

Оглавление:

Введение	12
1. Анализ литературы и нормативно-технической документации	14
1.1 Краткие сведения о цифровой обработке изображений	14
1.2 Основные этапы контроля проникающими веществами	24
2. Объект и методы исследования	29
2.1 Оборудование и материалы для исследования	30
2.2 Описание экспериментальной установки	31
2.3 Исследуемые параметры изображений	35
3. Разработка алгоритмов цифровой обработки изображений	36
3.1 Визуальный анализ полученных изображений	37
3.2 Алгоритм бинаризации изображений	42
3.3 Алгоритм выделения фрагментов бинарного изображения	52
3.4 Алгоритм определения формы индикаторного следа	54
3.5 Анализ источников возникновения погрешностей при цифровой обработке	56
4. Результаты исследования	67
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	68
6. Социальная ответственность	87
Заключение	99
Список публикаций	100
Список используемых источников	101
Приложение А Алгоритм бинаризации цифрового изображения	104
Приложение Б Алгоритм выделения фрагментов бинарного изображения	105
Приложение В Алгоритм определения формы бинарного следа	106
Приложение Г Раздел на английском языке	107
CD-диск	В конверте на обложке

Введение

В настоящее время автоматизация производственных процессов является неотъемлемой частью в полноценно функционирующих промышленных системах. Актуальность автоматизации процессов с каждым годом всё возрастает, поскольку она позволяет в значительной степени ускорить не только процесс производства продукции, но и повлиять на процессы её стандартизации и сертификации, обойти стороной которые не представляется возможным в условиях современного конкурентного рынка.

С увеличением темпов производства, возрастает и спрос на контроль промышленных объектов в целом и опасных производственных объектов в частности. Контроль качества опасных производственных объектов является ответственной задачей, решение которой на современном этапе развития техники и технологий обеспечивают неразрушающие методы контроля.

Ежегодно специалистам неразрушающего контроля приходится сталкиваться с колоссальными объемами однообразной и цикличной работы, и именно автоматизация некоторых технологических стадий контроля позволила бы не только ускорить процесс контроля, но и привести его результаты к некоторому унифицированному виду.

Алгоритмы автоматической цифровой обработки и анализа изображений могут применяться в различных областях неразрушающего контроля: в визуальном измерительном, капиллярном, магнитно-порошковом и цифровом радиографическом.

Несомненным плюсом алгоритмов цифровой обработки является так же возможность хранения полученных результатов в цифровом виде.

Целью магистерской диссертации является разработка алгоритмов цифровой обработки изображений применительно к цветной капиллярной дефектоскопии.

В соответствии с поставленной целью можно выделить следующие задачи:

- Проведение аналитического обзора источников технической литературы и основных публикаций, посвященных теме разработки алгоритмов цифровой обработки изображений индикаторных следов в капиллярной дефектоскопии;
- Разработка алгоритма бинарного преобразования цифрового изображения индикаторного следа;
- Разработка алгоритма автоматического поиска и архивирования фрагментов изображения, содержащих отдельные индикаторные следы;
- Разработка алгоритма определения формы индикаторного следа, вычисления его площади и определения максимальной протяженности;
- Оценка величины погрешностей, возникающих в процессе получения цифровых изображений и последующей их цифровой обработки.

Алгоритмы автоматической обработки цифровых изображений могут быть реализованы в виде программного пакета и задействованы как в обработке результатов, полученных в полевых условиях, так и в цеховых автоматизированных конвейерных производствах. Следует так же отметить, что в дальнейшем алгоритмы могут быть адаптированы к индивидуальным особенностям тех или иных объектов контроля и учитывать их форму (согласно [1]) в процессе идентификации индикаторных следов и определения их максимальной протяженности, которая нормируется в [2–3].

Алгоритмы могут так же быть задействованы в процессе определения качества дефектоскопических материалов и при сравнении различных дефектоскопических наборов для капиллярной дефектоскопии, что позволит сделать сравнительный анализ более объективным.

1. Анализ литературы и нормативно-технической документации

1.1 Краткие сведения о цифровой обработке изображений

Изображение можно определить как двумерную функцию $f(x, y)$, где x и y – координаты на плоскости. Значение функции в любой точке, задаваемой парой координат (x, y) , называется интенсивностью изображения или уровнем серого для изображения в данной точке. Если величины x , y и f принимают конечное число дискретных значений, такое изображение называют цифровым. Цифровой обработкой изображений называется обработка цифровых изображений с помощью цифровых вычислительных машин (компьютеров). Заметим, что цифровое изображение состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в конкретном месте и принимает определенное значение. Такие элементы называются элементами изображения или пикселями. Пиксель – наиболее широко использующийся термин для определения конечных элементов в цифровой обработке. [4]

Зрение является наиболее совершенным из органов чувств человека, потому неудивительно, что зрительные образы играют важнейшую роль в человеческом восприятии. Однако, в отличие от людей, способных воспринимать электромагнитное излучение лишь в видимом диапазоне, цифровая обработка изображений охватывает практически весь электромагнитный спектр от гамма-излучения до радиоволн. Обработываемые изображения могут порождаться источниками, которые для человека непривычно ассоциировать с наблюдаемыми изображениями. Таковыми, например, являются ультразвуковые изображения; изображения, получаемые при помощи электронного микроскопа или генерируемые посредством компьютера. Таким образом, цифровая обработка изображений широко применяется в различных областях техники. [5]

1.1.1 Области применения цифровой обработки изображений

Области применения цифровой обработки изображений столь разнообразны, что попытка охватить их во всей широте требует какой-то системы изложения. Один из простейших способов – классификация прикладных областей в соответствии с видами источников, формирующих соответствующие изображения (например, оптические, рентгеновские и т.д.). Главным источником энергии для формирования применяемых сегодня изображений является электромагнитное излучение. Среди других важных энергетических источников, которые могут создавать изображения, упомянем акустические и ультразвуковые (механические) колебания, а также электронные пучки, применяемые в электронной микроскопии. Кроме того, имеется целый класс синтетических (искусственных) изображений, которые синтезируются компьютерными программами и используются для моделирования и визуализации. В этом разделе мы кратко обсудим, как регистрируются изображения этих многочисленных категорий, и каковы области их применения. [4]

Наиболее привычны изображения, создаваемые электромагнитным излучением, особенно в видимом спектре или в рентгеновском диапазоне.



Рисунок 1.1 – Спектр электромагнитного излучения в порядке убывания энергии фотона

Электромагнитные волны можно трактовать как распространяющиеся синусоидальные колебания определенной частоты, а можно — как поток частиц, движущихся со скоростью света. Каждая такая частица обладает определенной энергией, но нулевой массой, и называется квантом излучения (фотоном). Если расположить диапазоны излучения в порядке убывания энергии фотона, то получим изображенный на Рисунке 1.1 спектр, простирающийся от гамма-лучей (обладающих максимальной энергией) до радиоволн. Плавное изменение окраски интервалов диапазона на этом рисунке призвано подчеркнуть тот факт, что спектр электромагнитного излучения не разграничен строго, а имеет смысл говорить скорее о плавном переходе одного участка диапазона в другой. [4]

Среди основных областей применения цифровой обработки изображения можно выделить следующие:

- изображения, полученные с помощью гамма-излучения;
- использование рентгеновских снимков;
- изображения, сформированные в ультрафиолетовом диапазоне;
- изображения, воспринимаемые в видимом диапазоне;
- инфракрасные изображения;
- изображения в микроволновом диапазоне;
- изображения в диапазоне радиоволн.

1.1.2 Яркостная адаптация и контрастная чувствительность

Поскольку цифровые изображения воспроизводятся как дискретное множество элементов с различной яркостью, способность глаза различать отличающиеся уровни яркости необходимо учитывать при представлении результатов обработки изображений. Зрительная система человека способна адаптироваться к огромному, порядка 10^{10} , диапазону значений яркости — от порога чувствительности скотопического зрения до предела ослепляющего блеска. Эксперименты со всей очевидностью показывают, что субъективная

яркость (т.е. яркость, как она воспринимается зрительной системой человека) является логарифмической функцией от физической яркости света, попадающего в глаз. На рисунке 1.2 изображен график этой зависимости субъективной яркости от истинной яркости. [6–7]

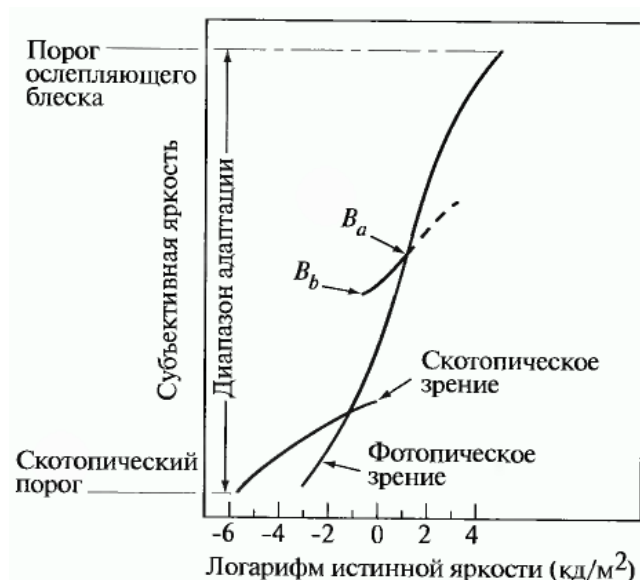


Рисунок 1.2 – Зависимость субъективной яркости от логарифма истинной яркости

Длинная сплошная кривая представляет диапазон яркостей, в котором способна адаптироваться зрительная система. При использовании одного фотопического зрения этот диапазон составляет около 10^6 . Постепенный переход от скотопического зрения к фотопическому происходит в диапазоне приблизительно от 0,003 до 0,3 кд/м² (т.е. от —2,5 до —0,5 по логарифмической шкале), что показано в виде двух ветвей кривой адаптации в этом диапазоне яркостей. [7]

Известны два явления, ясно доказывающие, что воспринимаемая яркость не является простой функцией истинной яркости. Первое основывается на том факте, что вблизи границ соседних областей с отличающимися, но постоянными яркостями зрение человека склонно «подчеркивать» яркостные перепады, как бы добавляя несуществующие выбросы яркости, что убедительно демонстрирует пример на рисунке 1.3а. Хотя яркость каждой из

полос постоянна, мы, кроме действительно ступенчатого изменения яркости, видим характерные выбросы вблизи краев полос (Рисунок 1.3б). Эти полосы с кажущимися изменениями яркости на краях называются полосами Маха в честь Эрнста Маха, впервые описавшего этот феномен в 1865 г. [8]



Рисунок 1.3 – Зависимость воспринимаемой яркости от истинной яркости

Второе явление, называемое одновременным контрастом, связано с тем фактом, что воспринимаемая яркость некоторой области не определяется просто ее яркостью, как показывает рисунок 1.4. Здесь все центральные квадраты имеют в точности одинаковую яркость, однако зрительно воспринимаются тем более темными, чем светлее фон. [8]

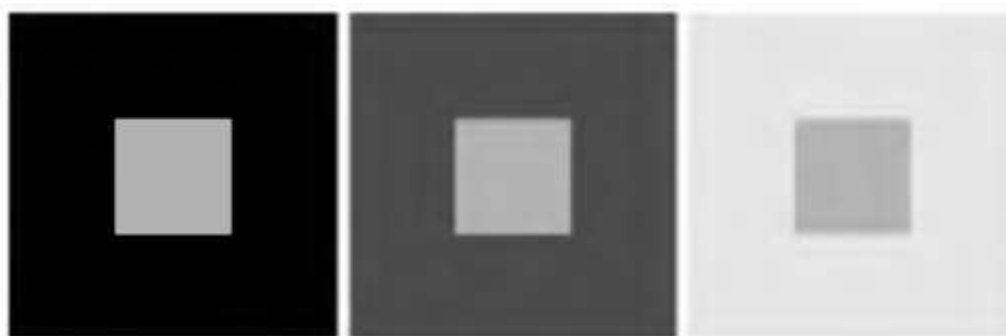


Рисунок 1.4 – Пример одновременного контраста

1.1.3 Считывание и регистрация изображения

Изображение, которое мы рассматриваем, есть двумерное отображение наблюдаемой сцены (как правило, двух- или трехмерной), возникающее как результат регистрации лучистой энергии, исходящей из наблюдаемой сцены, с помощью некоего устройства – сенсора (или одновременно совокупности сенсоров). Предполагается, что регистрируемый сенсором сигнал возникает в результате взаимодействия источника «освещения» с элементами изображаемой «сцены» в условиях эффектов отражения и поглощения энергии этого источника. Слова освещение и сцена взяты в кавычки, чтобы подчеркнуть тот факт, что они носят значительно более общий характер, чем в привычной ситуации, когда источник видимого света освещает обычную трехмерную бытовую сцену. Освещение может не только порождаться источником другого диапазона электромагнитного излучения (радиолокационным, инфракрасным или рентгеновским), но и возникать из менее традиционных источников (ультразвукового или даже виртуального, синтезированного компьютерной программой). [4]

Энергия излучаемая, отражаемая, или пропускаемая элементами сцены, фиксируется при помощи специального устройства регистрации, чувствительного к излучаемой сценой энергии. В некоторых прикладных задачах отраженная или проходящая энергия направляется на фотопреобразователь (экран, покрытый фосфором или другим фосфоресцирующим материалом), который преобразует эту энергию в видимый свет. Такой подход является обычным для электронной микроскопии и иногда также применяется при регистрации радиационных изображений. [4]

На рисунке 1.5 изображен один из чувствительных элементов (сенсоров), которые используются для преобразования энергии «освещения» в цифровое изображение.

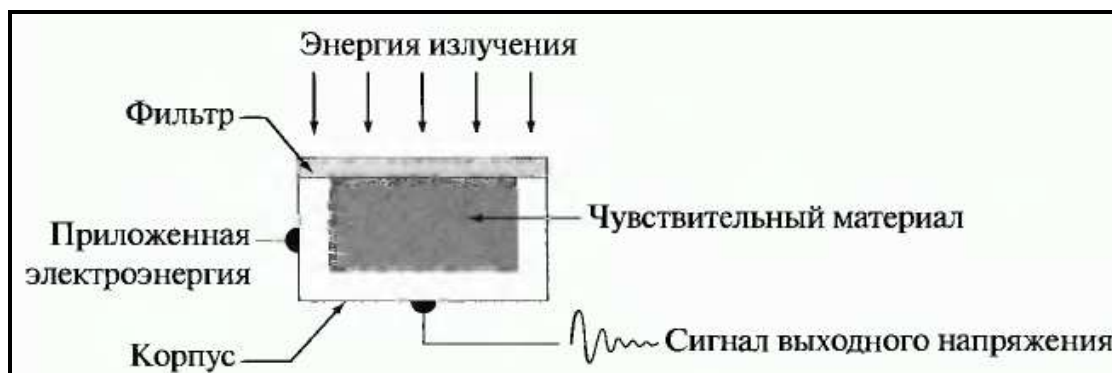


Рисунок 1.5 – Одиночный светочувствительный преобразователь (сенсор)

Сама идея преобразования очень проста: падающая энергия преобразуется в напряжение благодаря сочетанию материала, обладающего чувствительностью к интересующему виду излучения, и приложенной к нему электрической энергии. В ответ на энергию внешнего излучения такой чувствительный элемент выдает сигнал выходного напряжения, который затем преобразуется в цифровую форму.

