

На правах рукописи



Кусый Андрей Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВНОГО
МЕТАЛЛА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

кандидат технических наук
КРЫСЬКО Николай Владимирович
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры
«Сварка, диагностика и специальная
робототехника»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
БЕХЕР Сергей Алексеевич
ФГБОУ ВО СГУПС, заведующий кафедрой

кандидат технических наук
ЧЕРТИЦЕВ Василий Юрьевич
ООО «НПЦ «ЭХО+», руководитель
перспективных разработок

Ведущая организация:

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»»

Защита состоится «29» мая 2025 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного
совета 24.2.331.20 при Московском государственном техническом университете
имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации,
просим направить на имя ученого секретаря диссертационного совета по
указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Панкратов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Обеспечение безопасной и безаварийной эксплуатации магистральных газопроводов, протяженность которых в России превышает 182,5 тысячи километров, является важной современной задачей. В рамках ее решения применяется целый комплекс работ по техническому диагностированию, который обеспечивает оценку технического состояния трубопроводов, расчет величины их остаточного ресурса и определение объема ремонтных работ.

Высокая протяженность делает невозможным осуществление замены всех трубопроводов с истекшим сроком службы. Поэтому в настоящее время выполняется выборочный ремонт и переизоляция отдельных участков трубопроводов. Из-за чего первостепенную важность имеет качество и объем информации, получаемой при техническом диагностировании данных участков.

Одним из основных методов применяемых при техническом диагностировании трубопроводов является внутритрубный контроль, однако применяемые при внутритрубном контроле дефектоскопы имеют ограниченную чувствительность к дефектам на наружной поверхности трубопровода и не всегда обеспечивают выявление дефектов, таких как стресс-коррозионные трещины, глубиной менее 10% от толщины стенки трубы.

Для более полного выявления дефектов на наружной поверхности трубопроводов используют средства наружного контроля, которые реализуют различные методы неразрушающего контроля. При этом используются как ручной контроль, так и контроль с использованием автоматизированных сканеров-дефектоскопов. Несмотря на то, что автоматизированные сканеры-дефектоскопы существенно повышают производительность контроля, они не всегда позволяют классифицировать обнаруженные несплошности по типам и определять их параметры. Поэтому после выполнения контроля с использованием автоматизированных сканеров-дефектоскопов выполняется ручной подтверждающий контроль. Ручной подтверждающий контроль является очень трудоемким процессом, помимо этого он сильно зависит от квалификации специалиста, проводящего работы, поэтому результаты контроля могут содержать неточности, вызванные субъективным человеческим фактором.

В связи с этим актуальной задачей является создание технологии и оборудования для автоматизированного контроля, которые будут позволять в автоматическом режиме производить классификацию и оценку параметров обнаруженных несплошностей.

Цель работы: повышение производительности и исключение влияния человеческого фактора при неразрушающем контроле основного металла трубопроводов за счет исключения ручного контроля и создания технологии и оборудования, позволяющих в автоматическом режиме проводить классификацию и оценку параметров обнаруженных несплошностей.

Задачи исследования:

1. Выбрать методы наружного неразрушающего контроля основного металла трубопроводов, которые позволяют с высокой достоверностью выявлять поверхностные дефекты в автоматизированном режиме;
2. Экспериментально исследовать на предмет выявляемости и возможности классификации поверхностных дефектов основного металла трубопровода каждый выбранный метод неразрушающего контроля по отдельности;
3. Разработать модели классификации поверхностных дефектов на основе статистических методов и алгоритмов машинного обучения по результатам неразрушающего контроля комплексом методов;
4. Разработать модели определения размеров выявленных дефектов на основе алгоритмов машинного обучения по результатам неразрушающего контроля комплексом методов;
5. Разработать технологию и оборудование совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК, которые позволят определять тип дефекта и его параметры.

Методы исследования: результаты выполненной работы были получены за счет теоретических и экспериментальных исследований, разработки и обучения сверточных нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения. Эксперименты были выполнены с использованием ультразвукового дефектоскопа Sonaflex с электромагнитно-акустическим преобразователем, дефектоскопа Omniscan MX с вихретоковым модулем и дифференциальным вихретоковым преобразователем. Экспериментальные образцы содержали два типа искусственных дефектов – поверхностные пазы, изготовленные электроэрозионным способом, и вертикальные сверления. Разработка образцов для экспериментальных исследований, разработка и обучение сверточных нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения были выполнены с использованием стандартных программ, таких как КОМПАС 3D, Microsoft Excel, Python 3.0.

Ценность выполненных исследований: Разработана и обоснована технология, позволяющая за счет использования комплексного подхода к обработке данных неразрушающего контроля производить в автоматическом режиме классификацию и определение размеров поверхностных эксплуатационных дефектов.

