URL: https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html (дата обращения: 10.10.2023).

75. Chavolla ,E. Color spaces advantages and disadvantages in image color clustering segmentation / E.Chavolla, D.Zaldivar, E.Cuevas, M.A.Perez // In: Hassanien, A., Oliva, D. (eds) Advances in soft computing and machine learning in image processing. Studies in Computational Intelligence. Springer, Cham, 2018. V.730. P.3–22.

76. Celli, M. A new ceramic material for shielding pulsed neutron scattering instruments / M. Celli, F. Grazzi, M. Zoppi // Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment
565(2), 2006. P.861-863.

77. Color Difference Equations for Solid Colors // URL: <https://www.byk-instruments.com/en/t/knowledge/solid-color-difference-equations> (дата обращения: 10.6.2023).

78. Contour Detection Example with OpenCV in Python // URL: <https://www.datatechnotes.com/2023/05/contour-detection-example-with-opencv.html> (дата обращения: 10.10.2022).

79. Contour Features // URL: https://docs.opencv.org/3.4/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html (дата обращения 15.03.2022 г.).

80. Contours And Hierarchy // URL: <https://www.freedomvc.com/index.php/2021/07/05/contours-and-hierarchy/> (дата обращения: 10.10.2022).

81. Convert RGB Image to Grayscale Image using OpenCV // URL: <https://lindevs.com/convert-rgb-image-to-grayscale-image-using-opencv> (дата обращения: 30.10.2023).

82. CV2 Boundingrect Explained with Examples // URL: <https://www.pythonpool.com/cv2-boundingrect/> (Дата обращения 15.03.2022г.).

83. Czimmermann, T. Visual-Based Defect Detection and Classification Approaches for Industrial Applications - A Survey / T.Czimmermann, G.Ciuti, M.Milazzo, M.Chiurazzi, S.Roccella, C.M.Oddo, P.Dario // Sensors, 2020. V.20. N.5, P.1459–1484.

84. DeltaE(CMC)//URL:http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CMC.html (дата обращения: 10.06.2023).

85. Deng, W. Radioactivity in Zircon and Building Tiles. / W.Deng, K.Tian, Y.Zhang, D.Chen // Health Physics, 1997. № 73(2).

86. Daniel, M.A. Mathematical overview of bresenham algorithms in the determination of active pixel positions / M.Daniel / International journal of innovative research in computer and communication engineering. 2017. V.5. N.10.

87. Dnyandeo, S.V. A Review of Adaptive Thresholding Techniques for Vehicle Number Plate Recognition / S.V.Dnyandeo, R.S.Nipanikar // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2016. - V. 5, - No 4. - P.944-946.
88. Elbihiery, H.M. Surface defects detection for fired ceramic tiles using Monochrome and Color image processing analysis / H.M.Elbihiery, G.Abdelmouez, A.A.Hefnawy, M.T.Elewa // URL: <https://t.ly/NXXqe>.
89. Elhenawy, I.M. Visual Inspection of Ceramic Tiles Surfaces Using Statistical Features and LVQ of Artificial Neural Networks / I.M.Elhenawy, S.Mougy, A.Azab // International Journal of Computers and Information, 2014. № 3, P.28-41
90. EU-MERCI, Technical analysis – Ceramic sector (NACE C23.2-23.4), 2020 Project Nr. 693845.
91. Ford, A. Color space conversions / A. Ford, A. Roberts, 1998// URL: <http://www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf> (Дата обращения 11.04.2023г.).
92. Framinan, J.M. Manufacturing scheduling systems an integrated view on models, methods and tools / J.M.Framinan, R.Leisten, R.R.García // Springer Science & Business Media, 2014, 400pp.
93. Golkar, E. Ceramic Tile Border Defect Detection Algorithms in Automated Visual Inspection System / E.Golkar, A.Patel, L.Yazdi, A.S.Prabuwono // Journal of American Science 2011; Vol.7; №.6; P.542-550.
94. Gonzalez, R. Digital image processing in MATLAB environment / R.Gonzalez, R.Woods, S.Eddins // M: Technosphere, 2006. – 616p.
95. Hanzaei, S.H. Automatic detection and classification of the ceramic tiles' surface defects / S.H.Hanzaei, A.Afshar, F.Barazandeh, // Pattern Recognition, 2017. V.66. P.174-189.
96. Hassanein, A.S. A Survey on Hough transform, theory, techniques and applications / A.S.Hassanein, S.Mohammad, M.Sameer, M.E.Ragab // URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.02160.pdf> (дата обращения: 10.05.2023).

