

На правах рукописи



**Ремизов Алексей Евгеньевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ ТРУБ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ  
СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СКАНЕРОВ-ДЕФЕКТОСКОПОВ**

Специальность: 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,  
баз и хранилищ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Петухов Игорь Геннадьевич**

Официальные оппоненты: **Великоднев Валерий Яковлевич**,  
доктор технических наук,  
технический директор  
ООО «Трубные инновационные технологии»

**Балюк Юрий Анатольевич**,  
кандидат технических наук,  
начальник управления диагностики ГПА  
ОАО «Оргэнергогаз»

Ведущая организация: **Научно-образовательный центр  
«Энергосберегающие технологии и техническая  
диагностика» при Российском государственном  
университете нефти и газа имени И.М. Губкина  
(НОЦ «ЭТ ТД» при РГУНГ им. И.М. Губкина)**

Защита состоится «20» марта 2015 г., в 12<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 511.001.02 на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 142717 Россия, Московская область, Ленинский р-н, пос. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2 этаж, конференц-зал ОНТЦ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте: <http://www.vniigaz.gazprom.ru>.

Автореферат разослан «    » января 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Курганова  
Ирина Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы:** Управление техническим состоянием и целостностью газотранспортной системы (ГТС) является важной задачей в системе функционирования единой системы газоснабжения (ЕСГ) ОАО «Газпром». Эффективность его в значительной степени зависит от достоверности и оперативности получения данных о наличии дефектов и их параметрах при техническом диагностировании объектов ГТС. Повышение эффективности оценки параметров дефектов линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ) способствует обеспечению и поддержанию необходимого уровня управления техническим состоянием и целостностью ГТС.

Повышение эффективности оценки параметров дефектов ЛЧ МГ может быть достигнуто следующими способами: совершенствование методов оценки параметров дефектов; развитие и создание новых методов и средств неразрушающего контроля и технического диагностирования; автоматизация технологий контроля и диагностирования ЛЧ МГ, совершенствование алгоритмов обработки и передачи результатов контроля; совершенствование испытательных стендов для определения характеристик средств технического диагностирования; строгое соответствие используемых методов и средств диагностирования требованиям ОАО «Газпром»; введение единой унифицированной методологии контроля труб и сварных соединений на всех этапах жизненного цикла ЛЧ МГ.

При плановых диагностических работах на объектах ЛЧ МГ ОАО «Газпром» используется ряд конструкций наружных сканеров-дефектоскопов, реализующих различные методы неразрушающего контроля, при этом результаты диагностирования одного и того же участка газопровода существенно различаются между собой.

Поэтому повышение эффективности оценки параметров дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ предлагается обеспечить за счет разработки и внедрения унифицированной методики испытаний наружных сканеров-дефектоскопов (НСД), что также позволит привести к рациональному минимуму количество марок НСД, пригодных для использования на объектах ЛЧ МГ ОАО «Газпром» и повысить возможность получения достоверных данных при диагностировании.

Исходя из вышесказанного повышение эффективности оценки дефектов магистральных газопроводов по результатам стендовых испытаний сканеров-дефектоскопов является актуальной темой.

**Цель работы:** повышение эффективности выявляемости, идентификации и оценки параметров дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ на основе анализа результатов стендовых испытаний автоматизированного диагностического оборудования.

### **Задачи работы:**

- анализ дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ, методов и средств неразрушающего контроля, используемых для их обнаружения;

- анализ технических характеристик и результатов испытаний НСД, применяемых для выявления, идентификации и оценки параметров дефектов; проведение и анализ результатов испытаний НСД на испытательном стенде.
- разработка унифицированной методики стендовых испытаний НСД и классификации дефектов трубной плети испытательного стенда;
- разработка системы группировки искусственных стандартизованных дефектов трубной плети испытательного стенда;
- разработка математических моделей функциональной зависимости двумерной оценки дефектов трубной плети испытательного стенда;
- разработка нормативной базы для обеспечения испытаний наружных сканеров-дефектоскопов.

### **Научная новизна**

Впервые разработана унифицированная методика стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов.

Впервые разработана и внедрена система группировки искусственных стандартизованных дефектов испытательного стенда по участкам.

По результатам стендовых испытаний разработана система выявляемости, идентификации и оценки дефектов, позволяющая минимизировать влияние «человеческого фактора» при выполнении диагностических работ.

Разработаны две математические модели функциональной зависимости глубины продольно-ориентированного трещиноподобного дефекта от его длины.

### **Практическое значение работы и реализация результатов исследований**

Комплекс испытаний позволил решить вопрос выбора наиболее эффективного оборудования для диагностирования ЛЧ МГ, в частности автоматизированных наружных сканеров-дефектоскопов по критерию выявляемости и оценки параметров дефектов. По результатам проведения испытаний, базирующихся на единых методических требованиях, устанавливается соответствие технических и дефектоскопических характеристик наружных сканеров-дефектоскопов требованиям ОАО «Газпром», что позволило сформировать и актуализировать реестр НСД, допущенных к применению при капитальном ремонте ЛЧ МГ ОАО «Газпром».

Разработанные и апробированные технические решения реализованы в положениях нормативных документов ОАО «Газпром»:

- Р Газпром 2-2.6-596-2011 «Организация и проведение технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов наружными сканерами-дефектоскопами при капитальном ремонте. Общие требования»

- Р Газпром 2-2.3-733-2013 «Организация и проведение испытаний наружных сканеров-дефектоскопов, предназначенных для автоматизированного неразрушающего контроля трубопроводов. Основные положения»

- «Временных типовых технических требований к наружным сканерам-дефектоскопам для автоматизированного неразрушающего контроля трубопроводов при капитальном ремонте» (утв. ОАО «Газпром» 24.05.2010 г.);

- «Типовых требований к испытаниям наружных сканеров-дефектоскопов перед их допуском к применению на объектах ОАО «Газпром» (утв. ОАО «Газпром» 11.02.2011 г.).

**В диссертации защищаются следующие основные положения:**

1) Унифицированная методика стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов, направленная на повышение качества оценки параметров дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ, содержащая в том числе:

- проверку минимально обнаруживаемых размеров искусственных дефектов различного типа;

- проверку минимального расстояния между двумя близко расположенными искусственными дефектами;

- проверку выявляемости искусственных дефектов с различным угловым положением;

- проверку выявляемости дефектов в кольцевых сварных соединениях.

2) Обоснование системы группировки искусственных стандартизованных дефектов испытательного стенда по участкам, предназначенным для выполнения проверок дефектоскопического оборудования с целью повышения качества оценки дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ.