Научная новизна работы:

1. Установлены границы областей неоднозначности, не позволяющих осуществлять классификацию поверхностных дефектов ультразвуковым и вихретоковым методами по отдельности, поскольку пересечение амплитудных значений сигналов от дефектов для ультразвукового контроля составляет порядка 17 дБ, а для вихретокового контроля для амплитудных значений – порядка 2 дБ, а для фазовых значений – порядка 0,2 рад.
2. Установлено, что для классификации и определения размеров поверхностных дефектов необходимо использовать комплексный контроль, состоящий из ультразвукового, вихретокового, визуального и измерительного методов контроля. На основе положений теории вероятностей и математической статистики по критериям дисперсионного анализа (ANOVA) и алгоритма «экстра

деревьев» (ЕТС) установлено, что на классификацию дефектов основное влияние оказывают амплитуда и фаза вихретокового контроля, а на определение размеров дефектов – амплитуда ультразвукового контроля, а также глубина и ширина, определенные по результатам визуального и измерительного контроля.

Практическая значимость работы:

Разработан и утвержден нормативный документ Р Газпром 27.3-3.2-005-2023 «Методика автоматизированного неразрушающего контроля линейной части магистральных газопроводов». Результаты исследований внедрены в ООО «Компания «Нординкрафт». Разработана общая схема совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК. Разработан и изготовлен опытный образец комплекса автоматизированного неразрушающего контроля линейной части магистральных газопроводов. Разработаны модели на основе машинного и глубокого обучения, позволяющие выполнять классификацию эксплуатационных дефектов на плоскостные (трещины, КРН) и объемные (язвенная, питтинговая коррозия), а также позволяющие определять глубину плоскостных дефектов, глубину и ширину объемных дефектов по результатам комплексного контроля.

Достоверность результатов и выводов подтверждается использованием современного оборудования, апробированных методик, а также использованием методов статистической обработки данных.

На защиту выносятся:

1. Области неоднозначности не позволяющие выполнять классификацию по результатам ультразвукового и вихретокового контроля по отдельности.
2. Влияние параметров систем НК на классификацию и определение размеров поверхностных эксплуатационных дефектов.
3. Технология проведения совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК, которая использует модели на основе алгоритмов машинного и глубокого обучения, позволяющие выполнять классификацию эксплуатационных дефектов на плоскостные (трещины, КРН) и объемные (язвенная, питтинговая коррозия), а также позволяющие определять глубину плоскостных дефектов, а также глубину и ширину объемных дефектов.

Апробация работы:

Основные результаты данной работы были доложены на III международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (ТЭК-2022) (г. Кемерово, 2022 г.), XXIII всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2023 г.).

Личный вклад соискателя заключается в выполнении исследовательской работы по теме диссертации на всех этапах. Автором был выполнен литературный обзор по теме исследования, экспериментальные исследования, статистическая обработка результатов, построение моделей анализа данных, разработана технология комплексного неразрушающего контроля поверхности основного металла магистральных газопроводов, а также подготовлены и сделаны доклады на конференциях и семинарах. Все результаты получены автором лично, либо при его

непосредственном участии, весь заимствованный материал отмечен в диссертационной работе ссылками.

Публикации по теме диссертации: опубликовано 7 научных работ, из них 6 входящих в базу данных Scopus и в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации: диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 40 таблиц, состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 183 наименований.

Содержание работы

Во введении показана актуальность работы и сформулированы цель и задачи диссертационных исследований.

В первой главе представлен анализ существующих средств для наружного неразрушающего контроля основного металла магистральных трубопроводов. Выполнен анализ технологий неразрушающего контроля и их физических принципов. Определен набор методов неразрушающего контроля, совместный анализ данных которых будет исследоваться в работе. Представлено описание существующих алгоритмов и технологий совместной обработки данных на основе математической статистики и теории вероятностей, машинного, а также глубокого обучения для решения задачи классификации и определения параметров выявленных дефектов основного металла.

Анализ существующих средств для наружного неразрушающего контроля основного металла магистральных трубопроводов показал, что в настоящее время для контроля используются ультразвуковые контактные, ультразвуковые бесконтактные, магнитные и вихретоковые наружные сканеры дефектоскопы. При этом все вышеперечисленные сканеры дефектоскопы являются индикаторными приборами, то есть они позволяют только выявить области, которые содержат поверхностные дефекты без возможности определения их типа и размеров. Поэтому после проведения контроля с помощью наружных сканеров дефектоскопов осуществляют подтверждающий ручной неразрушающий контроль. Наличие ручного подтверждающего контроля делает процесс неразрушающего контроля трубопроводов очень трудоемким, особенно с учетом сильного увеличения объема ручного контроля при наличии большого количества дефектов. Кроме того, ручной контроль сильно зависит от квалификации специалиста, который его выполняет. Результаты ручного контроля оформляются в виде заключений, которые сильно подвержены человеческому субъективному фактору. Для ухода от трудоемкого ручного контроля необходимо разработать технологию и оборудование позволяющие в автоматизированном режиме осуществлять 100 % наружный контроль основного металла трубопроводов для выявления эксплуатационных дефектов и автоматического определения их типа и размеров. Наиболее подходящими методами для этого являются ультразвуковой бесконтактный с ЭМАП, вихретоковый и визуальный и измерительный с использованием телевизионной камеры и лазерного профилемера.

