

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности

(наименование института полностью)

Департамент бакалавриата

(наименование)

20.04.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки)

Аудит комплексной безопасности в промышленности

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Анализ и совершенствование методов контроля технического состояния сосудов и резервуаров на предприятиях химической промышленности (на примере ООО «Тольяттикаучук»)»»

Студент

Д.В. Калинин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

доцент, И.В. Дерябин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

## Оглавление

Введение.....	4
Термины и определения .....	8
Перечень сокращений и обозначений .....	9
Глава 1 Информационно-аналитический обзор нормативно - правовой литературы и методов контроля технического состояния оборудования.....	10
1.1 Законодательная, информационная, нормативно-правовая литература и требования, предъявляемые к контролю технического состояния сосудов и резервуаров.....	10
1.2 Метод контроля - капиллярный.....	14
1.3 Магнитный контроль.....	15
1.4 Метод акустического контроля .....	17
1.5 Метод рентгенографического контроля .....	21
1.6 Основные виды дефектов, оказывающих негативный эффект на техническое состояние сосудов и резервуаров.....	23
Глава 2 Анализ современных методов и приборов диагностирования оборудования в ООО «Тольяттикаучук».....	32
2.1 Общее описание оборудования и применяемых методов контроля.....	32
2.2 Капиллярная дефектоскопия .....	35
2.3 Гидравлический (пневматический) контроль .....	38
2.4 Ультразвуковая дефектоскопия и толщинометрия .....	39
2.5 Рентгенографическая дефектоскопия .....	46
Глава 3 Совершенствование рентгенографического метода контроля технического состояния сосудов и резервуаров в ООО «Тольяттикаучук»...	57
3.1 Анализ основных дефектов рентгенографической пленки .....	57
3.2 Совершенствование качества метода рентгенографического контроля при помощи оцифровки пленок.....	63
3.3 Сканеры. Общая информация.....	65

3.4 Математическая модель оцифровки рентгенографических снимков .....	66
3.5 Способ цифровой рентгенографии с использованием «фосфорных» пластин .....	70
3.6 Оцифровка радиографических пленок .....	76
3.7 Выводы о внедрении оцифровки в методику радиографического контроля технического состояния оборудования.....	82
3.8 Оценка возможностей и перспектив по принципам ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	83
3.9 Оценка эффективности исследования .....	86
Заключение .....	91
Список используемой литературы .....	94

## Введение

Производственный контроль за безопасной и эффективной эксплуатацией сосудов и резервуаров проводится согласно требованиям нормативно-технической документации с привлечением аккредитованной лаборатории (применяются методы неразрушающего и разрушающего контроля с применением различных приборов). Однако современные методы диагностики не всегда гарантируют выявления дефектов.

**Актуальность настоящего исследования** заключается в том, что на сегодняшний день встаёт острый вопрос по пересмотру прежних методов контроля за эффективной и безопасной эксплуатацией оборудования. Это связано с тем, что в эксплуатации находится большое количество сосудов и резервуаров, отработавших свой проектный срок. С каждым годом оборудование устаревает и вероятность появления дефектов неуклонно растет. Неточность оценки металла оборудования, а также металла сварных швов может привести к немалым денежным расходам.

Вместе с тем применение современных приборов, которые сканируют 100% сосудов и резервуаров, на сегодняшний день неэффективно и дорого для небольших производств. Поэтому актуальным становится решение компромиссной задачи усовершенствования методов контроля технического состояния оборудования, позволяющей, с одной стороны – минимизировать материальные и финансовые затраты, а с другой стороны – обеспечить высокую объективность и качество проведения диагностических работ.

Исходя из вышеуказанного, можно сделать вывод, что тема исследования «Анализ и совершенствование методов контроля технического состояния сосудов и резервуаров на предприятиях химической промышленности (на примере ООО «Тольяттикаучук»)» является актуальной и сосредоточена на улучшении выявления дефектов технологического оборудования предприятия.

**Объектом исследования** данной работы служат методы и средства контроля определения технического состояния сосудов и резервуаров.

**Предмет исследования** представляет собой рентгенографический метод контроля.

**Цель исследования** – анализ информации по современным методам контроля, а также разработка усовершенствованных организационно-технических мероприятий для улучшения выявляемости дефектов для более безопасной эксплуатации оборудования на тольяттинской промышленной площадке.

**Гипотеза исследования** состоит в том, что количество выявляемых скрытых дефектов в оборудовании увеличится, если будут внедрены мероприятия по совершенствованию методов диагностирования брака.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- рассмотреть и провести анализ нормативно-правовой и технической литературы, регулирующей и регламентирующей деятельность в современных способах и методах контроля сосудов и резервуаров;
- провести информационно-аналитический обзор известных методов и средств контроля технического состояния оборудования;
- рассмотреть имеющуюся на предприятии технику диагностического контроля, её аналоги и прототипы;
- разработать техническое решение улучшения методов контроля технического состояния сосудов и резервуаров;
- исследовать и проанализировать положительный эффект, достигаемый применением разработанного технического решения.

**Теоретико-методологическую основу** исследования составили актуальная нормативно-правовая документация, научные труды авторов, опубликованные в открытых источниках, в частности, периодические издания, патентные разработки, расположенные в электронном доступе по адресу <http://www.freepatent.ru>.

**Базовой для настоящего исследования** явилась также специализированная литература по методам контроля и техническим устройствам, применяемым при диагностике оборудования.

**Методы исследования:** аналитический (анализ литературы и документации по теме исследования), наблюдение и обобщение эмпирического материала (изучение методов диагностического контроля оборудования, проведение экспериментов).

**Опытно-экспериментальная база** исследования - лаборатория неразрушающего контроля в ООО «Тольяттикаучук».

**Научная новизна исследования** заключается в разработке организационно-технического мероприятия, позволяющего более качественно выявлять дефекты технического состояния сосудов и резервуаров на химическом предприятии.

**Теоретическая значимость исследования.** Разработано дополнительное усовершенствованное техническое мероприятие, которое позволяет повысить качество методов контроля технического состояния сосудов и резервуаров путем более тщательного выявления дефектов при диагностике оборудования, обеспечивая безопасную работу обслуживающего персонала, сохраняя окружающую среду, а также позволяя сохранить материальные ресурсы предприятия.

**Практическая значимость исследования** заключается в проведении испытаний внедряемого метода контроля дефектов оборудования, которые подтверждают эффективность внедряемого метода. Данное разработанное организационно-техническое мероприятие рекомендовано к внедрению в эксплуатацию в лаборатории неразрушающего контроля службы технического надзора, управления надежностью и диагностики в ООО «Тольяттикаучук».

**Достоверность полученных результатов** в данном диссертационном исследовании основывается на соответствии предложенного мероприятия по

совершенствованию метода технического контроля оборудования актуальным нормативно-правовым стандартам Российской Федерации.

#### **Личное участие автора.**

По теме диссертации опубликована одна научная работа:

- Калинин Д.В. Современные методы технического диагностирования сосудов и резервуаров на химическом производстве [Текст] / Д.В. Калинин // Научно-практический электронный журнал «Аллея Науки». 2019. № 4(31). С. 787–790. ISSN 2587-6244.

**Апробация результатов работы.** Результаты исследования опубликованы в научно-практическом электронном журнале «Аллея Науки». В диссертации был рассчитан положительный эффект от совершенствования метода контроля и даны рекомендации по применению данного способа диагностики в лаборатории неразрушающего контроля.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- результаты проведенного анализа нормативно-правовой документации и технической литературы, которая регулирует и регламентирует деятельность в современных способах и методах контроля сосудов и резервуаров;
- результаты проведенного информационно-аналитического обзора существующих методов и средств контроля технического состояния оборудования;
- рассмотренные средства диагностики оборудования, её аналогов и прототипов;
- предложенное техническое решение совершенствования метода контроля технического состояния сосудов и резервуаров;
- выявленный положительный эффект, достигнутый при помощи внедрённого технического решения.

**Структура диссертационного исследования** включает в себя введение, три главы, заключение, список используемой литературы. Объем

работы составляет 99 страниц, текст иллюстрирован 13 таблицами, 45 рисунками.

### **Термины и определения**

В данном магистерском диссертационном исследовании применяют следующие термины с соответствующими определениями:

авария – разрушение или повреждение машин и (или) оборудования, возникновение неконтролируемого взрыва и (или) выброса опасных и вредных веществ при эксплуатации машин и (или) оборудования;

дефектоскоп – устройство для обнаружения дефектов в изделиях из различных металлических и неметаллических материалов методами неразрушающего контроля;

дефектоскопист – это специалист, который занимается выявлением дефектов, механических повреждений и брака на производстве;

диагностика – методы и средства оценки технического состояния машин, механизмов, оборудования, конструкций и других технических объектов, определения причин возникновения отказов, рекомендации по устранению причин возникновения отказов;

неразрушающий контроль – контроль надежности основных рабочих свойств и параметров объекта или его отдельных элементов / узлов, не требующий снятия объекта с эксплуатации или его демонтажа;

резервуар – герметично закрываемый или открытый, стационарный сосуд, наполняемый жидким или газообразным веществом;

риск – это совокупность вероятности причинения вреда и последствий этого вреда для жизни или здоровья человека, имущества, окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;

сосуд – это герметичная емкость, используемая для проведения химических, тепловых и других технологических процессов, а также для хранения и транспортировки газообразных, жидких и других веществ.



## Перечень сокращений и обозначений

В настоящей магистерской диссертации применяют следующие обозначения и сокращения:

АЭК – акустико-эмиссионный контроль

ВИК – визуально измерительный контроль

ГИ – гидравлическое испытание

ЛНК – лаборатория неразрушающего контроля и диагностики

НД – нормативная документация

НТД – нормативно-техническая документация

НК – неразрушающий контроль

ОПО – опасный производственный объект

ПБ – промышленная безопасность

ПВК – капиллярный метод неразрушающего контроля

ПИ – пневматические испытания

ПО – программное обеспечение

РВС – резервуар вертикальный стальной

РК – рентгенографический контроль

РФ – Российская Федерация

ТПП – Тольяттинская промышленная площадка

ТУ – технические устройства

УЗД – ультразвуковая дефектоскопия

УЗТ – ультразвуковая толщинометрия

ISO – (International Organization for Standardization) международная Организация по Стандартизации

# **Глава 1 Информационно-аналитический обзор нормативно-правовой литературы и методов контроля технического состояния оборудования**

## **1.1 Законодательная, информационная, нормативно-правовая литература и требования, предъявляемые к контролю технического состояния сосудов и резервуаров**

На химическом предприятии ООО «Тольяттикаучук» широко применяются сосуды и резервуары, работающие как под давлением, так и без него. Сосуды на нефтехимических предприятиях, как правило, представляют собой ёмкостное оборудование, которое состоит из эллиптических днищ, обечайки, а также наружной облицовки. Чаще всего их исполнение бывает из углеродистых или нержавеющей сталей. Данное оборудование является опасным производственным объектом с возможными авариями, связанными с большим количеством несчастных случаев, поэтому контролю технического состояния сосудов и резервуаров уделяется особое внимание на предприятии.

В последнее время происходит постоянное увеличение объемов добычи нефтепродуктов, но за последнюю пару десятилетий объем по производству резервуаров заметно снизился в несколько раз. В таких условиях процесс устаревания парка оборудования в Российской Федерации интенсифицируется, а на ближний план выходят вопросы обеспечения надежной эксплуатации и вновь проектируемых конструкций. Ежегодно основные промышленно-производственные фонды имеют тенденцию к увеличению износа на 3% и в настоящее время износ составляет 70%. На предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности используется большой объем оборудования зарубежных и отечественных производителей, которое в настоящее время выработало свой проектный срок эксплуатации.

Непростая экономическая ситуация влияет на обновление устаревшего оборудования не лучшим образом, практически ограничивая его. В связи с этим создается реальная опасность разрушения конструкций и возникновения негативных экологических последствий. Одним из решений проблемы промышленной безопасности нефтегазохимических производств является дальнейшее совершенствование методов оценки технического состояния оборудования. «Техническое состояние резервуаров характеризуется их несущей способностью, герметичностью, а также работоспособностью» [22]. По возникновению дефекты подразделяются на производственно-технологические, которые появляются во время этапа проектирования, изготовления оборудования, при монтажных работах и установке, а также на эксплуатационные, которые возникают после этапа наработки устройств вследствие деградиционных процессов, некорректных параметров эксплуатации и ремонтных работ.

Одним из руководящих документов по безопасной работе сосудов и резервуаров является закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

«Оценка качества и количества состояния оборудования на предприятиях и устранение брака повышает их надежность в эксплуатации» [4]. Реальную оценку работы оборудования можно получить, основываясь только на комплексном обследовании, в которое будет включено проведение дефектоскопии сварных швов, замеры толщины стенок отдельных элементов, проверку качества металла, геометрической формы и др. Существуют факторы ограничения, одним из самых существенных служит возможность определять прочность оборудования, которая формируется по итогам диагностирования, учитывающим лишь геометрические размеры дефектов. Этот способ не принимает в расчет наличие существующих дефектов, которые со временем расширяются, то есть классификация развивающихся и неразвивающихся дефектов отсутствует. На этапе расчета на прочность и

устойчивость резервуаров и сосудов дефекты данных типов в расчете не учитываются.

«Под контролем качества устройств понимается проверка на соответствие показателей их качества определенным нормам» [14]. Особым показателем хорошего качества элементов сосудов и резервуаров являются физические, геометрические, функциональные, а также связанные с технологическими признаками качества (отсутствие брака нарушения сплошности металла, покрытия, геометрических размеров) параметры.

Закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116–ФЗ [44], «Об оборудовании, работающем под избыточным давлением» от 12.12.2017 № 116-ФЗ, руководящие указания «РУА-93» [43, 42], регламентирующие работу без избыточного давления, а также различные сопутствующие законы и их изменения, которые вышли на базе нормативно-правовой документации, существующей в сфере ПБ, провозглашают следующее утверждение: «Оборудование эксплуатируется пока его части, соединения, материалы не изменят свои размеры и физические характеристики до значений, которые не будут гарантировать восприятия эксплуатационных нагрузок без разрушения» [24].

Самым важным аспектом является объективная информация, подтверждающая, что качество испытываемых материалов и изделий при их взаимодействии с веществами или физическими полями в виде электрических, световых, звуковых или иных сигналов соответствует стандартам. Современные методы контроля отражены в ГОСТ Р 56542-2015 и подразделяются на девять основных видов. Перечислим их: методы, базирующиеся на акустике, радиации, вихретоковых и магнитных эффектах, радиоволновых и электрических принципах, капиллярные методы дефектоскопии.

Неразрушающий контроль делится на следующие подвиды: «неразрушающий контроль» и «неразрушающий физический контроль». Без

использования специальных устройств и узконаправленных знаний, а также специальных веществ обойтись в них невозможно.

ГОСТ Р 56542-2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» [39] описывает классы неразрушающих физических методов диагностирования.

Каждая разновидность НК классифицируется:

- по свойству взаимосвязи, в которых контактируют физические поля или вещества;
- по первичным информационным параметрам;
- по возможности получения данных.

Диагностирование технического состояния устройств на ОПО всегда представляет собой важное мероприятие, от него непосредственно зависят человеческие жизни и, в частности, жизни персонала. Следовательно, право проводить диагностические работы контроля оборудования имеют только дефектоскописты, которые прошли обучение и аттестацию в специализированных учреждениях. Право на выдачу заключений имеют дефектоскописты второго уровня квалификации по методу НК. Лаборатории, осуществляющие диагностику, должны быть лицензированы, сертифицированы в соответствии с требованиями «Правил сертификации лабораторий неразрушающего контроля» ПБ 03-372-00 и рекомендованы к добровольной аккредитации» [15].

Своевременное выявление дефектов является необходимым условием поддержания безопасности сосудов и резервуаров. Использование НК становится важным инструментом. «При диагностировании используются следующие методы: визуально-измерительный, рентгеновский, капиллярный, магнитный и акустический» [47].

Из вышеуказанного следует, что решением о продлении срока эксплуатации сосудов и резервуаров является достоверность данных в отклонениях, допустимых и недопустимых, на основании которых и делается вывод о пригодности оборудования на промышленной площадке. Чтобы

построить такую картину ресурсопригодности необходимо знать суммарное количество дефектов как допустимых, так и недопустимых. Мы должны знать их расположение, их протяженность, а также понимать причины их возникновения. Поэтому, чтобы определить техническое состояние сосудов и резервуаров, необходимо провести диагностирование по данным, полученным от приборов и аппаратов, используемых в рамках НК.

Самые применяемые на химических промышленных площадках, на РВС и сосудах, виды и методы НК:

- капиллярные,
- магнитные,
- акустические,
- радиационные.

Далее рассмотрим более внимательно их базовые принципы действия и историю возникновения в качестве инструментов диагностирования.

## **1.2 Метод контроля – капиллярный**

В это понятие входят следующие методы: газоаналитический, газогидравлический, вакуумно-жидкостный и капиллярный.

Область применения данного метода – это диагностирование на герметичность элементов оборудования: днища и стенки резервуаров и сосудов, которые предназначены для хранения нефти и нефтепродуктов, а также при ремонтах на сварных швах.

Часто используемым способом из-за его простоты является капиллярный. «Дефекты лежат на поверхности или внутри объекта исследования» [25]. Основные этапы эксплуатации капиллярного контроля заключаются в подготовке диагностируемого участка: его зачистки, нанесении пенетранта, удалении пенетранта и нанесении проявителя. Данный способ хорош при контроле оборудования после ремонта с применением сварки. Подходит для всех типов сталей. Помогает выявлять

такие виды дефектов, как трещины, поры, шлаки и прочее.

### **1.3 Магнитный контроль**

Контролируя объекты, обладающие ферромагнитными свойствами, используют магнитный контроль (это материалы, изготовленные из металлов твёрдого состояния, имеющие способность намагничиваться при воздействии внешних магнитных полей). Поэтому в технических устройствах, в частности, в резервуарах вертикальных стальных применяются перечисленные подвиды магнитного контроля: магнитопорошковый, магнитографический и феррозондовый.

Контроль, основу которого составляет магнитная память, использует данные измеряемых распределений магнитных полей рассеяния, контролирующийся феррозондным металлом, отображающимся в структуре и технологической связи. Указанный метод нормируется ГОСТ Р ИСО 24497- 2-2009 [40], который используется в разных направлениях промышленной отрасли. Ключевые потребители: нефтяные и газовые предприятия, котлонадзор, энергоустановки. Сам термин «магнитная память» берёт своё начало в 1994 году. До этого момента нигде не был использован данный термин.

«Особенность метода состоит в умении применять заложенную внутри объекта информацию, имеющую вид фиксации своих магнитных полей» [17]. Согласно общеизвестному факту, участки, подверженные контролю, испытавшие высокое механическое воздействие, меняют свои знаки инверсии напряженности магнитных полей  $H_r$ , в частности, с минуса на плюс или противоположно. В объектах, эксплуатируемых в безостановочном цикле, магнитная память проявляет свои свойства в постоянной невозвратимой изменчивости намагниченности при воздействии максимальных механических напряжениях рабочих нагрузок объекта [33]. Уровень критичности объекта отражается не значением напряженности поля

$H_r$ , а в изменении в зоне, где концентрация напряжения ниже. Сам описанный процесс продемонстрирован на рисунке 1.1.