1.1.4 Регистрация изображения с помощью матрицы сенсоров

На рисунке 1.6 изображено расположение отдельных сенсоров в форме двумерного массива. В настоящее время всевозможные электромагнитные и некоторые ультразвуковые устройства ввода данных систем обработки изображений используют именно матричные преобразователи. [4]

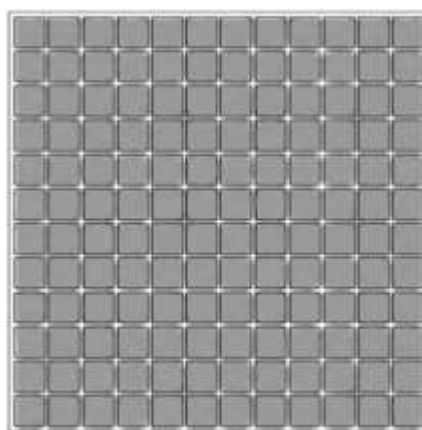


Рисунок 1.6 – Матрица светочувствительных преобразователей (сенсоров)

Такая же конструкция находится внутри подавляющего числа цифровых фотокамер, в которых обычно чувствительным элементом является матрица на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), которые выпускаются в виде монолитной конструкции, содержащей в себе 4000х4000 элементов (и более) с широким диапазоном чувствительности. ПЗС-матрицы широко используются в цифровых фото- и видеокамерах, а также других светочувствительных приборах. [5]

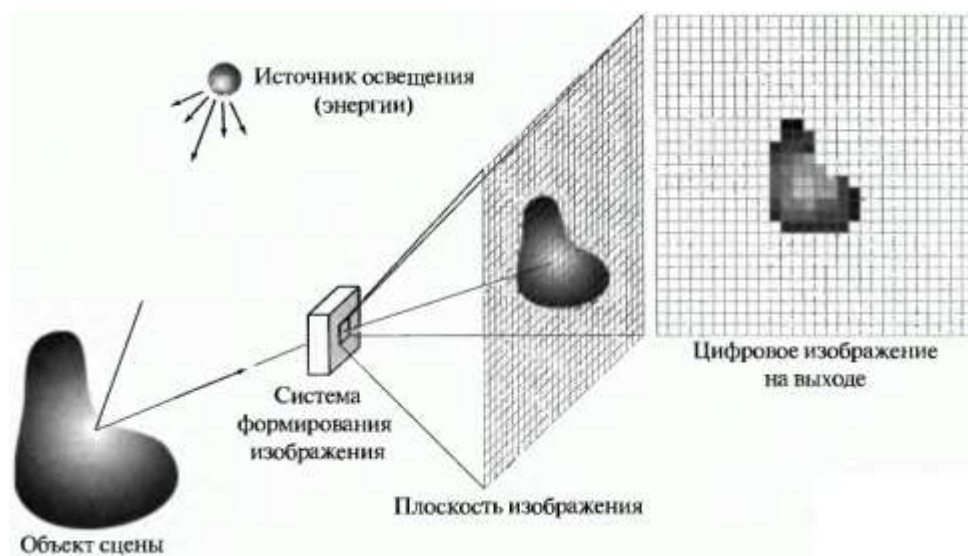


Рисунок 1.7 – Процесс регистрации цифрового изображения

Ответная реакция каждого элемента пропорциональна интегралу световой энергии, попадающей на поверхность этого элемента за время экспозиции; это свойство используется в астрономии и других сферах, где требуется получать изображения с низким уровнем шума. Уменьшение шума достигается за счет того, что чувствительным элементам дают возможность выдерживать принимаемый световой сигнал в течение минут или даже часов. Поскольку изображенная на рисунке 1.7 матрица сенсоров двумерна, ее главное достоинство состоит в том, что можно обрабатывать сразу все изображение, если сфокусировать на поверхности матрицы отвечающий ему пространственный поток лучистой энергии. Не трудно заметить, что в таком случае отпадает необходимость в механическом перемещении сенсоров. [9]

Рисунок 1.7 иллюстрирует главный способ использования матриц сенсоров. Здесь показано, что энергия, излучаемая источником освещения, отражается от объекта сцены (но, как отмечалось в начале этого раздела, энергия также может и проникать сквозь объекты сцены). Первая функция, выполняемая системой формирования изображения, состоит в том, чтобы собрать поступающую энергию и сфокусировать ее на плоскости изображения. Если для освещения используется источник видимого света, то на входе системы формирования изображения имеется объектив, который проецирует наблюдаемую сцену на плоскость изображения. Совмещенная с этой плоскостью чувствительная матрица генерирует набор выходных сигналов, каждый из которых пропорционален интегралу световой энергии, принятой соответствующим сенсором. [4]

1.1.5 Дискретизация и квантование

Главный принцип, лежащий в основе дискретизации и квантования изображений, проиллюстрирован на рисунке 1.8. Здесь (рисунок 1.8а) приведено исходное изображение $f(x, y)$, которое мы хотим преобразовать в цифровую форму. Изображение непрерывно по координатам x и y , а также по амплитуде. Чтобы преобразовать эту функцию в цифровую форму, необходимо представить ее отсчетами по обеим координатам и по амплитуде. Представление координат в виде конечного множества отсчетов называется дискретизацией, а представление амплитуды значениями из конечного множества – квантованием.

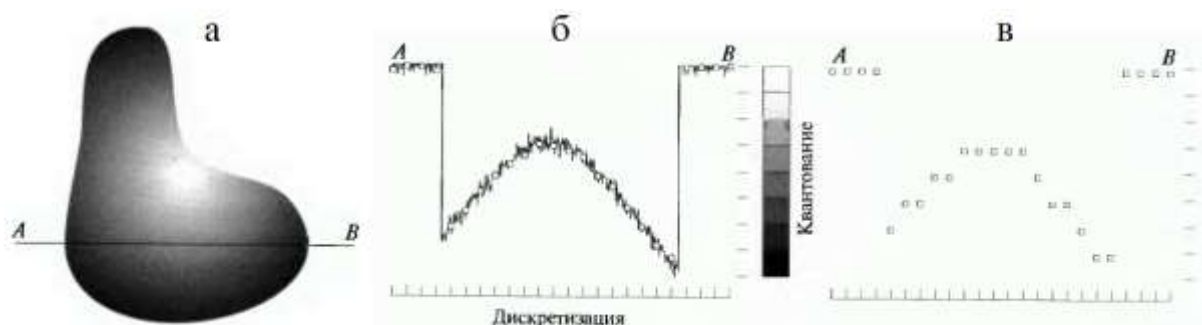


Рисунок 1.8 – Формирование цифрового изображения

Изображенная на рисунке 1.8б одномерная функция представляет собой график изменения значений яркости непрерывного изображения вдоль отрезка АВ. Случайные отклонения на графике вызваны наличием шумов в изображении. Чтобы дискретизировать эту функцию, разобьем отрезок АВ на равные интервалы, как показано засечками внизу на Рисунке 1.8б. Значения в выбранных точках отсчета представлены небольшими квадратиками на графике функции. Построенный набор значений в точках дискретизации описывает функцию в виде совокупности ее дискретных отсчетов, однако сами эти значения пока еще охватывают весь непрерывный диапазон яркостей (по вертикали). Чтобы построить цифровую функцию, диапазон яркостей также необходимо преобразовать в дискретные величины (проквантовать). Справа на рисунке 1.8б изображена шкала яркостей, разбитая на восемь дискретных уровней от черного до белого. Квантование непрерывных значений яркости в точках дискретизации осуществляется простым сопоставлением каждому отсчету одного из восьми дискретных уровней – того, к которому ближе найденное значение яркости. В результате совместных операций дискретизации и квантования возникает отвечающий одной строке изображения дискретный набор цифровых отсчетов, показанный на рисунке 1.8в. Выполняя такую процедуру построчно, с верхней по нижнюю строки, получаем двумерное цифровое изображение. [10]

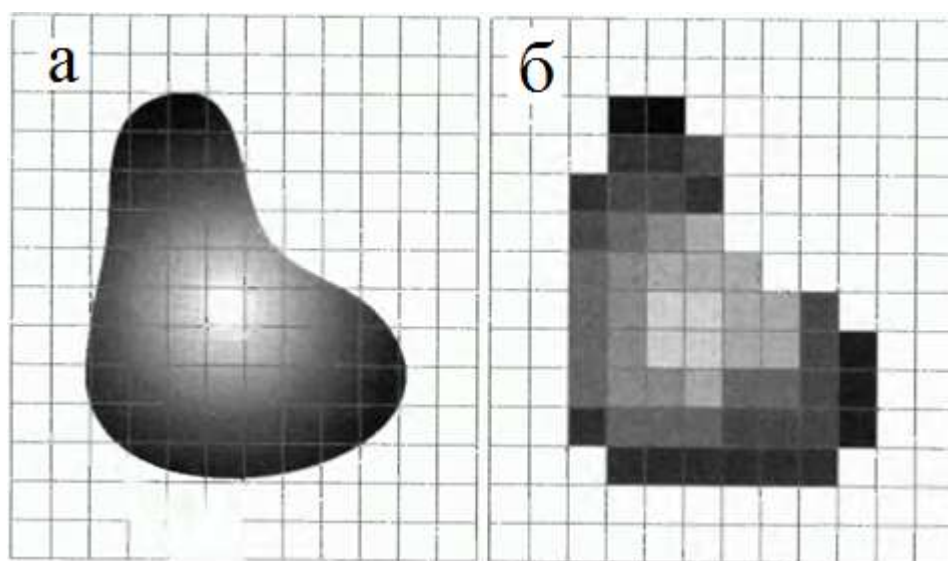


Рисунок 1.9 – Изображение объекта до (а) и после (б) его оцифровки

На рисунке 1.9а показано аналоговое изображение, спроецированное на плоскость сенсорной матрицы, а рисунок 1.9б демонстрирует то же изображение после дискретизации и квантования. Из рисунка видно, что качество получаемого представления в большой степени зависит от числа отсчетов в разбиении и числа уровней квантования.

1.2 Краткие сведения о капиллярной дефектоскопии

Контроль проникающими веществами представляет собой метод неразрушающего контроля, применяющийся с целью обнаружения дефектов или несплошностей (например, трещин) на поверхности непористых материалов, таких как металл, пластмассы или керамика. Контроль проникающими веществами (так же известный как капиллярный контроль или капиллярная дефектоскопия) прежде всего, направлен на промышленный сектор с целью осуществления контроля металлических объектов, таких как нефте- и газопроводы, а так же различных компонентов машинного оборудования с целью предотвращения неполадок и несчастных случаев. Среди дефектов, которые можно обнаружить, используя данный метод – усталостные трещины, волосовины, поры и скопления пор. Множество промышленных отраслей применяют контроль проникающими веществами. Среди них – нефтехимический комплекс, аэрокосмическая отрасль, автомобилестроение и др. [11]

Несмотря на то, что контроль проникающими веществами наименее технологически-продвинутый метод неразрушающего контроля (относительно ультразвукового, магнитопорошкового и радиационного методов) – он всё равно широко применяется на практике. У контроля проникающими веществами есть такие преимущества как относительно низкая стоимость контроля, универсальность и простота реализации. Фактически, контроль проникающими веществами требует минимальных навыков и опыта по сравнению с другими методами неразрушающего контроля.

Основные этапы контроля проникающими веществами

Предварительная очистка. Поверхность объекта контроля очищается с целью удаления любой грязи, краски, остатков нефти или смазки, любую рыхлую окалину, которая может вызвать ложные индикации. Стадия предварительной очистки может осуществляться посредством растворителей, щелочных растворов, обработки паром или ультразвуковых ванн. Конечной целью данного этапа является чистая поверхность, на которой дефекты являются открытыми, просушенными и свободными от загрязнений. Следует обратить внимание, что при использовании ультразвуковых ванн могут частично развиваться микротрещины, так что очистка ультразвуком рекомендуется на заключительном этапе. [1–3]

Нанесение пенетранта. Пенетрант наносится на поверхность объекта контроля. Пенетранту дают «время выдержки», чтобы он заполнил любые несплошности (обычно около 5-30 минут). Время выдержки главным образом зависит от проникающей способности пенетранта, материала контролируемого объекта и размера выявляемых несплошностей. Как следствие, меньшие несплошности требуют более длительного времени для заполнения. Ввиду несовместимости веществ, недопустимо попадание на одну поверхность очистителя и водно-смываемого пенетранта. [1–3]

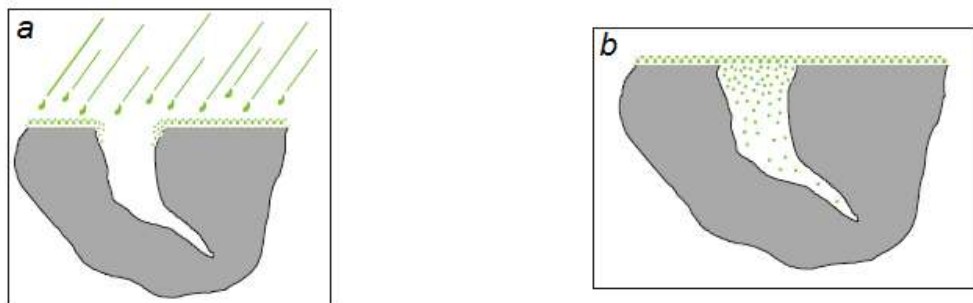


Рисунок 1.10 – Процесс нанесения пенетранта (a) и его выдержки (b)

Удаление избыточного пенетранта. Избытки пенетранта удаляются с поверхности объекта контроля. Способ удаления избыточного пенетранта определяется в зависимости от типа использованного ранее пенетранта. Водно-смываемый, растворимый, липофильный пост-эмульгируемый или гидрофильный пост-эмульгируемый в общем случае. Эмульгаторы позволяют достичь наиболее высокой чувствительности и обеспечивают контакт с масляным пенетрантом, что позволяет смешать его с каплями воды. Во время использования очистителя важно не распылять его на поверхность непосредственно, так как это может вымыть часть пенетранта, а наносить очиститель на ткань или салфетки. Если избыточный пенетрант не удалён полностью во время использования очистителя, это может привести к возникновению фона, который замаскирует некоторые индикации дефектов. Помимо этого могут возникнуть ложные индикации, препятствующие проведению объективного контроля. Так же излишки пенетранта следует удалять в одном из направлений, вертикальном или горизонтально в зависимости от обстоятельств. [1–3]

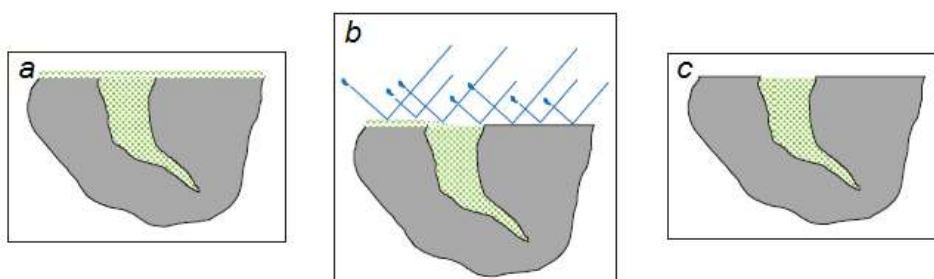


Рисунок 1.11 – Окончание времени выдержки (a) и процесс удаления избыточного пенетранта (b, c)

Нанесение проявителя. После того, как избытки пенетранта были удалены, на объект контроля наносится проявитель белого цвета. Существует несколько видов проявителей: безводный влажный; порошковый; на основе водной суспензии и водорастворимый. Выбор проявителя зависит от его совместимости с пенетрантом (водно-растворимый проявитель или на основе суспензии не совместим с водно-смываемым пенетрантом) и условиями

контроля. В случае использования безводного или порошкового проявителя, объект контроля должен быть высушен, в то время как суспензии проявителя наносятся на слегка влажную поверхность объекта контроля. Безводный проявитель выпускается в аэрозольных баллонах и может содержать ацетон, изопропиловый спирт или их соединения. Проявитель должен сформировать полупрозрачную плёнку, покрывающую поверхность объекта контроля. [1–3]

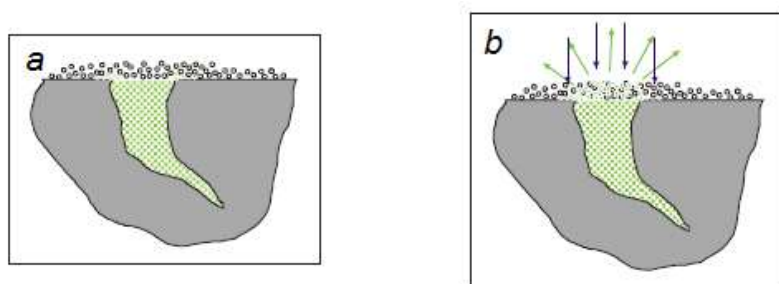


Рисунок 1.12 – Нанесение проявителя и формирование индикаторного следа

Проявитель вытягивает пенетрант из полостей дефектов на поверхность, чтобы сформировать индикаторный обычно кроваво-красного цвета. Любые области, которые проявились индикацией, могут указать на координаты, ориентацию и возможный тип поверхностных дефектов. Чтобы интерпретировать результаты и характеризовать дефекты по индикаторным следам, может потребоваться некоторый навык или опыт (размер индикаторного следа не показывает натуральную величину дефекта).

Непосредственно контроль. Оператор будет использовать источник видимого излучения с соответствующей интенсивностью (100 Фут-Кандел или 1100 Люкс как правило) для цветного пенетранта. Ультрафиолетовый источник света мощностью 1 мкВт/см², наряду с небольшим рассеянным светом (менее 22 Люкс) для флуоресцентного метода контроля. Поверхность объекта контроля должна контролироваться спустя 10-30 минут после окончания контроля в зависимости от объекта. Такая временная задержка позволяет сформировать индикаторный след. Оператор может наблюдать за объектом контроля в процессе цветной дефектоскопии, чтобы пронаблюдать процесс

формирования индикаторной картины, поскольку это позволяет интерпретировать дефекты.

Финальная очистка. Зачастую, поверхность объекта очищается после контроля и составления карты дефектов, особенно в случае если дефекты не обнаружены.

1.2.2 Достоинства и недостатки контроля проникающими веществами

Основными преимуществами капиллярного контроля является оперативность и относительно невысокая стоимость. Среди недостатков можно выделить возможность выявления только поверхностных дефектов, возможные раздражения кожи и то, что контроль должен проводиться на гладкой очищенной поверхности откуда могут быть удалены избытки пенетранта, чтобы обеспечить индикацию. Проводить тест на шероховатых поверхностях, таких как сварные соединения будет затруднительно, поскольку удаление остатков пенетранта может привести к появлению ложных индикаций. Водно-смываемый пенетрант должен быть использован за неимением других пенетрантов. Так же на некоторых поверхностях недостижим достаточно большой уровень контраста или пенетрант окрашивает поверхность. [11]

Для оператора не требуется длительного обучения, однако опыт является ценным. Соответствующая очистка необходима, чтобы гарантировать удаление всех поверхностных загрязнителей для обеспечения чистоты и сухости полостей дефектов. Как показала практика, некоторые методы очистки, которые на первый взгляд кажутся вредными, такие как травление кислотой, на практике могут удалить смазку металла и вновь вскрыть дефекты. [11]

2. Объект и методы исследования

Объектом исследования данной магистерской диссертации являются цифровые изображения индикаторных следов на тестовых образцах для цветной капиллярной дефектоскопии.