3) Экспериментальное обоснование неидентичности дефектоскопической информации, полученной от разных типов диагностического оборудования по результатам стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов.

**Апробация работы.** Научные положения диссертации докладывались на Международной конференции «Системные проблемы надёжности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами. Инноватика 2009», на IV научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2012), V научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2013), V Международной научно-технической конференции «ГАЗОТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ» (GTS 2013), 68-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014».

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 3 в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в «Перечень...» ВАК Минобрнауки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 138 страницах; содержит 57 рисунков, 27 таблиц и список использованных источников из 70 наименований.

**Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** выполнен анализ характерных дефектов ЛЧ МГ, а также средств их обнаружения.

Вопросы анализа и классификации дефектов ЛЧ МГ освещены в работах В.В. Клюева, А.Н. Коваленко, З.С. Никифорова, Н.А. Орлова, Румянцева С.В, Ф.Р. Соснина, В.Н. Филинова, К.В.Фролова, В.В. Харионовского.

Дефекты труб и соединительных деталей трубопроводов подразделяются: дефекты проката листов; дефекты изготовления труб; дефекты механического происхождения; эксплуатационные дефекты. Выполнен анализ дефектов каждой стадии жизненного цикла трубы.

Основной задачей дефектоскопии является своевременное обнаружение дефектов трубопроводов согласно представленной классификации средствами неразрушающего контроля.

Выделены основные задачи неразрушающего контроля: обеспечение своевременного обнаружения опасных трещин и других дефектов, возникающих при эксплуатации ЛЧ МГ с выдачей информации об их наличии, местонахождении и размерах; предотвращение отказов и аварий; поддержание ЛЧ МГ в исправном состоянии на основе объективной оценки его технического состояния; проведение неразрушающего контроля в объеме, необходимом для принятия обоснованных решений по увеличению ресурса или сроков эксплуатации труб ЛЧ МГ.

В основу классификации видов и методов неразрушающего контроля положен процесс с момента взаимодействия поля или вещества с контролируемым объектом до получения первичной информации.

В данной главе рассмотрены методы неразрушающего контроля, применяемые при диагностировании ЛЧ МГ. В соответствии с нормами технологического проектирования магистральных газопроводов в понятие ЛЧ МГ включаются трубопровод с отводами, лупингами, перемычками, запорной арматурой, переходами через естественные и искусственные препятствия.

Неразрушающий контроль в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на 9 видов: магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, капиллярный.

Необходимо отметить, что средства НК, применяемые при диагностировании ЛЧ МГ, кроме визуального и измерительного контроля и толщинометрии, являются индикаторными.

Принятие решения о степени опасности дефекта, выявленного средствами неразрушающего контроля, базируется на заключении о характере, местоположении и размерах дефекта, а также на представлениях теории прочности об опасности дефекта такого рода. При этом должна учитываться вероятность правильной классификации дефекта, точность определения его параметров или оценки параметров дефектов в случае использования индикаторных средств. При недостаточной достоверности или точности результатов необходимо осуществить повторный контроль, причем, по возможности, дублирующими методами неразрушающего контроля, например, радиографическим, вихретоковым или их совокупностью или при помощи принципиально новых средств диагностирования.

Высокую степень достоверности и надежности неразрушающего контроля можно обеспечить путем его автоматизации, включая обработку информации посредством вычислительной техники и выдачи документа с заключением о качестве объекта контроля. Однако для любой степени автоматизации системы неразрушающего контроля достоверность и надежность результатов в той или иной степени будут определяться квалификацией оператора, эксплуатирующего систему.

В главе установлено, что объем неразрушающего контроля, проводимого при комплексном анализе состояния всей площади основного металла трубы, предусмотренного основным документом, рекомендованным ОАО «Газпром», «Инструкцией по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов» недостаточен.

Показаны перспективы применения НСД в процессе отбраковки труб при капитальном ремонте, сформулированы общие требования к ним.

**Во второй главе** выполнен анализ НСД, используемых для автоматизированного контроля ЛЧ МГ. Выполнен анализ реализуемых в НСД методов НК. Перечень типов наружных сканеров-дефектоскопов представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Перечень типов НСД, используемых для автоматизированного контроля ЛЧ МГ.

Наименование, тип наружного сканера-дефектоскопа	Метод НК	Область применения*	Организация-разработчик (поставщик), № ТУ	Примечания
АМДЭ-СТ	МК	ОМ, ПСС	ЗАО ДНТЦ «Дефектоскопия», Технические требования к дефектоскопу АМДЭ-СТ (б/н)	Серийный образец
ДНС 1000-1400	МК	ОМ, ПСС	ЗАО «Газприборавтоматикасервис», РНКС 1460.К0.00.00.00 ТУ	Серийный образец
Автоскан МДР	УЗК	ОМ, ПСС, КСС	ООО «МДР-диагностика», ООО УК «Троицкая Инвестиционная Компания» ТУ 427610-001-86715145-2009	Опытный образец
УСД-60-8К-А	УЗК	ОМ, ПСС, КСС	ООО «НВП «Кропус», ООО «СпецРемДиагностика» ТУ 4276-079-33044610-09	Серийный образец
NDT PipeScan	УЗК	ОМ, ПСС, КСС	ЗАО «ДИГАЗ», ТУ не представлен.	Серийный образец
A2075 SoNet	УЗК ЭМА	ОМ, ПСС	ООО «Акустические Контрольные Системы», АПЯС.412231.013 ТУ	Серийный образец
СД-1420	МК	ОМ, ПСС	ОАО «АВТОГАЗ», ТЗ НКГМ.427636.009 2008 г.	Опытный образец
АВТОКОН-МГТУ	УЗК	ОМ, ПСС, КСС	ФГУ НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, ТУ без номера	Серийный образец
АВТОКОН-ЭМА-МГТУ	УЗК ЭМА	ОМ, ПСС	ФГУ НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, АКЭ 08-00.00.00 ТУ	Опытный образец

\* -КСС – кольцевые сварные соединения, ПСС – продольные сварные соединения, ОМ – основной металл

Используемые НСД основаны на применении ультразвукового и магнитного видов НК. В работе выполнен анализ технических характеристик используемых наружных сканеров-дефектоскопов.

Проведён анализ результатов испытаний, выполненных наружными сканерами-дефектоскопами в период с 2006 по 2012гг. Произведённый анализ показал, что отработка НСД велась на различных стендах, не имеющих необходимого набора дефектов, характерных для труб и сварных соединений трубопроводов ОАО «Газпром» и в условиях отсутствия единого методологического подхода к организации и проведению испытаний НСД.