97. Hocenski, Ž. LEDpanel illumination design of a control system for visual inspection of ceramic tiles / Ž. Hocenski, Kresimir Sobol, Robert Mijakovic, // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010. P.1663-1667.
98. Hocenski, Z. Improved Canny Edge Detector in Ceramic Tiles Defect Detection / Z.Hocenski, S.Vasilic, V.Hocenski // ECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, 2006. P.3328-3331.
99. Hocenski, Ž. Failure Detection and Isolation in Ceramic Tile Edges Based on Contour Descriptor Analysis / Ž.Hocenski, T.Keser // 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, July 27-29, 2007, Athens – Greece – P.1-6.
100. Hui-Fuang, Ng. Automatic thresholding for defect detection / Ng. Hui-Fuang // Pattern Recognition Letters, 2006, Vol.27. №14. P.1644-1649.
101. Image Rotation and Translation Using OpenCV // URL: earnopencv.com/image-rotation-and-translation-using-opencv / (Дата обращения 15.03.2022г.).
102. Jacob, G. Detection of surface defects on ceramic tiles based on morphological techniques / G.Jacob, R.Shenbagavalli, S.Karthika // 2016, <https://arxiv.org/abs/1607.06676>.
103. Jawad, A. A. Radiation shielding properties of some ceramic wasted samples / A. A.Jawad, N.Demirkol, K.Gunoğlu, I.Akkurt // International Journal of Environmental Science and Technology, 2019. Vol. 16, No 9. P.5039-5042.
104. **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
105. Karhe, R.R. A Survey on Automatic Defect Detection & Classification Technique from Image: A special case using ceramic tiles. / R.R.Karhe, N.N.Nagare // International Journal of Advance Engineering and Research Development, 2017. V.4, N12. P.1027-1034.
106. Karhe, R.R. Automatic Defect Detection and Classification Technique from Image Processing/ R.R.Karhe, N.N.Nagare // International Journal on Recent and

Innovation Trends in Computing and Communication Volume, 2018. Vol.6. № 1. P.136 – 141.

107. Karhe, R.R. Surface Defect Detection in a Tile using Digital Image Processing: Analysis and Evaluation / R.R.Karhe, Foram Sanghadiya, Darshana Mistry // International Journal of Computer Applications, 2015. V.116 – No. 10. P.33-37.

108. Karimi, M. H. Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods / M.H.Karimi, D.Asemani // Analysis and evaluation. ISA Transactions, 2014,53(3), P.834–844.

109. Khan, F.M. The physics of radiation therapy. / F.M.Khan // Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2010, 531 p.

110. Knoll Glenn, F. Radiation Detection & Measurement / G.F.Knoll//Wiley - 3rd ed.2000, 857 pp.

111. Kumar, T. A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image/ T.Kumar, K.Verma // International Journal of Computer Applications, 2010, №7.P.5-12

112. Kumar, V. Canny Edge Detection /V. Kumar D. Mishra // Institute of Technology Department of Computer Science and Engineering Indian Lectures Class // URL: <https://www.cse.iitd.ac.in/~pkalra/col783-2017/canny.pdf>

113. Lazaro, A. Color measurement and analysis of fruit with a battery-less sensor / A. Lazaro, M. Boada, R. Villarino, D. Girbau // Sensors (Basel), 2019. P.1741.

114. MaidullIslam Md. An Enhanced Automatic Surface and Structural Flaw Inspection and Categorization using Image Processing Both for Flat and Textured Ceramic Tiles / Md MaidullIslam, Md. Sahriar//International Journal of Computer Applications, 2012, pp. 48. 1-10.

115. Matić, T. Real-time biscuit tile image segmentation method based on edge detection. / Tomislav Matić, Ivan Aleksi, Željko Hocenski, Dieter Kraus // ISA Transactions, 2018. C.246-254.

116. Mishra, R. An automated ceramic tiles defect detection and classification system based on artificial neural network / R.Mishra, S.Dolly // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014. V.4, N.3. P.229-233.

117. Moria, H. Iron (III) Oxide-Based Ceramic Material for Radiation Shielding / H.Mori, Y.Oku, Y.Mannami, T.Kunisada // *Ceramics* 2020, 3(2). P.258-264.

118. Murty, R. Effective Atomic Numbers of Heterogeneous Materials. / R.Murty // *Nature*, 1965. №207. P.398–399.

119. Najafabadi, F.S. Corner defect detection based on dot product in ceramic tile images / F.S.Najafabadi, H.Pourghassem // *IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 2011. P.293-297.