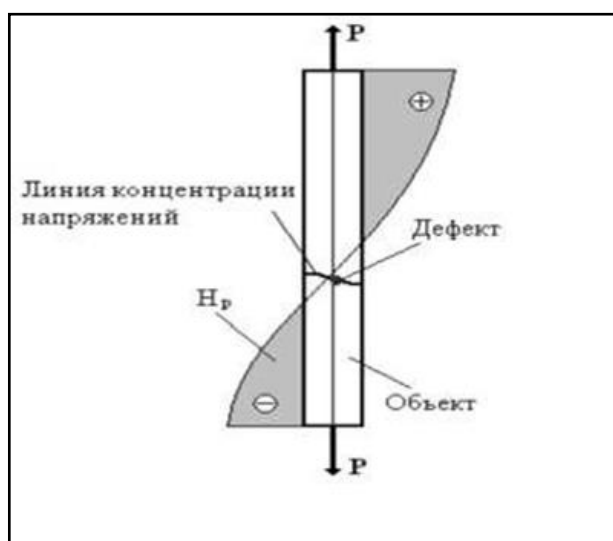


Рисунок 1.1 – Перестановка знака магнитного поля при остаточной напряженности  $H_r$  [17]

Нефтегазовая отрасль – основной потребитель данного метода. К примеру, когда осуществляется диагностирование состояния резервуара или сосуда, которые располагаются на открытой местности или заглублены в земле, при совмещении с другими методами неразрушающего контроля, эффективно выявляются такие дефекты, как коррозия, расслоения и даже механические нагрузки.

Магнитопорошковый метод контроля – один из базовых способов диагностирования устройств на промышленных площадках, выявляющий дефекты в поверхности материала, а также подповерхностные дефекты. Магнитопорошковый контроль был изобретен в США приблизительно в двадцатые годы двадцатого века. В 1939 было написано руководство по эксплуатации в промышленности данного метода. В 1927 году ученый Ф.М. Карпов сконструировал дефектоскоп-магнит, при помощи которого смог контролировать оси вагонов. Первое устройство, разработанное по методу магнитопорошковой диагностики, внедрил ученый Н.С. Акулов в



1934 году. Сделано это было в стенах Московского государственного университета, обладающего передовой лабораторией для тех лет.

В 1953 году под руководством А.С. Фалькевича создаются одни из первых магнитографических устройств для диагностики на наличие дефектов. В 1954 году Р.И. Янус внедряет феррозондовый метод, используемый в машиностроении и медицине [10].

#### **1.4 Метод акустического контроля**

В 1928 году появляется вид ультразвуковой диагностики металлов. Ученый С.Я. Соколов в этом же году первым внес предложение о внедрении теневого метода с постоянными волнами ультразвука, чтобы диагностировать брак. «В 1937 году под его наставничеством сделаны промышленные экземпляры дефектоскопов» [1]. Вклад в высокие достижения развития УЗК вложил Д.С. Шрайбер, гражданин СССР, он заложил основы использования дефектоскопов на промышленных предприятиях.

В 1930-е годы двадцатого столетия возникают стремления к визуализации ультразвуковых исследований. На смену постоянным волнам ультразвука в сороковые года двадцатого века приходят ультразвуковые импульсы. Первым человеком, применившим эхо-импульсный контроль, считают Р. Файерстоуна, который разработал прообраз современного устройства. В Советском Союзе в 1948 году командой единомышленников, возглавляемых С.Я. Соколовым, создается импульсный эхо-дефектоскоп.

Одно из значимых достижений – изобретение пьезопреобразователя с датчиком наклонного типа, внутри которого находилась призма из органического стекла. Поперечные волны стали основным средством контроля в диагностировании брака внутри сварных швов. «В СССР впервые произвели диагностирование сварных швов, используя наклонный пьезопреобразователь» [38].

Главная область использования эхо-метода – замеры толщины стенок сосудов и резервуаров, когда есть доступ с одной стороны диагностируемого объекта. Начальной точкой применения ультразвукового метода толщинометрии в промышленности можно считать 1952-1953 годы, когда на строящихся предприятиях нефтехимии Н.В. Химченко и В.П. Есилевским были применены ультразвуковые толщиномеры УЗТ-3 и исследовано воздействие характеристик при контроле погрешности измерений.

Акустические устройства имеют такую конструкцию, которая позволяет при диагностировании оборудования задействовать пьезопреобразователи, возбуждающие и принимающие ультразвуковые волны. «В сороковые годы Л.Я. Гутин внедрил теорию, сопоставимую со схемой пьезоэлемента, которая и стала «классической» моделью при расчетах характеристик пьезопреобразователей» [46].

Пластины, изготовленные из кварца, использовали в роли излучателя и приёмника колебаний вплоть до конца 70-х годов двадцатого века. Сегодня же для этого применяется пьезоэлектрическая модель. Пристальное внимание обратило на себя изобретение бесконтактных преобразователей.

«УЗК используют с определенным регламентом для каждого вида контролируемого объекта отдельно» [13]. Основопологающим регламентом является ГОСТ Р 55724-2013 «Контроль неразрушающий» [34]. Цель метода – находить и сопоставлять дефекты по определенным нормам геометрических размеров, расположенных внутри несплошностей в диагностируемом объекте. Чтобы использовать указанный НК необходимы специальные приборы и аппараты, которые обладают нужной чувствительностью по определенным типам изделий, что ведет к ограничению условий диагностирования.

Перечислим некоторые недостатки данного метода:

- трудность в определении действительных размеров несплошностей, результаты диагностики строятся по эквивалентным размерам дефектов. Причинами могут быть, например, разная степень

отражения ультразвуковых волн от несплошностей с разными плотностями;

- одни из дефектов иногда просто невозможно обнаружить в силу их параметров. Требуется очень сильный контакт объекта контроля с датчиком, что в полевых условиях бывает трудновыполнимо;
- при диагностировании ультразвуком в некоторых металлах крупнозернистой структуры из-за больших промежутков и сильных затуханий уровень нахождения дефектов значительно уменьшается.

Данный метод объединяет в себе несколько методов НК. Его принцип основывается на регистрации упругих колебаний, которые возникают в объекте контроля. Метод акустического контроля используется при контроле оборудования, изготовленного из различных материалов, чтобы выявлять внутренние и поверхностные дефекты, такие как несплошности, неоднородности, коррозию. Указанный метод пригоден при доступе только с одной стороны контролируемого объекта без нарушения целостности диагностируемого участка.

Методы акустического контроля состоят из активных и пассивных методов. «В активном методе используется анализ распространения акустических волн, специально вводимых в диагностируемый объект» [20]. Чаще всего используется в толщинометрии для определения физико-химических характеристик технологических устройств. Пассивный метод базируется на анализе от упругих акустических колебаний, которые возникают в объекте диагностирования при нагружении или других технологических процессах. При образовании или развитии дефектов колеблющиеся волны возникают особенно сильно. Вышеуказанный метод в основном применяют при акустико-эмиссионном контроле оборудования, а также при шумо- и вибродиагностике.

«В областях острых краёв дефектов, которые появляются при нагружении сосудов и резервуаров, проявляется локальная концентрация напряжения и возникает локальная зона пластинчатой деформации» [18].

Когда достигается норма и превышение в локальном напряжении уровня предела прочности материала, возникает разрушение кристаллической решётки материала и дефект прогрессирует в своем развитии, возникают сигналы АЭ. «В дальнейшем увеличении нагрузки повторяется развитие дефекта, что ведет к ещё большему появлению сигналов АЭ с увеличением пластинчатой деформации» [51].

Данные свойства создают сформированную нормальную систему оценивания технического состояния оборудования, основывающуюся на действительном воздействии дефекта на объект, в которую входит классификация дефектов и параметров.

Укажем основные характеристики АЭ контроля:

- обеспечивает выявление, позволяет зарегистрировать дефект, который развивается. Это способствует классификации несплошностей по степени опасности;
- проводит диагностику разными технологическими процессами;
- расположение непосредственного диагностируемого объекта не влияет на нахождение дефектов;
- минимальное количество ограничивающих факторов, связанных с характеристикой и структурой материала;
- высокий класс чувствительности;
- проводится во время диагностирования всего объекта с применением одного или нескольких преобразователей;
- диагностика оборудования выполняется без его вывода из работы.

АЭ метод диагностирования оборудования применяют, чтобы создать в элементах конструкции напряжённое состояние, которое инициируется в материале объекта контроля при работе источников АЭ. Несмотря на это, сам объект подвержен силовой нагрузке, повышению давления, температурным полям и прочему. «Определение выбора в виде нагрузки зависит от конструкционных особенностей объекта и условий его эксплуатации» [5].

Результаты методов НК зависят от многих узконаправленных

переменных: от возможности обнаруживать определённые типы дефектов, от скорости диагностирования, от производительности, себестоимости контроля.

### **1.5 Метод рентгенографического контроля**

Радиационный контроль – это метод контроля, использующий регистрацию и анализ от проникающего ионизированного излучения после его взаимодействия с контролируемым объектом. Данное определение взято из государственного стандарта. «База метода – это возможность пропускать излучение сквозь материал объекта» [32]. Широко используется, чтобы диагностировать, локализовать и определять характеристики дефектов на поверхности и под поверхностью. Часто применяется для контроля сосудов и резервуаров на нефтехимических предприятиях.

В сравнении с другими методами, рентгенографический отличается его наглядностью, результаты можно хранить в архиве, а при необходимости воспользоваться ими, что является несомненным плюсом указанного способа.

«РК один из методов контроля, который выделяется своей точностью» [16]. В области нефтехимии это востребованный метод диагностирования оборудования, работающего под избыточным давлением. В данных объектах не допускается таких дефектов, как микротрещины, трещины, поры, шлаки и другое. Чаще всего дефекты такого типа практически невозможно выявить визуально. Применение данного метода регламентировано в нормативно-правовой документации на технические устройства с повышенной опасностью.

Метод, использующий принцип пропускания рентгеновских лучей сквозь объект контроля, способен обнаружить посторонние включения, полости.

Рентгенографический метод способен выявить внешние дефекты:

- нарушение габаритов сварного соединения,
- непровар,
- прожог,
- пору,
- трещину.

Внутренние:

- внутренняя пора,
- стороннее включение,
- непровар,
- несплавление,
- трещину.

Дефекты внутри материала очень опасны, так как могут привести к разгерметизации оборудования, которая может привести к потенциально опасному происшествию.

Рентгеновское оборудование широко применяют при работах с контролем сварных швов, распространяется на:

- трубопроводы,
- газо- и нефтепроводы,
- котлы и резервуары,
- сосуды и аппараты.

На практике очевидно, что на объектах, где используется рентгенографический контроль, риск в возникновении аварий по причинам внутренних дефектов стремится к минимуму.

«Принцип работы рентгенографических аппаратов использует лучи, проходящие насквозь твердые поверхности» [26]. Когда лучи достигают материала, часть из них проходит насквозь. При нахождении в сварном соединении поры, раковины или другие дефекты, которые создают неоднородную структуру в материале, пропускают через себя больше лучей, чем остальные участки. Это способствует не только выявлению брака, но и показывает размеры и местонахождение дефектов. Фиксация результатов

производится на специальной плёнке, которую можно хранить. Данная работа регламентируется по ГОСТ 7512-82 [36].

Укажем достоинства этого метода:

- выявляет скрытые дефекты;
- позволяет с высокой точностью определять размер и месторасположение брака;
- относительно быстрое проведение контроля с выдачей готового заключения.

Рассмотрим недостатки РК:

- сложность в исполнении, не каждому человеку и организации он доступен;
- требуется использование дорогостоящего оборудования;
- необходимость использования уникальных расходных материалов;
- опасно для здоровья персонала по причине использования вредного излучения.

## **1.6 Основные виды дефектов, оказывающих негативный эффект на техническое состояние сосудов и резервуаров**

Рассмотрим наиболее характерные и часто встречаемые дефекты при контроле технического состояния сосудов и резервуаров. Во многих рассмотренных нормативно-технических документах определение «дефекта» следующее – это любое несоответствие объекта контроля установленным требованиям. Единственно верного понятия «дефект» в области нефтехимии нет, несмотря на это по некоторым нормативным документам есть определение – несплошность сварного соединения или же отклонение от требуемых геометрических норм. Оценка технического состояния того или иного оборудования определяется по показателям, которые были

обнаружены приборами или аппаратами неразрушающего контроля. Группировка диагностируемых дефектов на допустимые и недопустимые согласно требованиям НТД, превышающим нормы, происходит по «ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012» [41]. Также их распределяют на дефекты: поверхностные, внутренние, критические, допустимые. Это сделано для того, чтобы уметь выбирать метод контроля, например, разрушающий или неразрушающий. В любом методе дефекты подлежат оценке определенными характеристиками, свойственными именно этому методу контроля. «Классификация дефектов происходит в соответствии с результатами показаний оборудования конкретного метода» [37]. Дефекты разделяют на производственно-технологические, возникающие в процессе изготовления, монтажа, установки и на эксплуатационные, которые возникают непосредственно при эксплуатации, в момент деградации материала, а также при нарушении работы по технологическим параметрам или ремонтам. «Перечисленные дефекты, выявленные в ходе технического диагностирования, должны также быть выявлены средствами и методами НК» [13].

Под диагностированием технических устройств понимается наличие «знаний», объединяющих теорию, методы и средства определения технического состояния оборудования. По итогам контроля, основанном на нормативно-правовой документации, определяют допустимость или недопустимость выявленных дефектов. При выборе метода и приборов неразрушающего контроля, обеспечивающих безопасный рабочий процесс сосудов и резервуаров, учитываются заранее определенные параметры, условия эксплуатации и условия обследования. На основе требований НТД используют «комплексное диагностирование», лишь один метод контроля не способен в полной мере обеспечить удовлетворенность в полном объеме требованиям безопасности.

Рассмотрим на примерах основные дефекты, возникающие в оборудовании в процессе его эксплуатации.

В условиях развития уже существовавшего дефекта в виде кратера (см.



рисунок 1.2) со сквозным прожогом в металле, имеет место начало распространения трещины. А также видна трещина на рисунке 1.3 с внутренней стороны резервуара.

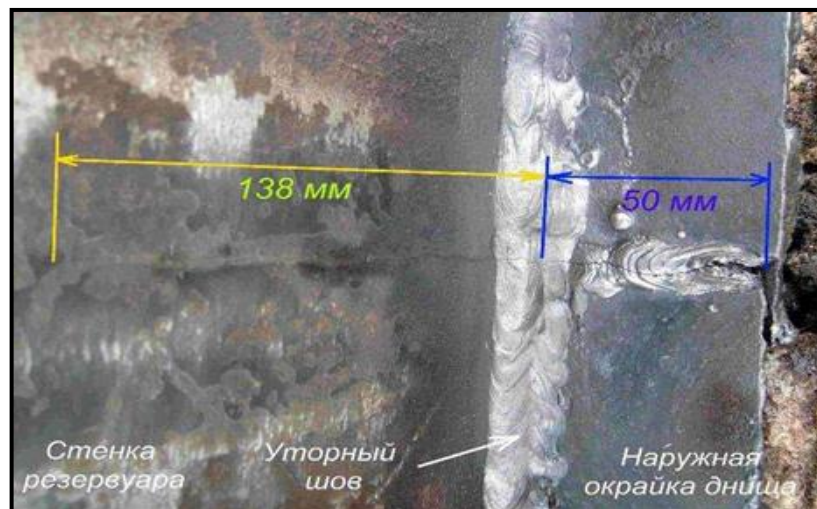


Рисунок 1.2 – Трещина в сварном шве (вид с внешней стороны) [7]



Рисунок 1.3 – Трещина в сварном шве (вид с внутренней стороны) [7]

Бывают и механические повреждения объекта контроля, которые видны невооруженным взглядом, как на примере, указанном на рисунке 1.4. Дефект образован падением тяжелого предмета сверху.



Рисунок 1.4 – Вмятина на корпусе теплообменника

На рисунках 1.5, 1.6 отображены коррозионные дефекты оборудования различного типа.



Рисунок 1.5 – Коррозия элементов реактора от течей рабочей среды и атмосферного конденсата



Рисунок 1.6 – Язвенная коррозия корпуса воздухоборника

Сварные дефекты видны на рисунках 1.7 – 1.10, они возникают в основном во время ремонта или после ремонта с применением сварки.



Рисунок 1.7 – Несоответствующие требованиям сварные швы после ремонта



Рисунок 1.8 – Некорректное расположение сварных швов на штуцере и укрепляющем кольце



Рисунок 1.9 – Следы от ремонтных вставок на корпусе [48]



Рисунок 1.10 – Вид сварного шва на латке резервуара

Одна из важных задач при проведении неразрушающего контроля – это умение оптимально выбирать метод диагностирования, включающего в себя наименьшую себестоимость и высокий уровень нахождения дефектов. Если использовать методы в хаотичном порядке, то это может также негативно сказаться на диагностируемых дефектах. Оптимальная себестоимость при эффективном методе выявления дефектов рассмотрена многими отечественными авторами.

Авторы В.И. Иванов, Н.Н. Коновалов, А.Н. Дергачев [11] рассматривают процессы при выявлении и измерении параметров дефектов в роли «вероятностных», к которым можно применить метод теории случайных процессов. Анализ результатов контроля рассматривается и регламентируется по нижеуказанным параметрам.

Достоверность контроля – параметр, по которому в соответствии с нормами дефектности, проводится оценка вероятности корректной браковки. Определением «вероятность выявления» называют показатель, меняющийся в соответствии с прибором, проводящим контроль толщины изделий и непосредственно материала. В том числе он характеризует вероятность диагностирования дефекта разных размеров и на разной глубине залегания. Под рабочей характеристикой системы НК подразумевают параметр, от которого зависят соотношения шумов и сигналов, которые определяют соотношение реальных и ложных дефектов. Лучшее положение, когда соотношение достигает 8:2.

Указанные параметры нужно соблюдать при оценивании работоспособности технических устройств и устанавливать к ним необходимые требования. Относительная выявляемость дефектов от общего количества брака, применяя разные методы, рассмотрена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Относительная выявляемость дефектов в сварке различными методами дефектоскопии от общего числа дефектов в процентах

Контроль	Трещины на поверхности	Включения из неметаллов	Раковины	Непровары	
				по скосам	в корне шва
Просвечивание рентгеном	2	100	100	65	65
Просвечивание гамма-излучением	0	85	90	28	0
Ультразвук	10	45	85	95	45
Магнитопорошковый	98	0	0	0	0
Капиллярный	100	0	0	0	0

Используя любой из предоставленных методов НК индивидуально, определяется возможность обнаружения дефектов. Непосредственно чувствительностью контроля определяется вероятность выявления дефектов. Выявляемость разными видами неразрушающего контроля, чаще всего, определяется чувствительностью и достоверностью диагностирования, поэтому выбор метода контроля основывается на вышеуказанных параметрах.