В результате исследований выявлена необходимость разработки испытательного стенда для проведения проверок характеристик НСД и введения единого методологического подхода к организации и проведению испытаний НСД.

**В третьей главе** разработана унифицированная методика стендовых испытаний, конструкции испытательного стенда, разработана система группировки искусственных дефектов, выполнен анализ результатов стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов.

Целью проведения стендовых испытаний является экспериментальное определение значений основных дефектоскопических и технических характеристик диагностического оборудования, представляемого различными фирмами для оказания услуг и оценка их соответствия требованиям технического задания, технических условий и нормативной документации ОАО «Газпром».

Доказано, что для обеспечения достоверности результатов стендовых испытаний необходимо проводить испытания по единой методике для всех наружных сканеров-дефектоскопов и на одном испытательном стенде.

В процессе стендовых испытаний экспериментально определены основные технические и дефектоскопические характеристики сканеров-дефектоскопов, в том числе: чувствительность, разрешающая способность, выявляемость различных типов дефектов, наличие (отсутствие) неконтролируемых зон, технологические характеристики (скорость и траектория сканирования, оперативность представления результатов, стабильность показаний и др.).

Для проведения стендовых испытаний на Опытно-экспериментальной базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ» создан испытательный стенд суммарной длиной 45, 5 метров, представляющий собой расположенную на опорах плеть из четырех труб внешним диаметром 1420 мм с фактической толщиной стенки 18,0 мм, 17,0 мм, 16,6 мм, 17,6 мм, имеющих естественные и искусственные дефекты в основном металле, стыковых и продольных сварных соединениях.

Дефекты в основном металле труб и сварных соединениях испытательного стенда разделены на искусственные и естественные. Искусственные дефекты испытательного стенда в свою очередь подразделяются на стандартизованные и нестандартизованные.

Разработана система группировки искусственных и естественных дефектов испытательного стенда по участкам, которые предназначены для выполнения проверок наружных сканеров-дефектоскопов:

- оценка минимально выявляемого размера дефектов в основном металле труб;

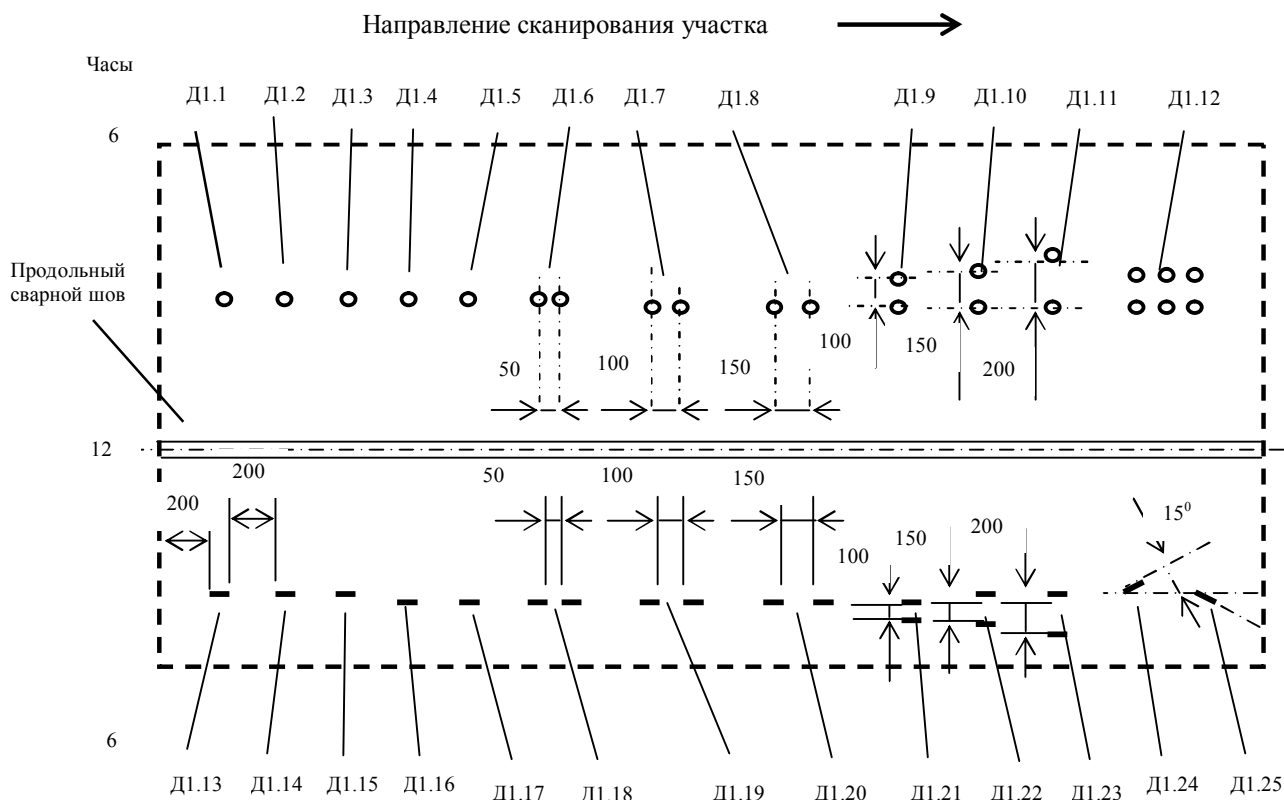


- оценка разрешающей способности (возможности отдельного выявления близкорасположенных дефектов в основном металле труб);
- проверка выявления дефектов с разным угловым положением;
- проверка наличия неконтролируемых зон в основном металле трубы;
- оценка точности определения координат дефектов в основном металле трубы;
- проверка выявляемости поперечных трещин в продольном сварном соединении и в основном металле труб;
- проверка наличия неконтролируемых зон в продольном сварном соединении и околошовной зоне;
- оценка точности определения координат дефектов в продольном сварном соединении и в основном металле труб;
- проверка выявляемости близкорасположенных дефектов (наличия акустической или магнитной «тени») в продольном сварном соединении и в основном металле труб;
- оценка минимально выявляемого размера дефектов в стыковом сварном соединении;
- оценка разрешающей способности (отдельного выявления близкорасположенных дефектов) в стыковом сварном соединении;
- оценка выявляемости дефектов в различных зонах стыкового сварного соединения;
- оценка точности определения координат дефектов в стыковом сварном соединении;
- проверка наличия неконтролируемых зон в стыковом сварном соединении и около шовной зоне
- оценка выявляемости естественных дефектов различных размеров в основном металле труб;
- оценка точности определения координат естественных дефектов в основном металле труб.