120. Ofner, R.A. Collection of algorithms for the determination of construction points in the measurement of 3d geometries via light-sectioning/ R.Ofner, P.O’Leary, M.Leitner // *Workshop on european scientific and industrial collaboration: advanced technologies in manufacturing; University of Wales College: Newport, UK, 1999; P.505–512.*

121. OpenCV. Prev Tutorial: Contours. More Functions // URL: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d8b/tutorial_py_contours_hierarchy.html (дата обращения: 10.10.2022).

122. OpenCV. Histogram Comparison Histogram Calculation // URL: https://docs.opencv.org/3.4/d8/dc8/tutorial_histogram_comparison.html (дата обращения: 01.06.2023).

123. OpenCV. Next Tutorial: Contour Features // URL: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html (дата обращения: 10.10.2022).

124. Ortiz, Josefina. Radioactivity reference levels in ceramics tiles as building materials for different countries. / Josefina Ortiz, Luisa Ballesteros, Vicente Serradell // *12 International congress of the International Radiation Protection Association (IRPA): Strengthening radiation protection worldwide, Argentina: SAR. 2008. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/070/42070504.pdf?r=1* (дата обращения: 10.05.2023).

125. Ozkan, F. Use of an eye-tracker to assess workers in ceramic tile surface defect detection/ F.Ozkan, B.Ulutas // *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2016. P.088–091.

126. Patil, A.G. Automatic defect detection and classification of ceramic tiles / A.G.Patil, S.V.Phakade, D.O.Shirsath // International Journal of Advanced Research in Science and Engineering, 2016. Vol.5, Special No.01, P.127-133.
127. Perera, A.A.D. Manufacturing Ceramic Tiles Using Extracted Clay as a New Raw / A.A.D.Perera, U.Sutharsan, S.N.Malkanathi // Conference: Young Members' Technical Conference At: Institution of Engineers, Sri Lanka, 2020.
128. Rahaman, A. Automatic defect detection and classification technique from image: a special case using ceramic tiles / A.Rahaman, M.Hossain // International Journal of Computer Science and Information Security, 2009 Vol.1. №1. P.22-31.
129. Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry // EUROPEAN COMMISSION, August 2007. P 232. URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/201911/cer_bref_0807.
130. Samarawickrama, Y. C. Matlab based automated surface defect detection system for ceramic tiles using image processing, / Y.C.Samarawickrama, C.D.Wickramasinghe // 6th National Conference on Technology and Management (NCTM) - Malabe, Sri Lanka, 2017, P.34-39.
131. Sanghadiya, F. Surface defect detection in a tile using digital image processing: analysis and evaluation / F.Sanghadiya, D.Mistry // International journal of computer applications, 2015. Vol.116. No.10. P.33-35.
132. Saravanan, C. Color Image to Grayscale Image Conversion / C.Saravanan // Second International Conference on Computer Engineering and Applications, Bali, Indonesia, 2010, P. 196-199.
133. Shah, H.N.M. Automated Quality Inspection on Tile Border Detection using Vision System / H.N.M.Shah, M.Sulaiman, K.S.M.Isa, Z. Kamis, M.R.Baharon // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 2019. Vol.8. №3. P.3737-3745.
134. Shapiro, L. Computer Vision / L.Shapiro, J.Stockman // M.: BINOM. Laboratory of knowledge, 2015. – 763p.

135. Singh, R. Corner defect detection based on inverse trigonometric function using image of square ceramic tiles / R.Singh, G.C.Yadav // International journal of engineering and computer science, 2014. V.03. N.09. P.8047-8055.
136. Singh, R. Classifying corner defects from square ceramic tile at production phase / R.Singh, G.C.Yadav // International journal of computer science trends and technology (IJCST), 2014. V.2. N.4. P.180-183.
137. Singh, R.K. Angle extraction using digital image processing / R.K.Singh, R.Sharma // International journal of science research (IJSR), 2013. V.2. N.7. P.68-69
138. Su, Feng-wu. A statistical features-based color difference classification method / Su Feng-wu, Jiang Mai // 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013. P.2063-2067.
139. Tang Xuri. Ceramic tile color difference classification system based on color histogram / Tang Xuri, Jiang Mai, Wang Yuping, Pi Zhigang // Trans Tech Publications, 2013. V.662 P.926-930.
140. Tsarouhas, P.H. Application of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of a Ceramic Tiles Manufacturing Plant / P.H.Tsarouhas, D.Arampatzaki // St Olympus International Conference On Supply Chains, Katerini, Greece. Oct. 2010. P. 1-17.
141. Yasmin, S. Ionizing radiation shielding effectiveness of decorative building materials (porcelain and ceramic tiles) used in Bangladeshi dwellings / S.Yasmin, M.U.Khandaker, B.S.Barua, M.N.Mustafa, F.Chowdhury, M.A.Rashid, D.A.Bradley // Indoor and Built Environment, 2018. No.28(6). P.825-836.
142. Zennouhi, R. A new 2D histogram scheme for colour image segmentation. / R.Zennouhi, L.H.Masmoudi // The Imaging Science Journal. 2009. V. 57(5). P.260-265.
143. Zhang, L. Improved HIS Model with Application to Edge Detection for Color Image / L.Zhang, X.Mao, Ch.Zhou, P.Yu // Journal of computers, 2012.V.7, N.6. P.1400-1404.
144. Zhong, L. A method of online color-difference detecting based on image processing and its application / L. Zhonga, W.Li // Trans Tech Publications, 2010. V.37-38. P.14-17.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023681782