Визуальный и измерительный, ультразвуковой с ЭМАП и вихретоковый методы неразрушающего контроля имеют свои преимущества и недостатки, и при

контроле каждым из методов по отдельности можно получать данные, которые будут неполным образом отображать наличие дефектов на поверхности трубопровода, или давать неоднозначные или даже противоречивые результаты. Поэтому для получения наиболее полной, точной и согласующейся информации о дефектах необходимо использовать цифровые технологии, которые позволят комплексно оценивать информацию, объединяя данные от каждого из применяемых методов контроля. Такой подход позволяет производить анализ данных в автоматическом режиме, что значительно снижает влияние субъективного человеческого фактора на результаты контроля. Анализ литературы показал, что для комплексной оценки данных неразрушающего контроля можно использовать такие алгоритмы как байесовский вывод, теорию Демпстера-Шафера, логистическая регрессия, полиномиальная регрессия метод опорных векторов дерево решений, случайный лес, градиентный и адаптивный бустинг, полносвязная нейронная сеть. Каждый из представленных алгоритмов может решать широкий спектр задач, и для выбора оптимального решения конкретной задачи необходимо выполнять тестирование разработанных моделей на подготовленном наборе данных.

Во второй главе проведены исследования возможностей выявления и классификации поверхностных эксплуатационных дефектов магистральных трубопроводов ультразвуковым и вихретоковым методами. Для исследований был подготовлен набор данных, в котором в качестве имитаторов поверхностных эксплуатационных дефектов использовались электроэрозионные пазы и вертикальные сверления. Поскольку возможности по выявлению поверхностных дефектов данными методами хорошо изучены, что отражено в проанализированной литературе, то в данном случае выполнялась проверка удовлетворяют ли выбранные конфигурации оборудования требованиям нормативной документации по выявляемости дефектов. Для выполнения проверки строились графики кривых вероятности выявления дефектов (Probability of Detection, POD), основанных на линейных моделях.

В результате проверки возможностей выбранной конфигурации оборудования ультразвукового контроля по выявлению поверхностных эксплуатационных дефектов было установлено что диаметр и глубина объемных дефектов, а также глубина залегания и угол наклона к поверхности плоскостных дефектов и амплитуда ультразвукового сигнала имеют сильную линейную зависимость с коэффициентами корреляции r^2 равными 0,84, 0,94, 0,87, 0,87, 0,73, соответственно. Ультразвуковой метод контроля позволяет с вероятностью 90% с учетом доверительного интервала 95% выявить объемные дефекты с диаметром 1,1 мм и/или глубиной 0,25 мм и плоскостные дефекты глубиной 0,1 мм, минимальным углом наклона 12° , а максимальным – 156° .

В результате проверки возможностей выбранной конфигурации оборудования вихретокового контроля по выявлению поверхностных эксплуатационных дефектов было установлено что глубина залегания, ширина раскрытия и угол наклона к поверхности плоскостных дефектов и амплитуда вихретокового сигнала имеют линейную зависимость с коэффициентами корреляции r^2 равными 0,78 и 0,83, 0,79, 0,82 соответственно. Также вихретоковый

метод контроля позволяет с вероятностью 90% с учетом доверительного интервала 95% по амплитуде выявить плоскостные дефекты глубиной 0,15 мм, шириной раскрытия 0,26 мм, с минимальным углом наклона 31° и максимальным углом наклона 167° .

Для исследования возможности классификации эксплуатационных дефектов по результатам контроля ультразвуковым методом с применением ЭМАП, генерирующих рэлеевские волны, все результаты измерений, полученные для вертикальных сверлений и электроэрозионных пазов, были нанесены на один график, представленный на Рисунке 1.