Вывод к первой главе.

В данной главе рассмотрена основная информационно-аналитическая документация, регламентирующая методы контроля технического состояния сосудов и резервуаров в промышленности. Изучены базовые принципы методов неразрушающего контроля, задействованных при диагностировании оборудования. Изучена история возникновения и развития методов НК. Получены базовые представления о каждом методе, применяемых в промышленной сфере. Описаны наиболее применяемые способы нахождения

дефектов в сосудах и резервуарах, на которые опирается контроль технического состояния.

Подверглись анализу также часто встречаемые виды брака на устройствах, которые применяются в нефтехимии, в частности, рассмотренные в нашем исследовании сосуды и резервуары. Также первая глава затрагивает проблемы выявления скрытых внутри материалов дефектов, ухудшающих эксплуатационные свойства объектов и способных вызывать потенциально опасные происшествия. Рассмотрены основные виды дефектов. Проблема выявления брака в оборудовании, находящегося на опасных производственных объектах, подлежит внимательному рассмотрению в связи с необходимыми мерами как по защите человеческих жизней, так и по защите окружающей среды.

## Глава 2 Анализ современных методов и приборов диагностирования оборудования в ООО «Тольяттикаучук»

### 2.1 Общее описание оборудования и применяемых методов контроля

На тольяттинской промышленной площадке для хранения жидких и газообразных веществ используется ёмкостное оборудование: сосуды и резервуары. Химической отрасли оно подходит лучше всего, так как предназначено для хранения в нём химических веществ, сжиженных углеводородов. На тольяттинской промышленной площадке находится большое количество сосудов, типовые виды которых представлены на рисунках 2.1, 2.2, работающих под избыточным давлением, входящих в категорию опасных производственных объектов. Дефекты такого оборудования чреваты возникновением аварий и несчастных случаев. Хотя и разгерметизация резервуаров без избыточного давления [35], отображенных на рисунках 2.3, 2.4, может представлять опасность, т.к. разлив вещества из них может негативно сказаться на состоянии окружающей среды. Контролю за техническим состоянием оборудования на предприятии уделяется особое внимание. При диагностировании делается акцент на наличие недопустимых дефектов в сварных соединениях и основном металле оборудования.

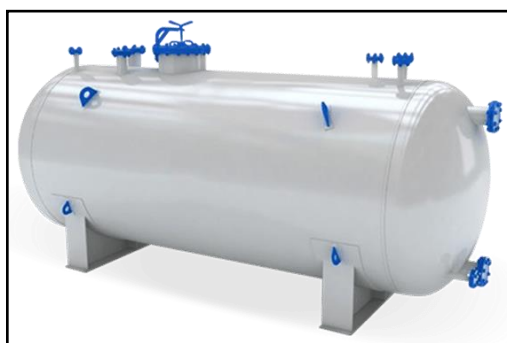


Рисунок 2.1 – Сосуд горизонтальный с выпуклыми днищами [46]





Рисунок 2.2 – Сосуд горизонтальный с плоскими днищами [46]



Рисунок 2.3 – Резервуар вертикальный [46]



Рисунок 2.4 – Резервуар вертикальный стальной [46]

В ООО «Тольяттикаучук» основными методами диагностирования являются методы неразрушающего контроля. Они не требуют выведения из эксплуатации и разрушения конструкции технических устройств.

Основная причина изменения физических характеристик материала сосудов и резервуаров, таких как плотность, упругость, электропроводимость, является появление дефектов металла и, в частности, самих сварных соединений [48]. Анализ перечисленных свойств совместно с диагностированием дефектов служат основой для методов.

Основными требованиями к методам НК являются:

- объективность и достоверность измеряемого параметра,
- воспроизводимость результатов,
- скорость подготовки объекта к контролю,
- оперативность выдачи результатов,
- надёжность в эксплуатации.

Основой для методов технического диагностирования являются приборы для неразрушающего контроля.

Назовем основные устройства, используемые на тольяттинской площадке:

- ультразвуковые толщиномеры,
- ультразвуковые дефектоскопы,
- рентгенографические дефектоскопы,
- пенетранты, применяемые в капиллярном контроле,
- оборудование, применяемое при гидравлических (пневматических) испытаниях.

Процентное соотношение применяемых методов на тольяттинской промышленной площадке отображено на рисунке 2.5.

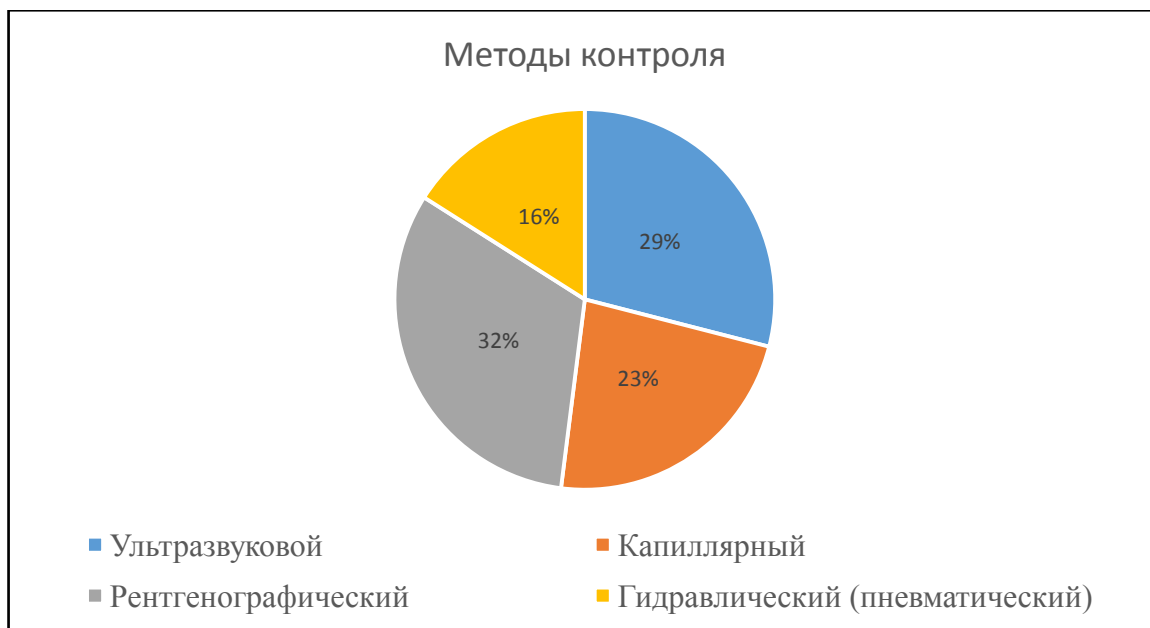


Рисунок 2.5 – Процентное соотношение применяемых методов контроля

Из диаграммы видно, что наиболее задействованным способом контроля на ТПП является метод РК. На него приходится тридцать два процента от всех методов контроля. В первую очередь это связано с тем, что сосуды и резервуары на площадке отработали свой гарантийный срок, при котором выход из строя приближается к минимуму, теперь им требуется всё чаще проводить ремонт с использованием сварки, после которого контролируется их ресурсопригодность.

Рассмотрим более подробно вышеуказанные приборы, на которых основываются методы контроля, исследуемые в нашей работе. Аппараты и приборы, о которых пойдет речь далее, составляют основу для безопасной эксплуатации сосудов и резервуаров в ООО «Тольяттикаучук».

## 2.2 Капиллярная дефектоскопия

Принцип капиллярного метода основан на том, что, в процессе нанесения пенетранта (жидкость с очень низкой вязкостью) на поверхность контролируемого объекта, он проникает и заполняет трещины или пустоты,

если они имеются. Принцип работы данного метода представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Принцип капиллярного метода контроля [18]

Требования при проведении капиллярного метода контроля заключаются в необходимости наличия подготовленной зачищенной поверхности от грязи, шлака и других включений при нанесении пенетранта на участки контроля. Потому что эта «грязь» препятствует попаданию жидкости в трещины и пустоты. Пенетрант определенное время находится на поверхности, заполняя все несплошности, затем подлежит тщательной очистке. «Нужно быть внимательным при очистке, чтобы не удалить пенетрант, попавший в дефекты» [31]. После этой процедуры наносят проявитель, который вбирает в себя из глубин участка пенетрант, тем самым показывая на поверхности объекта контроля скрытые дефекты.

Капиллярный контроль – признан одним из наиболее чувствительных метод НК. К таким методам контроля можно отнести способы, которые

базируются на капиллярном проникновении индикаторных жидких веществ (пенетрантов) в микротрещины на поверхности и сквозные дефекты. Индикаторные среды, которые проявляются на поверхностях материалов, чаще всего регистрируются визуальным контролем. Этот метод определяет наличие дефектов и их расположение, ориентацию и протяженность на поверхности контролируемого участка. Метод капиллярной дефектоскопии используется чаще всего для выявления небольших по размерам дефектов, которые не могут быть выявлены при использовании визуального контроля.

В основном на предприятии используются пенетранты для капиллярного метода набора Sherwin (см. рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Пенетранты для капиллярного метода набора Sherwin

Данный набор – это набор баллончиков для работ с капиллярной дефектоскопией. Используется в диапазоне от плюс десяти до плюс пятидесяти градусов по Цельсию.

Капиллярный НК используется для диагностирования брака элементов устройств на поверхностях (трещины) в металлах. Обширное применение данного метода используется для диагностирования на соответствие

требованиям состояния сосудов и резервуаров после сварочных работ на сварных соединениях, а также при контроле оборудования на наличие растрескивания материала, работающего при высоких температурах.

Результаты данного метода (см. рисунок 2.8) трудно оставить незамеченными.

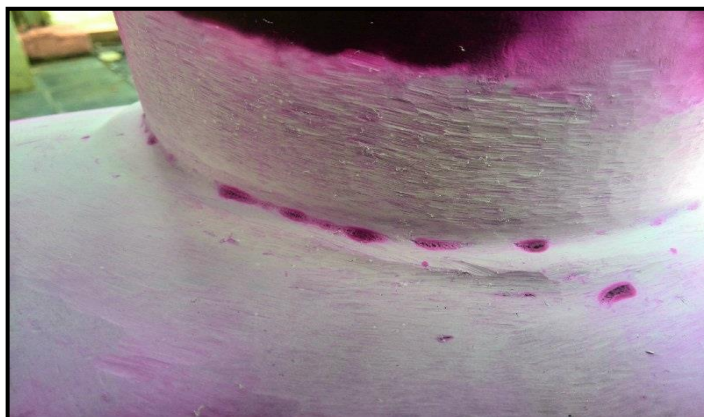


Рисунок 2.8 – Дефекты, обнаруженные при помощи капиллярного метода. Скопление шлака и пор по периметру сварного соединения штуцера сосуда

Отчетливо видны подрезы и шлак на сварном шве. Они детектируются повышенной концентрацией красного проявителя в местах брака.

### **2.3 Гидравлический (пневматический) контроль**

Для контроля прочности и герметичности сосудов и резервуаров частым методом контроля является гидравлическое испытание оборудования. Порядок проведения данного метода представлен на рисунке 2.9. Этим методом чаще всего контролируются сварные соединения после ремонта, монтажа, реконструкции. Метод очень надежен, т.к. по месту проведения сразу видны результаты. Наличие дефектов проявляется появлением запотевания, струйками воды, падением давления по манометру, установленному на объекте контроля.



Рисунок 2.9 – Порядок проведения гидравлического испытания [17]

Регистрация пробных веществ, которые проникают в сквозные дефекты объекта контроля, лежит в основе данного метода. При пневматическом испытании используются воздух или инертный газ. Этот метод применяется после всех способов контроля, описанных выше в нашей работе, является заключительным, но по важности не уступает.

## 2.4 Ультразвуковая дефектоскопия и толщинометрия

Принцип работы ультразвуковых приборов строится на введении высокочастотного звука в контролируемый объект, при попадании волн на материал с отличным от основного акустическим импедансом (плотностью и скоростью), часть ультразвука отражается на передающее устройство.

«Самыми распространенными частотами являются волны в диапазоне от 1,0 до 10,0 МГц» [44]. Данные волны не слышны человеческому уху из-за их высокой частоты, они не распространяются по воздуху. Волны низкочастотные могут глубже проникать в объект диагностирования, но у них занижена чувствительность. Самые применяемые типы волн – волны сжатия, продольные и поперечные, представленные на рисунке 2.10.

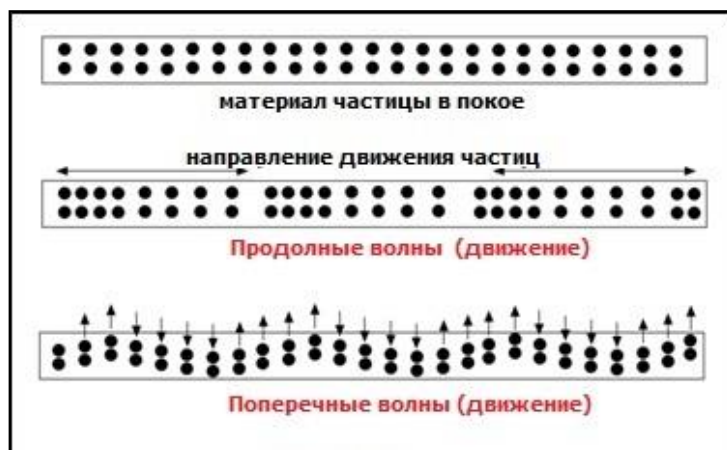


Рисунок 2.10 – Типы ультразвуковых волн [2]

В ультразвуковых толщиномерах используются прямые датчики, принцип их действия проиллюстрирован на рисунке 2.11.

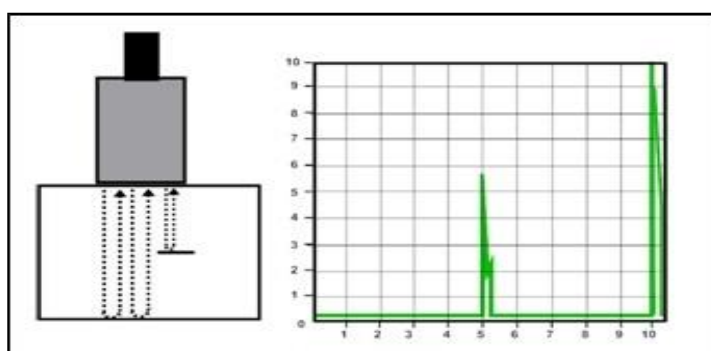


Рисунок 2.11 – Прямой датчик в толщинометрии [2]



На тольяттинской промышленной площадке лабораторией НК широко используются цифровые толщиномеры, в которых результаты замеров отображаются на экране в виде цифровых значений.

Один из самых популярных приборов в арсенале лаборатории – ультразвуковой толщиномер. Рассмотрим прибор EM2210 «Мини ЭМА», изображенный на рисунке 2.12. Под воздействием колебаний среда искривляется и в ней распространяются акустические волны. Акустический прибор использует ультразвуковые волны. Возникает поверхность (фронт волны) благодаря частицам с одинаковыми фазами колебаний. «Этот поток образуется в перпендикулярном направлении к распространению волны» [3].



Рисунок 2.12 – Ультразвуковой толщиномер EM2210 «Мини ЭМА» [1]

Принцип действия данного прибора выражается в его способности преобразовывать электромагнитные колебания в акустические прямо на поверхность контролируемого участка. Его преимущество заключается в том, что он может работать без контактных сред, что упрощает работу с ним. «Благодаря данному факту он имеет преимущество перед устройствами, использующими классические пьезопреобразователи с контактными гелями» [42]. Прибор позволяет точно и быстро измерять толщину металла в

необходимой для нас части оборудования без предварительной подготовки поверхности.

Также удобен и надежен в использовании ультразвуковой толщиномер ТУЗ-2 (см. рисунок 2.13). Он используется для контроля толщины стенок сосудов и резервуаров, в том числе, к которым имеется доступ лишь с одной стороны [17].



Рисунок 2.13 – Ультразвуковой толщиномер ТУЗ-2

Прибор прост в эксплуатации, помогает определять степень коррозионного и эрозионного износа оборудования на производственной площадке по остаточной толщине контролируемого объекта.

Ещё одним прибором, используемым для проведения контроля за техническим состоянием, является Булат 1М, представленный на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Ультразвуковой толщиномер Булат 1М

По принципу действия он схож со своими аналогами, представленными выше.

Разница в технических характеристиках данных приборов, помогающих контролировать толщину материала, представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение основных представленных дефектоскопов

Наименование аппарата	Диапазон контроля, мм	Усиление сигнала	Диапазон скоростей, м/с	Диапазон температур	Размер дисплея и разрешение	Время автономной работы
EM2210 «Мини ЭМА»	До 3500	100 дБ	1000-8000	-20... +50°C	45 x 25 пикселей	6-7 ч
ТУЗ-2	До 12000	100 дБ	1000-9999	-40... +55°C	65 x 48 пикселей	6-8 ч

Булат 1М	До 5000	100 дБ	1000-9999	-10... +50°C	64 x 48 пикселей	6-8 ч
----------	---------	--------	-----------	--------------	------------------	-------

Также для контроля сварных соединений используются ультразвуковые дефектоскопы, на тольяттинском предприятии популярностью пользуется OmniScan (см. рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 – Ультразвуковой дефектоскоп OmniScan

Самым важным аспектом в эксплуатации данного экземпляра служит тот факт, что в своей работе ультразвуковой дефектоскоп применяет фазированные решетки – данная разработка модульных дефектоскопов фирмы «R/D Tech» относительно молода, но уже успела завоевать симпатии многих лабораторий, следящих за состоянием своего оборудования. Данный прибор соответствует самым высоким требованиям НК. «Он выполняет сбор данных с высокой скоростью и точностью, что немаловажно» [31]. Действия датчика при выполнении контроля отображены на рисунке 2.16. Выявленные дефекты отображаются на экране дефектоскопа и имеют вид, представленный на рисунке 2.17.