В качестве метода исследования используется цифровая обработка полученных изображений, представляющая собой ряд алгоритмов, а именно:

- алгоритм бинаризации изображения;
- алгоритм выделения фрагментов изображения;
- алгоритм определения формы капиллярного следа;
- алгоритм определения площади следа и его линейных размеров;

Наличие такого рода алгоритмов, применительно к изображениям различного качества, позволяет в автоматическом режиме сформировать представление об объекте контроля и выдать заключение о пригодности объекта контроля к эксплуатации.

Методика исследования заключается в последовательной обработке цифровых изображений с различными характеристиками (Светочувствительность ISO, разрешение, контрастность следа, освещенность объекта контроля) и выявлении особенностей для каждого качества изображения. Определение реакций алгоритмов на те или иные характеристики изображений позволят выявить уязвимые места самих алгоритмов или же их сильные стороны.

Таким образом, можно сформировать представление об оптимальных условиях контроля и оптимальных характеристиках изображений (ISO, разрешение, контрастность, освещенность).

2.1 Обзор оборудования для эксперимента

Для реализации разработки алгоритмов автоматической обработки цифровых изображений в капиллярной дефектоскопии необходим перечень оборудования, включающий в себя специальные технические средства и некоторые расходные материалы.

Поскольку получаемые изображения представляют собой фотографии тестовых образцов капиллярной дефектоскопии – возникает необходимость в предварительном проведении непосредственно капиллярного контроля (цветной метод). В качестве перечня оборудования для проведения цветной капиллярной дефектоскопии можно выделить следующее оборудование и расходные материалы:

- наборы дефектоскопических материалов (sherwin, magnaflux и др.);
- вытяжной шкаф;
- оборудование и средства для очистки тестовых образцов (ультразвуковая ванна, погружная ёмкость со спиртовым раствором);
- средства индивидуальной защиты (перчатки, защитный халат, защитные очки);
- комплект бумажных полотенец.

После получения индикаторных следов на тестовых образцах, возникает необходимость регистрации индикаторных картин в качестве цифровых изображений. В связи с этим можно выделить следующий перечень оборудования и программного обеспечения для регистрации изображений и дальнейшей их обработки:

- люминесцентные газоразрядные источники освещенности;
- фотокамера;
- штатив для фотокамеры;
- персональный компьютер;
- программная среда MathCAD;
- программная среда MATLAB.

2.2 Описание экспериментальной установки

В качестве основных элементов для эксперимента используется перечень оборудования, представленный в предыдущей главе. Непосредственно эксперимент происходит в два этапа: подготовительный и основной. На подготовительном этапе осуществляется процедура капиллярного контроля на тестовых образцах, а на основном этапе происходит цифровая регистрация изображений для дальнейшей их обработки. Условная схема основного этапа эксперимента представлена на рисунке 2.1.

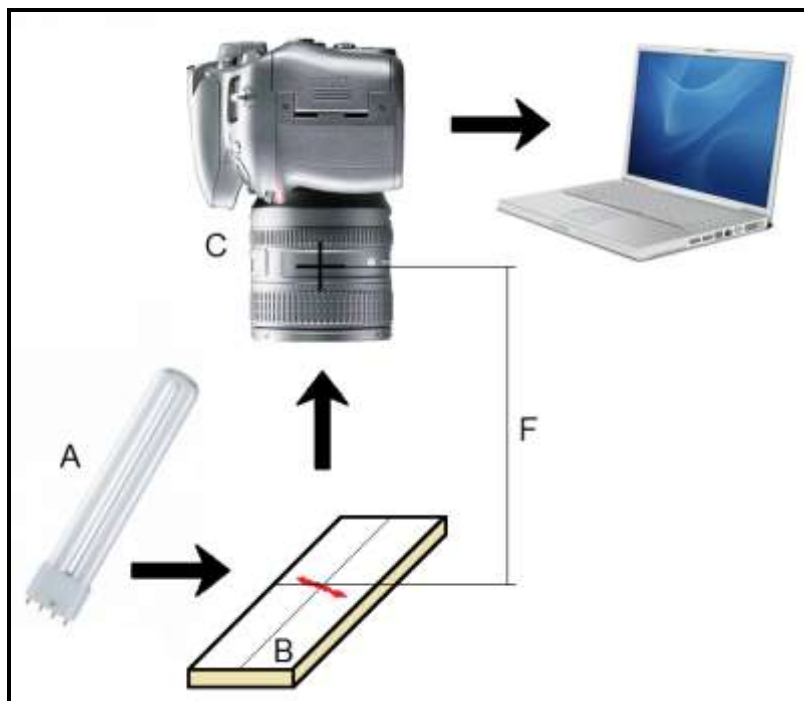


Рисунок 2.1 – Условная схема основного этапа эксперимента

Как видно из рисунка 2.1, на основном этапе эксперимента происходят следующие взаимодействия: объект контроля освещается при помощи люминесцентных ламп; фотокамера регистрирует изображение индикаторного следа на тестовом образце капиллярной дефектоскопии; полученное цифровое изображение загружается на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Рассмотрим более детально схему экспериментальной установки.

2.2.1 Схема получения цифровых изображений

Последовательная схема получения цифровых изображений в капиллярной дефектоскопии представлена на рисунке 2.2. Рассмотрим подробнее элементы, входящие в её состав.

Перед началом цикла работ, поверхность объекта контроля должна быть очищена от всевозможных загрязняющих веществ при помощи специализированных средств, описанных в п. 4.3 [1–3] (ручные аэрозольные баллоны, автоматизированные ультразвуковые ванны и т.д.). Непосредственно капиллярный контроль включает в себя стадии, описанные в п. 4.4-4.6 [1–3]. Результатом проведения капиллярного контроля является наличие или отсутствие индикаторного следа, который указывает на координаты поверхностных дефектов объекта контроля.

В процессе получения цифрового фотоизображения капиллярного следа необходимо обеспечить такие параметры как равномерная освещенность поверхности объекта контроля и оптическая фокусировка линз регистрирующих средств (в текущем эксперименте – цифровой фотокамеры). Наличие освещенности и возможности фокусировки является необходимым элементом в системе, поскольку это напрямую связано с качеством получаемых цифровых изображений. [12]

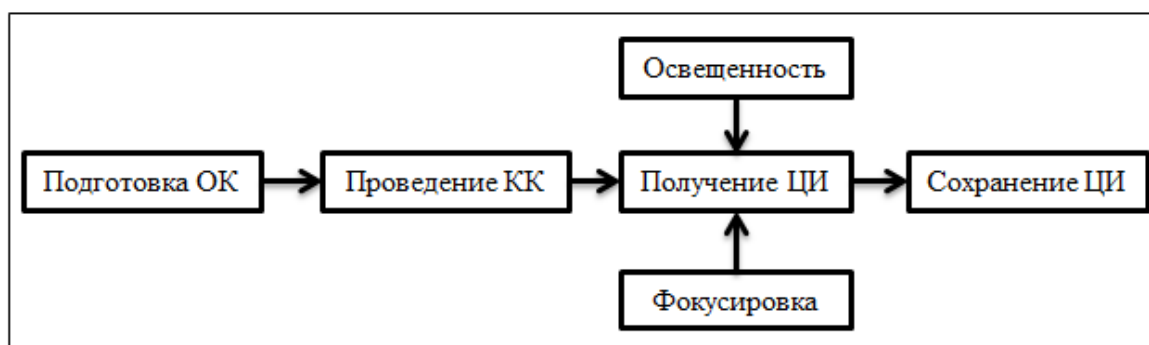


Рисунок 2.2 – Схема получения цифровых изображений (ОК – объект контроля; КК – капиллярный контроль; ЦИ – цифровое изображение)

Например, отсутствие должной освещенности объекта контроля напрямую связано с соотношением сигнал/шум, а отсутствие должной фокусировки приводит к возникновению геометрической нерезкости и, как следствие, к возникновению погрешностей в последующей цифровой обработке. [12]

Для последующей обработки, изображения необходимо сохранить на информационный носитель (если система не является полностью автоматизированной).

2.2.2 Схема формирования оптического изображения с учётом геометрии

Схема формирования оптического изображения с учётом геометрии является ключевым элементом в процессе получения качественного цифрового изображения. Качество полученного изображения определяется, прежде всего, точностью фокусировки объектива фотокамеры. Зная фокусное расстояние объектива, можно определить соотношение между проецируемой и проецирующей плоскостью, и тем самым определить линейный размер пиксельной единицы в метрическом эквиваленте. [13]

Определение размера пиксельной единицы позволяет обходиться без использования единиц площадей в процессе цифровой обработки, что в значительной степени упрощает анализ изображений. [14]

На рисунке 2.3 приведена условная геометрическая схема формирования фотографического изображения. Основными параметрами схемы являются:

f – фокусное расстояние объектива; F – расстояние от матрицы до объекта контроля; a и b – длина и ширина оптической матрицы; A и B – длина и ширина фотографируемого изображения; X – ширина индикаторного следа; x – ширина следа, спроецированная на оптическую матрицу.

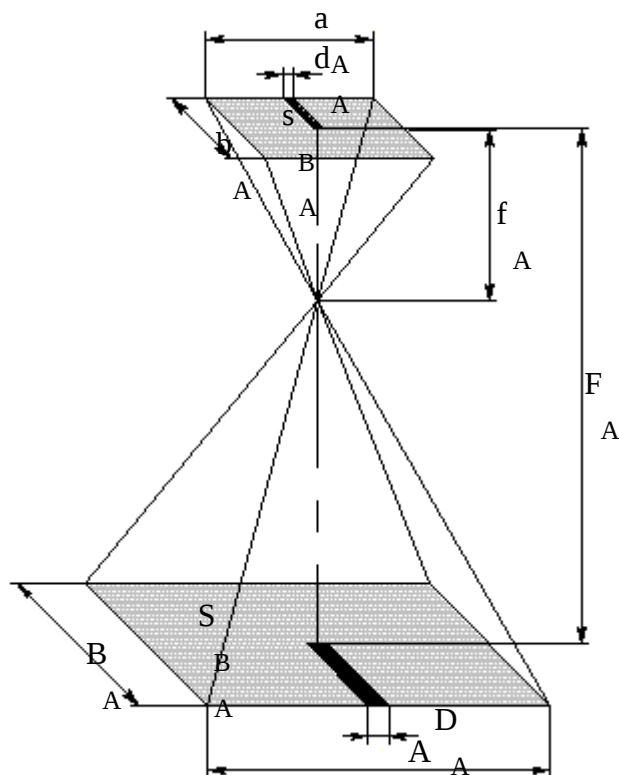


Рисунок 2.3 – Геометрическая схема формирования изображения

Исходя из рисунка 2.3, можно заметить элементарную геометрическую связь между перечисленными ранее параметрами, которую удобнее всего выразить в виде формулы оптического коэффициента (1).

$$K_y = \frac{f}{F - f} = \frac{d}{D} = \frac{a}{A} = \frac{b}{B} = \frac{s}{S}; \quad (1)$$

Для удобства дальнейшего анализа изображений целесообразно ввести системы координат для проецирующей матричной плоскости (рисунок 2.4а) и проецируемой плоскости изображения (рисунок 2.4б).

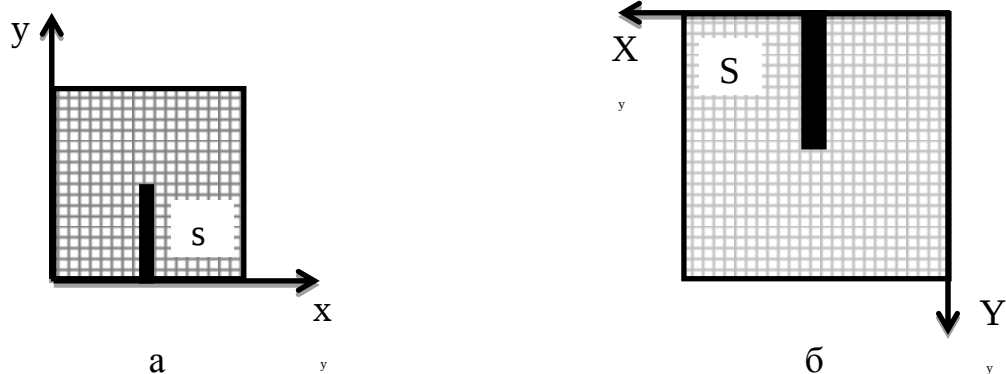


Рисунок 2.4 – Проецирующая и проецируемая плоскости изображения

2.3 Исследуемые параметры изображений

Согласно [1–3], наиболее важными параметрами индикаторного следа является его тип, форма и размер. По типу принято различать одиночные индикаторные следы и скопления.

Скопления индикаторных следов может указывать на наличие скопления поверхностных пор или разветвлённые трещины, а одиночные индикаторные следы могут указывать на наличие трещины или одиночной поверхностной поры. [15]

По форме принято различать округлые и вытянутые капиллярные следы. Округлый индикаторный след наиболее часто встречается в случае наличия одиночной поры, а вытянутый индикаторный след указывает на наличие сквозной или не сквозной трещины. [1–3]

Размер индикаторного следа определяет то, является дефект допустимым или не допустимым.

Помимо описанных выше параметров, для формирования алгоритмов необходимо учитывать такие параметры, как: яркость той или иной RGB-составляющей изображения; контрастность индикаторного следа. [14]

Так же на качество работы алгоритмов могут оказывать влияние такие характеристики, как: светочувствительность матрицы ISO, разрешение изображения и освещенность объекта контроля.

В качестве дополнительного исследуемого параметра была выбрана площадь индикаторного следа, поскольку по величине площади индикаторного следа и его контрастности можно произвести оценку качества дефектоскопических материалов.

3 Разработка алгоритмов цифровой обработки изображений

Разработка алгоритмов автоматической обработки цифровых изображений в капиллярной дефектоскопии представляет собой комплекс взаимосвязанных между собой программных фрагментов, направленный на получение наиболее полного представления об объекте контроля с минимальным вмешательством человека в процесс анализа, что в свою очередь позволяет свести человеческий фактор возникновения погрешностей к минимуму. [16–18]

Алгоритмы, представленные в магистерской диссертации, реализованы посредством программных сред MathCAD и MATLAB. Программная среда MathCAD использовалась в качестве оперативного средства представления некоторых результатов, поскольку построение плоских и объемных графиков в данной среде максимально упрощено и наглядно. Программная среда MATLAB использовался в качестве «чистового» варианта реализации алгоритмов, поскольку в данной среде создание циклов и построение логических взаимосвязей наиболее удобно. [5]

В текущей главе будет представлен визуальный анализ полученных изображений для получения некоторого первичного представления о возможных влияниях на качество изображения таких характеристик, как: светочувствительность матрицы ISO и теплота освещенности.

Так же в главе будут рассмотрен базовый алгоритм по бинаризации цветных изображений на примере программных кодов MathCAD. Алгоритмы выделения фрагментов изображения и определения формы капиллярного следа будут рассмотрены с точки зрения программной среды MATLAB.

Помимо вышеупомянутых элементов, будут так же проанализированы источники возникновения погрешностей при цифровой обработке и способы их минимизации.

3.1 Визуальный анализ полученных изображений

На данном этапе исследования изображения были получены посредством зеркальной камеры Nikon D600, которая способна обеспечить стабильный ряд светочувствительности ISO200, ISO400, ISO800 и ISO1600, а так же максимальное разрешение изображения 3008x2000 пикселей. Камера в ходе эксперимента была зафиксирована при помощи штатива на неизменном расстоянии от объекта контроля, что позволяет поддерживать коэффициент увеличения изображения на постоянном уровне и, как следствие, обеспечивать постоянство при переходе от пиксельных единиц к метрическим. [19]

В качестве средств освещения использовались люминесцентные лампы холодной и тёплой цветовой температуры. В процессе получения изображений лампы размещалась на оптимальном расстоянии 30 см, при котором образец получал равномерное освещение. Условная и последовательная схемы получения изображения были рассмотрены в предыдущей главе и представлены на рисунках 2.1 и 2.2. [18]

В качестве примера в таблицах 3.1 – 3.4 приведен ряд цветных изображений, полученных при различной светочувствительности ISO и цветовой температуре.

Если зрительно проанализировать изображения, то можно заметить, что по мере увеличения светочувствительности ISO уровень шума на изображении так же возрастает. Если рассмотреть изображения, полученные при холодной освещенности, то можно заметить, что на ISO1600 фон приобретает зеленоватый оттенок, а наиболее оптимальным диапазоном ISO для холодной освещенности является ISO 400-800. Для тёплой освещенности светочувствительность ISO1600 наоборот является оптимальной и делает след наиболее контрастным на желтом фоне. Вероятнее всего это связано с тем, что зеленый и желтый цвета в оптическом спектре расположены близко друг к другу.

Таблица 3.1 – Изображения, полученные для контрольного образца №122 при различной светочувствительности матрицы ISO и холодном внешнем освещении.