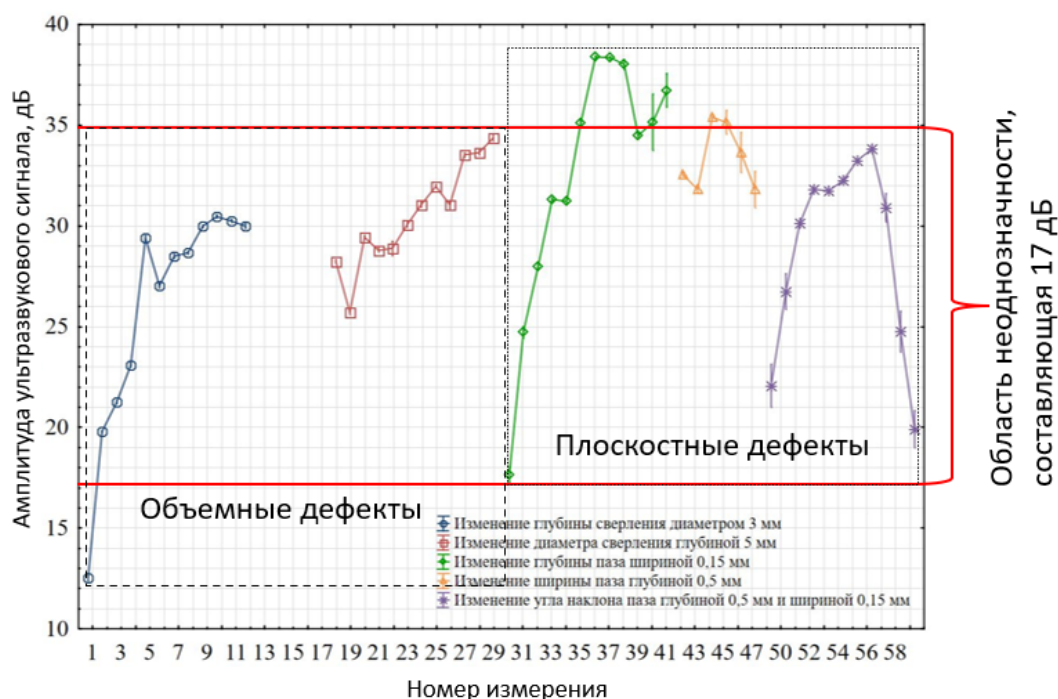


Рисунок 1. Оценка возможности классификации эксплуатационных дефектов по результатам УЗК с ЭМАП

Анализ Рисунка 1 показывает, что несмотря на то, что в целом амплитуды сигналов, отраженных от пазов, выше амплитуд, зарегистрированных от вертикальных сверлений аналогичных размеров, области амплитудных значений сигналов от дефектов этих двух типов перекрывают друг друга приблизительно на 17 дБ. Наличие этой области перекрытия амплитудных значений или области неоднозначности, приводит к тому, что при регистрации сигнала от дефекта, амплитуда которого попадает в эту область, невозможно будет определить относится ли дефект к плоскостному или объемному дефекту. Таким образом наличие области неоднозначности не позволяет только по результатам ультразвукового контроля выполнять классификацию эксплуатационных дефектов. Поэтому для получения более полной информации о классе дефектов необходимо комбинировать ультразвуковой контроль с другими методами.

Для оценки возможности классификации эксплуатационных дефектов по результатам контроля вихретоковым методом, все результаты измерений, полученные для вертикальных сверлений и электроэрозионных пазов, также наносились на один график. Поскольку у вихретокового сигнала есть два оцениваемых параметра – амплитуда и фаза, то возможность классификации по

ним оценивалась отдельно. Графики, полученные для амплитуды и фазы вихретокового сигнала, представлены на Рисунках 2 и 3 соответственно.

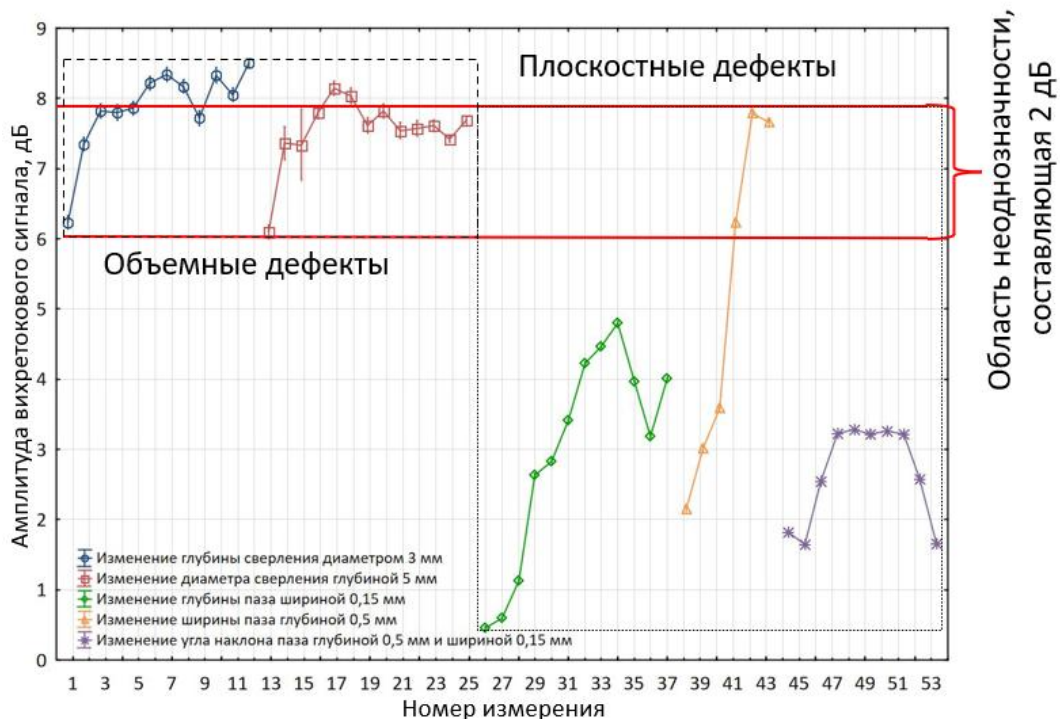


Рисунок 2. Оценка возможности классификации эксплуатационных дефектов по амплитуде по результатам вихретокового контроля