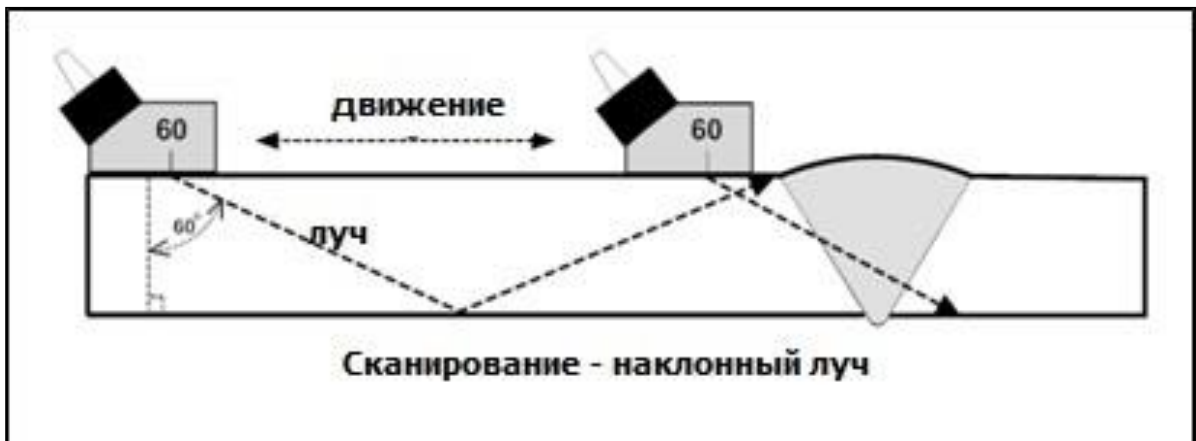


Рисунок 2.16 - Принцип сканирования датчиком с углом ввода 60 Градусов [2]

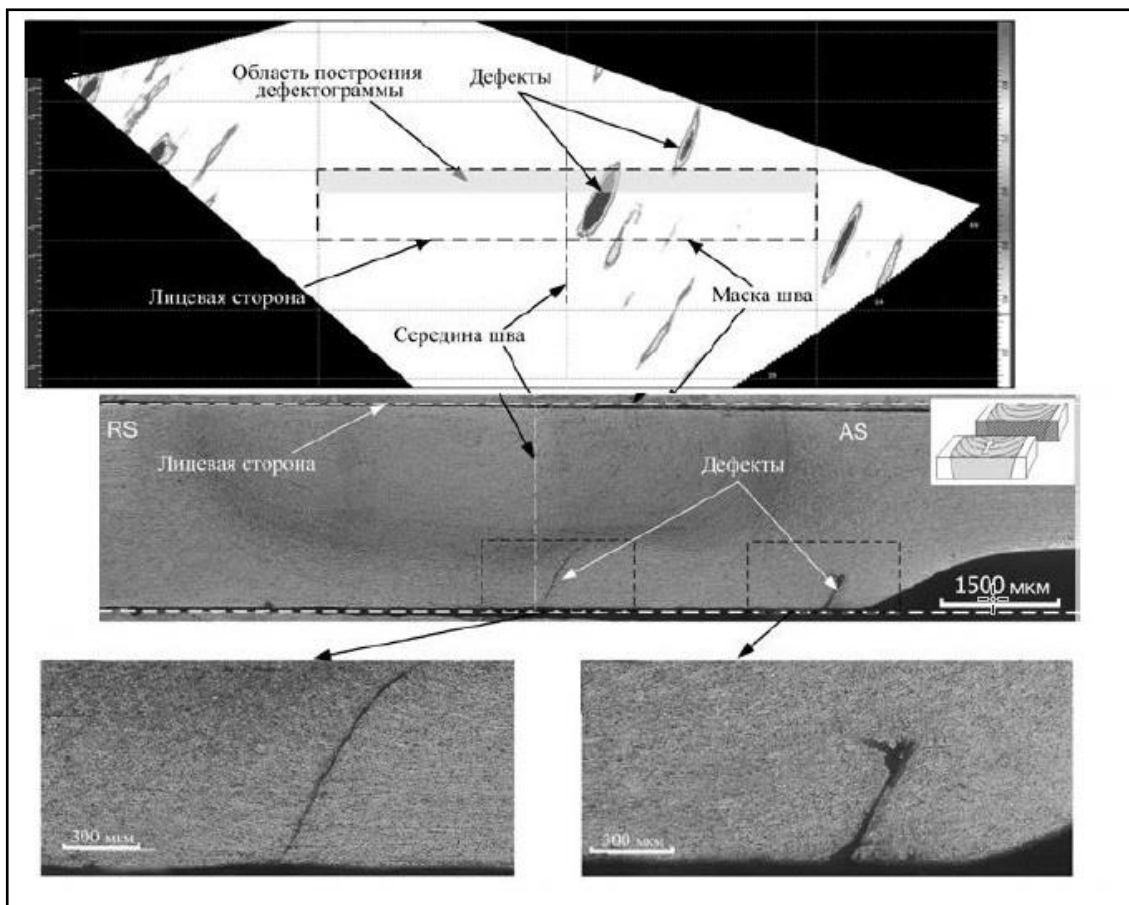


Рисунок 2.17 - Ультразвуковой S-скан с включениями [1]

Недостатком данного метода служит его трудоемкость при больших объемах контроля, дефектоскопист подвержен усталости от постоянного

визуального контакта с экраном прибора, что в свою очередь может повлечь пропуск дефектов. Присутствует человеческий фактор при определении брака при использовании метода УЗК.

## 2.5 Рентгенографическая дефектоскопия

Метод рентгенографического контроля работает при помощи взаимодействия радиоизлучения с материалами устройств. В процессе поглощения, дифракции, отражения, преломления падающей волны или взаимодействия падающих (отраженных) волн появляется эффект проявления. «Данный метод позволяет использовать специализированные резонансные эффекты взаимодействия радиоволновых излучений» [2]. Принцип просвечивания объекта на специализированную пленку представлен на рисунке 2.18.

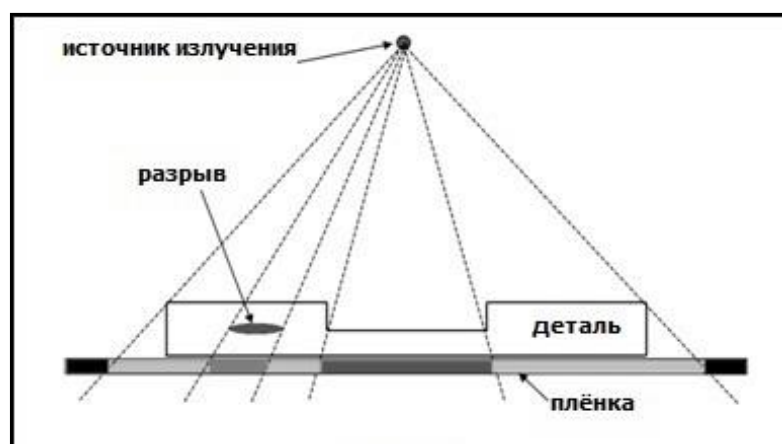


Рисунок 2.18 – Принцип отображения излучения на пленке [9]

В лаборатории НК одним из используемых аппаратов является рентгеновский аппарат «Моноскан 4» (см. рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Импульсный рентгеновский аппарат «Моноскан 4»

Прибор является одним из самых универсальных комплексов диагностирования в линейке рентгеновских аппаратов.

«Свинцовая защита корпуса минимизирует пропуск излучения в момент эксплуатации прибора» [8]. Данная модель имеет кнопку, позволяющую задерживать время начала просвечивания, а также пульт дистанционного управления, дающий возможность дефектоскописту быть на безопасном расстоянии от рентгеновского аппарата при его работе.

Есть и недостатки данного прибора. Моноскан 4 генерирует импульсы рентгеновских лучей длительностью не более 25 наносекунд. Данный факт может способствовать неточным показаниям или вовсе их отсутствию при работе прибора в режиме измерения уровня излучения.

Еще одним часто применяемым рентгеновским аппаратом является «Март-200», изображенный на рисунке 2.20.



Рисунок 2.20 – Рентгеновский аппарат «Март-200» [21]

МАРТ-200 – небольшой рентген аппарат, состоящий из одного блока, контролирующей сварные швы резервуаров и сосудов. Особенность модели заключается в том, что в торце блоке излучателя есть выход пучка излучения с углом 140 градусов, это служит прекрасной способностью применять его при панорамной съёмке.

Также в рентгенографическом методе контроля используются два дефектоскопа, представленных на рисунках 2.21, 2.22, - АРИНА-3 и АРИНА-9. Визуально они отличаются лишь размером блока излучателя, который у АРИНЫ-9 немногим больше своего собрата.





Рисунок 2.21 – Портативный рентген-аппарат АРИНА-3

Это современная система бюджетного выбора для диагностики сварных соединений объектов в непростых полевых условиях. Используется всегда вместе с источником питания на аккумуляторных батареях. Прибор позиционируется как переносной комплекс. Осуществляет просвечивание на кассетную плёнку. Также возможно применение панорамного способа просвечивания.



Рисунок 2.22 – Портативный рентген-аппарат АРИНА-9

В основе работы лежит взрывная электронная эмиссия, которая образуется в вакуумной трубке вследствие поступления короткого импульса

высокого напряжения катода. Чаще всего данный прибор применяется для диагностирования брака и несоответствий сварных соединений толстостенного оборудования, его способность «пробивать» большие толщины является преимуществом использования перед аналогами.

Результаты просвечивания от метода РК видны на пленках (см. рисунок 2.23). Видны поры и непровары сварного шва.

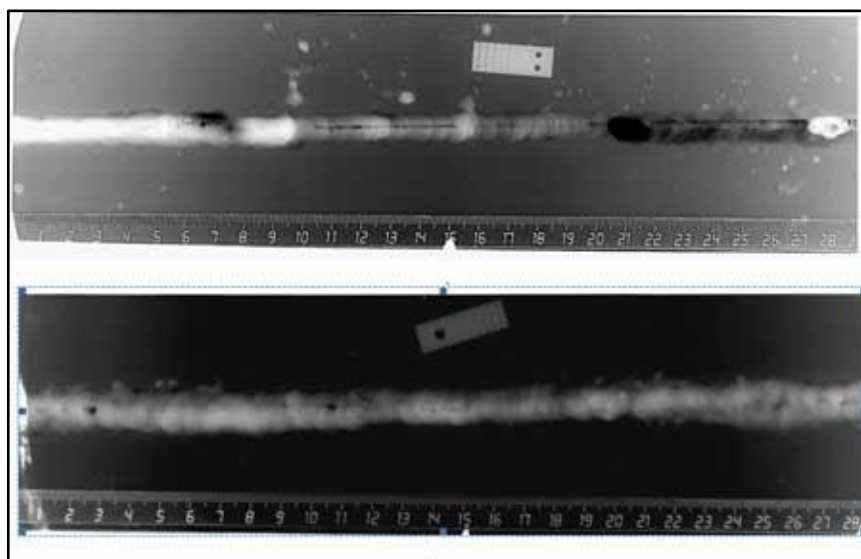


Рисунок 2.23 – Рентгенографические снимки на пленке с дефектами в сварном шве

При наличии в объекте контроля пустот или дефектов, через них проходит большее количество лучей. Это и является следствием получения более темных участков пленки.

Сама радиографическая пленка представляет собой тонкий прозрачный пластик. Бромид серебра покрывает ее поверхность, присутствующий с одной или двух сторон. При взаимодействии радиационного излучения с пленкой, в кристаллах происходит реакция, превращающая их в металлическое серебро черного цвета. Далее серебро «прикрепляется» на пластик при проявлении, затем, высыхая, становится рентгеновской пленкой.

Немаловажным фактором метода контроля является оказываемое воздействие на пленку в процессе ее эксплуатации. Так, на качество полученных результатов влияют такие параметры, как контрастность, резкость, разрешающая способность, геометрия просвечивания. Рассмотрим каждый немного подробнее, т.к. это значимо в данном методе.

«Контрастностью называют разность значения оптической плотности и соседних участков снимка» [48]. Изменение по плотности почернения в момент воздействия разных доз экспозиции излучения является контрастностью объекта.

Резкость – скачкообразный переход плотности почернения по краю изображения. При переходе от более светлых участков к темным, разбиваемость в контуре усиливается, увеличивается резкость. От резкости снимков зависит лучшая выявляемость очертаний объекта просвечивания, тем самым повышается вероятность обнаружения брака. Если же переход от светлых участков к более темным становится шире, то контур сильнее размыт и резкость уменьшается, что ведет к ухудшению нахождения дефектов.

Такой параметр, как разрешающая способность пленки обуславливает возможность к отдельной регистрации близко расположенных дефектов и участков, не имеющих их вовсе, при обследовании объекта. Разделенные видимые линии с шагом толщины в один мм – один из параметров данной особенности. Пленка с мелкозернистой структурой имеет лучшее разрешение в сравнении с крупнозернистой. Практика показывает, что чувствительность РК характеризуется наименьшими радиационными величинами найденного дефекта. Этот параметр выражен относительными или абсолютными значениями. Контрастность объекта и коэффициент контрастности регистратора влияют на чувствительность. Также качество зависимо от геометрии просвечивания. Схему контроля необходимо выбирать исходя из лучшего нахождения на снимке вероятных дефектов. В

ГОСТ 7512-88 показаны типовые схемы при помощи радиографического метода.

Регистратор излучения – это рентгенографическая пленка. Фосфорные пластины всё чаще набирают популярность. При предпочтении типа пленки учитываются толщина, плотность материала, чувствительность.

В лаборатории проведен подсчет среднего затрачиваемого времени на непосредственную фотообработку рентгенографических пленок. Результаты представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Длительность этапов контроля

Этап	Начало	Длительность	Конец
Проверка пригодности температуры обрабатывающих растворов	8:00	0:10	8:10
Определение времени проявления	8:10	0:10	8:20
Промежуточная промывка пленки	8:20	0:02	8:22
Фиксирование	8:22	0:10	8:32
Окончательная промывка	8:32	0:15	8:47
Просушка	8:47	3:00	11:47
Просмотр и расшифровка	11:47	0:30	12:17

Из таблицы видно, что вторым по затрате времени этапом является просмотр и расшифровка. Этот пункт несомненно требует внимания. Данный этап требует усовершенствования, т.к. длительность времени работы на данном отрезке времени подвергает дефектоскописта дополнительной нагрузке и ведет к вероятностным ошибкам при расшифровке.

Также результаты вышеуказанной таблицы можно представить диаграммой Ганта на рисунке 2.24. Этот инструмент позволяет планировать, управлять задачами. Он имеет вид горизонтальных полос, которые размещены между двух осей (вертикально – задачи, горизонтально - даты).

Это визуальный стандарт порядка выполнения задач и норм времени на каждую операцию.

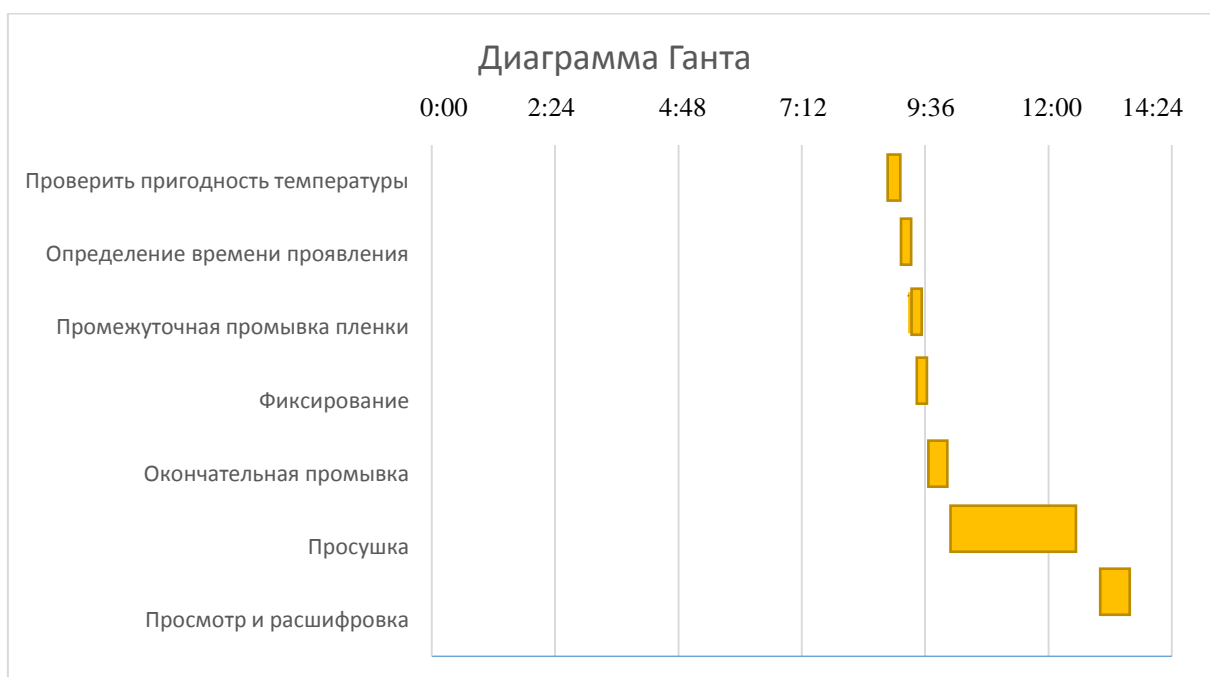


Рисунок 2.24 – Диаграмма Ганта

Этапы проведения контроля состоят из отдельных операций, описанных в ВСН 012-88.

Рассмотрим четыре основных этапа метода РК, представленных на рисунке 2.25:

- подготовка к контролю,
- просвечивание сварного стыка,
- фотообработка радиографической пленки,
- расшифровка снимков.

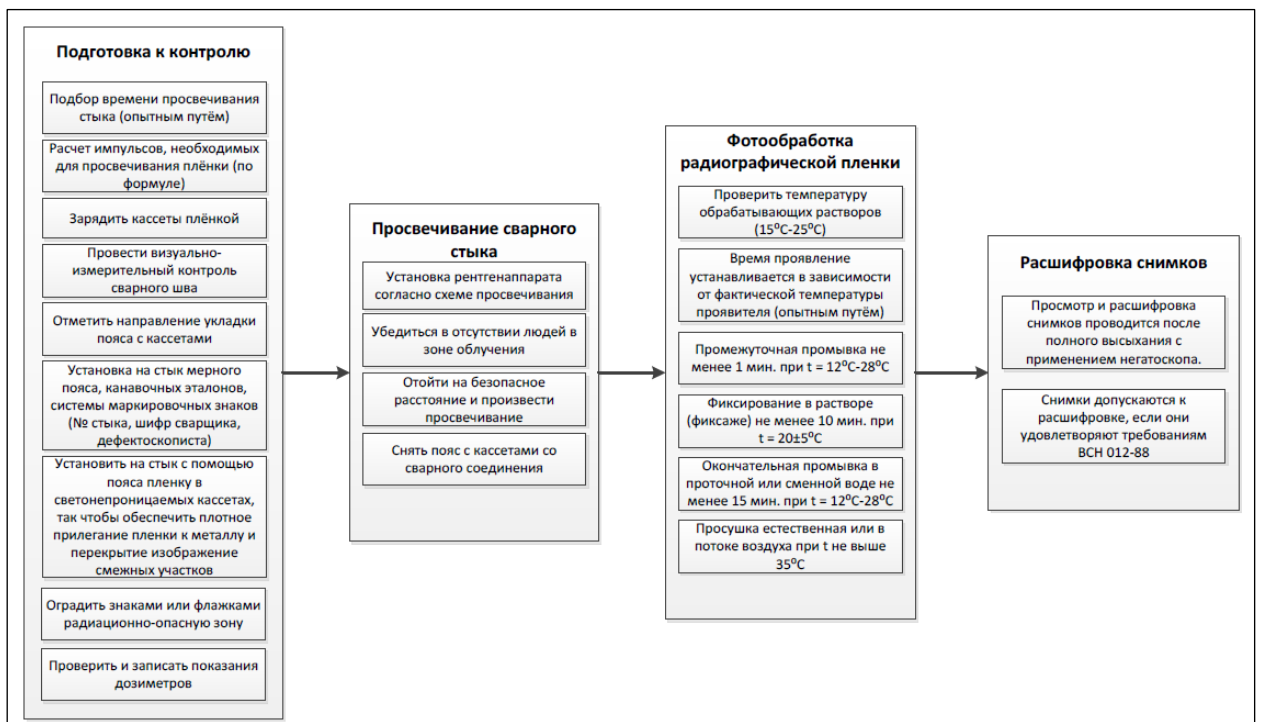


Рисунок 2.25 – Основные этапы метода РК [20]

Причины не выявления брака методом рентгенографического контроля также отображена на диаграмме Исикавы (см. рисунок 2.26). Данная диаграмма представляет собой графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, это «инструмент», позволяющий определять причины проблем в графическом представлении.