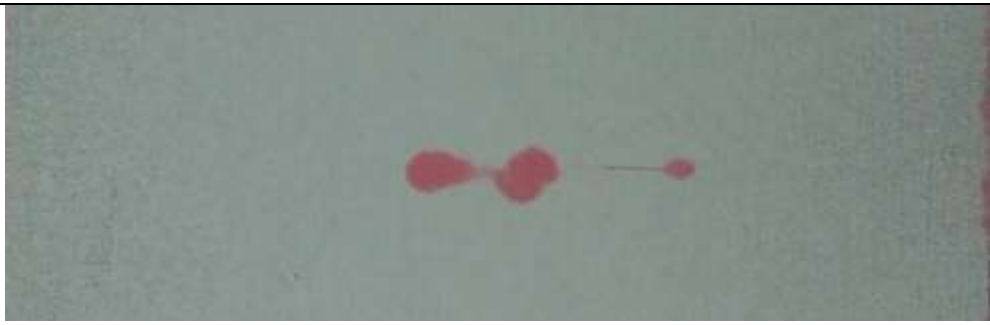
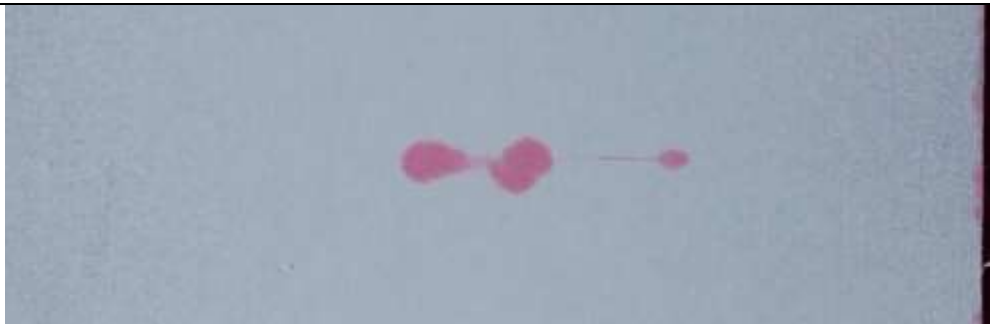
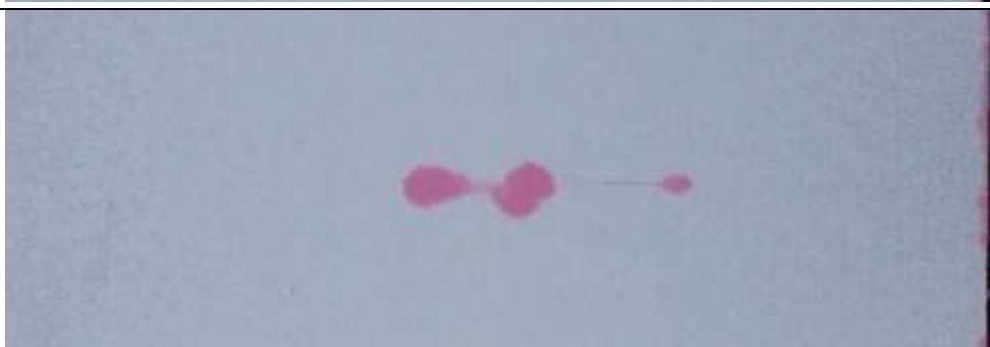
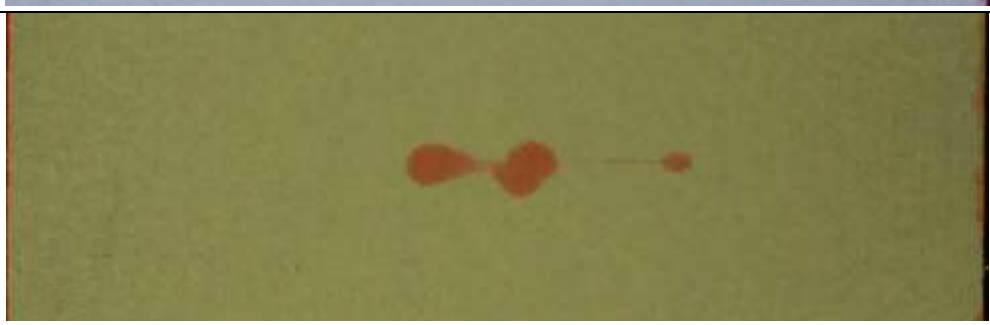
	КО № 122, ISO 200, HQ, Холодный свет
	КО № 122, ISO 400, HQ, Холодный свет
	КО № 122, ISO 800, HQ, Холодный свет
	КО № 122, ISO 1600, HQ, Холодный свет
	КО № 122, ISO 3200, HQ, Холодный свет

Таблица 3.2 – Изображения, полученные для контрольного образца №E19 при различной светочувствительности матрицы ISO и холодном внешнем освещении.

	КО № E19, ISO 200, HQ, Холодный свет
	КО № E19, ISO 400, HQ, Холодный свет
	КО № E19, ISO 800, HQ, Холодный свет
	КО № E19, ISO 1600, HQ, Холодный свет
	КО № E19, ISO 3200, HQ, Холодный свет

Таблица 3.3 – Изображения, полученные для контрольного образца №E19 при различной светочувствительности матрицы ISO и тёплом внешнем освещении.

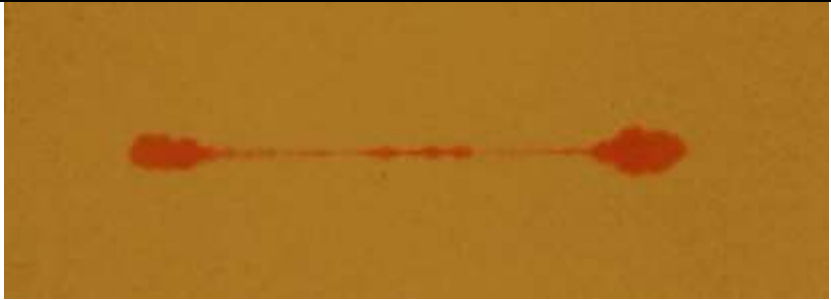
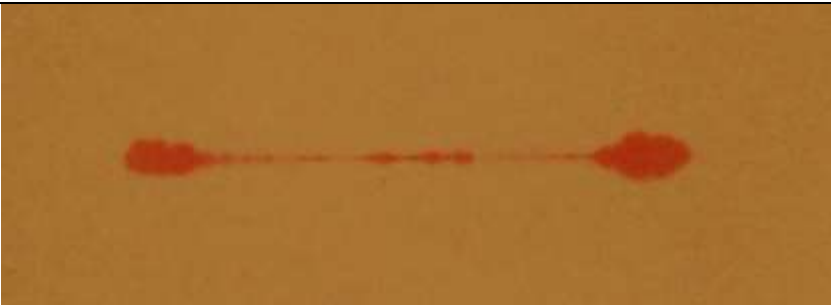
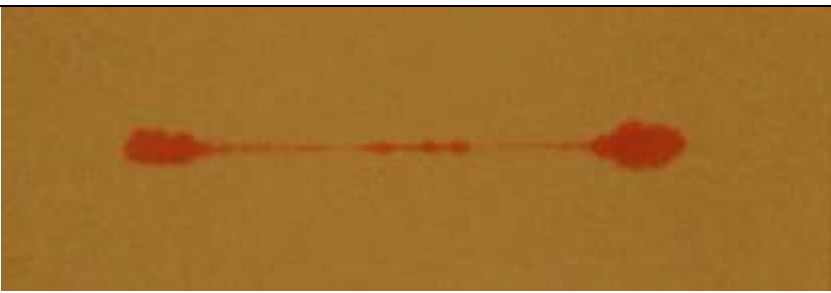
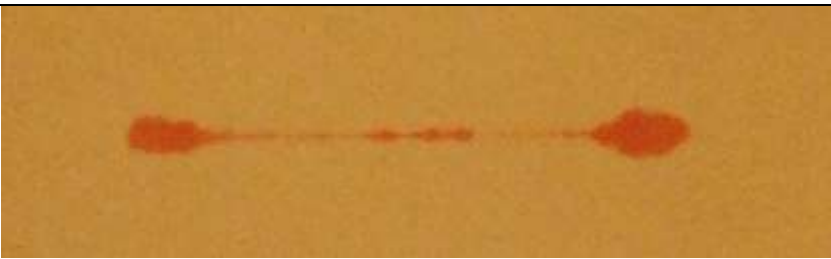
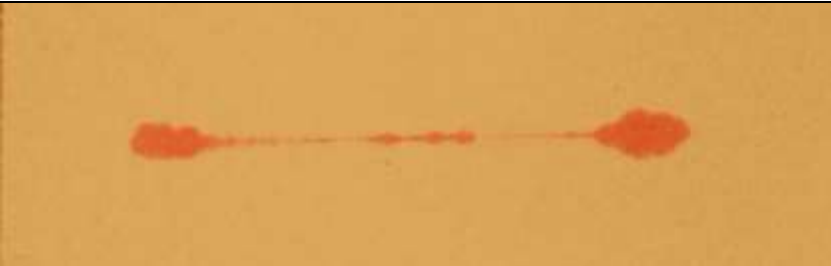
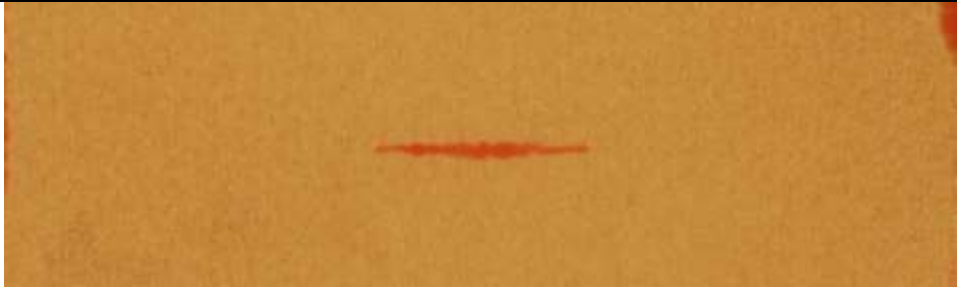
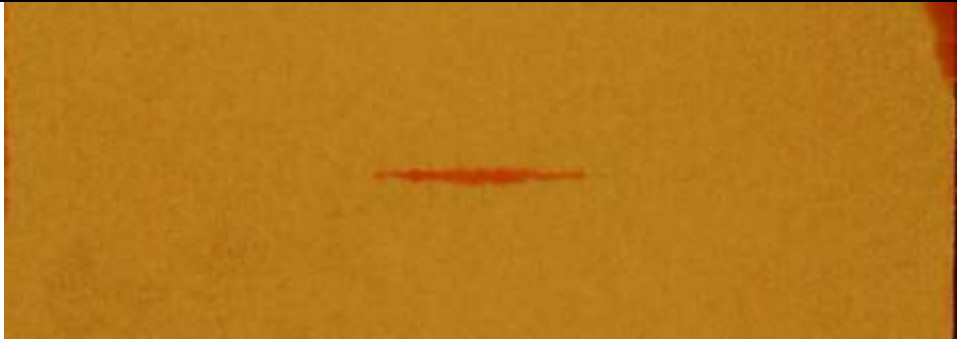
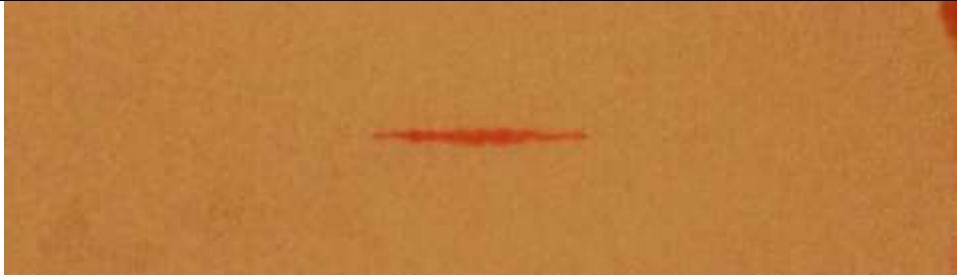
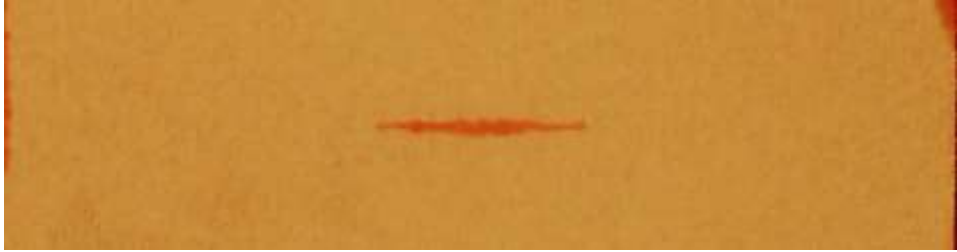
	КО № E19, ISO 200, HQ, Тёплый свет
	КО № E19, ISO 400, HQ, Тёплый свет
	КО № E19, ISO 800, HQ, Тёплый свет
	КО № E19, ISO 1600, HQ, Тёплый свет
	КО № E19, ISO 3200, HQ, Тёплый свет
	КО № E19, ISO Auto, HQ, Тёплый свет

Таблица 3.4 – Изображения, полученные для контрольного образца №192 при различной светочувствительности матрицы ISO и тёплом внешнем освещении.

	КО № 192, ISO 200, HQ, Тёплый свет
	КО № 192, ISO 400, HQ, Тёплый свет
	КО № 192, ISO 800, HQ, Тёплый свет
	КО № 192, ISO 1600, HQ, Тёплый свет
	КО № 192, ISO 3200, HQ, Тёплый свет
	КО № 192, ISO Auto, HQ, Тёплый свет

3.2 Алгоритм бинаризации изображений

3.2.1 Схема получения бинарного изображения

Бинарное изображение (двухуровневое, двоичное) представляет собой разновидность цифровых растровых изображений, когда каждый пиксель может быть представлен только одним из двух цветов, характеризующих собой логический ноль или логическую единицу. Бинарное изображение так же называют Битмап (от англ. Bitmap). Особенностью бинарных изображений является простота их кодировки, вследствие чего процесс цифровой обработки в значительной степени упрощается. [20]

На рисунке 3.1 представлен разработанный в ходе выполнения эксперимента вариант схемы получения бинарного изображения. Рассмотрим подробнее этапы, входящие в состав схемы.

На подготовительном этапе, цифровое изображение, полученное ранее, загружается в программную среду (MathCAD, MATLAB, C++), затем первым делом из общего изображения выделяются фрагменты с полученными ранее индикаторными следами (если программа не выявляет на снимке капиллярных следов, изображению присваивается статус «отсутствие дефектов»).



Рисунок 3.1 – Схема получения бинарного изображения индикаторного следа (ЦИ – цифровое изображение; ФИИС – фрагмент изображения индикаторного следа; КИС – контрастность индикаторного следа; ГЦО – график цветowych отклонений)

Последующие элементы схемы, такие как: выделение цветowych составляющих RGB; Выделение фрагментов изображения индикаторных следов; оценка контрастности индикаторного следа; построение графика

цветовых отклонений и получение бинарной картины будут подробно рассмотрены в пунктах ниже.

3.2.2 Программный код для определения цветового баланса

Любое цветное цифровое изображение кодируется как матрица значений векторов RGB (Red, Green, Blue), то есть цветное изображение с разрешением 100x100 пикселей кодируется 10 000 значений вектора RGB. Каждая из составляющих вектора RGB может принимать значение от 0 до 255, следовательно, суммарное количество чисел для кодировки изображения 100x100 пикселей равно 30 000. Безусловно, изображения с разрешением 3008x2000 будут содержать в себе в десятки раз больше информации и непосредственная её обработка займёт относительно длительный промежуток времени. [21]

Наиболее наглядно для человеческого глаза цветовой баланс можно представить в виде трех 3D поверхностей (рисунок 3.2) каждая из которых несет информацию о соответствующей цветовой составляющей.



Рисунок 3.2 – Трёхмерное представление RGB-составляющих яркости в MathCAD.

Для упрощения процесса анализа достаточно разделить вектор RGB на три теневые составляющие и анализировать их последовательно. На рисунке 3.3 представлен программный код, позволяющий в среде MathCAD выделить три теневые составляющие вектора RGB. Изображения этих составляющих приведены ниже на рисунке 3.4.

$C := \text{READRGB}("19.\text{auto2.bmp}")$	- Считывание изображения из файла
$RC := \text{rows}(C) \quad CC := \text{cols}(C)$	- Определение разрешения RGB-изображения
$r := \text{submatrix}\left(C, 0, RC - 1, 0, \frac{CC}{3} - 1\right)$	- Выделение красной составляющей вектора RGB
$g := \text{submatrix}\left(C, 0, RC - 1, \frac{CC}{3}, \frac{2 \cdot CC}{3} - 1\right)$	- Выделение зелёной составляющей вектора RGB
$b := \text{submatrix}\left(C, 0, RC - 1, \frac{2 \cdot CC}{3}, CC - 1\right)$	- Выделение синей составляющей вектора RGB
$M := \frac{CC}{3}$	- Определение длины одной составляющей вектора RGB
$k := 0..M - 1$	- Задание вектора длины изображения
$i := 0..RC - 1$	- Задание вектора ширины изображения

Рисунок 3.3 – Программный код для определения цветового баланса изображения.

На рисунке 3.4 видно, что красная (R) теневая составляющая отличается от зелёной (G) и синей (B), а значит, имеются и численные отличия в матрицах этих составляющих.