Схемы местоположения искусственных дефектов, представляющих собой пропилов, засверловки и зарубки различной глубины и длины на дефектных участках представлены на рисунках 1-3. Нанесено 93 стандартизованных искусственных дефекта, из них 38 засверловки, 55 пропилов. Типы, местоположение и размеры искусственных дефектов испытательного стенда были выбраны на основе:

- статистического анализа причин разрушений трубопроводов, а также анализа дефектов, выявляемых в процессе эксплуатации;
- анализа требований ОАО «Газпром» к параметрам надёжности ЛЧМГ;
- анализа технических характеристик НСД и физических возможностей используемых методов НК.

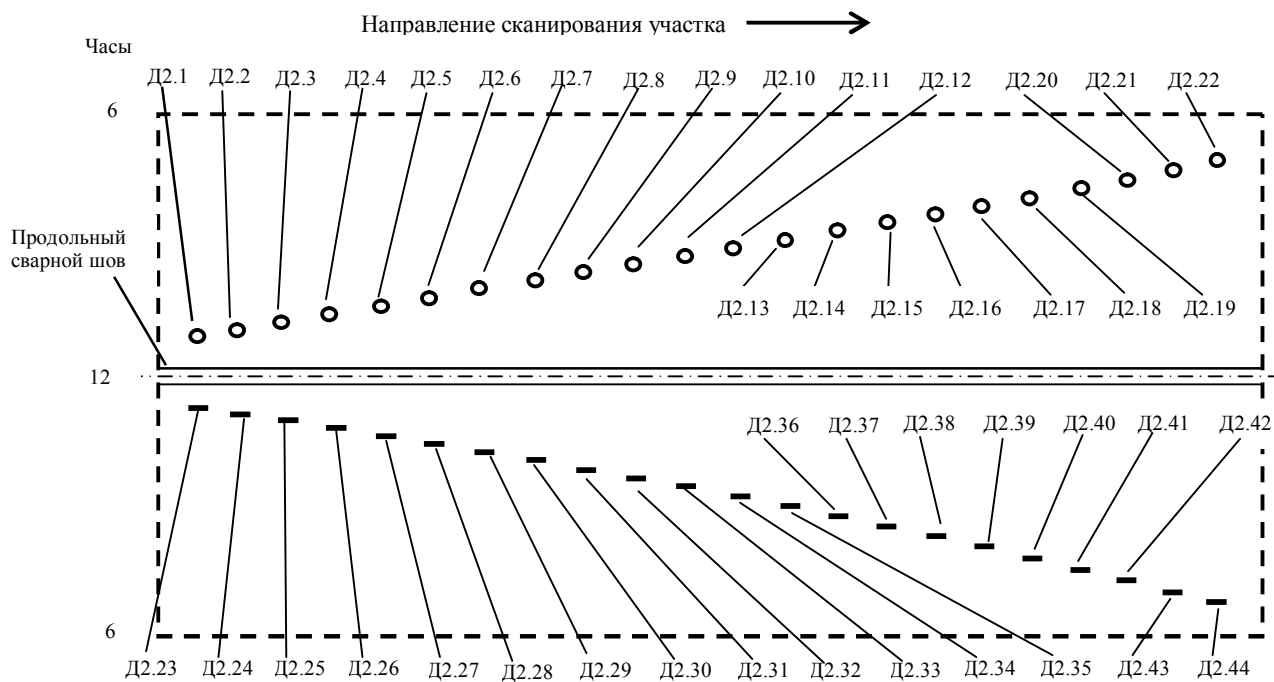
Выделен дефектный участок, содержащий 22 естественных дефекта (непровары, поры, шлаковые включения, трещины и др.) в стыковом сварном шве, предназначенный для проверки выявляемости различных типов дефектов и наличия неконтролируемых зон средствами неразрушающего контроля в стыковом сварном соединении.



Д1.1–Д1.12 – искусственные дефекты засверловки

Д1.13–Д1.25 – искусственные дефекты пропилов

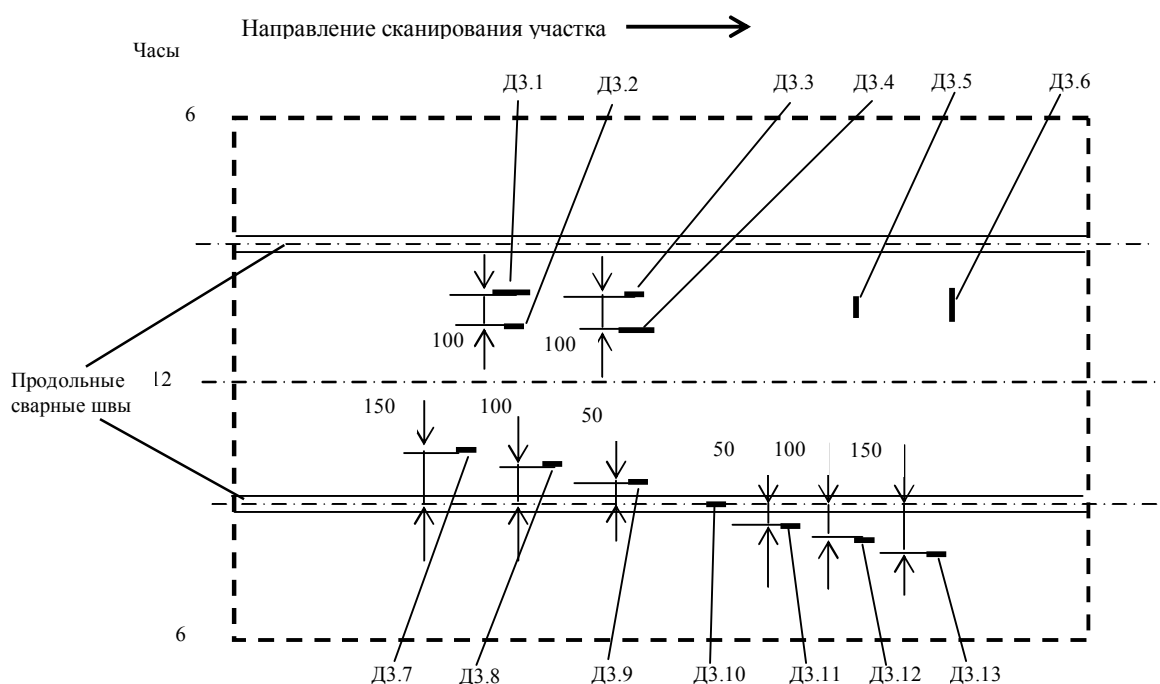
Рисунок 1 - Схема местоположения искусственных дефектов на дефектном участке № 1 испытательного стенда



Д2.1–Д2.22 – искусственные дефекты засверловки;

Д2.23–Д2.44 – искусственные дефекты пропилов

Рисунок 2 - Схема местоположения искусственных дефектов на дефектном участке № 2 испытательного стенда



ДЗ.1-ДЗ.13 – искусственные дефекты пропилы

Рисунок 3 - Схема местоположения искусственных дефектов на дефектном участке № 3 испытательного стенда

К нестандартизованным искусственным дефектам относятся пропилы, сквозные сверления, засверловки, зашлифовки различных глубины и размеров, нанесённые на трубы испытательного стенда до начала исследований.