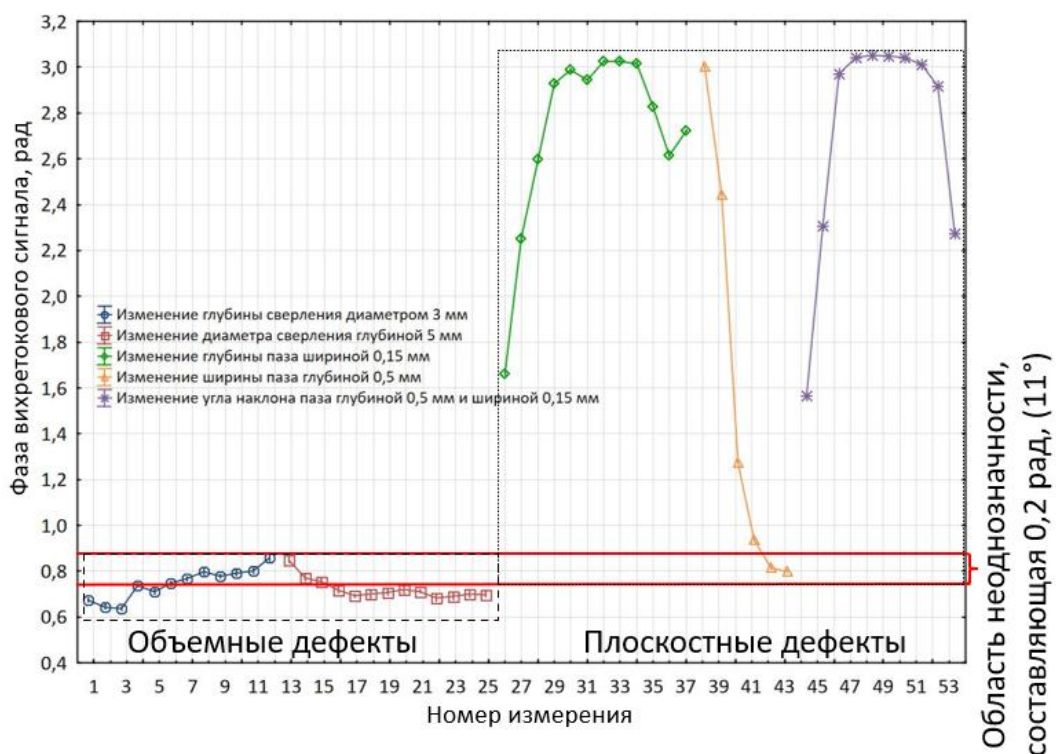


Рисунок 3. Оценка возможности классификации эксплуатационных дефектов по фазе по результатам вихретокового контроля

Как видно из Рисунков 2 и 3 как для амплитуды, так и для фазы вихретоковых сигналов присутствуют области неоднозначности, составляющие 2 дБ для амплитуды и 0,2 рад для фазы, в которых значения сигналов от объемных и

плоскостных дефектов накладываются друг на друга и не позволяют произвести классификацию дефектов по типам. В отличие от ультразвукового контроля области неоднозначности для вихретокового контроля имеют значительно меньший размер, однако для вихретокового контроля значительно выше вероятность появления ложных сигналов, которые связаны с невозможностью обеспечения идеального позиционирования ВТП относительно контролируемой поверхности. Наличие областей неоднозначности и ложных сигналов не позволяют выполнять однозначную классификацию эксплуатационных дефектов только по результатам вихретокового контроля, для успешной классификации необходимо комбинировать вихретоковый контроль с другими методами.

В третьей главе представлен анализ существующих моделей для идентификации коррозионных повреждений по данным, полученным по результатам телевизионного контроля, а также разработка собственных моделей для идентификации на поверхности трубопроводов питтинговой и язвенной коррозии.

Результаты анализа показали, что большинство существующих моделей выполняют классификацию изображений по цветовым признакам наличия ржавчины, при этом они могут определять различные степени ржавчины или выявлять другие повреждения. Однако для газопроводов является допустимым присутствие ржавчины или других изменений цвета поверхности трубопровода, поскольку из-за них не происходит снижения прочностных характеристик. Таким образом необходимо разрабатывать модель, которая при выявлении на изображении ржавчины различных цветов или не чистой поверхности будет классифицировать это изображение как бездефектное. В то время как при наличии на изображении питтинговой коррозии, при которой присутствует реальная потеря металла в каверне, изображение будет классифицироваться как дефектное с коррозией.

В настоящее время доминирующим подходом для классификации изображений, обнаружения объектов и других задач компьютерного зрения является применение сверточных нейронных сетей. Вначале были проанализированы возможности по классификации коррозионных повреждений уже существующих архитектур сверточных нейронных сетей, таких как AlexNet, ZFNet, VGGNet, Inception, ResNet и Xception. Для обучения моделей сверточных нейронных сетей был создан набор данных который содержит 5760 изображений, 4270 из которых представляют собой изображения без коррозии, а 1490 – с коррозией. Данный набор разбивался на обучающую, валидационную и тестовую выборки, в каждую из которых изображения отбирались со случайной перестановкой, при этом соотношение изображений без дефектов и с коррозией в наборах оставалось одинаковым.