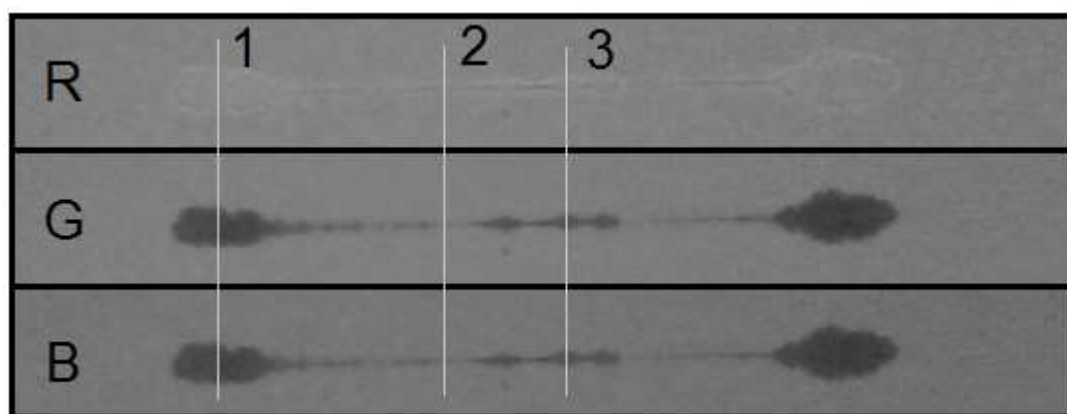


Рисунок 3.4 – Теневые составляющие вектора RGB.

На рисунках 3.5–3.7 представлены графики цветового баланса в сечениях 1, 2 и 3. Если рассмотреть цветовой баланс в различных сечениях изображения (1–3 рисунок 3.4), то невозможно не заметить места, в которых красная составляющая резко отличается от зелёной и синей, что свидетельствует о наличии в этих координатах красного индикаторного следа.

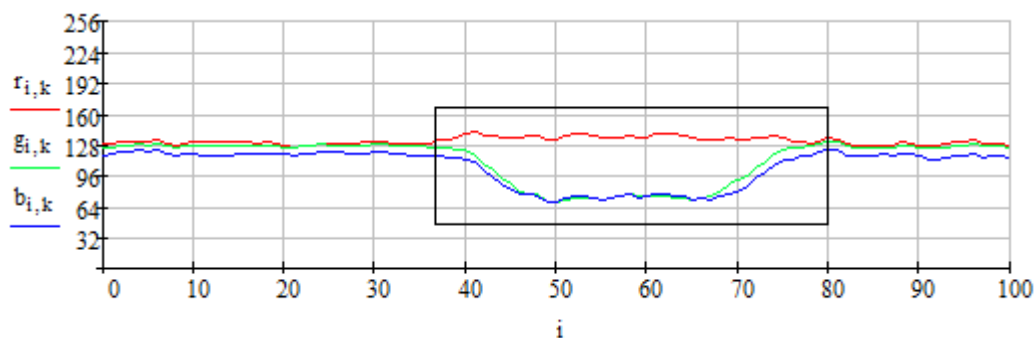


Рисунок 3.5 – График цветового баланса в сечении №1

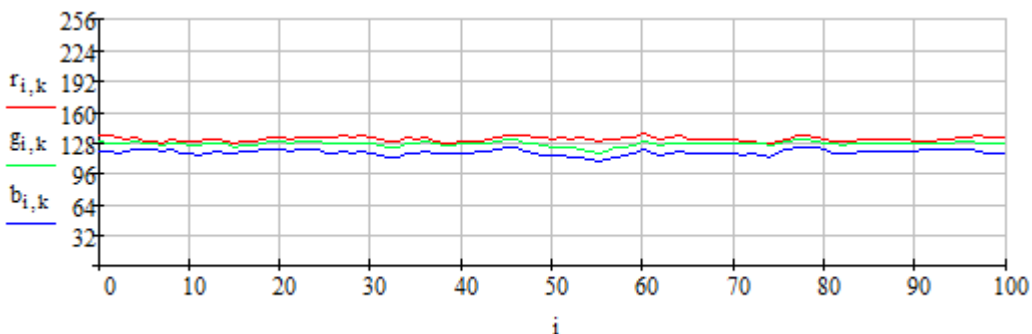


Рисунок 3.6 – График цветового баланса в сечении №2

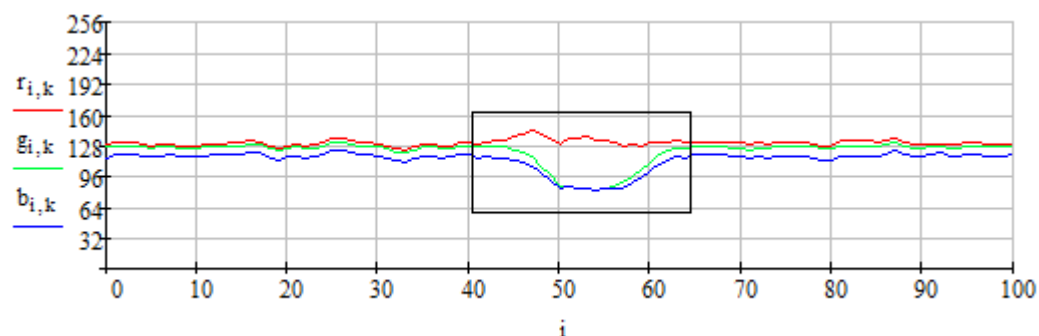


Рисунок 3.7 – График цветового баланса в сечении №3

Поскольку алгоритм должен иметь «сквозной» характер, т.е. обеспечивать автоматическое изменение результатов анализа при изменении входных данных, необходимо в программном коде учесть общий уровень контрастности изображения, в зависимости от которого впоследствии будут уточняться границы индикаторного следа, которые хорошо заметны на рисунке 3.4 у составляющей R.

Теоретически величина контраста определяется по формуле (2).

$$k = \frac{B_b - B_s}{B_s}, \quad (2)$$

где B_b – яркость фона; B_s – яркость индикаторного следа

Однако необходимо понимать, что яркость индикаторного следа на любом изображении в капиллярной дефектоскопии будет неравномерной. Также немаловажным является наличие трёх цветовых составляющих, что усложняет процесс определения контраста. По этой причине яркость индикаторного следа разумно определить как усредненное значение красной составляющей RGB вектора, а яркость фона представить средним арифметическим от усреднённых значений синей и зелёной составляющих RGB вектора.

Программный код MathCAD для определения контрастности изображения представлен с комментариями на рисунке 3.7.

$$\text{Red} := \frac{\sum_{k=0}^{M-1} \frac{\sum_{i=0}^{RC-1} r_{i,k}}{(RC-1)}}{M-1} \quad \text{Green} := \frac{\sum_{k=0}^{M-1} \frac{\sum_{i=0}^{RC-1} g_{i,k}}{(RC-1)}}{M-1} \quad \text{Blue} := \frac{\sum_{k=0}^{M-1} \frac{\sum_{i=0}^{RC-1} b_{i,k}}{(RC-1)}}{M-1}$$

- Среднематричные значения RGB составляющих

$$\text{srQ} := \frac{\text{Blue} + \text{Green}}{2} \quad \text{- Среднее арифметическое значение B и G составляющих}$$

$$\text{kontrast} := \frac{100(\text{Red} - \text{srQ})}{\text{srQ}} = 11.056 \quad \text{- Величина контраста, \%}$$

Рисунок 3.7 – Программный код MathCAD для определения величины контраста.

Следует отметить, что в данном алгоритме контраст был определен как величина яркости красной составляющей на фоне средней яркости зеленой и синей составляющих. Полученная величина позволяет объективно уточнить границы индикаторного следа и повысить точность в процессе формирования бинарного изображения, что впоследствии повлияет как на определение суммарной площади индикаторного следа, так и на определение линейных размеров следа. [22]

3.2.3 Алгоритм получения бинарной картины с учётом баланса RGB

Полученные ранее матрицы цветового баланса, представленные в частности на рисунках 3.5, 3.6 и 3.7, должны быть обработаны таким образом, чтобы получить на выходе единый параметр, при логическом анализе которого и будет формироваться бинарный индикаторный след.

Такого рода параметром может служить величина отклонения красной составляющей RGB от усредненного цветового баланса. Для примера на рисунке 3.8 представлен график, включающий красную составляющую ($r_{i,k}$) и усредненный цветовой баланс ($sr_{i,k}$). На рисунке 3.9 представлен график отклонения ($\delta_{i,k}$) красной составляющей от усреднённого цветового баланса.

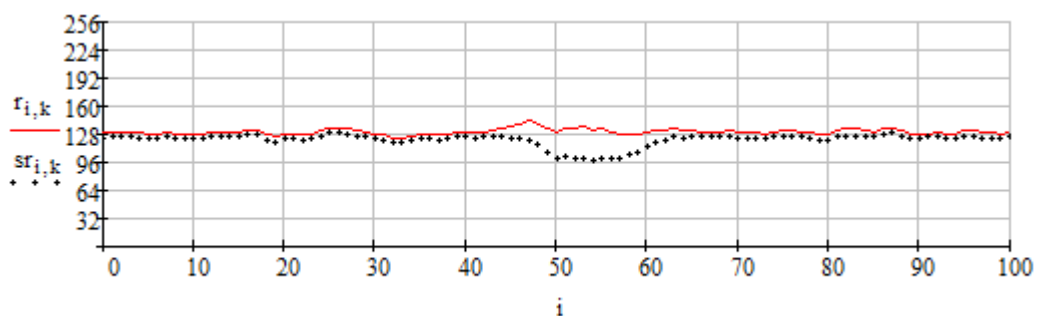


Рисунок 3.8 – Красная составляющая и усреднённый цветовой баланс.

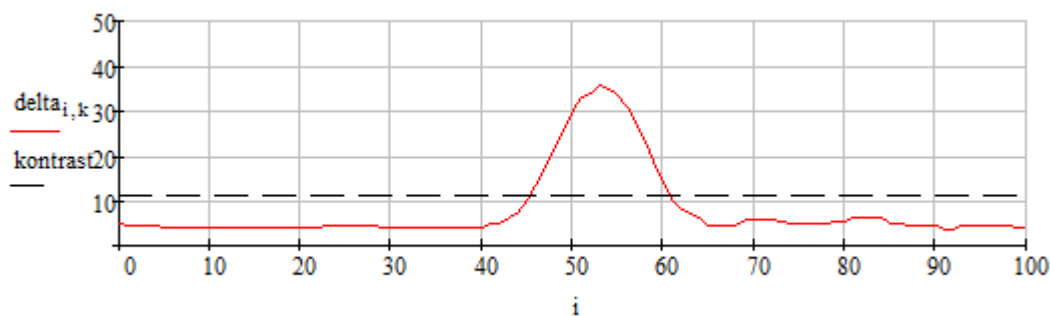


Рисунок 3.9 – Отклонение (%) красной составляющей от усреднённого цветового баланса.

Дополнительно на рисунке 3.9 представлена линия рассчитанного ранее контраста, которая исполняет роль фильтра в процессе формирования бинарной картины индикаторного следа.

Ниже на рисунке 3.10 представлен программный код MathCAD для получения бинарной картины индикаторного следа, с учётом рассчитанного ранее контраста изображения. В приложении А представлена блок-схема алгоритма.

Исходное изображение и результат алгоритма его обработки для сравнения представлены соответственно на рисунках 3.11 и 3.12.

$$\begin{aligned} sr_{i,k} &:= \frac{r_{i,k} + g_{i,k} + b_{i,k}}{3} && \text{- Формирование матрицы усредненного цветового баланса} \\ \text{delta}_{i,k} &:= \frac{100 |sr_{i,k} - r_{i,k}|}{r_{i,k}} && \text{- Формирование матрицы значений отклонения} \\ \text{Binar}_{i,k} &:= \begin{cases} 0 & \text{if } \text{delta}_{i,k} > \text{kontrast} \\ 255 & \text{otherwise} \end{cases} && \text{- Формирование бинарного индикаторного следа} \end{aligned}$$

Рисунок 3.10 – Программный код MathCAD для формирования бинарной картины.



Рисунок 3.11 – Исходное изображение индикаторного следа.

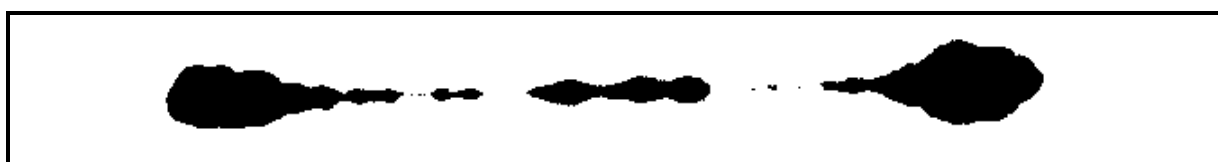


Рисунок 3.12 – Бинарное изображение индикаторного следа после цифровой обработки.

Полученное с учётом рассчитанного ранее контраста бинарное изображение капиллярного следа пригодно для дальнейшей цифровой обработки, расчёта площади следа и уточнения его линейных размеров. Бесспорно, оно не в полной мере повторяет контуры цветного изображения, однако детально передаёт форму капиллярного следа.

3.2.4 Анализ параметров следа и получение численных результатов площади и протяженности

В капиллярной дефектоскопии критерием отбраковки является максимальная протяженность дефекта. Как правило, большинство дефектов, выявляемых в процессе капиллярного контроля, представляют собой поверхностные поры, скопления пор или трещины. Поры и скопления пор имеют в качестве следа фигуры эллиптической формы, а капиллярные следы трещин имеют сложную форму, зависящую от ширины её раскрытия в той или иной координате. [23]

На рисунке 3.13 представлен алгоритм получения зависимости распределения ширины следа по оси его протяженности. На рисунке 3.14 представлен бинарный след и полученный график распределения его ширины.

```
Bk := for k ∈ 0..M - 1  
      | b ← 0  
      | for i ∈ 0..RC - 1  
      |   | i ← i + 1 if superli,k = 255  
      |   | otherwise  
      |   |   | b ← b + 1  
      |   |   | i ← i + 1  
      | Bk ← b
```

Рисунок 3.13 – Алгоритм получения зависимости распределения ширины следа в MathCAD.

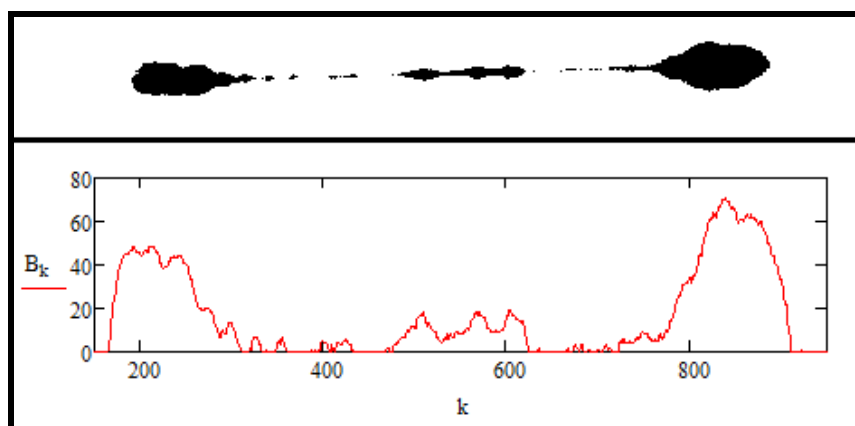


Рисунок 3.14 – Бинарная картина капиллярного следа и распределение ширины следа вдоль оси его протяженности.

Если рассмотреть рисунок 3.14, то можно заметить, что ширина следа изменяется по мере его протяженности в диапазоне от 0 до 80 пикселей и достигает своего максимума в координате 840. Так же на графике видно, что общая протяженность следа составляет 747 пикселей. По наличию на графике резких перепадов и нулевых точек, программа может понять, что данный дефект не является единичной порой.

Помимо определения протяженности имеется возможность вычисления площади бинарного следа. Для этого необходимо просуммировать все значения ширины вдоль оси протяженности следа.

Однако следует помнить, что количество пикселей не даёт никакой информации о реальных размерах дефекта и без знания размеров пиксельной единицы определение реальных размеров следа не представляется возможным.

Получить же информацию о размере пиксельной единицы возможно как минимум двумя способами. Первый – позволяет определить размер пикселя с учётом оптического коэффициента геометрической схемы получения изображения. Данный метод сложен в реализации, поскольку требует строгой фиксации регистратора и наличие информации о координате оптического центра объектива фотоаппарата, а так же строгое установление фокусного расстояния линзы с высокой точностью. Данный метод целесообразен при необходимости повышенной точности измерений параметров изображения.

Второй способ позволяет определить размер пикселя, опираясь на эталон площади. В качестве эталона целесообразно использовать квадрат контрастного цвета, например красного, площадь которого заранее известна. Этот способ значительно проще и требует выполнения только одного условия – эталон должен лежать в одной плоскости с капиллярным следом.

В ходе исследования эталоном являлся красный квадрат, распечатанный на цветном принтере, площадью $27,88 \text{ мм}^2$. Площадь была определена путём измерения сторон квадрата при помощи измерительного микроскопа. На рисунке 3.15 представлено изображение эталона квадрата, наложенного на поверхность контрольного образца №122.



Рисунок 3.15 – Контрольный образец №122 с квадратным эталоном площади.

Площадь квадрата в пикселях была определена методом суммирования, описанным ранее. Изображение цветного капиллярного следа и его бинарная картина представлены на рисунке 3.16. Результаты расчётов программы и реальные размеры, полученные при помощи измерительного микроскопа, сведены в таблице 3.1.