Глубина трещиноподобных дефектов оценена с помощью тарировочного графика, построенного по показаниям вихретокового дефектоскопа и на основе результатов контролируемой шлифовки ряда дефектов различных глубины в соответствии с Инструкцией по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов.

Всего на испытательном стенде зафиксировано и внесено в разработанный автором «Паспорт искусственных и естественных дефектов испытательного стенда ООО «Газпром ВНИИГАЗ» 322 естественных дефекта, 16 дефектов механического характера возникновения, 29 нестандартизованных искусственных дефектов. Нанесено 93 стандартизованных искусственных дефекта, из них 38 засверловок, 55 пропилов. В результате обследования стыковых сварных соединений испытательного стенда было в общей сложности выявлено 277 дефектов, включая искусственные и естественные дефекты.

При обследовании дефектов труб испытательного стенда было установлено, что естественные дефекты в основном металле труб испытательного стенда представляют собой скопления трещин общей протяженностью от 50 до 700 мм с максимальной глубиной отдельных трещин от 1 до 3 мм. При этом в скоплениях трещин протяженностью менее 200 мм максимальная длина наиболее глубоких трещин составляет от 3 - 5 до 10 - 15 мм. На основании этого получена зависимость (рисунок 4) длины наиболее глубоких трещин от общей протяженности скопления трещиноподобных

дефектов, построенная по результатам детального неразрушающего контроля выборки из 12 естественных дефектов различных размеров.



Рисунок 4 - Зависимость длины максимального дефекта от общей протяженности скопления трещиноподобных дефектов основного металла труб испытательного стенда.

Стендовые испытания наружных сканеров-дефектоскопов проводят в следующем порядке:

- разворачивание сканера-дефектоскопа из транспортного в рабочее положение;
- настройка (проверка настроек) сканера-дефектоскопа для автоматизированного контроля сварных соединений и основного металла труб по образцам;
- установка (монтаж) сканера-дефектоскопа на испытательный стенд;
- сканирование (не менее двух раз) всех дефектных участков испытательного стенда с фиксированием результатов (дефектограмм) автоматизированного контроля;
- повторное сканирование дефектных участков, предназначенных для выполнения отдельных проверок с фиксированием результатов (дефектограмм) автоматизированного контроля;
- систематизация и анализ полученных результатов автоматизированного контроля, оформление результатов стендовых испытаний.

Одной из основных проверок наружных сканеров-дефектоскопов является оценка вероятности обнаружения дефектов. Оценку вероятности обнаружения дефектов наружным сканером-дефектоскопом в основном металле труб при стендовых испытаниях проводят:

- для трещиноподобных дефектов (по выявляемости искусственных дефектов пропилов);
- для дефектов язвенной коррозии (по выявляемости искусственных дефектов засверловки);

Вероятность обнаружения дефектов  $q$  по результатам диагностирования НСД трубной плети испытательного стенда определили отдельно для коррозионных дефектов (стандартизованные засверловки) и трещин (стандартизованные пропилы). Количество паспортизованных дефектов каждого типа для достижения уровня доверительной вероятности 90% должно

быть не менее 22 шт. Вероятность обнаружения дефектов  $q$  определена по формулам:

При  $n_n = 0$ :

$$q = \sqrt[N_d]{1 - \gamma} \quad (1)$$

При  $0 < n_n \leq N_d - n_n$ :

$$q = 1 - \frac{2z}{2t + z - [2 \cdot (n_n^2 + 2n_n) + n_n \cdot z - z^2] / (6 \cdot y)}, \quad (2)$$

где  $N_d$  – общее количество паспортизованных дефектов;  $\gamma$  – доверительная вероятность;  $z$  – параметр, который вычисляется по формуле:

$$z = 2 \cdot (n_d + 1) \cdot \left( 1 - \frac{1}{9(n_d + 1)} + u_\gamma \sqrt{\frac{1}{9(n_d + 1)}} \right)^3, \quad (3)$$

где  $n_n$  – количество пропущенных наружным сканером-дефектоскопом паспортизованных дефектов;  $y = 2N_d - n_n$ ;  $u_\gamma$  – квантиль нормированного нормального распределения, для выбранной доверительной вероятности 90% равный 1,282.

Для обеспечения испытаний нормативной базой разработан пакет технической документации испытательного стенда ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

На подготовленном испытательном стенде в соответствии с разработанными нормативными документами были проведены стендовые испытания НСД, перечень которых представлен в главе 2.

Диаграмма выявления наружными сканерами-дефектоскопами различных типов дефектов в основном металле и продольных сварных соединениях труб испытательного стенда при проведении испытаний приведена на рисунке 5. На рисунке 6 приведена диаграмма выявления наружными сканерами-дефектоскопами дефектов в кольцевых сварных соединениях.

Результаты выявления стандартизованных пропилов испытательного стенда, с указанием размеров искусственных дефектов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты выявления стандартизованных пропилов испытательного стенда.