Рисунок 2.26 – Диаграмма Исикавы. Причины дефектов метода РК [20]

Выводы к второй главе.

Итак, рассмотрев все доступные методы контроля технического состояния сосудов и резервуаров на площадке ООО «Тольяттикаучук», мы можем сказать, что диагностирование оборудования ведется на всех этапах: при монтаже, пусках, ремонтно-восстановительных работах, реконструкциях. Являясь непростой комплексно-технической и организационной проблемой, контроль оборудования, его остаточного ресурса и обеспечение безопасной работы стоит на первом месте на тольяттинском предприятии.

Стоит отметить, что в основном ресурс сосудов и резервуаров выработал свой гарантийный срок, для дальнейшей возможности эксплуатации данному оборудованию проводится диагностирование в рамках экспертизы промышленной безопасности специализированными организациями, имеющими лицензию на проведение данных работ.

Процесс технического диагностирования должен быть строго соблюден. В нём не допустимо наличие неопределенностей при оценке показателей, обеспечивающих повторяемые и задаваемые точные результаты контроля. Требования обеспечиваются за счет системы нормативно-технической документации.

Из всех представленных методов наиболее применяемым и надежным является метод рентгенографического контроля. Он стабильно помогает в выявлении внутренних и наружных дефектов. Его преимущество заключается в том, что он нагляден, результаты можно хранить в архиве на протяжении многих лет.

На тольяттинском предприятии лабораторией НК используется классический способ рентгенографического контроля с проявлением пленок. Эти результаты диагностирования не всегда приводят к необходимому положительному эффекту при расшифровке снимков. Из-за перечисленных факторов: ошибок операторов, неудобства в установке пленки в труднодоступных местах или проблем с аппаратурой часто страдает и

качество самих снимков. Они могут быть засвечены, слишком затемнены при лишнем облучении. Да и сами дефектоскописты, участвующие при расшифровке снимков, не всегда способны с помощью негатоскопа выявить те или иные дефекты, так как человеческий глаз при усталости оператора может не заметить небольшие отклонения от норм на пленках. Эта совокупность негативных факторов данного вида контроля, который является основным на тольяттинской промышленной площадке, должна быть модифицирована с применением современных технологических возможностей, которыми располагает современное профессиональное сообщество, занятое в сфере предоставления и обеспечения безопасной работы промышленных химических производств, в частности, в ООО «Тольяттикаучук».

В связи с этим существует необходимость в совершенствовании данного метода контроля, с целью облегчить работу дефектоскописта при расшифровке снимков, а также увеличить качество выявляемости дефектов.



## **Глава 3 Совершенствование рентгенографического метода контроля технического состояния сосудов и резервуаров в ООО «Тольяттикаучук»**

### **3.1 Анализ основных дефектов рентгенографической пленки**

Работая с методом рентгенографического контроля, самое главное следовать всем этапам подпроцессов, не допуская несоответствий при работе. От правильного и качественного диагностирования состояния оборудования зависит насколько тщательно работники ЛНК смогут выявить каждый дефект на пленке, чтобы уменьшить даже небольшую вероятность пропуска брака, последствия которого могут быть огромны, начиная от вытекания продукта из сосуда и резервуара, ведущей к экологическим угрозам, заканчивая аварией на площадке, влекущей негативные последствия для жизни персонала и материальными убытками для организации.

Поэтому для предотвращения негативных последствий нам требуется улучшить метод контроля с его этапами. Рассмотрим количественные и качественные дефекты рентгенографических снимков, используемых в работе дефектоскопистами.

На рисунке 3.1 отображена диаграмма связей возникновения дефектов.

«Диаграмма служит для определения того, какие именно дефекты зависят от каких именно факторов» [6]. Мы видим, что на возникновение дефектов могут оказывать влияние несколько факторов: невнимательность дефектоскопистов, внешние факторы, а также технические проблемы с оборудованием.

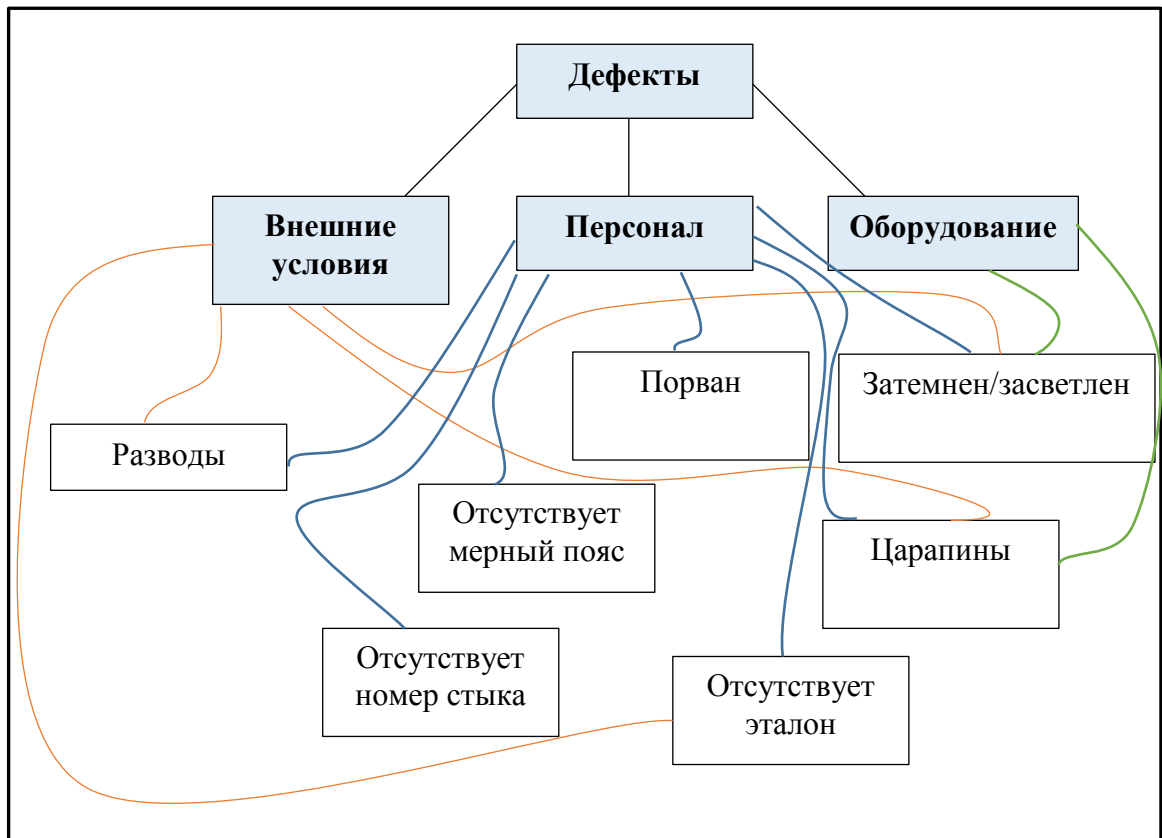


Рисунок 3.1 – Диаграмма связей дефектных снимков

Было проанализировано 34 архива с пленками, собранными за полгода работы. За шесть месяцев лабораторией было проконтролировано, сделано и обработано именно такой объем сварных соединений сосудов и резервуаров. Эти данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Данные по архивам

№ архива	Количество снимков	Количество годных снимков	Количество дефектных снимков	% годных снимков	% дефектных снимков
1	454	446	8	98,24	1,76
2	571	565	6	98,95	1,05
3	592	586	6	98,99	1,01
4	879	840	39	95,56	4,44
5	557	546	11	98,03	1,97
6	410	393	17	95,85	4,15
7	102	86	16	84,31	15,69

Продолжение таблицы 3.1

№ архива	Количество снимков	Количество годных снимков	Количество дефектных снимков	% годных снимков	% дефектных снимков
8	618	612	6	99,03	0,97
9	116	103	13	88,79	11,21
10	109	101	8	92,66	7,34
11	247	235	12	95,14	4,86
12	665	648	17	97,44	2,56
13	927	908	19	97,95	2,05
14	956	942	14	98,54	1,46
15	200	193	7	96,50	3,50
16	379	374	5	98,68	1,32
17	341	332	9	97,36	2,64
18	96	90	6	93,75	6,25
19	466	461	5	98,93	1,07
20	95	89	6	93,68	6,32
21	145	135	10	93,10	6,90
22	693	687	6	99,13	0,87
23	254	209	45	82,28	17,72
24	275	258	17	93,82	6,18
25	458	433	25	94,54	5,46
26	71	64	7	90,14	9,86
27	104	96	8	92,31	7,69
28	306	285	21	93,14	6,86
29	53	52	1	98,11	1,89
30	132	127	5	96,21	3,79
31	188	184	4	97,87	2,13
32	143	141	2	98,60	1,40
33	49	47	2	95,92	4,08
34	113	105	8	92,92	7,08

Из представленных выше данных мы видим, что архив под номером 4 включает в себя наибольшее количество дефектных снимков. Для более полного представления данный архив был подвергнут повторному осмотру и расписан более детально.

При пересмотре снимков были выявлены следующие несоответствия рентгенографических пленок. Наиболее встречаемые дефекты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Дефекты

№ архива	Вид дефекта								Итого
	Затемнен	Отсутствует номер снимка	Отсутствует мерный пояс	Засветлен	Царапины	Разводы	Порван	Отсутствует эталон	
1	3	0	0	1	1	3	0	0	8
2	0	2	0	0	0	1	3	0	6
3	1	0	0	0	1	4	0	0	6
4	9	4	4	2	4	3	6	7	39
5	3	0	0	0	2	4	1	1	11
6	4	0	1	0	4	6	2	0	17
7	5	1	2	4	0	3	1	0	16
8	2	0	0	0	0	2	1	1	6
9	7	2	0	4	0	0	0	0	13
10	0	3	0	2	2	0	0	1	8
11	1	4	0	4	1	2	0	0	12
12	7	0	2	5	0	2	1	0	17
13	8	5	0	0	0	0	0	6	19
14	0	0	4	8	2	0	0	0	14
15	0	0	1	3	0	2	1	0	7
16	3	2	0	0	0	0	0	0	5
17	1	1	0	4	1	2	0	0	9
18	2	0	1	0	3	0	0	0	6
19	0	0	0	2	2	0	0	1	5
20	0	2	0	2	2	0	0	0	6
21	5	2	2	1	0	0	0	0	10
22	1	0	0	3	2	0	0	0	6
23	13	5	2	13	6	0	2	4	45
24	6	4	0	2	4	1	0	0	17
25	7	2	4	6	4	0	2	0	25
26	3	0	0	0	2	2	0	0	7
27	3	0	0	4	1	0	0	0	8
28	8	3	2	6	0	0	2	0	21
29	1	0	0	0	0	0	0	0	1
30	3	0	1	1	0	0	0	0	5
31	0	0	0	1	0	2	0	1	4
32	2	0	0	0	0	0	0	0	2
33	0	1	0	0	0	0	1	0	2
34	2	0	0	6	0	0	0	0	8
Итого	110	43	26	84	44	39	23	22	391

Из приведённых данных по архиву № 4 видно, что самый большой процент брака приходится на затемнённые и засветленные снимки,

отображенных на рисунке 3.2.

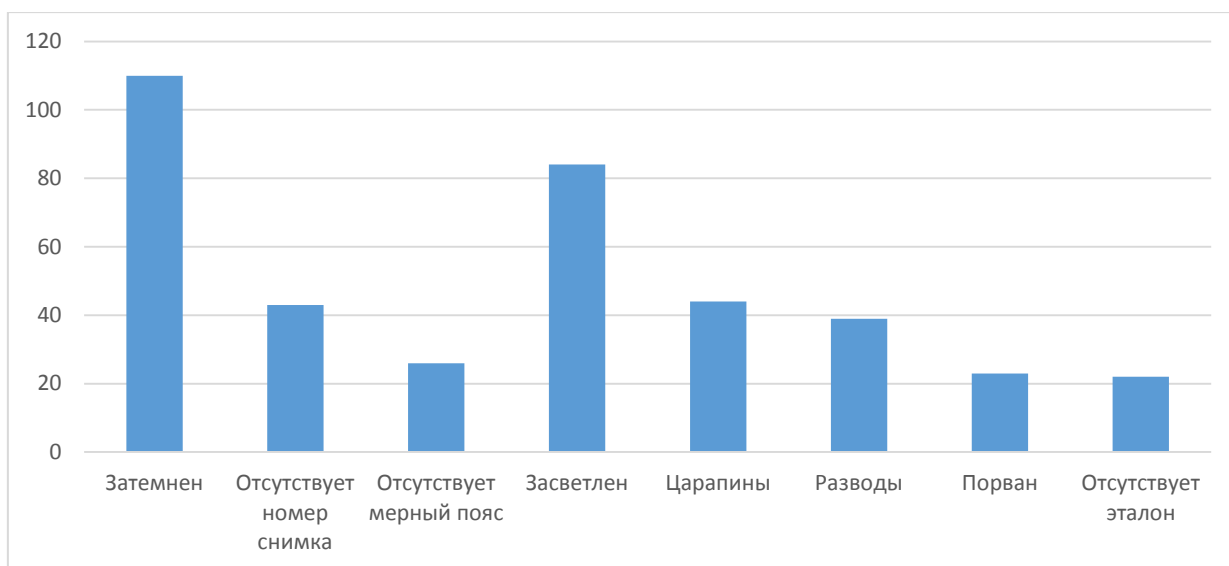


Рисунок 3.2 – Диаграмма дефектов

Рассмотрим в таблице 3.3 на каких стадиях проведения контроля и при каких условиях появляются выявленные ранее дефекты.

Таблица 3.3 – Условия появления дефектов

Дефект	Стадия появления	Условия появления
Затемнен	просвечивание сварных соединений; проявление пленок	некорректное время экспозиции; попадание света на пленку; повреждение кассеты; поврежденная партия пленок; дефект/неисправность аппарата; нарушение режима температуры при проявке

Продолжение таблицы 3.3

Дефект	Стадия появления	Условия появления
Отсутствие номера снимка	установка мерного пояса	невнимательность
Отсутствие мерного пояса	установка мерного пояса	неверная установка мерного пояса
Засветлен	просвечивание сварных соединений; проявление пленок	некорректное время экспозиции; попадание света на пленку; нарушение соблюдения режима температуры при проявке
Царапины	проявление пленок; зарядка кассет; проявление пленок; расшифровка снимков	неосторожное обращение с пленкой
Разводы	проявление пленок;	неравномерное погружение в проявитель/фиксаж; некачественная промывка пленок после проявления; нарушение соблюдения режима температуры при проявке
Порван	просушка снимков; расшифровка снимка	неосторожность
Отсутствие эталона	установка эталона	невнимательность

Из таблицы видно, что дефекты могут появиться на любой стадии проведения РК. Наибольшее количество условий возникновения брака приходится на затемненные, засветленные дефекты.

### **3.2 Совершенствование качества метода рентгенографического контроля при помощи оцифровки пленок**

На тольяттинской промышленной площадке одним из самых надежных, простых в использовании и наглядным методом определения технического состояния оборудования является метод рентгенографического контроля. Используются специализированные рентгенографические пленки для диагностирования результатов контроля, по которым персонал лаборатории делает заключение о годности сварных соединений, что непосредственно служит контролем технического состояния сосудов и резервуаров. «Недостатком метода является: некачественное диагностирование дефектов по рентгенографическим пленкам, что влечет к пропуску брака в процессе эксплуатации сосудов и резервуаров» [27]. Пленки не всегда получают идеального качества, что влечет к трудности при расшифровке. Этому способствуют, в одном случае, сложность доступа к контролируемому оборудованию, что не позволяет в полной мере настроить оборудование на необходимые параметры, а в другом, ошибки дефектоскопистов в расшифровке снимков. «Из-за этого грань между дефектом и погрешностью качества снимка может нарушаться, приводить к неразличимости брака» [25]. В работе мы предлагаем нивелировать вышеуказанные риски, вызванные некачественной работой персонала и проблем диагностирования оборудования в труднодоступных местах при помощи внедрения оцифровки пленок.

«Оцифровка радиографических пленок на сегодняшний день – это один из наиболее необходимых и перспективных методов в развитии способов неразрушающих испытаний» [9]. Обозначенный факт в первую очередь связан с усовершенствованием системы при регистрации изображений, полученных радиационным методом, а также выход на рынок высококачественного оборудования, помогающего оцифровывать рентгеновские снимки. Возникшие технологии в цифровой сфере

радиографического метода контроля и диагностики технического состояния оборудования помогают сохранять в архив обработанные компьютером рентгеновские снимки, делать более четкий анализ, этому способствует применение определенного математического метода оцифровки полученных данных.

Обработка рентген снимков для получения высококачественной картинки довольно тяжелая проблема, потому что возникает необходимость сохранения информации, которая содержится в аналоговом виде рентгеновского снимка. Вышеуказанный метод оцифровки возможен к применению при использовании специализированных сканеров, которые имеют отличия от обычных оптических сканеров в разрешении, в частности, в количестве полутонов. Чтобы сохранить имеющиеся достоинства рентгеновского снимка с изображением и получить дополнительные преимущества применяют стандарт ISO 14096-2005, требующий множество критериев к сканирующему оборудованию.

Чтобы получить качественные и правильные цифровые снимки специальные сканеры должны обеспечивать:

- нужный диапазон оптической плотности радиографических снимков (плотности почернения);
- способность преобразовывать оптическую плотность рентгеновских плёнок в цифровые сигналы;
- определенную контрастность чувствительности в оптической плотности;
- требуемое пространственное разрешение.

ISO 14096-2005 классифицируется системами перевода в цифру радиографических плёнок [45]. Можно поделить данные системы на три главные группы:

- DS – представляет собой высококачественную технику, оцифровка которой происходит с небольшим понижением в отношении сигнал/шум и пространственного разрешения, сканирующее



оборудование используется для архивации рентгеновских изображений;

- DB – этот класс представляет собой усовершенствованное оборудование, оцифровка осуществляется при ухудшении качества рентгенографического изображения, главным предназначением сканера данного вида класса служит цифровой анализ изображений;
- DA – основное оборудование, оцифровка совершается путём занижения качества, а также разрешения, задействуются сканеры при анализе изображений общего применения.