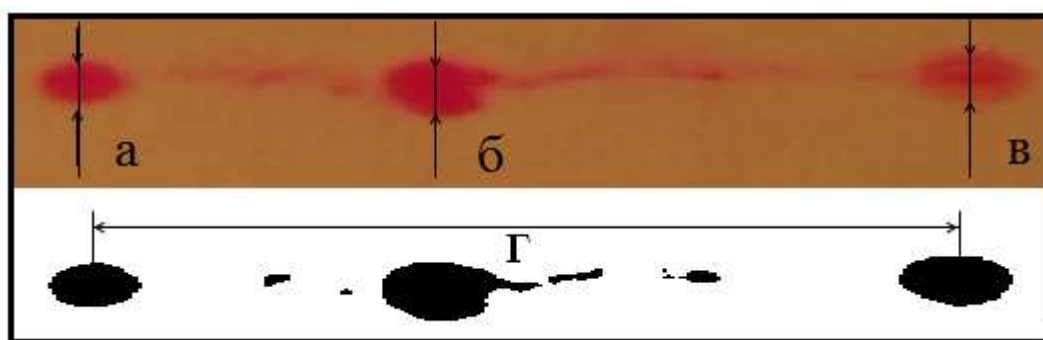


Рисунок 3.16 – Капиллярный след и его бинарное изображение (Образец №122, желтый свет, ISO 200, граница отклонения цвета 43%)

Таблица 3.5 – Численные результаты анализа изображения образца №122.

	а	б	в	г
Измеренная величина, мм	0.727	0.984	0.863	7.907
Рассчитанная величина, мм	0.782	1.042	0.893	7.548
Абсолютная погрешность, мм	0.055	0.058	0.030	0.359
Относительная погрешность, %	7.57	5.89	3.48	4.56
Площадь бинарного следа, мм ²	2.228			

Если рассмотреть данные таблицы 3.5, то можно заметить, что относительная погрешность не превышает и 10%, что для капиллярной дефектоскопии является приемлемым уровнем.

3.3 Алгоритм выделения фрагментов бинарного изображения

Алгоритм выделения фрагментов изображения представляет собой совокупность арифметических и логических операций по распознаванию индикаторных следов.

Поскольку в капиллярной дефектоскопии крайне важным для идентификации типа дефекта является определение формы следа (округлый, вытянутый) и его максимальной протяженности, в качестве одного из главных требований к алгоритму возникает необходимость наличия последовательности логических операций, позволяющих очень точно выделить область индикаторного следа. На рисунке 3.17 представлено одно из возможных бинарных изображений индикаторного следа. Человеческому глазу в данном случае понятно, что след представляет собой трещину, размер которой приблизительно можно определить как разность между центрами крайних пятен, однако для программы такая картина является лишь совокупностью нулей и единиц и в исходном виде не имеет никаких логических взаимосвязей. [24]

Первостепенной задачей на данном этапе является обведение областей индикаторного следа условными границами (рисунок 3.18). Выделенные фрагменты целесообразно сохранять в отдельную матрицу для последующего анализа их формы и протяженности. Блок схема алгоритма выделения фрагментов бинарного изображения приведена в приложении Б.

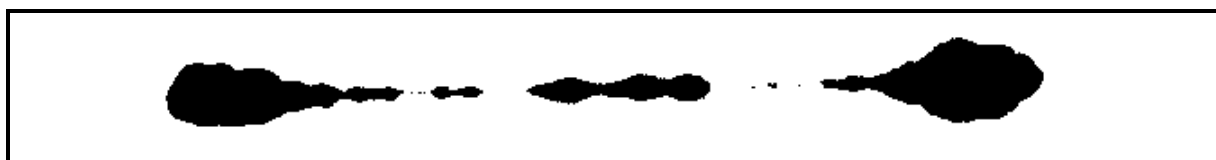


Рисунок 3.17 – Пример бинарного изображения индикаторного следа



Рисунок 3.18 – Бинарный след с выделенными фрагментами

На следующем этапе возникает необходимость оценки близости расположения выделенных фрагментов друг к другу, поскольку фрагменты в действительности могут отражать один и тот же дефект, либо представлять собой скопления дефектов (скопления пор, скопления трещин). В связи с этим необходимо произвести анализ наложения областей фрагментов друг на друга.

Под областью фрагмента в данном случае понимается матрица, расширенная в два раза относительно размеров исходного фрагмента изображения. На рисунке 3.19 разными цветами выделены области одинарного (зеленый) и двойного (красный) наложения. Области без наложений оставлены не закрашенными. [21]

Таким образом, если в ходе алгоритма выделения фрагментов бинарного изображения создавать дополнительный массив данных, в котором по ходу выполнения алгоритма будут регистрироваться и суммироваться расширенные области фрагментов, то в результате этот дополнительный массив данных будет содержать информацию о наличии как минимум двойных и тройных наложений. В случае со скоплениями пор теоретически возможны и четверные наложения областей. [20]

Затем, анализируя этот дополнительный массив и сопоставляя данные о наложениях с координатами участвующих в наложении областей, программа может понять, какие из фрагментов представляют собой единый дефект (трещину) или скопление пор.

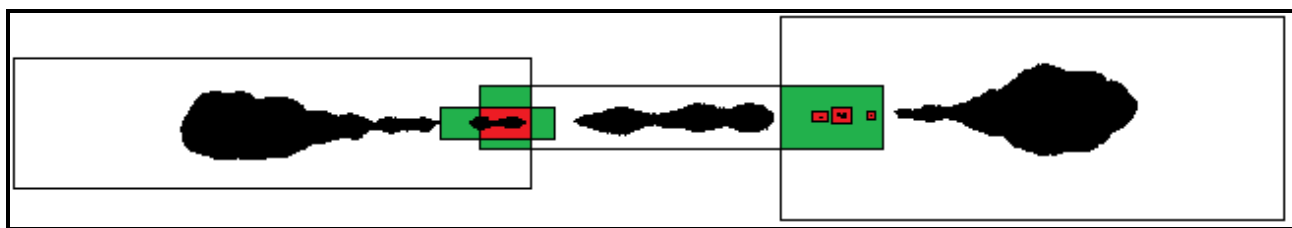


Рисунок 3.19 – Карта наложения областей фрагментов бинарного изображения

3.4 Алгоритм определения формы индикаторного следа

Форма индикаторного следа является основным критерием для определения типа скрывающегося под ним дефекта. В капиллярной дефектоскопии дефекты принято условно разделять на округлые и вытяженные. Округлым считается индикаторный след, длина которого в три раза больше по отношению к его ширине. Примеры вытяженного и округлого дефектов представлены на рисунке 3.20.

Однако, не смотря на кажущуюся простоту для человеческого глаза, программе для анализа формы следа необходимы чёткие критерии, согласно которым индикаторный след будет отнесен по типу к трещине, единичной поре или скоплению. Поры, как правило, являются округлыми дефектами, а трещины – вытяженными. Особенностью трещин является так же то, что при выходе на поверхность они могут иметь небольшую вытяженность и их можно принять за единичную пору. [1]



Рисунок 3.20 – Примеры вытяженного (А) и округлого (Б) индикаторных следов

В качестве критерия для отнесения следа к тому или иному типу, в качестве опоры было выбрано соотношение площади квадрата (прямоугольника) и круга (эллипса), которое представляет собой отношение $\pi/4$. Если выразить данное соотношение в процентах, то круг (предполагаемый идеальный округлый индикаторный след) занимает около 78% квадратной (прямоугольной) области. Если условно разделить диапазон от 0 до 78 % занимаемой площади следа на две части и учесть это в алгоритме, то получится, что индикаторный след, занимающий менее 33% площади прямоугольника

можно условно считать отражением трещины, а след, занимающий от 33 до 78% площади прямоугольника – отражением поры. [1]

На рисунке 3.21 приведены возможные изображения следов, отражающих наличие поры и трещины. Подобного рода условное разделение следов по занимаемой площади относительно выделенного фрагмента необходимо, прежде всего, для определения максимальной протяженности индикаторного следа. Таким образом, если индикаторный след занимает менее 33%, его площадь целесообразно определять по теореме Пифагора, а если площадь занимает от 33 до 78 % прямоугольника – целесообразно определять его протяженность как наибольшую его проекцию на оси X и Y.

Блок-схема определения формы и протяженности капиллярного следа представлена в приложении В.

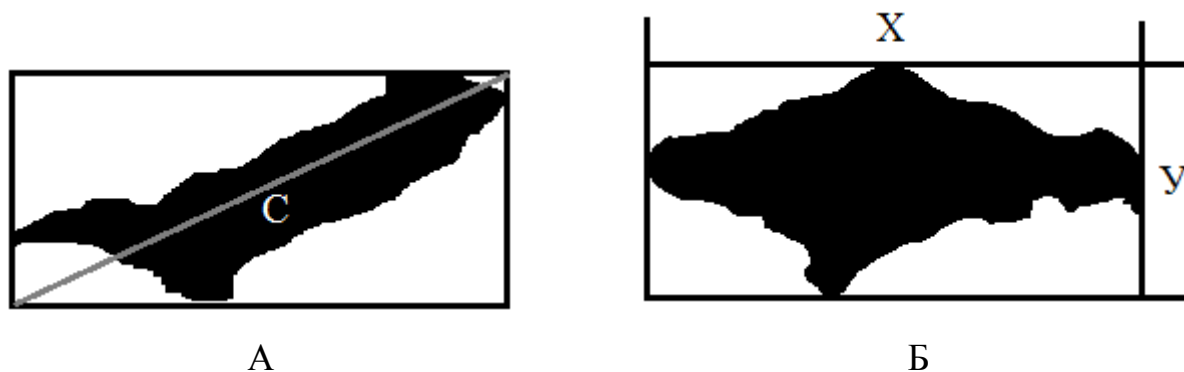


Рисунок 3.21 – Возможные изображения следов, занимающих менее 33% (А) и более 33% (Б) площади ограничивающих их прямоугольника
(С – протяженность следа по т. Пифагора; Х – протяженность следа как проекция на ось абсцисс)

Следующим и заключительным этапом является присвоение индикаторным следам реальных размеров, согласно изначально установленному размеру пиксельной единицы. На основании реальных размеров индикаторных следов им присваивается статус «допустимый» или «не допустимый». И составляется отчёт с указанием координат дефектов. [1–3]

3.5 Анализ источников возникновения погрешностей при цифровой обработке

Опираясь на информацию, представленную в предыдущих разделах, можно предположить, что качество преобразования от цветного изображения в бинарное зависит от следующих типов погрешностей:

- оптико-геометрические погрешности;
- погрешности, вносимые соотношением «Сигнал/Шум»;
- погрешности, обусловленные низким уровнем контраста;
- погрешности, обусловленные несовершенством стандартных образцов площади.

3.5.1 Оптико-геометрические погрешности

Такого рода погрешности обусловлены особенностями геометрических схем получения изображений. Эти погрешности связаны, прежде всего с нелинейным проецированием изображений и их величина зависят от типов оптических линз и цифровых фото-матриц. На рисунках 3.22 и 3.23 представлена схема преобразования оптического излучения в цифровую фотографию. Рисунок 3.22 является трёхмерной моделью преобразования, а рисунок 3.23 является плоской схемой с конкретными числовыми параметрами как частный случай геометрической схемы. [19]

Таблица 3.6 – Элементы и параметры рисунков 3.22 и 3.23

Рисунок 3.22	Рисунок 3.23
А – Оптическая линза (OL); В – Плоскость формирования изображения (IGP); С – Объект контроля (OC); Е – Цифровая матрица (DA).	А – Длина объекта контроля; L – Длина линии изображения; а – Размер телесного угла; S – расстояние между DA и OC; F – Фокусное расстояние.

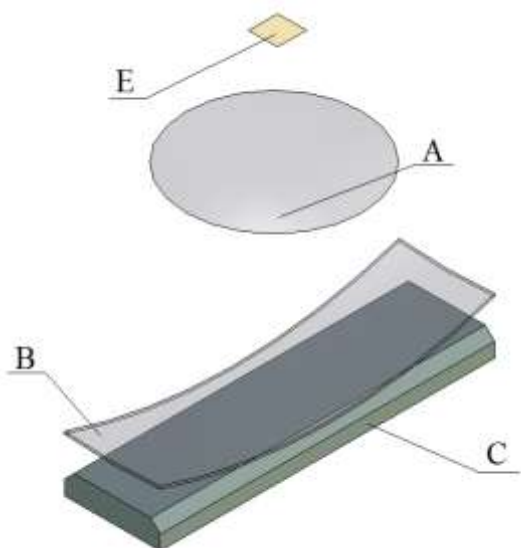


Рисунок 3.22 – 3D модель
оптического преобразования

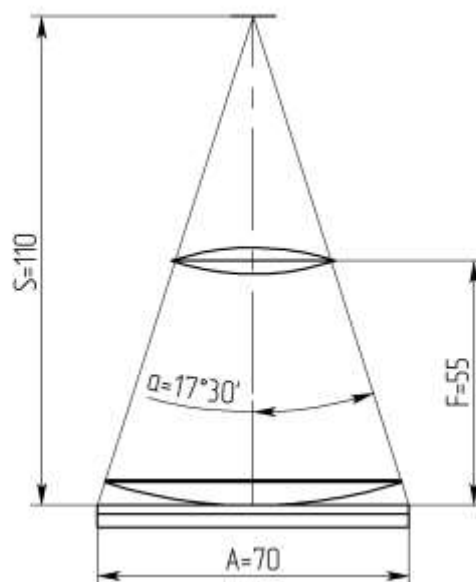


Рисунок 3.23 – 2D чертёж
оптического преобразования

Длина линии изображения зависит от размера телесного угла и может быть определена по следующей формуле:

$$L = \frac{2 \pi a}{180} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 17,5}{180} \approx 67,2 \text{ mm}$$

Размер относительной погрешности может быть вычислен по формуле:

$$\delta = \frac{|L - A|}{A} = \frac{|67,2 - 70|}{70} \approx 4 \%$$

Вычисления показали, что во время цифровой обработки необходимо учитывать линейный поправочный коэффициент, равный 1,042 ($m = A/L$).

3.5.2 Погрешности, вызванные соотношением Сигнал/Шум

Подобного рода погрешности обусловлены величиной уровня шума на диаграмме RGB-баланса. Эти погрешности в капиллярной дефектоскопии связаны с диаграммой отклонения красного канала относительно среднего цветового баланса. На рисунках 3.24 и 3.25 представлены, соответственно диаграмма отклонений с различным соотношением Сигнал/Шум. Рисунки 3.26 и 3.27 являются цветным изображением и бинарным соответственно. [19]

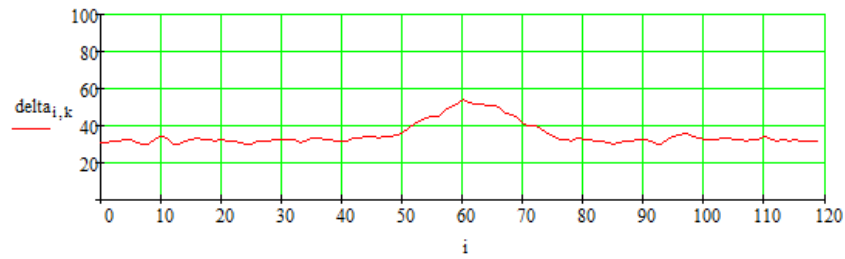


Рисунок 3.24 – Диаграмма отклонений с небольшим отношением Сигнал/Шум.

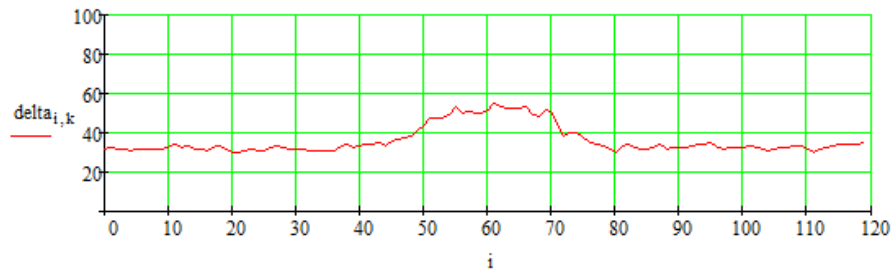


Рисунок 3.25 – Диаграмма отклонений с большим отношением Сигнал/Шум.

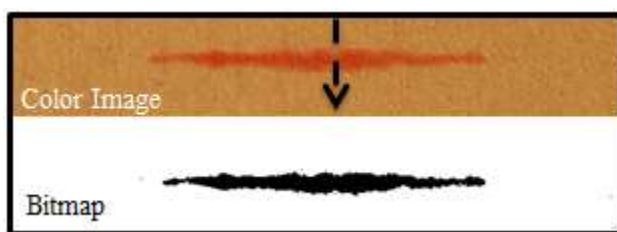


Рисунок 3.26 – Результат цифровой обработки изображения с небольшим отношением Сигнал/Шум

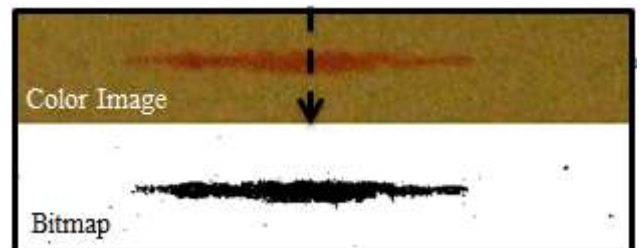


Рисунок 3.27 – Результат цифровой обработки изображения с большим отношением Сигнал/Шум

3.5.3 Погрешности, обусловленные малым уровнем контраста

Данный фактор контраста связан с разницей между яркостью фона (B_b) и яркостью индикаторного следа (B_s). Размер уровня контраста может быть вычислен по следующей формуле (3):

$$k = \frac{B_b - B_s}{B_s} \quad (2)$$

Рисунки 3.28 и 3.29 представляют собой цветные и бинарные изображения для различных уровней контраста. Можно заметить, что изображение с высоким уровнем контраста выглядит более чётким, нежели изображение с незначительным уровнем контраста.