	Глубина пропила, мм (% от толщины стенки трубы)				
	0,6 (3,3%)	1,0 (5,6%)	1,2 (6,7%)	1,8 (10,0%)	2,4 (13,3%)
A2075 SoNet	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
NDT Pipe Scan	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Выявлен	Выявлен
АВТОКОН	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен
АВТОКОН ЭМА	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
АВТОСКАН	Не выявлен	Не выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
УСД-60-8К-А	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
АМДЭ-СТ	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен
ДНС 1420	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен

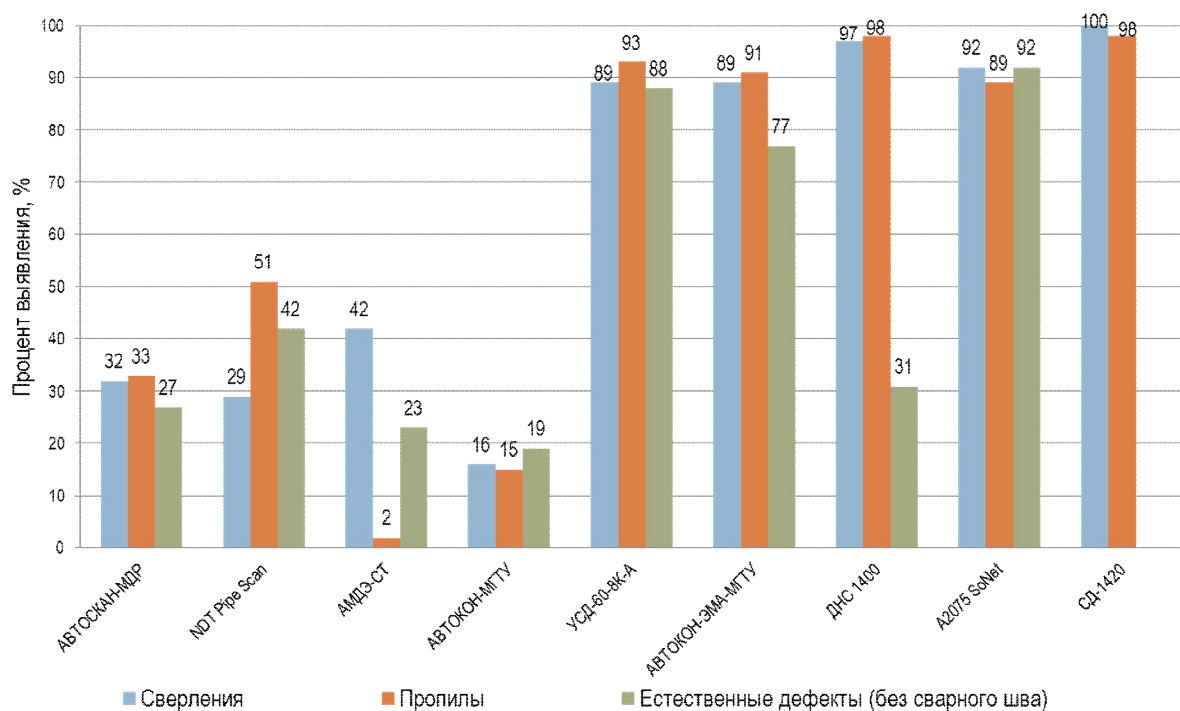


Рисунок 5 - Выявляемость различных типов дефектов в основном металле и продольных сварных соединениях труб испытательного стенда, %.

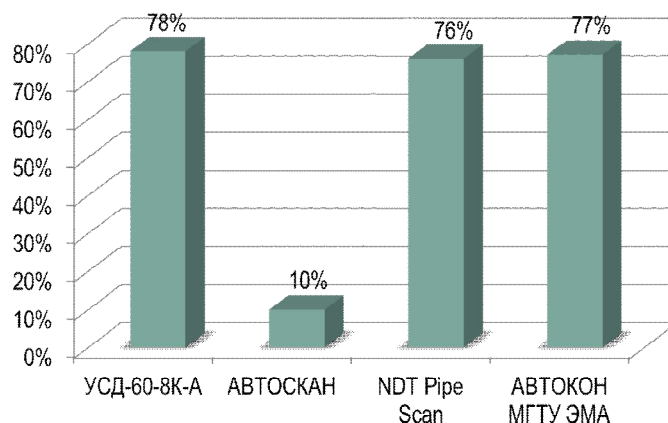


Рисунок 6 - Выявляемость различных типов дефектов в кольцевых сварных соединениях труб испытательного стенда, %

Результаты выявления стандартизованных засверловки испытательного стенда ООО «Газпром ВНИИГАЗ», с указанием размеров искусственных дефектов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты выявления стандартизованных засверловки испытательного.

	Глубина засверловки, мм (% от толщины стенки трубы)				
	1,2 (6,7%)	2,0 (11,1%)	2,4 (13,3%)	3,6 (20,0%)	4,8 (26,7%)
А2075 SoNet	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
NDT Pipe Scan	Не выявлен	Не выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
АВТОКОН	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен
АВТОКОН ЭМА	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
АВТОСКАН	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Выявлен
УСД-60-8К-А	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен
АМДЭ-СТ	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Не выявлен	Выявлен
ДНС 1420	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен	Выявлен

Также проанализированы следующие результаты испытаний НСД:

- оценка разрешающей способности наружных сканеров-дефектоскопов (возможности раздельного выявления близко расположенных дефектов), проведенная по факту выявления искусственных пропилов (длина 20,0 мм, ширина 0,5 мм, глубина 2,7 мм);
- оценка разрешающей способности (возможности раздельного выявления близко расположенных дефектов), проведенная по факту выявления искусственных засверловок (диаметр 10 мм, глубина 4,6 мм);
- выявляемость наклонных искусственных паспортизованных дефектов с разной угловой ориентацией;
- количество найденных естественных трещиноподобных дефектов (скоплений трещин) в основном металле труб с максимальной глубиной 2,0 мм (11% толщины стенки трубы) и более, общей протяженностью более 200 мм из выборки в количестве 10 дефектов;
- количество найденных естественных трещиноподобных дефектов (скоплений трещин) в продольном сварном соединении с максимальной глубиной от 1,7 мм до 2,0 мм (от 10% до 12% толщины стенки трубы) и длиной от 80 мм до 1700 мм из выборки в количестве 9 дефектов;
- прочие результаты в соответствии с разработанной методикой испытаний НСД.

Значения вероятностей выявления дефектов, рассчитанных согласно методике, изложенной выше, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Вероятность выявления искусственных дефектов испытательного стенда.

	Метод НК	Вероятность выявления искусственных дефектов-пропилов, %	Вероятность выявления искусственных дефектов-засверловок, %	Соответствие требованиям ОАО «Газпром»
SoNet	УК ЭМА	90	90	соответствует
NDT PipeScan	УК	45	23	не соответствует
Автокон	УК	9	9	не соответствует
Автокон ЭМА	УК ЭМА	90	90	соответствует
УСД-60-8К	УК	90	90	соответствует
Автоскан	УК	28	21	не соответствует
АМДЭ-СТ	МК	0	35	не соответствует
ДНС-1400	МК	90	90	соответствует
СД-1420	МК	90	90	соответствует

В главе 3 экспериментально доказана неидентичность результатов контроля участков труб испытательного стенда разными типами наружных сканеров-дефектоскопов, применяемыми различными фирмами при оказании услуг ОАО «Газпром». Для повышения эффективности выявления, идентификации и оценки параметров дефектов труб требуется выполнить дополнительные исследования трещиноподобных дефектов труб испытательного стенда на предмет выявления зависимости геометрических параметров дефектов труб испытательного стенда, для возможного внедрения полученной зависимости в алгоритм обработки дефектоскопической информации наружными сканерами-дефектоскопами.