Результаты тестирования существующих архитектур на подготовленном наборе данных представлены в Таблице 1. Как видно из Таблицы 1 наилучшие значения метрик имеет модель сверточной нейронной сети основанная на архитектуре ZFNet, точность (Accuracy) которой равна 96,7%, а F1-мера – 95,3%.

Таблица 1.

Значения метрик классификации рассматриваемых архитектур на тестовом наборе

Архитектура	Точность (Accuracy) (%)	F1-мера (%)	Площадь под кривой ROC	Площадь под кривой P-R
AlexNet	95,83	92,81	0,98	0,97
ZFNet	96,70	95,30	0,98	0,98
VGG16	94,10	90,48	0,97	0,95
VGG19	94,62	92,20	0,98	0,96
ResNet18	96,18	93,52	0,99	0,98
ResNet50	91,49	84,64	0,95	0,91
Inception V3	95,66	92,05	0,98	0,97
Xception	95,31	91,84	0,98	0,97

Несмотря на высокие показатели ZFNet имеет достаточно большое количество параметров обучения, в ее структуре находится flatten-слой и два полносвязных слоя имеющих 4096 параметров, при этом полносвязные слои имеют склонность к переобучению. Поэтому для дальнейшей работы было решено разработать на основе ZFNet собственную архитектуру, которая будет иметь меньшее количество обучаемых параметров и может обеспечить более высокую точность. Для поиска наиболее оптимальной архитектуры сверточной нейронной сети выполнялся поиск гиперпараметров с использованием байесовской оптимизации. Полученная в результате архитектура представлена в Таблице 2.

Таблица 2.

Архитектура разработанной сверточной нейронной сети с оптимизацией с использованием функции «Гауссовский процесс»

№	Слой	Вход	Размер фильтра	Количество фильтров	Шаг	Выход	Количество параметров
1	Conv1	224x224x3	7x7x3	32	2	109x109x32	4736
2	Pool1	109x109x32	3x3x1	-	2	54x54x32	-
3	Conv2	54x54x32	7x7x32	128	2	24x24x128	200832
4	Pool2	24x24x128	3x3x1	-	2	11x11x128	-
5	Conv3	11x11x128	3x3x128	384	1	9x9x384	442752
6	Conv4	9x9x384	3x3x384	384	1	7x7x384	1327488
7	Conv5	7x7x384	3x3x384	128	1	5x5x128	442496
8	Pool3	5x5x128	3x3x1	-	2	2x2x128	-
9	GAP	2x2x128	-	-	-	128	-
10	FC	128	-	1	-	1	129

Собственная модель сверточной нейронной сети по точности работы превосходит архитектуру ZFNet, а именно по точности (Accuracy) имеет показатель 98,44%, а по F1-мере – 97,3%. При тестировании разработанная модель верно классифицировала большинство изображений, а именно 568 штук, и ошиблась всего в 9 случаях, как это представлено на Рисунке 4.



Рисунок 4. Матрица ошибок вычислений по разработанной сверточной нейронной сети с оптимизацией с использованием функции «Гауссовский процесс» на тестовом наборе данных

В четвертой главе представлено исследование оценки влияния параметров, получаемых с применяемых систем НК, на классификацию и определение размеров эксплуатационных дефектов. Показана разработка моделей позволяющих выполнять классификацию и определение размеров поверхностных эксплуатационных дефектов. Представлена общая схема совместного анализа данных по результатам комплексного контроля ультразвуковым, вихретоковым, а также визуальным и измерительным методами.

В результате исследований было установлено, что для классификации и определения размеров поверхностных дефектов необходимо использовать комплексный контроль, состоящий из ультразвукового, вихретокового, визуального и измерительного методов контроля. При этом для каждого из методов характерны свои параметры, которые регистрируются применяемыми системами НК, как это представлено на Рисунке 5. Для системы ультразвукового контроля регистрируется максимальная амплитуда сигнала, для вихретокового контроля – максимальная амплитуда и фаза сигнала, для визуального и измерительного контроля – вероятность наличия коррозии, получаемая при телевизионном контроле, а также глубина и ширина отклонения профиля, регистрируемые при лазерной профилометрии. Показанные на Рисунке 5 параметры измерялись на экспериментальных образцах и в итоге был сформирован набор данных из 269 измерений, 149 из которых относятся к плоскостным дефектам и 120 – к объемным.