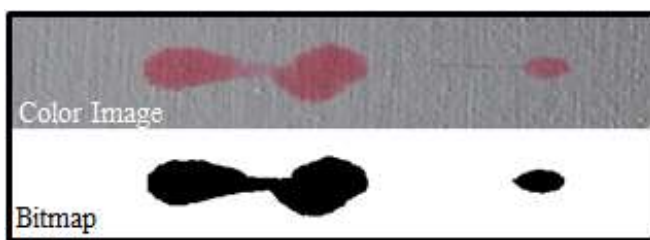


Рисунок 3.28 – Результат цифровой обработки с высоким уровнем контраста изображения.

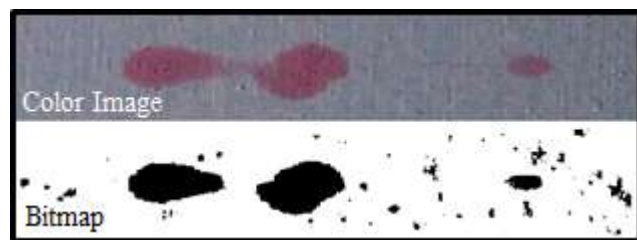


Рисунок 3.29 – Результат цифровой обработки с низким уровнем контраста изображения.

3.5.4 Погрешности обусловленные несовершенством образцов площади

Данный фактор связан с качеством производства образцов площади. Высококачественный стандартный образец имеет постоянный и однородный цвет, обеспечивающий высокую контрастность.

На рисунке 3.30 представлен результат цифровой обработки для объекта с квадратным образцом площади, равным $27,88 \text{ мм}^2$, а на рисунке 3.31 представлен результат цифровой обработки для объекта с идеальным эталоном площади, полученным посредством графического редактора.

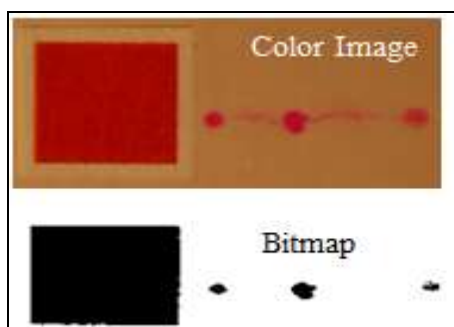


Рисунок 3.30 – Результат цифровой обработки с реальным эталоном площади

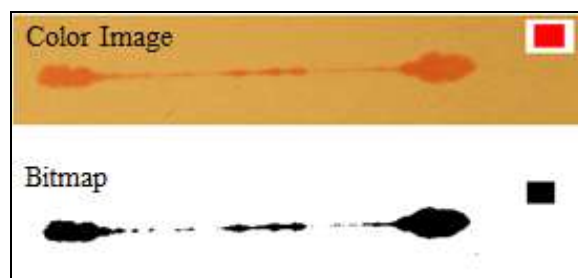


Рисунок 3.31 – Результат цифровой обработки с идеальным эталоном площади

На рисунке 3.30 можно заметить некоторые неровности в бинарном изображении квадратного образца-эталона площади, а на рисунке 3.31 таких неровностей не обнаружено.

Результаты анализа источников возникновения погрешностей сведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Типы возникающих погрешностей и связанные с ними параметры.

<u>Типы погрешностей</u>	<u>Параметры</u>
Оптико-геометрические погрешности	Разрешение цифровой матрицы и тип линзы
Погрешности соотношения Сигнал/Шум	Светочувствительность матрицы (ISO)
Погрешности, обусловленные низким уровнем контраста	Баланс освещенности объекта контроля
Погрешности, обусловленные несовершенством образцов площади	Качество и точность изготовления образцов площади

Если рассмотреть более детально таблицу 3.7, то возникающие погрешности можно разделить на:

- погрешности, влияющие на качество обработки информации;
- погрешности, влияющие на точность определения численных результатов.

Первые являются наиболее значимыми, поскольку их наличие может привести к возникновению ложных бинарных индикаций. К их числу относятся погрешности, обусловленные низким уровнем контраста индикаторного следа и погрешности соотношения «сигнал/шум». Вторые влияют лишь на точность измерений протяженности и площади индикаторного следа, однако не оказывают влияния на определения типа дефекта.

Следует отметить, что в капиллярной дефектоскопии точность измерения не является основополагающим фактором, поскольку индикаторный след указывает лишь на наличие дефекта, а его (следа) площадь лишь отчасти зависит от объема полости поверхностного дефекта.

Далее, более детально будут рассмотрены погрешности, влияющие на качество обработки информации, а именно: погрешность определения линейного размера следа в зависимости от разрешения изображения и погрешность определения линейного размера следа в зависимости от светочувствительности ISO.

3.5.5 Величина погрешности определения линейного размера следа в зависимости от разрешения изображения.

Согласно нормативно-технической документации, в капиллярном контроле принято разделять поверхностные дефекты на протяженные и округлые. Для присвоения дефекту статуса протяженного или округлого, необходимо, прежде всего, измерить его максимальную протяженность, размер которой является линейным. [1–3]

Поскольку разрешение оптической матрицы напрямую связана со стоимостью оборудования, вытекает потребность зафиксировать зависимость величины погрешности определения линейного размера капиллярного следа от разрешения изображения с целью определения минимально необходимого разрешения изображения.

Для установления такого рода зависимости при помощи имеющегося оборудования был получен ряд изображений капиллярного следа с различным разрешением (пкс/см), что позволило варьировать значения линейного разрешения изображения в диапазоне от 63 до 257 пкс/см.

Для получения численного значения линейной протяженности дефекта были использованы алгоритмы, описанные в пунктах 3.2.3–3.2.4.

Для наглядности, на рисунках 3.32 и 3.33 представлены бинарные картины, полученные в процессе обработки изображений с линейным разрешением 63 и 257 пкс/см. На рисунке 3.34 приведена зависимость величины погрешности определения линейного размера капиллярного следа от величины разрешения изображения.

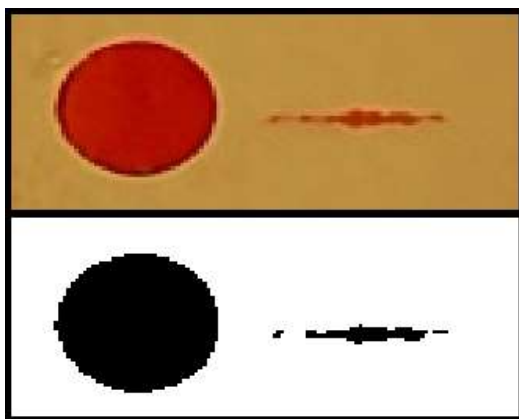


Рисунок 3.32 – Индикаторный след и его бинарная картина при разрешении 63 пкс/см

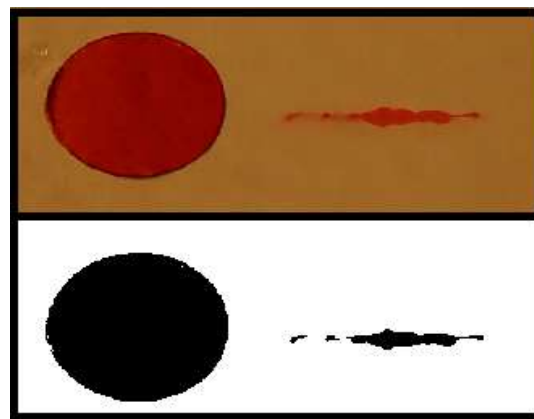


Рисунок 3.33 – Индикаторный след и его бинарная картина при разрешении 257 пкс/см

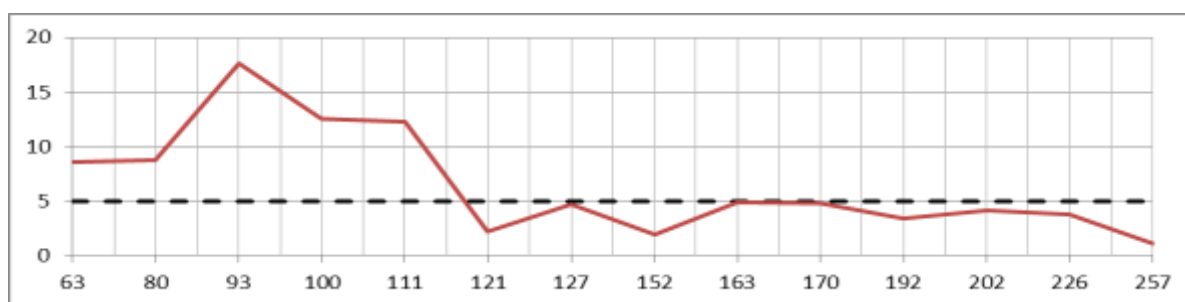


Рисунок 3.34 – Зависимость величины относительной погрешности определения линейного размера капиллярного следа (%) от величины разрешения изображения (пкс/см)

Если рассмотреть рисунки 3.32 и 3.33, то можно заметить очевидную разницу в качестве изображения, однако график, представленный на рисунке 3.34 показывает, что по мере увеличения разрешения изображения, погрешность входит в зону 5% на значении 120 пкс/см, после чего её значение колеблется в диапазоне 1-5 %, что вполне приемлемо для алгоритма, описанного в пунктах 3.2.3–3.2.4, поскольку он не учитывает индивидуальных особенностей яркости фона снимка.

Алгоритм определяет порог отклонения (Рисунок 3.9) основываясь на данных о цвете фона, а поскольку яркость этого цвета и его RGB баланс могут отличаться от снимка к снимку, то это отражается на значении контраста индикаторного следа, что в свою очередь приводит к возникновению алгоритмической погрешности не более 10% (Таблица 3.1).

Следует так же помнить, что увеличение разрешения изображения увеличивает количество информации, которую содержит изображение, что в свою очередь влияет на время обработки изображений в процессе его преобразования в бинарную картину и вычисления линейного размера или площади следа. Помимо времени обработки изображения, разрешение связано со стоимостью оборудования в целом и оптической матрицы в частности.

Подводя промежуточный итог можно сказать, что оптимальным разрешением для снимка является минимум 120 пикселей на сантиметр объекта контроля для дефектов, выявляемых по первому классу чувствительности при использовании цветного метода капиллярного контроля.

3.5.6 Величина погрешности определения линейного размера следа в зависимости от светочувствительности ISO.

Светочувствительность цифровой фотокамеры ISO представляет собой характеристику цифрового фотоаппарата, определяющую зависимость числовых параметров созданного им цифрового изображения от экспозиции, полученной светочувствительной матрицей. Светочувствительность цифровых фотоаппаратов принято выражать в единицах, эквивалентных светочувствительности ISO галогеносеребряных фотоэмульсий. [12]

Цифровыми фотоаппаратами при одной и той же экспозиции может быть получено изображение разной степени яркости. Это достигается изменением предварительного усиления электрических сигналов светочувствительной матрицы и алгоритмов их последующего аналогово-цифрового преобразования в цветовое пространство, главным образом, RGB. Производители цифровой аппаратуры устанавливают фиксированную зависимость между значениями сигналов матрицы и соответствующими параметрами цветового пространства, принимаемую в качестве экспозиционного индекса EI. Большинство цифровых фотоаппаратов имеет несколько значений EI, переключение между которыми позволяет находить

наиболее приемлемый компромисс между возможностью съёмки с короткими выдержками и интенсивностью шумов в получаемом изображении. Значения EI выбираются таким образом, чтобы получаемое цифровое изображение было сопоставимо с получаемым на плёнке такой же чувствительности ISO, с теми же экспозиционными параметрами. Поэтому, в обиходе принято называть значения EI цифровых фотоаппаратов «эквивалентной светочувствительностью ISO». Однако, этот параметр имеет лишь косвенное отношение к светочувствительности матрицы, и выражается в единицах плёночной сенситометрии только для удобства использования классических приёмов измерения экспозиции, принятых в традиционной фотографии. [13]

Для установления зависимости погрешности измерения линейного размера от величины светочувствительности матрицы ISO, было получен ряд изображений с предварительно установленной различной величиной светочувствительности ISO. Впоследствии, аналогично предыдущему эксперименту, изображение подвергалось обработке, на выходе которой получалась бинарная картина, проекция которой определяла длину индикаторного следа в пикселях. С учётом заранее известной единицы площади, определялось реальное значение длины пиксельной единицы, после чего производился пересчёт.

Ниже на рисунках 3.35 – 3.42 приведены различия между изображениями, RGB-балансами, графиками отклонений и бинарными картинками для снимков, полученных при различной светочувствительности ISO.

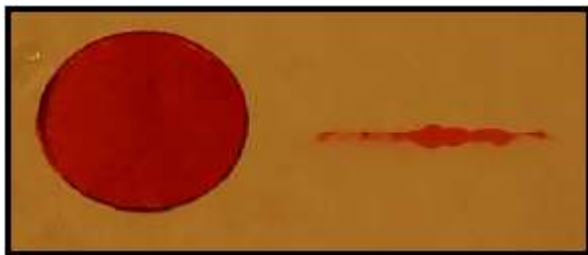


Рисунок 3.35 – Изображение снимка
при ISO 200

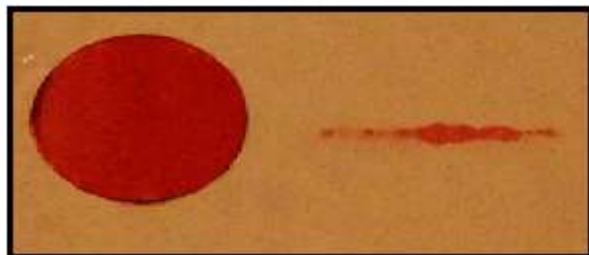


Рисунок 3.36 – Изображение снимка
при ISO 3200

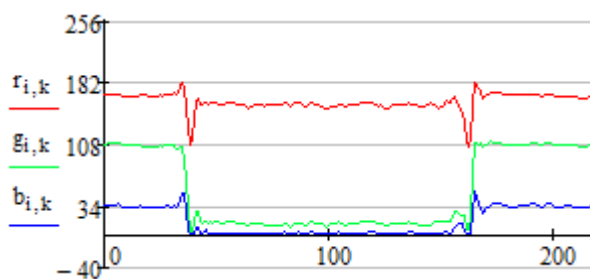


Рисунок 3.37 – RGB баланс при ISO 200

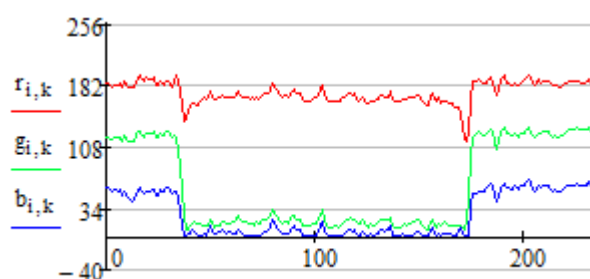


Рисунок 3.38 – RGB баланс при ISO 3200

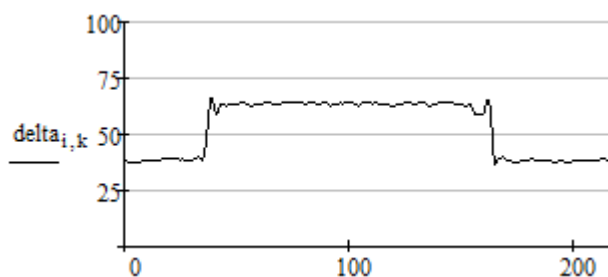


Рисунок 3.39 – График отклонений при ISO 200

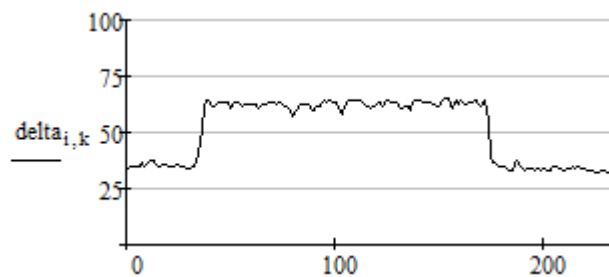


Рисунок 3.40 – График отклонений при ISO 3200



Рисунок 3.41 – Бинарная картина при ISO 200

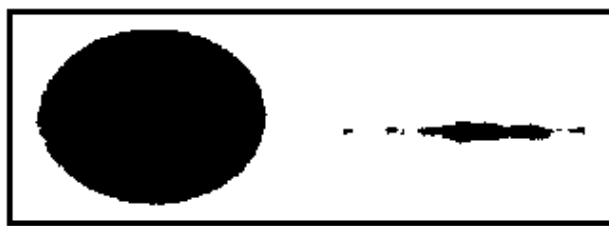


Рисунок 3.42 – Бинарная картина при ISO 3200

Если рассмотреть подробнее рисунки 3.35 – 3.42, то можно заметить, что основным эффектом в процессе изменения светочувствительности матрицы ISO является возникновение шумов. Однако алгоритм, описанный в пунктах 3.2.3–3.2.4, позволяет получить бинарную картину исходя из относительных значений цветового баланса (отклонение красной составляющей от средней цветовой RGB составляющей), вследствие чего амплитуда шумов резко снижается и их вклад в общую погрешность уменьшается. Это связано с тем, что при возникновении шума, яркость изменяется во всех трёх RGB

составляющих, следовательно, проблема решается простым вычитанием одной составляющей из другой.