**В четвёртой главе** выполнено исследование трещиноподобных дефектов на трубах испытательного стенда.

Собранная статистическая информация - измерения длины и глубины трещиноподобных дефектов труб испытательного стенда обрабатывались на основании метода отсева грубых погрешностей измерений.

Для отсева грубых погрешностей разработаны статистические методы обработки измерений, основанные на критерии Шовена, который позволяет «отбрасывать» данные, значительно отличающиеся от других.

На основании обработки статистической информации с использованием двух методов аппроксимации построены модели зависимости глубины трещины от её длины.

Целью исследования является определение функциональной зависимости между размерами глубины и длины трещиноподобных дефектов труб испытательного стенда для внедрения в алгоритм обработки диагностической информации наружных сканеров дефектоскопов с целью повышения надежности определения размеров трещиноподобных дефектов и для дальнейшего прогноза развития трещинообразования на магистральных газопроводах.

Было рассмотрено два способа построения регрессионных моделей зависимости глубины трещиноподобных дефектов от их длины в среде Excel с помощью графического метода:

- функция рабочего листа - построение линий тренда;
- специальная программа оптимизации, используемая для метода наименьших квадратов - «поиск решения».

Были построены графики линий тренда разных моделей для каждой трубы испытательного стенда и для всех труб в совокупности.

Величина достоверности  $R^2$  достигает своего наибольшего значения в большинстве случаев для *полиномиальной модели второй степени* для всех четырёх труб, как по отдельности, так и в совокупности.

Таким образом, после анализа графиков линий тренда разных моделей получена первая функциональная зависимость глубины трещиноподобных дефектов от длины следующего вида:

$$H_1(L) = -7,4*10^{-6}L^2 + 4,2*10^{-3}L + 1,3, \quad (4)$$

Для применения второго способа Excel для определения функциональной зависимости  $H=f(L)$  необходимо воспользоваться методом наименьших квадратов.

Выдвинута гипотеза (на основании предыдущих исследований), что функциональная зависимость глубины трещиноподобных дефектов от их длины имеет следующий вид:

$$H_T(L) = a_0 + a_1L + a_2L^2 \quad (5),$$

где  $H_T(t)$  — функциональная зависимость глубины трещин от их длины;  
 $H$  — глубина трещиноподобного дефекта трубы испытательного стенда;  
 $L$  — длина трещиноподобного дефекта трубы испытательного стенда;



$a_0 - a_5$  — параметры полинома.

Целью применяемого метода наименьших квадратов является минимизация отклонения теоретических значений глубин трещин  $H_{Ti}$  от эмпирических  $H_i$  значений при заданных значениях длин трещин  $L_i$ .

Отклонения теоретических значений от эмпирических могут быть как со знаком «плюс», так и со знаком «минус», поэтому вычислен квадрат отклонений  $(H_i(L) - H_{Ti}(L))^2$  (чтобы избежать негативного влияния знака «минус» на результат вычислений).

Для учета всех отклонений при заданных значениях  $L_i$  вычислена сумма квадратов разности отклонений  $F$ , которая в данном случае будет определяться формулой:

$$F = \sum_{i=1}^{286} \{H_i(L) - (a_0 + a_1L_i + a_2L_i^2)\}^2, \quad (6)$$

Таким образом, определена целевая функция  $F$ , для которой неизвестными параметрами являются три значения полинома  $a_0, a_1, a_2$ .

В итоге задача сводится к поиску оптимальных значений параметров полинома  $a_0, a_1, a_2$ , при которых целевая функция стремится к минимуму. Поэтому формулу (6) можно представить в ином виде:

$$\sum_{i=1}^{286} \{H_i(L) - (a_0 + a_1L_i + a_2L_i^2)\}^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

В результате компьютерного моделирования получена вторая функциональная зависимость следующего вида:

$$H_2(L) = 5,04 * 10^{-9} + 4,5 * 10^{-7} * L + 5,64 * 10^{-5} * L^2, \quad (8)$$

Далее на основании корреляционного анализа проведена оценка достоверности полученной модели методом наименьших квадратов.

Задачей корреляционного анализа является количественное определение тесноты связи между двумя признаками при парной связи или между результативным и несколькими факторными при множественной связи.

Теснота связи коррелируемых величин может быть определена по шкале Чеддока, представлена в таблице 5, в зависимости от расчетного значения коэффициента корреляции  $r_{H(L)}$

Таблица 5. Шкала Чеддока

Теснота связи	Значение коэффициента корреляции при наличии:	
	Прямой связи	Обратной связи
Слабая	0,1 — 0,3	(- 0,1) — (- 0,3)
Умеренная	0,3 — 0,5	(- 0,3) — (- 0,5)
Заметная	0,5 — 0,7	(- 0,5) — (- 0,7)
Высокая	0,7 — 0,9	(- 0,7) — (- 0,9)
Весьма высокая	0,9 — 0,99	(- 0,9) — (- 0,99)

Коэффициент корреляции для первой и второй моделей, полученные разными методами в Excel соответственно равны:

$$\begin{aligned} r_{H(L)1} &= 0,53; \\ r_{H(L)2} &= 0,47. \end{aligned} \quad (9)$$

В обоих случаях теснота связи является умеренной. Это означает, что обе модели не являются достоверными и не могут использоваться на практике для оценки функциональной зависимости глубины трещины от её длины, хотя такая зависимость имеет место.

Далее была проведена оценка надежности полученных коэффициентов корреляции.

Корректность корреляционного анализа гарантируется критериями надежности расчетных статистических характеристик для разных статистик, если расчетное значение коэффициента корреляции больше или равно нижней границе надежности связи, зависящей от объема выборки:

$$r_{\theta}[n] \leq r_{xy}, \quad (10)$$

где  $r_{\theta}[n]$  — нижняя граница надежности связи;  $n$  — общее количество всех наблюдений (объема выборки);  $r_{xy}$  — коэффициент корреляции.

Значение  $r_{\theta}[n]$  рассчитывается по соответствующим формулам для малых и больших статистик.