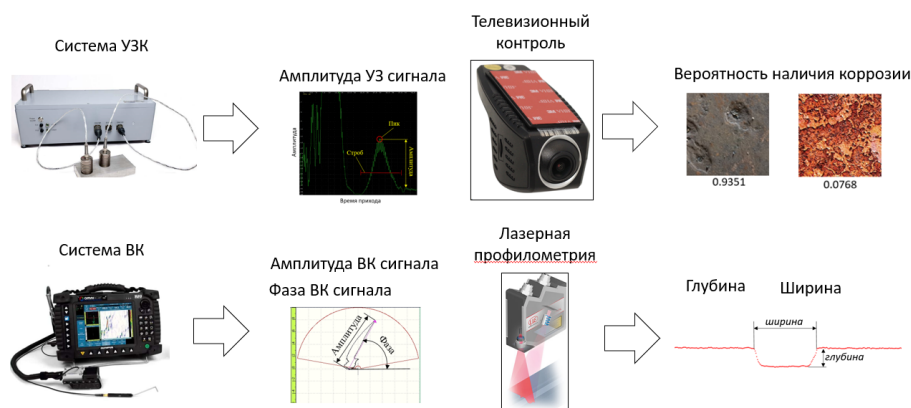


Рисунок 5. Параметры регистрируемые каждой из применяемых систем НК

На основе положений теории вероятностей и математической статистики по критериям ANOVA и ETC установлено, что на классификацию дефектов основное влияние оказывают амплитуда и фаза вихретокового контроля, а на определение размеров дефектов – амплитуда ультразвукового контроля, а также глубина и ширина, определенные по результатам визуального и измерительного контроля.

Для того чтобы выполнять классификацию дефектов по результатам комплексного контроля были разработаны модели классификаторы основанные следующих алгоритмах: Байесовский вывод, теория Демпстера-Шафера, метод опорных векторов, логистическая регрессия, дерево решений, случайный лес, градиентный бустинг, адаптивный бустинг, полносвязная нейронная сеть. Для каждой модели были подобраны свои оптимальные гиперпараметры. Оценка работоспособности представленных моделей производилась по таким метрикам как точность (Ассигасу) и F1-мера. Результаты расчета метрик представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Результаты оценки работоспособности разработанных моделей классификаторов

Алгоритм, на котором основана модель	Точность (Ассигасу), %	F1-мера, %
Байесовский вывод	96,1	96,05
Теория Демпстера-Шафера	96,29	96,25
Метод опорных векторов	95,64	95,59
Дерево решений	99,26	99,25
Случайный лес	99,63	99,63
Градиентный бустинг	99,35	99,34
Адаптивный бустинг	99,16	99,15
Логистическая регрессия	99,16	99,15
Полносвязная нейронная сеть	99,72	99,72

Как видно из Таблицы 3 все представленные модели имеют высокие значения метрик, таким образом для классификации дефектов можно использовать любую из них. Для дальнейшей работы было решено использовать модель, основанную на полносвязной нейронной сети.

Для того чтобы выполнять определение размеров дефектов по результатам комплексного контроля были разработаны модели регрессии основанные

следующих алгоритмах: метод опорных векторов, дерево решений, случайный лес, градиентный бустинг, линейная регрессия, полиномиальная регрессия и полносвязная нейронная сеть. Поскольку по результатам контроля необходимо определять три типа размеров дефектов, а именно глубину плоскостных дефектов, а также глубину и ширину объемных дефектов, то были разработаны модели отдельно для каждого типа размеров дефектов. Для всех моделей были подобраны свои оптимальные гиперпараметры. Оценка работоспособности моделей осуществлялась по таким метрикам как среднее арифметическое по всем итерациям для средней абсолютной ошибки (MAE) и корня из средней квадратичной ошибки (RMSE). Результаты оценки работоспособности моделей на обучающем и тестовом наборах для определения глубины плоскостных дефектов, а также глубины и ширины объемных дефектов приложены в Таблицах 4-6.

Таблица 4.

Результаты оценки работоспособности моделей для определения глубины плоскостных дефектов

Алгоритм	Ср. MAE обуч.	Ср. MAE тест.	Ср. RMSE обуч.	Ср. RMSE тест.
Метод опорных векторов	0,379	0,387	0,823	0,803
Дерево решений	0,001	0,031	0,004	0,137
Случайный лес	0,092	0,141	0,203	0,307
Градиентный бустинг	0,011	0,032	0,016	0,071
Линейная регрессия	0,450	0,482	0,634	0,666
Полиномиальная регрессия	0,029	0,051	0,041	0,085
Полносвязная нейронная сеть	0,277	0,304	0,515	0,549

Таблица 5.

Результаты оценки работоспособности моделей для определения глубины объемных дефектов

Алгоритм	Ср. MAE обуч.	Ср. MAE тест.	Ср. RMSE обуч.	Ср. RMSE тест.
Метод опорных векторов	0,795	0,827	1,032	1,057
Дерево решений	0,012	0,158	0,054	0,444
Случайный лес	0,070	0,189	0,150	0,355
Градиентный бустинг	0,002	0,103	0,003	0,199
Линейная регрессия	0,716	0,770	0,911	0,959
Полиномиальная регрессия	0,207	0,398	0,308	0,610
Полносвязная нейронная сеть	0,339	0,397	0,579	0,646

Таблица 6.