Требования к оцифровщикам рентгенографических пленок указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Требования к устройствам оцифровки

Показатель	DS	DB	DA
Диапазон оптической плотности $D_R$	0,5 – 4,5	0,5 – 4,0	0,5 – 3,5
Глубина оцифровки (бит)	$\geq 12$	$\geq 10$	$\geq 10$
Чувствительность $\Delta D_{cs}$ в диапазоне $D_R$	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$	$\leq 0,02$
Численное значение градаций серого, $M$	$\geq 4096$	$\geq 1024$	$\geq 1024$

Исходя из вышеуказанных требований стандарта ISO 14096-2-2005, метод перевода пленок в цифровой формат приемлем для НК.

### 3.3 Сканеры. Общая информация

Цифровой РК строится на системе оцифровки пленочных снимков, состоящей из самого сканера, специализированного ПО, а также системы, которая помогает отображать визуальную информацию [2].

Анализируя эту систему, мы не можем улучшить качество рентгеновских изображений, поэтому на входе в систему оцифровки

необходимо использовать высококачественные пленки, которые получены в жестких условиях требований процедуры рентгеновского контроля.

«Основными элементами системы цифровизации снимков являются оптические сканеры» [29]. Принципиальной разницы в работе оптических и специальных устройств нет. Сканер – это устройство, позволяющее вводить информацию непосредственно в компьютерную технику в формате изображений, слайдов, чертежей, схем.

### **3.4 Математическая модель оцифровки рентгенографических снимков**

Поглощенная доза энергии  $P$  излучения напрямую зависима от оптической плотности  $D$ . Задается простым соотношением 3.1:

$$D = \gamma \lg P + D_0, \quad (3.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент контрастности плёнки;

$D_0$  – инерционность плёнки.

Коэффициентные показатели  $\gamma$  и  $D_0$  имеют отношение к характеристикам плёнки и этапу проявления снимков.

Пусть  $D$  – это исходное аналоговое рентгенографическое изображение некоего объекта контроля. Сама процедура создания оцифрованного рентгенографического снимка соединена с процедурой трансформации снимков в цифровой формат. «На выходе оцифрованное рентгенографическое изображение представляет матрицу яркости  $R_{ij}$  в точках координат  $i, j$ ,  $i = 1 \div n$ ,  $j = 1 \div m$ .  $n$  и  $m$  – это количественное показание пикселей в двух параллельных направлениях» [7]. Основной рентгенографический снимок подвергается сканированию при помощи оптического излучения, которое регистрирует частицы света, эксплуатируя

шкалу с детекторами,  $i = \frac{x'}{b}$ , а  $j = \frac{y'}{V\Delta t}$ ,  $\Delta t$  – время интегрирования,  $V$  – скорость каретки. В приборе «оптический сканер», в режиме излучения, градации оттенков серого в цифровом формате в точках  $x'$ ,  $y'$  выявляются с помощью оценивания степени непрозрачности рентгенографических пленок  $N(x', y')$ :

$$N(x', y') = \frac{J_0}{J(x', y')}, \quad (3.2)$$

где  $J_0$  – энергетический поток излучения;

$J$  – представляет собой показатель потока энергии, проходящего сквозь рентгенографическую пленку.

«Уровень, отображающий отсутствие прозрачности рентгенографической пленки, представляет собой параметр, обратный коэффициенту уменьшения фотонов света» [21].

Составляющие снимка  $N$  взаимодействуют с частью изображения  $D$  в системе координат системы  $x'$ ,  $y'$ , представлено формулой:

$$N = (x', y') = 10^{D(x', y')} \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) основано на возможности определения оптической плотности, которая была представлена ранее.

Связь, которая видна в распределении степени непрозрачности рентгенографического изображения  $N(x', y')$  и оцифрованной формы  $R$  с элементами  $R_{ij}$ , на первый взгляд может быть выражена выражением:

$$R_{i,j} = \frac{\int_{ib}^{(i+1)b} \int_{jV\Delta t}^{(j+1)V\Delta t} N(x', y') dy' dx'}{bV\Delta t} M, \quad (3.4)$$

где  $M$  – коэффициент. Произведение  $V\Delta t$  можно обозначить через  $a$ :

$$R_{i,j} = \frac{\int_{ib}^{(i+1)b} \int_{ja}^{(j+1)a} N(x',y') dy' dx'}{ba} M, \quad (3.5)$$

Переменные  $a$  и  $b$  в формуле (3.5) позволяют определить физические размеры пикселей в двух параллельных направлениях.

« $M$  зависит от разрядности параметра АЦП и напрямую зависит от диапазона изменения оптической плотности сканирующего оборудования от  $D_{min}$  до  $D_{max}$ . Светлый уровень связан с  $D_{min}$ , тёмный с  $D_{max}$ » [32].

«Тёмный» соответствует нулю, а «светлый» соответствует значению  $K=2^k-1$ . Следуя данному описанию и формулам (3.1), (3.3), получаем наименьший коэффициент  $N_{min}$ , который ухудшает поток света, сравнивается с максимумом значением на выходе АЦП, равным  $K=2^k-1$ . Максимум  $N_{max}$  сопоставим с наименьшим параметром, выходящим из АЦП, равным нулю. Из уравнения (3.3) получаем  $N_{min}$  и  $N_{max}$ :

$$N_{min} = 10^{D_{min}}, 10^{D_{max}}, \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) помогает произвести расчет для значения, представляющего интервал дискретизации  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{N_{max} - N_{min}}{2^k - 1} = \frac{10^{D_{max}} - 10^{D_{min}}}{2^k - 1}, \quad (3.7)$$

Коэффициент  $M$  имеет тесную связь с интервалом дискретизации  $\Delta$ , выраженным в соотношении  $M=1/\Delta$ .

Формула (3.8) выглядит следующим образом:

$$R_{i,j} = \frac{c(2^k - 1) \int_{ib}^{(i+1)b} \int_{ja}^{(j+1)a} 10^{D(x',y')} dy' dx' - 10^{D_{min}}}{ba(10^{D_{max}} - 10^{D_{min}})}, \quad (3.8)$$

Коэффициент  $C$  (3.8) менее единицы, он задаётся чтобы ограничить вероятный сигнал, учитывающий колебания интенсивности потока света, выраженный  $k$ . Данные выражения (3.1) – (3.8) показывают математическую модель перевода оригиналов радиографических изображений на пленку в цифровом формате. Формула (3.8) образуется из пяти составляющих специального сканера, обрабатывающего плёнки –  $a$ ,  $b$ ,  $N_{\min}$ ,  $N_{\max}$  и  $k$ . «Коэффициент  $C$  имеет наименьшее значение» [50]. Обширный набор представленных параметров исключает возможность сделать выбор сканера путём экспериментов. Мы должны сделать выбор в пользу одного из нескольких рентгеновских сканеров по итогам данных, основанных на результатах вычислительных экспериментов, которые базируются на принципе имитационной модели, разработанной на базе вышеописанной математической модели.

Математическая модель (3.1) – (3.8) описывается на основе зависимости поглощения энергии радиографического излучения  $P$  от характеристик излучающего источника и контролируемого объекта. «Эти зависимости получаются на основе принципов, описывающих данную проблему» [23]. Диагностический объект, имеющий массовую толщину  $\rho H$  и атомный номер материала  $Z$ , облучают рентгеновским лучом с максимум энергии  $E_{\max}$  спектра  $f(E, E_{\max})$ . Теперь соотношение можно выразить следующим уравнением:

$$P(\rho H, Z) = P(0, Z) \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E) f(E, E_{\max}) e^{-m(E, Z)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h}] dE, \quad (3.9)$$

где  $E_{ab}(E)$  – среднее значение энергии, которое регистрирует фотон;

$\mu$ ,  $h$  – линейный коэффициент затухания, толщина пленки;

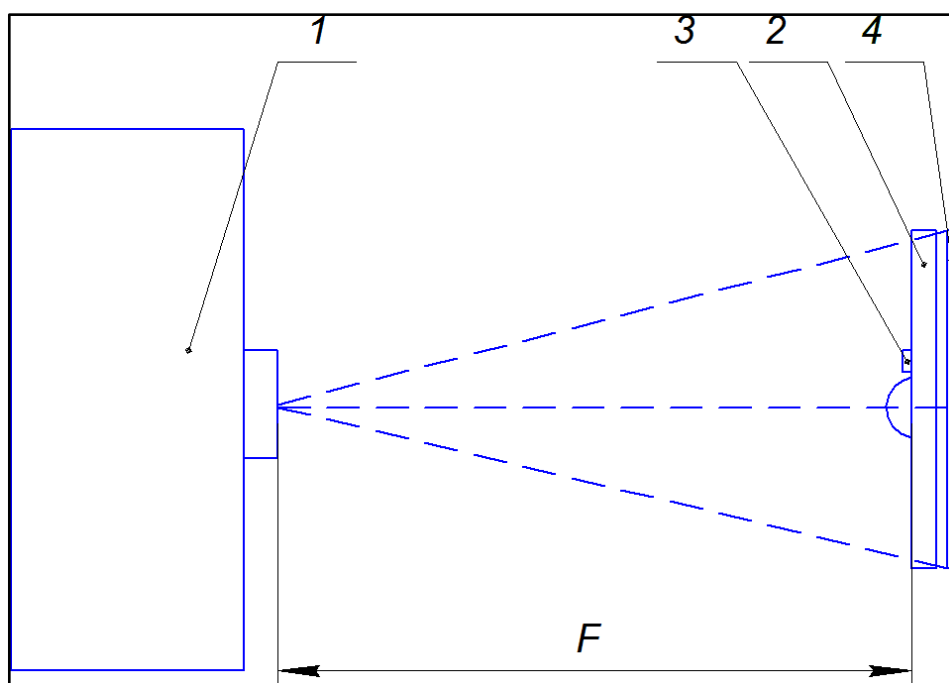
$m$  – коэффициент массы уменьшения излучения контролируемого объекта.

Выражения (3.1) – (3.9) демонстрируют доказательства положительного эффекта от внедрения оцифровки рентгеновских плёнок, позволяющее отслеживать изменения рентгенографического контраста локальной неоднородности на оцифрованном рентгенографическом изображении.

### 3.5 Способ цифровой рентгенографии с использованием «фосфорных» пластин

Рассмотрим способ преобразования обычной рентгеновской пленки в цифровой формат, использующий «фосфорные» пластины памяти. Эта часть исследования рассматривает цифровые рентгеновские изображения различных объектов, находящихся под наблюдением, чтобы помочь исследовать возможные улучшения в обнаружении брака.

Для решения этой задачи мы используем схему для экспонирования с использованием РК, изображенную на рисунке 3.3.



1 – рентгенографический аппарат МАРТ - 200; 2 – шов; 3 – эталон;  
4 – «фосфорная» пластина.

Рисунок 3.3 – Схема рентгенографического контроля [20]

Рисунок 3.3 отображает фокусное расстояние  $F$ . Объект контроля – это сварное соединение, выполненное из металла. Сварной шов контролировался рентгеновским методом. При выборе указанного метода контроля учитывалась его самая распространённая область использования, непосредственно радиационный контроль свариваемых соединений.

Взятые образцы можно разделить по нескольким параметрам:

- толщина материала,
- размеры,
- величина усиления и ширина шва валика.

Дефекты как внутреннего, так и внешнего характера определяются по следующим параметрам:

- превышение размеров усиления сварных соединений,
- неравномерное заполнение по ширине сварных швов,
- подрезы,
- несплошности,
- различные посторонние включения,
- смещения кромок.

Марка стали для каждого объекта управления выбиралась по-разному. Описанные объекты контроля используются благодаря их относительно легкому доступу во время экспериментов. Параметр, как толщина шва, варьировался от двух до шестнадцати миллиметров, этот выбор был основан на задачах, поставленных для нашей экспериментальной части. МАРТ-200 выбран из-за требуемых нам параметров. Исходя из требований ГОСТ 20426-82, выбор типа и энергии источника РК в рентгенографии осуществляется с учетом материального исполнения образца и толщины. Эталон – это средство контроля толщиной в десять миллиметров, изготовленный из стали. Мы должны основывать свой выбор на рентгеновских приборах с напряжением на трубке аппарата не более 140 кВт.

Схема контроля выбирается в соответствии с ГОСТ 7512-82, согласно этому ГОСТу выбирается необходимость контроля сварных соединений по схеме 3.3. Фокусное расстояние также подбирается по формулам согласно ГОСТ 7512-82. Правильное уравнение для определения фокусного расстояния, используемого для схемы, выглядит следующим образом:

$$F = \frac{2\Phi s}{k}, \quad (3.10)$$

где  $\Phi$  – фокусное пятно (1,2 мм);

$s$  – радиационная толщина, мм;

$k$  – чувствительность (0,2 мм).

Максимум фокусного расстояния  $F_{\max}$  составляет приблизительно 120 мм. При сканировании контролируемого объекта, толщиной менее 10 мм, выбирается фокусное расстояние приблизительно 120 мм, это уменьшает время перемещения объекта НК или аппарата РК.

Эталоном определен металлический канавочный эталон по ГОСТ 7512-82 стандарта № 1 и 13. Выбранные эталоны обеспечивают требуемую чувствительность 0,2 мм. Указанные эталоны закреплены в соответствии с ГОСТ 7512-82 на стороне излучателя.

«Экраны из свинца, толщина которых составляет 0,15 мм, задействованы для роли усиления и защиты экранов» [19].

Регистратор представляет собой «фосфорную» пластину, она выбирается исходя из того, что она очень доступна во время экспериментов и отвечает требованиям первого класса чувствительности таблицы 6 ГОСТ 7512-82. Чувствительность НК соответствует рентгенографическим пленкам D4, D5, D7. «Регистратор по отношению к обычным рентгенографическим пленкам имеет ряд плюсов» [22]. Среди перечисленных положительных сторон можно выделить следующие:

- экспозиция в восемь раз меньше, чем при использовании обычного рентгеновского снимка D7;



- отсутствие фазы проявки пленки;
- пластины не подвержены засвечиванию.

Напряжение анодного тока и время на экспозицию, необходимое для воздействия, рассчитывают с помощью номограммы на прибор МАРТ-200. Для толщины 10 мм и рентгеновских пленок D7, плотность которой  $D = 2,0$ , нужно использовать прибор по параметрам: напряжение  $U = 140$  кВт, анодный ток  $I = 3,5$  мВт. Время экспозиции займет 2 минуты, но по той причине, что будет задействована «фосфорная» пластина, будет сокращено время в восемь раз, время составит тридцать секунд.

Вся процедура при передаче изображения с «фосфорных» пластинок в цифровой формат осуществляется с помощью комплекса оцифровки рентгенографии – «ФОСФОМАТИК». Выбор этой системы основан на ее простоте и удобстве использования. Параметры этого комплекса хорошо оптимизированы для I класса чувствительности по ГОСТ 7512-82. Вся последующая обработка оцифрованных рентгенографических изображений осуществляется в программе. Исходное оцифрованное изображение заносится в нее, затем полученная картинка сохраняется в формате «tiff» и открывается. В своем арсенале она имеет большой функционал, чтобы обрабатывать данные нашего исследования.

Задействованы функциональные возможности программы:

- масштабирование определенной области;
- возможность изменения контрастности;
- измерение дефектов.

Пример работы этого цифрового комплекса продемонстрирован на рисунке 3.4. На нем показано оцифрованное рентгеновское изображение объекта НК.

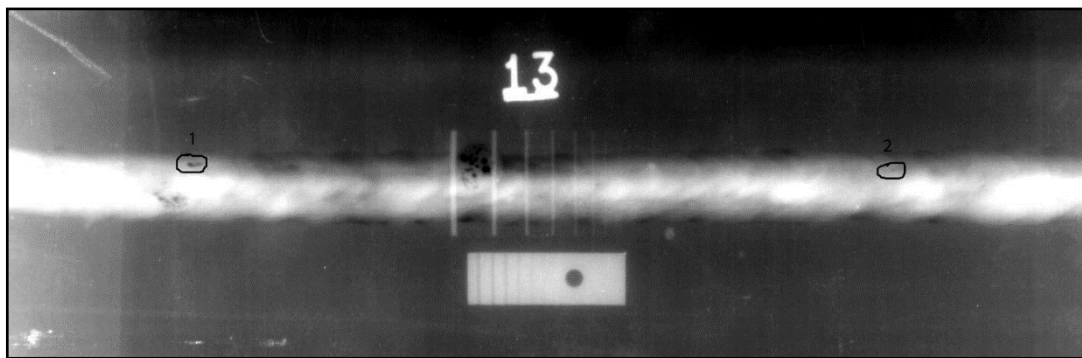


Рисунок 3.4 – Оцифрованное рентгенографическое изображения [11]

Из представленного рисунка 3.4 заключается, что чувствительность, исходя из изображения эталона, равна 0,2 мм. На этом изображении показаны две области (1; 2). Далее в работе они детально рассмотрены и проанализированы.

Примером мы выбрали два участка изображения с возможными дефектами, расположенные на рисунке 3.4, области 1 и 2.

«Области диагностики с помощью программы «ФОСФОМАТИК» подвержены изменениям масштаба (увеличению)» [18]. Этот этап необходим для досконального анализа интересующей нас области, подвергая ее любым манипуляциям. В этом случае контраст секций, выбранных на рисунке 3.4, специально изменяется. Полученное модифицированное изображение показано на рисунках 3.5 и 3.6. Дефекты этих двух изображений относительно рисунка 3.4 выглядят контрастнее по отношению к сварному соединению. Это оперативное действие помогает более детально исследовать необходимые участки изображения, представляющие интерес для дефектоскопистов.