К большим статистикам относятся выборки, объем которых больше или равен 50, т.е.  $n \geq 50$ . В нашем случае имеет место большая статистика - количество трещиноподобных дефектов испытательного стенда  $n=286$ , т.к. рассматриваются данные измерений по всей совокупности труб. Для больших статистик значение  $r_{\theta}[n]$  рассчитывается по следующей формуле:

$$r_{\theta}[n] = \frac{\sqrt{n+12(\sqrt{n} \cdot r_{\min} + 3)} - \sqrt{n}}{6}, \quad (11)$$

где минимальное значение  $r_{\min}$  определяется по формуле

$$r_{\min} = \frac{\sqrt{n+36} - \sqrt{n}}{6}, \quad (12)$$

В результате оценки надежности полученных коэффициентов корреляции имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r_{\theta}[n] &= 0,33; \\ r_{\theta}[n] &< r_{xy1} = 0,53; \\ r_{\theta}[n] &< r_{xy2} = 0,47. \end{aligned} \quad (13)$$

При выполнении данных условий оценку надежности коэффициентов корреляции можно считать удовлетворительной.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Повышение эффективности оценки параметров дефектов труб магистральных газопроводов достигнуто за счёт разработки и внедрения унифицированной методики стендовых испытаний наружных сканеро-дефектоскопов

2. Разработаны требования и создан испытательный стенд для проведения стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов. Разработан пакет документации испытательного стенда, в том числе «Паспорт дефектов испытательного стенда».

3. Разработана и внедрена система группировки искусственных стандартизованных дефектов испытательного стенда по участкам, которые предназначены для выполнения проверок диагностического оборудования с целью повышение качества оценки дефектов труб и сварных соединений ЛЧ МГ.

4. Экспериментально доказана неидентичность дефектоскопической информации, полученной от разных типов диагностического оборудования по результатам стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов.

5. Проведены исследования и анализ зависимостей глубины трещиноподобных дефектов испытательного стенда от их длины. По результатам исследований выявлено, что для построения моделей зависимости геометрических параметров трещиноподобных дефектов испытательного стенда требуется подобрать комплексную функцию, которая с достаточной степенью точности (достоверности) описывала бы функциональную зависимость глубины трещиноподобных дефектов испытательного стенда от их длины.

6. По результатам проведенных стендовых испытаний актуализирован реестр наружных сканеров-дефектоскопов для автоматизированного неразрушающего контроля труб и сварных соединений ЛЧ МГ при капитальном ремонте, технические условия которых соответствуют требованиям ОАО «Газпром», регламентированными разработанными нормативными документами.

7. На основании методологии, представленной в работе, разработаны следующие нормативные документы Системы Стандартизации ОАО «Газпром»:

- Р Газпром 2-2.6-596-2011 «Организация и проведение технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов наружными сканерами-дефектоскопами при капитальном ремонте. Общие требования»

- Р Газпром 2-2.3-733-2013 «Организация и проведение испытаний наружных сканеров-дефектоскопов, предназначенных для автоматизированного неразрушающего контроля трубопроводов. Основные положения»

- «Временных типовых технических требований к наружным сканерам-дефектоскопам для автоматизированного неразрушающего контроля трубопроводов при капитальном ремонте» (утв. ОАО «Газпром» 24.05.2010 г.);

- «Типовых требований к испытаниям наружных сканеров-дефектоскопов перед их допуском к применению на объектах ОАО «Газпром» (утв. ОАО «Газпром» 11.02.2011 г.).

8. В соответствии с разработанными документами при участии автора проведены натурные испытания наружных сканеров-дефектоскопов на испытательном стенде Комсомольского ЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Югорск». Результаты находятся в стадии обработки.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ремизов А.Е., Дейнеко С.В., Толстов А.Г. Мониторинг текущей механической надежности парка ГПА КС Краснодарская. // Газовая промышленность, 2009. – № 9 (636). – С. 59-63.
2. Ремизов А.Е., Дейнеко С.В., Мониторинг вибродиагностики для оценки механической надёжности парка ГПА КС «Краснодарская» // Материалы Международной конференции и Российской научной школы «Системные проблемы надёжности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами. Инноватика 2009», 2009. – С. 51-55.
3. Ремизов А.Е., Вялых И.Л., Лазарев В.Л., Петухов И.Г., Зотов Д.А., Недопад И.В. Оценка технических параметров и анализ результатов стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов для автоматизированного контроля линейной части магистральных газопроводов // Наука и техника в газовой промышленности, 2012.–№ 4 (52). –С. 77-91.
4. Ремизов А.Е. Испытания наружных сканеров-дефектоскопов в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» // Тезисы доклада IV научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2012. – С. 43.
5. Ремизов А.Е. Перспективы развития методов и средств технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Тезисы доклада V научно-практической молодежной конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2013. – С. 96.
6. Ремизов А.Е., Вялых И.Л., Лазарев В.Л., Петухов И.Г., Зотов Д.А. Состояние и направления развития методов и средств технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Тезисы доклада V Международной научно-технической конференции «ГАЗОТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ», 2013. – С. 27-35
7. Ремизов А.Е., Вялых И.Л., Лазарев В.Л. Результаты стендовых испытаний наружных сканеров-дефектоскопов для автоматизированного контроля линейной части магистральных газопроводов // Промышленный сервис, 2013. – № 4(49). – С. 27-35
8. Ремизов А.Е. Состояние и направления развития методов и средств технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром» // Тезисы доклада 68-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014», 2013. – С. 43-44.
9. Ремизов А.Е., Вялых И.Л., Лазарев В.Л., Зотов Д.А. Функциональные испытания диагностического оборудования как элемент системы управления техническим состоянием и целостностью ГТС // Научно-технический сборник «Вести газовой науки. Управление техническим состоянием и целостностью газопроводов», 2014. – №1(17). – С. 29-35.

10. Ремизов А.Е, Вялых И.Л., Лазарев В.Л., Дейнеко С.В. Унификация процедур проведения испытаний средств технического диагностирования в системе управления техническим состоянием и целостностью ГТС // Промышленный сервис, 2014. – № 3(52). – С. 40-46.
11. Ремизов А.Е, Вялых И.Л., Лазарев В.Л., Дейнеко С.В. Состояние и направления развития методов и средств технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов ОАО Газпром» // Технологии нефти и газа, 2014. – № 6. – С. 56-63.

Подписано к печати «12» января 2015 г.

Заказ № 4287

Тираж 100 экз.

1 уч.-изд. л. ф-т 60×84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу:  
142717, Московская обл., Ленинский район, пос. Развилка