В результате такого вычитания получаются графики отклонений, представленные на рисунках 3.39 и 3.40, на которых видно явное отклонение красной составляющей баланса от средней цветовой. Разница между фоном и индикаторным следом составляет 25%, что говорит о достаточном контрасте. В результате применений алгоритма обработки получаются почти идентичные бинарные картины, что свидетельствует о незначительности влияния светочувствительности ISO на результат измерения линейной протяженности индикаторного следа.

Для численного подтверждения была построена зависимость погрешности определения линейного размера следа от светочувствительности ISO, представленная на рисунке 3.43.

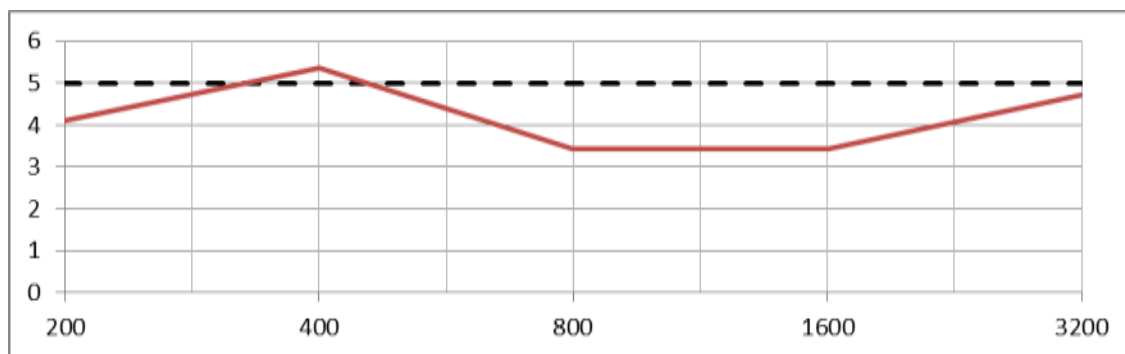


Рисунок 3.43 – Зависимость величины относительной погрешности измерения линейного размера от светочувствительности матрицы ISO.

Если рассмотреть рисунок 3.43, то можно заметить, что погрешность в среднем не превышает 5%, что говорит о малом влиянии светочувствительности ISO на результаты линейных измерений. Как и в предыдущем разделе, погрешность обусловлена не совершенностью алгоритма. Однако следует помнить, что для дефектов, выявляемых по первому классу чувствительности при использовании цветного метода капиллярного контроля данной погрешности более чем достаточно для обнаружения дефекта и его типа.

4. Результаты проведенного исследования

В результате проведенного исследования в ходе сравнительного визуального анализа полученных изображений тестовых образцов для капиллярной дефектоскопии было установлено, что оптимальной светочувствительностью матрицы при «тёплой» освещенности является ISO1600, а при «холодной» освещенности – от ISO400 до ISO800. Так же было установлено наличие большого количества шумов при светочувствительности матрицы ISO3200.

В ходе эксперимента был разработан алгоритм бинаризации цветного цифрового изображения тестового образца для цветной капиллярной дефектоскопии. В результате измерения параметров бинаризованного индикаторного следа (локальная ширина в сечениях, протяженность) было установлено, что полученные результаты отклоняются от замеров, сделанных при помощи оптического микроскопа не более чем на 7-10%, что для капиллярной дефектоскопии является более чем приемлемым показателем.

Так же был разработан логический алгоритм по распознаванию фрагментов индикаторных следов на бинарном изображении с последующим анализом на возможную взаимосвязь соседних фрагментов. Блок-схема алгоритма приведена в приложении А.

В дополнение был разработан алгоритм по определению формы индикаторного следа и присвоению ему статуса «округлый» или «протяженный» с дальнейшим численным вычислением его площади и максимальной протяженности. Блок-схема алгоритма приведена в приложении Б.

В завершение были проанализированы возможные источники возникновения погрешностей в ходе цифровой обработки изображений, в результате чего была составлена сводная таблица наиболее важных влияющих факторов и построены зависимости величины погрешности от разрешения изображения и величины светочувствительности матрицы ISO.

Заключение

В результате проделанной работы были реализованы эксперименты по получению цифровых изображений контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии.

Был проведен аналитический обзор источников технической литературы и основных публикаций, посвященных теме алгоритмов цифровой обработки изображений индикаторных следов в капиллярной дефектоскопии;

В результате анализа полученных цифровых изображений, были выявлены цветовые особенности индикаторных следов в капиллярной дефектоскопии, вследствие чего был разработан алгоритм бинарного преобразования цифрового изображения индикаторного следа.

Ввиду того, что бинарное изображение может содержать в себе несколько индикаторных следов, независимых друг от друга, был разработан алгоритм автоматического поиска и архивирования фрагментов изображения, содержащих отдельные индикаторные следы.

Так же в ходе исследования была установлена необходимость определения формы индикаторного следа, вследствие чего был разработан алгоритм определения формы индикаторного следа, вычисления его площади и определения максимальной протяженности.

В завершение была произведена оценка величины погрешностей, возникающих в процессе получения цифровых изображений и последующей их цифровой обработки.

В качестве дополнительных разделов были оформлены «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и «Социальная ответственность».

Список публикаций

1. Чесноков Д. В. Возможности статистических методов в спектральном анализе // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 274-277;

2. Чесноков Д. В. Исследование способа крепления датчика вибрации на постоянный магнит // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. В 4-х томах, Томск, 6-11 Октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 270-274;

3. Осипов С. П. , Алибекова А. А. , Чесноков Д. В. Способы оценки площади оптической неоднородности на плоском изделии на основе анализа фотоизображений // Качество - стратегия XXI века: сборник научных трудов XIX Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 9-12 Декабря 2014. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 115-123;

4. Чесноков Д. В. Исследование влияния способов крепления датчика вибрации на спектральные характеристики виброакустических сигналов, полученных с пьезоэлектрических акселерометров [Электронный ресурс] // Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т., Томск, 26-30 Мая 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 187-191;

5. Чесноков Д. В. Исследование зависимости амплитудно-частотных характеристик пьезоэлектрических акселерометров от способов крепления // Приборостроение и информационные технологии: тезисы докладов VIII студенческой научно-практической конференции, посвященной дню образованию ОНИИП, Омск, 10-11 Декабря 2015. - Омск: ОНИИП, 2015 - С. 34-37

Список используемых источников

1. ГОСТ 24522-80 – Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения.
2. ГОСТ 18442-80 – Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
3. РД-13-06-2006 – Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. с. 1104
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. - Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006.– 616 с.
6. В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко Компьютерная обработка и распознавание изображений. Учебное пособие - СПб: СПбГУИТМО, 2008. - 192 с.
7. Беликова Т.П. Некоторые методы цифрового препарирования изображений // Цифровая обработка сигналов и ее применение.– М.: Наука, 1981. – С.87–98.
8. Белявцев В.Г., Воскобойников Ю.Е. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры // Автометрия. – 1998. – № 3. – С. 18 – 25.
9. Белявцев В.Г., Воскобойников Ю.Е. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т.С. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
10. Гимельфарб Г.Л. и др. Расчленение цифровых изображений на участки, однородные по локальным изменениям сигнала // Тез. докл. Всесоюз. Конф. АСОИЗ–81. – М.: Наука, 1981. – С. 51.
11. Прохоренко П. П., Мигун Н. П. Введение в капиллярную дефектоскопию / Под ред. А. С. Боровикова. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 207 с.

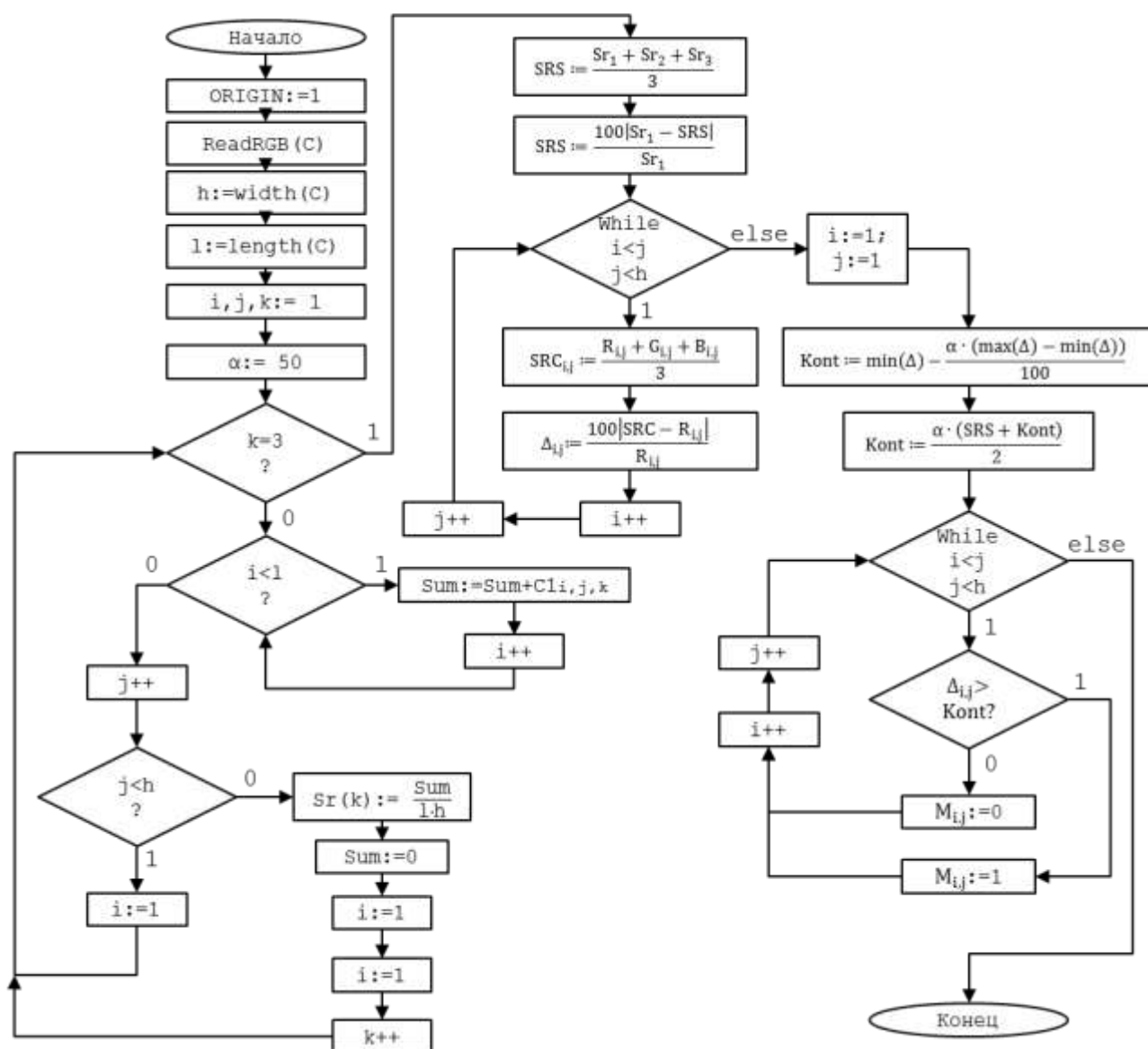
12. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Советское радио, 1973. – 368 с.
13. Гранрат Д.Дж. Роль моделей зрения человека в обработке изображений // ТИИЭР. – Т. 69. – № 5. – 1981. – С. 65 – 77.
14. Гуров А.А., Порфирьева Н.Н. Вопросы оценки контрастности сюжетных изображений // Труды ГОИ им. С.И. Вавилова. – т. 44, вып. 178. – Л. – 1979. – С. 31 – 34.
15. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов: Пер. с англ. под ред. Л.П. Ярославского. – М.: Мир, 1988. – 488 с.
16. Журавлев Ю.И., Гуревич И.Б. Распознавание образов и распознавание изображений // Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. – Вып. 2. – М.: Наука. – 1989. – С. 5 – 72.
17. Ким В., Ярославский Л.П. Ранговые алгоритмы обработки изображений // Адаптивные методы обработки изображений. – М.: Наука, 1988. – С. 35 – 73.
18. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. М.: Энергия, 1972. – 360 с.
19. Нестерук В.Ф. Преобразование оптических изображений и оценка их качества // Успехи научной фотографии. – М.: Наука. – 1985. – Т. 23. – С. 93 – 102.
20. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.
21. Прэтт У. Цифровая обработка изображений – М.: Мир, 1982. – 790 с.
22. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. – М.: Мир, 1972. – 230 с.
23. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М., Издательство ЭКОМ, 1997. – 336 с.
24. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. – М.: Сов. радио, 1979. – 312 с.
25. СанПиН 2.2.4.548–96 – Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы

26. ГОСТ 12.0.003–74 – Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1).
27. СНиП 23–05–95*, СП 52.13330.2011 – Естественное и искусственное освещение.
28. ГОСТ Р12.1.019–2009 – Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
29. ГОСТ12.1.030–81 – Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1).
30. ГОСТ Р50923–96 – Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
31. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (123 – ФЗ от 22 июля 2008 г.)

Приложение А

(Обязательное)

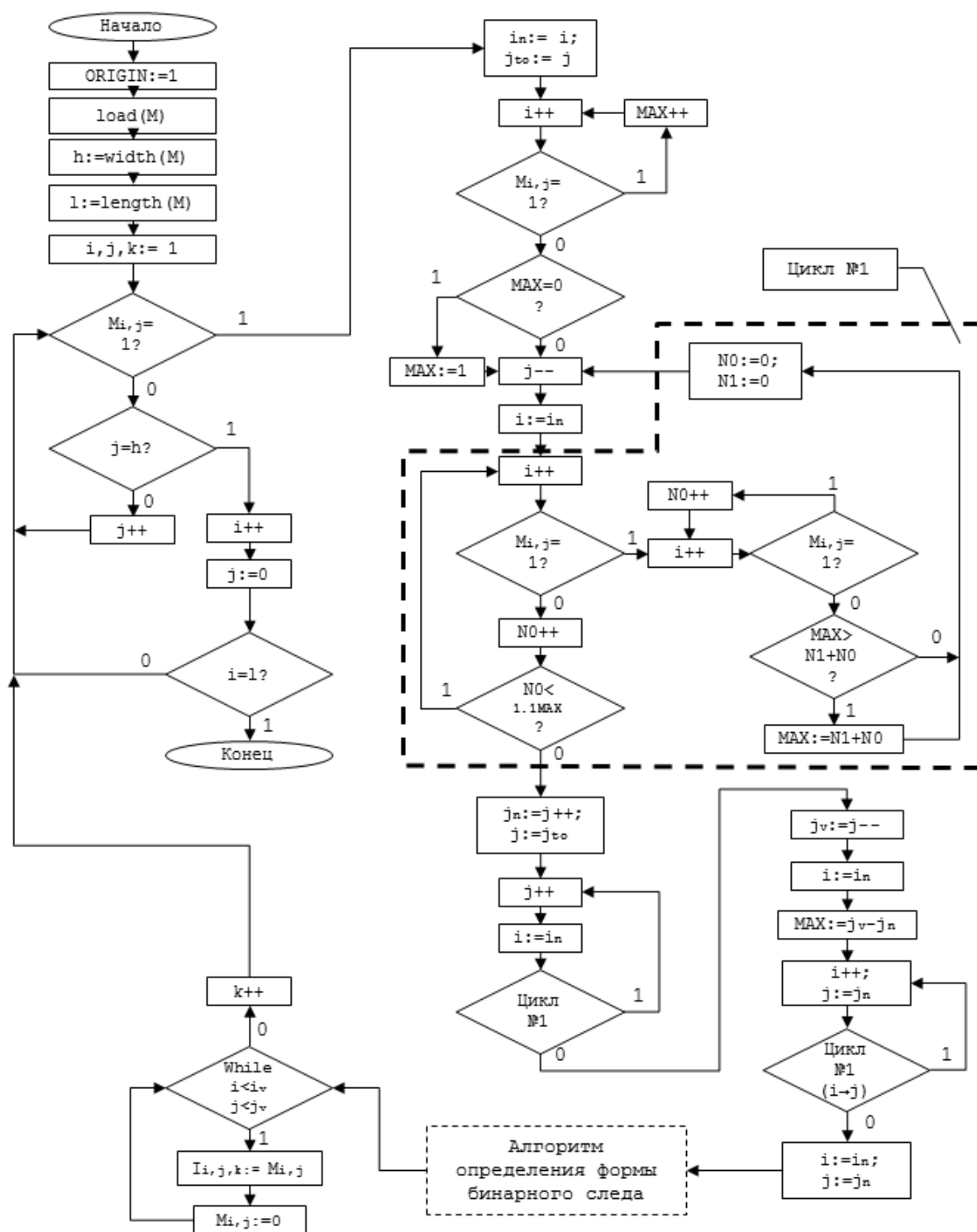
Алгоритм бинаризации цифрового изображения



Приложение Б

(Обязательное)

Алгоритм выделения фрагментов бинарного изображения



Приложение В

(Обязательное)

Алгоритм определения формы бинарного следа