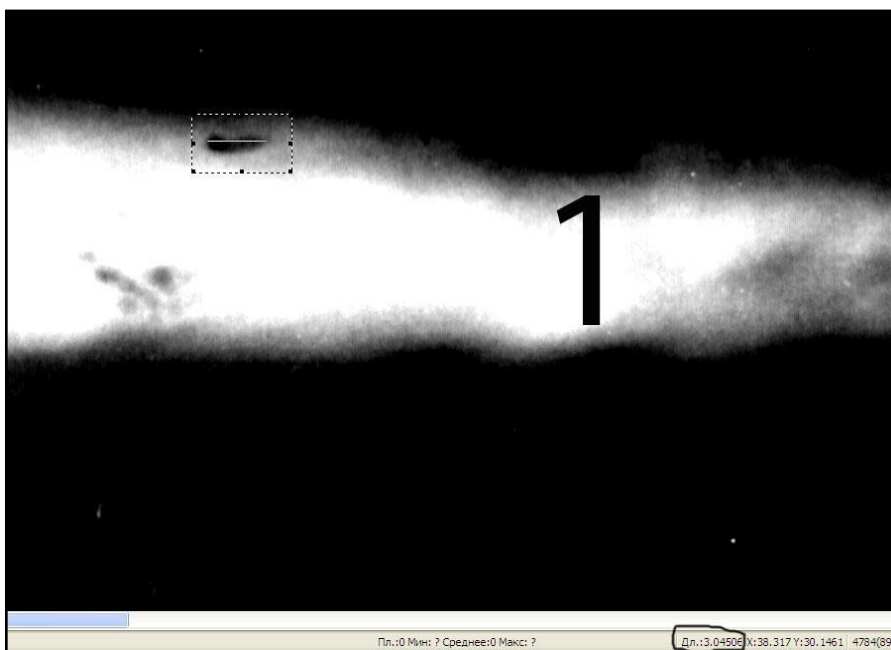


Рисунок 3.5 – Цифровое рентгенографическое изображение на первом участке, дефект – шлак [11]

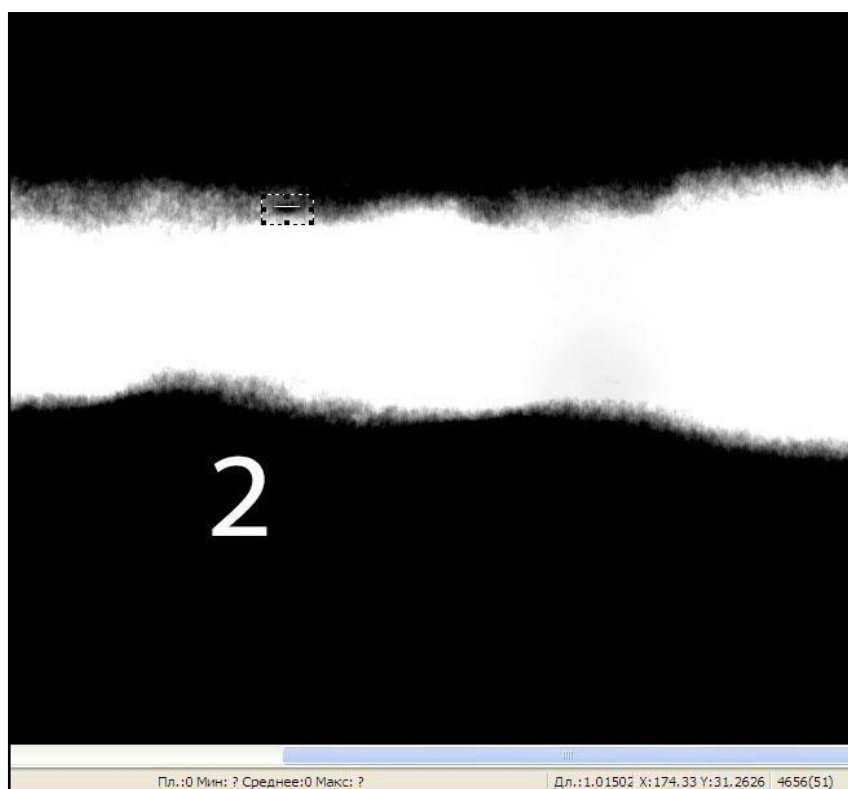


Рисунок 3.6 – Цифровое рентгенографическое изображение на втором участке, дефект – непровар [11]

Важно отметить, что эти манипуляции способствуют более точному измерению найденного брака с помощью такого инструмента, как «линейка». На рисунках 3.5 и 3.6 показано, что длина дефектов расположена в нижней правой части экрана монитора. Масштаб оцифрованных рентгеновских изображений для различных диагностических объектов различен, универсального соотношения инструмента «масштаб делений» в программе нет. «Возникает необходимость калибровки «линейки» в процессе измерения и определения габаритов эталона» [30]. Возможна погрешность в измерении габаритов эталона в связи с появлением скрытых изображений контролируемого объекта или того же эталона, не исключено, что может появиться геометрическое увеличение объекта. Однако увеличение будет небольшим для влияния на замеры габаритов дефектов, поскольку их фактический размер из-за вышеуказанных причин трудно различим.

При экспериментах были получены оцифрованные рентгенографические изображения шести диагностических объектов. Распространяется правило, что чем тоньше контролируемый материал, тем меньше становится доля рассеянного излучения, достигающего до детектора. От толщины зависит и качество изображений.

Ниже мы обратимся к аспекту, относящемуся к получению оцифрованных рентгеновских изображений путем сканирования рентгеновских пленок.

### **3.6 Оцифровка радиографических пленок**

Еще один метод перевода снимков в цифровые рентгенографические изображения основан на прямом методе оцифровки. «Для этого применяют специальное оборудование» [19].

В наших экспериментах использовался рентгенографический сканер «EPSON EXPRESSION 10000XL». В нем сочетаются все необходимые параметры, используемые нами в данном исследовании.

В таблице 3.5 показаны основные устройства для сканирования и приведены характеристики для каждого из них. «Стандарт позволяет декодировать изображения с оптической плотностью в диапазоне от 1,5 до 3,5 D» [11]. Из этой таблицы видно, что все эти устройства могут быть пригодны для работы. Большая величина зависит от разрешения, при оцифровке рентгенографических пленок необходимо наблюдать фиксацию любых дефектов. Чем лучше разрешение, тем легче выявить минимальный размер дефекта.

Таблица 3.5 – Сканеры

Сканер	Плотность, D	Разрешение, dpi	Глубина цвета, бит	Скорость сканирования, сек/стр.	Цена, руб.
FS50B	4,7	2400×4800	12	355×4327	3202216
EPSON EXPESSION 10000XL	3,8	2400×4800	48	210 × 2973	106481
Microtek MII- 800XL Plus	4,7	3200×6400	16	305×40625	2086370
Microtek Medi- 5000	4,5	3200×6400	16	305×40721	748880

Важная характеристика – это глубина цвета, в конкретном случае это градация серого. Параметр в идеале должен стремиться к максимальному значению, так как дефект, который имеет приближенную плотность с плотностью контролируемого объекта не может быть обнаружен, несмотря на то, что в классическом способе расшифровки это вероятнее сделать. «При

большом объеме снимков имеет важное значение скорость сканирования» [10]. Основопологающим экономическим параметром служит цена сканирующей техники, в таблице 3.5 ценовой диапазон начинается от сотен тысяч и заканчивается миллионами рублей. Экспериментальная часть делится на нескольких этапов. Для начала отбирается просвеченная рентгенографическая пленка. Затем она подвергается расшифровке на негатоскопе для выявления дефектов. Далее происходит фотографирование плёнки, которая прикладывается на негатоскоп. Происходит оцифровка рентген пленок на специализированном сканере. В финале манипуляций проводится анализ полученных цифровых изображений при помощи ПО «ФОСФОМАТИК».

Основным пунктом части, которая посвящена изучению возможности повышения эффективности обнаружения дефектов, является сравнение метода декодирования рентгеновских изображений с применением классического метода с использованием негатоскопа и их оцифрованным вариантом, в котором используются компьютеры и программа «ФОСФОМАТИК». «Рентгенографические плёнки включали изображения с разными объектами контроля» [1]. Их отличие заключается в разных толщинах, диапазон которых составляет от 4 до 16 мм. Объектом контроля служат сварные соединения сосудов и резервуаров, применяемых на тольяттинской промышленной площадке. Радиографические изображения сварных швов были задействованы по причине актуальности эксплуатации радиографического метода контроля собственно для диагностирования на наличие брака в сварных соединениях. «Основное применение РК строится на контроле качества сварных швов» [49].

Отметим, что рентгенографическая плёнка фирмы Agfa Structurix D7 применяется в нашей работе, так как хорошо себя зарекомендовала. Плёнка состоит из мелкозерновой структуры, обладает высокой контрастностью и чувствительностью.

За образцы плёнки взяты просвеченные и проявленные в ходе экспериментов снимки. Все плёнки имеют отличие, у них разная плотность почернения, лежащая в границах от 1,7 до 3,3 D.

В нашем случае применяется схема с рисунка 3.3. Разница только в детекторе. Прежде применены «фосфорные» пластины, в данном способе это Agfa Structurix D7. Также соблюдены все параметры диагностирования, исключение составляет – время экспозиции, которое определяется в соответствии с номограммой рентген аппарата МАРТ - 200 и пленки D7.

В дополнении к эксперименту применяется фотоаппарат, необходимый, чтобы делать фотографии рентгенографической плёнки, в дальнейшем она прикладывается к негатоскопу. «Плюсы данного способа перевода в цифровой формат в том, что, имея качественное оборудование высокого разрешения, их можно фиксировать для обработки и перемещения в архив» [15].

Нами применяется негатоскоп – Н – 85/220. Он может просвечивать плёнку, соблюдая плотность в 3,7 D.

Рассмотрим и проанализируем рентгенографические изображения разных контролируемых объектов.

В расшифровке рентгенографической плёнки задействован дефектоскопист второго уровня, прошедший аттестацию по РК. В процессе расшифровывания плёнок дефектоскописту требуется постоянный просмотр снимков одного за другим, расшифровывая их и измеряя дефекты. Данный факт необходим для оценивания усталостного фактора на дефектоскописта и способности его находить брак, работая с большими базами пленок. Поставлено условие выявить дефектоскописту все возможные виды брака на плёнках.

### **3.6.1 Контроль объекта 4 мм**

Контролируется сварной шов, толщина металла которого составляет 4 мм, а чувствительность – 0,2 мм. Рентгенографические изображения обладают высокой контрастностью и качеством благодаря небольшой

толщине и незначительной доле рассеянного излучения, оптическая плотность – 2,2 D. Разобрано двенадцать рентгеновских изображений, время расшифровки каждого равняется десяти секундам. Для дефектоскописта не составило труда обнаружить все присутствующие дефекты, благодаря тому, что сам шов относительно невелик, имеет высокое качество изображения и обладает высокой чувствительностью. Время и усилия, затраченные на расшифровку «классическим» методом, примерно равнозначны методу расшифровки из цифрового формата. Из этого результата следует вывод, что нетрудно обнаружить дефекты в сварных соединениях сосудов и резервуаров, используя оба метода для опытных дефектоскопистов.

### **3.6.2 Контроль объекта 8 мм**

Шов, толщина которого равна восьми миллиметрам, длина самого шва составляет примерно триста миллиметров, чувствительность – 0,2 мм. Число контролируемых пленок – двенадцать. Качество изображений этих сварных швов было несколько ниже, чем в приведенном выше примере, поскольку доля излучения увеличилась. Оптическая плотность составляла 2,3 D. Время, затрачиваемое на расшифровку дефектного изображения, включая измерения каждого дефекта, составляет примерно пять минут. Мы имеем в виду дефектную пленку, содержащую большое количество единичных дефектов разного размера. Дефектоскопист ЛНК должен расшифровывать изображения с различным числом дефектов. В общем расшифровка с измерением занимает около сорока минут.

Один из существующих дефектов, выполненный расшифровкой обычным методом, был трудно идентифицируемым из-за слабого контраста самих дефектов и сварного соединения, их небольших размеров. После небольшой паузы, которая требовалась дефектоскопу, он начал расшифровывать цифровые рентгенографические изображения, используя программу «ФОСФОМАТИК». При расшифровке этого метода дефектоскописту потребовалось меньше времени. Процесс занял примерно двадцать две минуты.



Этот процесс обнаружения дефектов является более эффективным, благодаря способности программы увеличивать необходимые нам зоны, изменять контраст выбранных областей и производить измерения. Выполненная работа позволяет сделать вывод, что наибольшее значение имело время, необходимое для расшифровки. Классическая расшифровка занимает приблизительно сорок минут, а цифрового формата – двадцать две. Количество дефектов значительное число, их обнаружено двадцать пять. Пример цифрового рентгеновского изображения показан на рисунке 3.7. Он отображает область, в которой присутствует дефект. Из представленного рисунка 3.8 можно сделать вывод о высоком качестве сканируемых пленок. «Используя ПО «ФОСФОМАТИК», участок изображения, который интересует дефектоскописта, увеличивается, а контраст изменяется» [12]. В результате дефект может быть легко диагностирован.

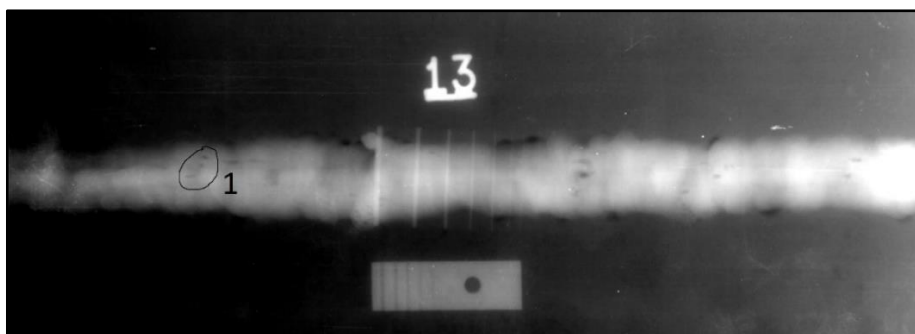


Рисунок 3.7 – Цифровое рентгенографическое изображение

Изображение с увеличенной площадью и изменением в контрасте показано на рисунке 3.8.

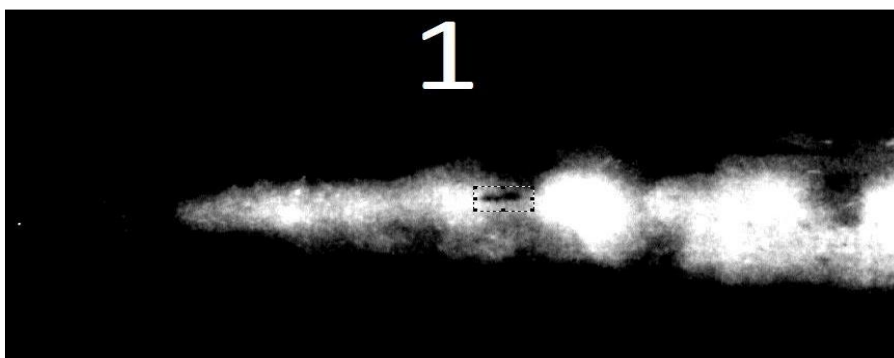


Рисунок 3.8 – Цифровое рентгенографическое изображение с изменениями в программе

На рисунке отчетливо стал виден брак. Данный дефект можно будет легко выявить на изображении, что уменьшит вероятность не выявления несплошности из-за невнимательности дефектоскописта.

### **3.6.3 Контроль объекта 16 мм**

Для 16 мм чувствительность определена значением 0,32 мм, проверялись четыре шва. Качество пленки оказалась с худшими свойствами, доля рассеянного излучения в контролируемом объекте была увеличена. Всего было исследовано восемь изображений. Четыре обладали средней плотностью потемнения 2,0 D, а остальные 2,9 D. Отдельные дефекты были трудноразличимы из-за малых размеров и, напротив, были почти неотличимы от прямого сварного соединения. Также отмечается ухудшение оптической плотности. Увеличение оптической плотности, достигнутое на максимальном уровне 3,1 D, сказалось на появлении «зерен» на пленке. Эталон оставался четким, требования к изображению были выполнены. Расшифровка изображений занимает пять минут при «классическом» методе, но при методе дешифровки с использованием цифровой версии, как правило, занимает три минуты.

## **3.7 Выводы о внедрении оцифровки в методику радиографического контроля технического состояния оборудования**

Расшифровка цифровых рентгеновских изображений увеличила обнаружение дефектов. Время поиска несплошностей сокращено: классическая расшифровка – восемьдесят пять минут, цифровых изображений – тридцать пять. «Эти результаты показывают существенную разницу во времени, затрачиваемым дефектоскопистом» [28]. Затрачивая меньше минут на расшифровку, сотрудник меньше устает, учитывая, что усталость оказывает значительное воздействие на внимательность при мониторинге брака. Применение программы «ФОСФОМАТИК» с цифровыми рентгеновскими изображениями позволяет выполнять различные действия: увеличивать область с детализацией, увеличивать контрастность, измерять размеры дефектов.

Как отмечалось ранее, одним из способов преобразования рентгеновских снимков в цифровую форму является их фотографирование с последующим нанесением изображений на негатоскоп. Фотооборудование, как и сканеры, может передавать реальные изображения пленок в цифровой формат (см. рисунок 3.9). Это оборудование должно иметь тот же диапазон параметров, что и сканирующее устройство. «Камера должна иметь определенные параметры: абберацию и угол обзора объектива» [21].



Рисунок 3.9 – Сфотографированная радиографическая пленка

При сравнении таких параметров в ценовом сегменте до 25 тысяч рублей, выбран сканер, в соответствии с его характеристиками, EPSON EXPRESSION 10000x1.

### 3.8 Оценка возможностей и перспектив по принципам ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Технология QuaD (QUality ADvisor) – современная система, позиционирующая себя, как измерительный инструмент тех параметров, которые отображают качество принятого решения и перспективы, помогающие принятию взвешенных решений, целесообразности вкладываемых материальных ресурсов в исследовательской работе.

Основополагающие технологии QuaD состоят из способности находить средневзвешенную величину по перечисленным ниже группам показателей, необходимых, чтобы усовершенствовать наши способы диагностирования:

1. Показатели, которые включены, чтобы оценить экономический потенциал:

- воздействие на эффективность деятельности организации,
- перспективные планы от проектов и производства,
- финансовая результативность.

2. Показатели, включающие оценку качества развития:

- динамика развития,
- ремонтпригодность,
- энергетическая эффективность,
- эргономика,
- общности.

Сравнительным способом был выбран метод сканирующей электронной микроскопии. Параметры оценки и его конкурентоспособности отражены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Оценка конкурентных технических решений

Показатель	Вес	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
------------	-----	-------	-------------------	------------------------	---------------------------

Показатели оценки качества					
Увеличение производительности труда	0,5	100	100	1	0,5
Простота применения	0,2	95	100	0,95	0,19
Цена	0,3	30	100	0,3	0,09
Финансовая эффективность	0,1	60	100	0,6	0,6
Итого	1	–	–	–	–

Для оценивания качества и перспектив, взятой по QuaD, используют выражение:

$$P_{cp} = B_i \times B_i, \quad (3.11)$$

где  $P_{cp}$  – средневзвешенное значение параметра;

$B_i$  – вес показателя;

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

$$P_{cp} = 0,5 \times 100 + 0,2 \times 95 + 0,3 \times 30 + 0,1 \times 60 = 75$$

$P_{cp}$  равный 75 означает, перспективность считается выше среднего, поэтому она подлежит развитию.

Материальные траты рассчитываются и осуществляются по формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \times \sum_{i=1}^m C_i + N_{расхi}, \quad (3.12)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхi}$  – количество видов ресурсов;

$C_i$  – цена единицы  $i$ -го вида;

$k_T$  – коэффициент, учитывающий логистические и закупочные расходы.

Затраты разработки указываем в таблице 3.7. Рассмотрим три варианта исполнения поставленной задачи по совершенствованию метода контроля путем внедрения оцифровки рентгенографических изображений. Первый вариант – внедрение метода при помощи сканера Microtek Medi-5000, негатоскопа Н-85/220 и персонального компьютера. Во втором варианте будут задействованы сканер Microtek Medi-3200, негатоскоп Н-85/220 и также персональный компьютер. Третий вариант представляет собой использование сканера EPSON EXPESSION 10000XL, негатоскопа Н-85/220 и персонального компьютера. Рассмотрев перечисленные варианты, выберем наиболее эффективный для нашего внедряемого решения.