**Программный комплекс «Обнаружение дефектов на
поверхности однотонной керамической плитки»**

Правообладатель: *Русинов Леон Абрамович (RU)*

Авторы: *Русинов Леон Абрамович (RU), Кадим Мохаммед
Худаир Кадим (IQ)*

Заявка № **2023680751**

Дата поступления **09 октября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **18 октября 2023 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по научной работе

НИЦ «Курчатовский институт» -
ЦНИИ КМ «Прометей», д.т.н.

А.Д. Каштанов

« 24 » 01 2024 г.

Акт

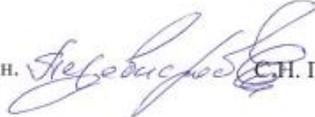
об использовании результатов диссертационной работы

Мохаммеда Худайра Кадима

НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» подтверждает, что использовал в своей научно-технической деятельности программный комплекс обнаружения поверхностных дефектов керамических материалов, разработанный диссертантом кафедры автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (Технического университета) Мохаммедом Худайром Кадимом, в рамках реализации проекта Российского научного фонда 21-73-30019 «Новые физические и химические принципы технологии металлических, металлокерамических и керамических материалов с управляемой макро-, микро- и наноструктурой и уникальными служебными характеристиками».

Разработанный М.Х. Кадимом аналитический подход зарекомендовал себя для проведения автоматизированной диагностики керамик на наличие поверхностных дефектов.

Начальник лаборатории

«Техническая керамика», д.т.н.  С.Н. Перевислов

Начальник сектора

«Жаростойкая керамика», д.т.н.  М.А. Марков

АО «Нефрит-керамика»

Генеральный директор

«24» 01 2024

г. Санкт-Петербург



ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический филиал)» (СПбГТИ(ТУ))

Ректор, д-р техн. наук, доц.

«24» 01 2024

г. Санкт-Петербург



АКТ О ВНЕДРЕНИИ В ОПЫТНУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Настоящий акт составлен о том, что комплексный алгоритм обнаружения дефектов керамической плитки в реальном времени и, соответствующая ему программа, разработанные на кафедре автоматизации процессов химической промышленности (АПХП) СПбГТИ(ТУ) под руководством д-ра техн. наук, проф. Русниова Л.А., внедрен в опытную эксплуатацию на АО «Нефрит-керамика»

Программный комплекс предназначен для контроля поверхностных дефектов монокромных керамических плиток (сколов на уголках, выщерблин на гранях, царапины, трещины, наколов, мушек, пятен, неравномерностей распределения цвета на поверхности плитки и отклонения в цвете разных плиток на конвейере). Работа комплекса выполняется на основе технического зрения и производится в режиме он-лайн. На обработку изображения плиток распространенных размеров, например, 500x250мм и 600x300мм при наличии на конвейере направляющих, требуется 90-120мс, а при их отсутствии до 200мс. Особенностью программного комплекса является отсутствие требования наличия эталонных плиток и использование эффективных методов обработки изображений.

Экономический эффект достигается за счет автоматизации операций выходного и промежуточного контроля керамической плитки с обнаружением возможных ее дефектов в реальном времени и исключении из этой рутинной и утомительной операции человека. Разработчиком комплекса является Кадим М.Х.

От АО «Нефрит-керамика»

Начальник службы АСУ

Щербаков А. В.

«24» 01 2024

От кафедры АПХП СПбГТИ(ТУ)

Руководитель разработки

Зав. каф., д-р техн. наук, проф.

Л.А.Русниов

Исполнитель разработки:

Сотрудник

М.Х.Кадим

«24» января 2024