Таблица 3.7 – Материальные затраты

Наименование	Единица изм.	Количество			Цена за ед. руб.			Затраты на материалы(ЗМ), руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп. 1	Исп. 2	Исп.3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	Лист	100	100	100	1,2	1,2	1,2	138	138	138
Картридж	Шт.	1	1	–	1000	1000	–	1150	1150	1150
Итого								1288	1288	1288

Стоимость спецоборудования рассчитывается исходя из действующих цен в прайс-листах. Затраты отображаются в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Затраты на приобретаемое оборудование

Оборудование	Количество единиц оборудования			Цена, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Сканер Microtek Medi- 5000	1	0	0	100	0	0	100	0	0
Негатоскоп Н-85/220	1	1	1	38	38	38	38	38	38
Сканер Microtek Medi- 3200	0	1	0	0	434,25	0	0	434,25	0

Персональный компьютер	1	1	1	20	20	20	20	20	20
Сканер EPSON EXPESSION 10000XL	0	0	1	0	0	675,5	0	0	675,5
Итого							158	492,25	733

Приобретая специальное оборудование, стоит учитывать траты, которые необходимо нести при установке и доставке устройств в пределах 15% цены оборудования.

### 3.9 Оценка эффективности исследования

Для выявления положительного эффекта от реализованного мероприятия необходимо рассчитать интегральный показатель, определяющий эффект от реализованного исследования. Для расчета показателя необходимо определить два средневзвешенных значения: финансовую и ресурсную эффективность.

Для получения интегрального показателя финансового эффекта при оценке бюджетных расходов необходимо использовать три и более изученных сценария исполнения. Вычислительная база (знаменатель в выражении 3.13), принимает наибольшее интегральное значение от реализации поставленных задач. Этот финансовый показатель можно выразить выражением:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.13)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$  – интегральный показатель финансового развития;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -ой версии;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимум стоимости выполнения проекта.

«Результат показывает многократное увеличение бюджета в числовой

форме, если это значение больше единицы или, если численное снижение цены исследования меньше единицы, но больше нуля» [3]. Информация отображена в таблице 3.9.

Интегральный показатель ресурсоэффективности может быть выражен формулой:

$$I_{pi} = \sum a_i \times b_i, \quad (3.14)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель  $i$ -го исполнения;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -ой разработки;

$b_i$  – оценка  $i$ -ой разработки в бальной системе.

Таблица 3.9 – Оценка вариантов исполнения проекта

Критерий	Коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Увеличение производительности труда	0,5	5	5	5
Удобство в эксплуатации	0,2	5	5	5
Цена	0,3	3	4	5
Финансовая эффективность разработки	0,1	5	5	5
Итого	1	–		–

$$I_{p1} = 5 \times 0,5 + 5 \times 0,2 + 3 \times 0,3 + 5 \times 0,1 = 4,4$$

$$I_{p2} = 5 \times 0,5 + 5 \times 0,2 + 4 \times 0,3 + 5 \times 0,1 = 4,7$$

$$I_{p3} = 5 \times 0,5 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,3 + 5 \times 0,1 = 5,0$$

Ресурсная и финансовая эффективность определяют интегральный показатель эффективности проектных вариантов, представленной выражением:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p1}}{I_{финр}}, I_{исп2} = \frac{I_{p2}}{I_{финр}}, \dots \quad (3.15)$$



Непосредственно сравнивая показатель эффективности вариантов, видно, что он позволяет находить сравнительную эффективность проекта и выбирать максимально оптимальный вариант из представленных в нашей работе. Сравнительная эффективность выражается следующей формулой:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}}, \quad (3.16)$$

Сравнив энерго- и ресурсоэффективность различных вариантов, рассмотренных в таблице 3.10, можно заключить, что самым подходящим будет являться 3 вариант.

Таблица 3.10 – Сравнительная эффективность разработки

Показатель	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Интегральный финансовый показатель	1	0,74	0,386
Интегральный показатель эффективности	4,4	4,7	5,0
Интегральный показатель эффективности	4,4	6,35	12,95
Сравнительная характеристика	0,69/0,34	0,49/1,44	2,94/2,04

Выводы к третьей главе.

Проделав данную работу, мы можем заключить, что цифровая радиография весьма эффективна, в особенности, можно сказать, что, в сравнении с классическим методом при расшифровывании рентгеновских плёнок с помощью негатоскопа, вводимый метод показал себя лучше. В выполненной работе можно отметить, что такие параметры, как чувствительность, пространственное разрешение, производительность, располагаются на высоком уровне, удовлетворяющим необходимым требованиям нормативно-правовой документации, которая затрагивает радиационный контроль.

Известно, что выявляемость дефектов это субъективный параметр. Дефектоскописты, выявляющие несоответствия, подвержены следующим факторам: усталости, некомфортным условиям при расшифровке снимков. Перечисленные отрицательные моменты всегда присутствуют в работе специалистов, но при выборе «способа» расшифровки плёнок данные факторы могут быть значительно уменьшены. С помощью оцифрованных рентгенографических изображений получилось уменьшить фактор усталости дефектоскопистов, снизив данный уровень за счёт внедренного метода.

Хочется отметить несколько важных преимуществ данного метода.

Первое, для создания визуальной картины оцифрованных изображений применяются дисплеи и мониторы, характеристики которых лучше оптимизированы для глаз людей.

Второе, программа «ФОСФОМАТИК» использована чтобы измерять дефекты, контролировать их увеличение и другие параметры, позволяющая улучшить эффективность от расшифровки плёнок. В результате произошло снижение общего времени расшифровки, вследствие того, что дефектоскопистам не приходилось подвергать глаза яркому свету, исходящего от негатоскопа, подвергавшего глаза специалистов дополнительному перенапряжению.

Итогом служит уменьшение общего времени, затрачиваемого при расшифровке. Время на расшифровку оцифрованного формата сорока пленок сократилось до 75 минут, вместо 145. При классическом методе расшифровки тридцати пленок было потрачено 110 минут, но при цифровом методе расшифровки всего 45.

На уменьшение затрат времени поспособствовала программа «ФОСФОМАТИК» (увеличение интересующей области, изменение контраста изображения и прочее). Подобные действия с плёнкой в классическом методе не представляются возможными.

Подытожив всё вышесказанное, можно с уверенностью сказать, что цифровой метод расшифровки рентгенографических плёнок, в сравнении с

классическим методом, существенно упрощает и повышает эффективность нахождения дефектов контролируемых объектов, что в свою очередь повышает надёжность контроля технического состояния сосудов и резервуаров на тольяттинском предприятии. Это несомненные доводы в пользу того, что нам удалось усовершенствовать метод контроля, связанного с рентгеновским излучением, который в свою очередь позволяет в более полной мере нивелировать риски в ходе эксплуатации оборудования на площадке ООО «Тольяттикаучук».

## Заключение

В данной диссертации была проведена работа по анализу действующих нормативно-правовых документов и законов, регламентирующих порядок работы методов неразрушающего контроля для диагностики технического состояния сосудов и резервуаров на примере тольяттинской промышленной площадки.

В диссертационной работе проведён анализ классификациям видов неразрушающего контроля, проводимых сосудам и резервуарам на предприятиях нефтехимической промышленности. Рассмотрены основные требования по эксплуатации методов НК. Рассмотрена история их возникновения, изучены авторы данных открытий. Проведен аналитический разбор по оцениванию выявляемости дефектов в металлах различными видами диагностирования. Проанализированы часто встречаемые виды дефектов в оборудовании, в частности, в сварных соединениях технических устройств. Брак данного оборудования способен привести к негативным последствиям как для сосудов, резервуаров, так и для человеческих жизней.

Проведен разбор типовых видов сосудов и резервуаров в ООО «Тольяттикаучук», которые задействованы в работе технологических установок. Описаны возможные негативные последствия от разгерметизации технических устройств, причинами которых могут быть дефекты в сварных соединениях, а также в основном металле. Проведен анализ для таких методов контроля, как капиллярная дефектоскопия, рентгенографический контроль, ультразвуковой контроль и гидравлические (пневматические) испытания. Их выбор обосновывается на том, что вышеуказанные способы диагностирования наиболее часто применяются на тольяттинской промышленной площадке. Показаны принципы действия каждого из методов НК. Продемонстрированы их сильные и слабые стороны. Обоснован выбор каждого метода в конкретном случае при эксплуатации оборудования. Разобраны технические устройства-дефектоскопы, которые находятся в

распоряжении лаборатории неразрушающего контроля ООО «Тольяттикаучук». Также продемонстрированы результаты работы каждого из методов.

Анализ методов диагностирования технического состояния сосудов и резервуаров показал, что самым часто используемым и удобным является метод рентгенографического контроля. Он чаще всего задействован при ремонтах технических устройств. В процентном соотношении это значение равняется 32% по всей площадке.

Анализ недостатков метода РК показал затруднения при расшифровке большого количества рентгеновской плёнки, а также при недостаточной видимости дефектов на снимках. Это может происходить как из-за человеческого фактора, вследствие усталости глаз дефектоскопистов, так и из-за недостаточной резкости снимка, которая не выявляется при расшифровке.

В диссертационном исследовании проанализированы наиболее встречаемые дефекты при просвечивании сварных соединений в рамках контроля технического состояния оборудования. Рассмотрены условия, при которых этот брак возникает при контроле данным методом.

На основе анализа от недостатков используемого метода РК в ЛНК нами было предложено внедрение мероприятия по совершенствованию данного способа диагностирования. Был предложен способ оцифровывания рентгеновских плёнок для упрощения выявления дефектных сварных швов.

Были рассмотрены основные требования к сканирующему оборудованию, их характеристикам и параметрам. Была представлена математическая модель перевода пленок в цифровой формат. Проанализированы способы «фосфорных» запоминающих пластин, способ цифровизации при помощи сканирующих устройств, а также при помощи фотоаппарата. Была проведена оценка положительного эффекта от внедрения мероприятия по оцифровке пленок в рентгенографическом НК.

Был получен показатель равный 75 по методике оценивания QuaD, что свидетельствует о положительном результате данного внедряемого мероприятия.

Таким образом, были достигнуты задачи, поставленные в диссертационном исследовании, а именно:

- проведен анализ нормативно-правовой и технической литературы, регулирующей и регламентирующей деятельность в современных способах и методах контроля сосудов и резервуаров;
- проведен информационно-аналитический обзор известных методов и средств контроля технического состояния оборудования;
- рассмотрена имеющаяся на предприятии техника диагностического контроля, её аналоги и прототипы;
- разработано техническое решение улучшения метода контроля технического состояния сосудов и резервуаров;
- исследован и проанализирован положительный эффект, достигаемый применением разработанного технического решения.

В итоге следует отметить, что эффективность от внедрения предложенного мероприятия в ООО «Тольяттикаучук» выражается в:

- сокращении затрачиваемого времени при расшифровке рентгенографических пленок;
- повышении выявляемости дефектов в сварных соединениях сосудов и резервуаров;
- уменьшении фактора человеческой усталости, вследствие которого понижается процент пропуска бракованных швов конструкций.

Перечисленные положительные составляющие указывают на целесообразность внедрения данного метода цифрового контроля рентгенографических изображений для диагностики технического состояния сосудов и резервуаров в ООО «Тольяттикаучук».

## Список используемой литературы

1. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // Инженерный вестник. 2015. №1. С. 533–538.
2. Апасов А.М. Исследование сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении плоских образцов из высокопрочной стали. Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 2. 235 с.
3. Багаев К.А., Козловский С.С. Оцифровка радиографических пленок. Что следует учесть при разработке и внедрении Российских стандартов // В мире неразрушающего контроля. 2013. №3. С. 25–27.
4. Баранов А.В. Цифровая радиография сварных соединений // Технология машиностроения. 2014. № 12. С. 60–61.
5. Башков О.В., Панин С.В., Семашко Н.А., Петров В.В. Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12Х18Н10Т / М.: АСТ. 2005. 110 с.
6. Борщак В.А. Сравнительный анализ характеристик и параметров типичных фотоматериалов и твердотельного элемента памяти // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2008. № 1. С. 44–48.
7. Ботвина Л.Р. Эволюция поврежденности на различных масштабах // Физика Земли. 2011. №10. С. 5–18.
8. Варламов А.Н. Опыт эксплуатации комплекса цифровой радиографии в полевых условиях // В мире неразрушающего контроля. 2014. С. 25–28.
9. Гнедин М.М., Точинский Е.Г., Чахлов С.В. Документальное обеспечение радиографического контроля сварных соединений при изготовлении изделий ответственного назначения на экспорт в страны ЕС // Контроль. Диагностика. 2013. №13. С. 170–172.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.

11. Грудский А.Я., Величко В.Я. Оцифровка радиографических снимков – это не очень просто // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 4. С. 32–34.
12. Гудинов К.К. Цифровая фотоаппаратура: Лабораторный практикум. СПб.: Изд. СПбГУКиТ, 2010. 68 с.
13. Заднепровский В.Ф., Талалаев А.А., Тищенко И.П., Фраленко В.П., Хачумов В.М. Программно-инструментальный комплекс высокопроизводительной обработки изображений медицинского и промышленного назначения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2014. № 1. С. 61–72.
14. Калинин Д.В. Статья «Современные методы технического диагностирования сосудов и резервуаров на химическом производстве» // Изд-во Аллея Науки, № 4(31). 2019. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.alley-science.ru/domains\\_data/files/03April2019/SOVREMENNYE%20METODY%20TEHNICHESKOGO%20DIAGNOSTIROVANIYa%20SOSUDOV%20I%20REZERVUAROV%20NA%20HIMICHESKOM%20PROIZVODSTVE.pdf](https://www.alley-science.ru/domains_data/files/03April2019/SOVREMENNYE%20METODY%20TEHNICHESKOGO%20DIAGNOSTIROVANIYa%20SOSUDOV%20I%20REZERVUAROV%20NA%20HIMICHESKOM%20PROIZVODSTVE.pdf)
15. Ковалевич О.М. Риск в техногенной сфере. М. Издательский дом МЭИ, 2006. 148 с.
16. Капустин В.И., Осипов С.П. О критериях сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии // Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 25–32.
17. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Том 1, книга 2, Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2008. 237 с.
18. Козинкина А.И., Рыбакова Л.М., Березин А.В. Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 4. С. 39–42.
19. Комплексы цифровой радиографии Фосфоматик. Руководство по эксплуатации и паспорт. СПб., 2006.



20. Майоров А.А. Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин – что это такое? // В Мире НК. 2004. № 2 (25). С. 42–43.

21. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // СФЕРА. Нефть и Газ. 2010. №1. С. 26–37.

22. Носов В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций с помощью метода акустической эмиссии / Дефектоскопия. 2009. № 2. С. 58–66.

23. Основы промышленной рентгеновской съёмки. Технический справочник. Токуо: Fujifilm Corporation. 2009. 34 с.

24. Пат. 2445616 Российская Федерация, G01N29/14 Способ неразрушающего контроля прочности металлоконструкций. Носов В.В., Ельчанинов Г.С., Тевосянц Д.С. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ») - № 2010150121/28; заявл. 06.12.2010; опубл. 20.03.2012. – 3 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://patentdb.ru/patent/2445616> (дата обращения: 12.03.2020).  
34

25. Погребан С.В. К вопросу об оценке качества сканированных изображений // Известия института инженерной физики. 2014. Т. 1, № 31. С. 34–39.

26. Приорова Е.М., Приоров Г.Е., Панфиленко В.А. Экологические проблемы и обеспечение экологической безопасности в Российской Федерации // Техносферная безопасность. 2018. №1(18). С. 92–97.

27. Степанов А.В., Ложкова Д.С., Косарина Е.С. Компьютерная радиография результатов практических исследований возможности замены пленочных технологий. М.: ВИАМ, 2010. С. 11–14.

28. Степаненко О.С. Сканеры и сканирование // М.: Издательство Диалектика, 2004. 288 с.

29. Троицкий В.А. Новые возможности радиационного контроля качества сварных соединений / Автоматическая сварка. 2015. № 7. С. 56–60.
30. Троицкий В.А. Современные системы радиационного неразрушающего контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2015. № 1. С. 23–35.
31. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений. Учебное пособие - СПб: СПбГУИТМО, 2008. 192 с.
32. Цветков Н.К., Новицкая К.А., Кологов А.В., Смирнов В.Г. Особенности применения комплексов цифровой радиографии при неразрушающем контроле корпусного производства // Технология машиностроения. 2014. № 7. С. 47–50.
33. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие понятия. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004648> (дата обращения: 18.02.2020).
34. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200107569> (дата обращения: 17.01.2020).
35. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200122220> (дата обращения: 23.01.2020).
36. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001358> (дата обращения: 23.01.2020).
37. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200138636> (дата обращения: 23.02.2020).

38. ГОСТ 29025–91. Дефектоскопы рентгентелевизионные. Общие технические требования. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023581> (дата обращения: 26.02.2020).

39. ГОСТ Р 56542-2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» имеет классы [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200123257> (дата обращения: 13.02.2020).

40. ГОСТ Р ИСО 24497- 2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200075955> (дата обращения: 03.03.2020).

41. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103148> (дата обращения: 03.03.2020).

42. РУА-93 Руководящие указания по эксплуатации и ремонту сосудов и аппаратов, работающих под давлением ниже 0,07 МПа (0,7 кгс/кв. см) вакуумом [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200058254> (дата обращения: 12.03.2020).

43. Нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением» [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 25.03.2014 № 116 (ред. от 12.12.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/499086260> (дата обращения: 03.03.2020).

44. Нормы и правила «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 21.07.1997 № 116 (ред. От 12.12.2017). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15234/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/) (дата обращения: 20.02.2020).

45. ISO 14096-2005 – Контроль неразрушающий. Оценка систем оцифровки радиографической пленки. Часть 2. Минимальные требования. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/40641.html> (дата обращения: 05.03.2020).

46. Akbashev, N.R. Solodovnikov, A. V. Example of an Expert Analysis of the Industrial Safety of Equipment // Chemical and Petroleum Engineering. Vol. 50. 2014. P. 542–546.

47. Muravin B. Acoustic emission method for diagnostics and structural health monitoring of critical structures during operation // HDKBR INFO Magazin. 2012. vol. 2. №3. P. 2–7.

48. Perner P. A comparison between neural networks and decision trees based on data from industrial radiographic testing // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 22. No. 1. P. 47–54.

49. Ritchie R.O., Lankford J. Small fatigue cracks: A statement of the problem and potential solutions // Materials Science and Engineering, № 84. 2007. P. 11–16.

50. Udaya B. Halabe, Ph.D., Hota GangaRao, Ph.D., Hema J. Siriwardane, Ph.D., Powsiri Klinkhachorn, Ph.D., REVIEW OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION TECHNIQUES FOR FRP COMPOSITE STRUCTURAL COMPONENTS, Department of Civil and Environmental Engineering, Morgantown, West Virginia, 2007. 225 p.

51. Zscherpel U., Ewert U., Bavendiek K. Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique – Examples and system theoretical analysis. Lyon, June, 2007. 32 p.