Результаты оценки работоспособности моделей для определения ширины
объемных дефектов

Алгоритм	Ср. MAE обуч.	Ср. MAE тест.	Ср. RMSE обуч.	Ср. RMSE тест.
Метод опорных векторов	0,094	0,097	0,13	0,131
Дерево решений	0,008	0,062	0,041	0,165
Случайный лес	0,026	0,067	0,065	0,143
Градиентный бустинг	0,001	0,019	0,001	0,053
Линейная регрессия	0,087	0,092	0,126	0,130
Полиномиальная регрессия	0,045	0,074	0,064	0,101
Полносвязная нейронная сеть	0,082	0,091	0,118	0,127

Как видно из Таблиц 4-6 наиболее оптимальной моделью для определения размеров дефектов во всех трех случаях является модель основанная на алгоритме градиентного бустинга, данные модели имеют минимальные значения усредненных MAE и RMSE. Так значение RMSE для глубины плоскостного дефекта составляет 0,071 мм, для глубины объемного дефекта – 0,199 мм, а для ширины – 0,053 мм.

На основании выполненных исследований была разработана общая схема проведения совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК схема которого представлена на Рисунке 6. Суть представленной схемы заключается в следующем: с систем контроля собираются значения амплитуды сигнала УК, амплитуды и фазы сигнала ВК, фото поверхности объекта контроля, глубина и ширина отклонения профиля, определенные по данным лазерного профилемера, данные параметры используются в модели классификации дефектов основанной на полносвязной нейронной сети в результате работы которой происходит определение типа эксплуатационного дефекта, а именно плоскостной дефект (трещина, КРН) или объемный дефект (язвенная, питтинговая коррозия). Результаты работы этой модели сопоставляются с данными о наличии или отсутствии объемных дефектов, которые получаются в результате работы модели классификатора на основе сверточной нейронной сети. Далее для плоскостных дефектов происходит определение глубины с помощью модели регрессии на основе градиентного бустинга по шести входным параметрам. В случае объемного дефекта две модели регрессии также по шести входным параметрам определяют его глубину и ширину.

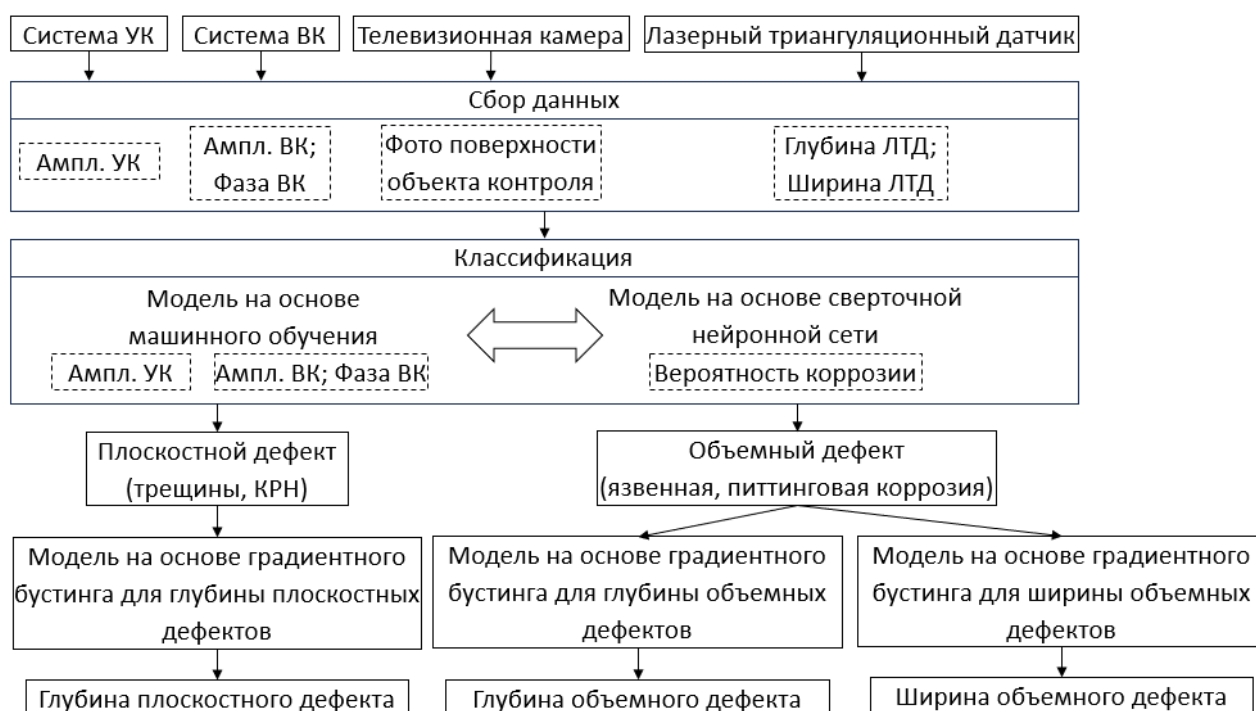


Рисунок 6. Общая схема проведения совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК

Для оценки работоспособности разработанных моделей использовался набор данных, который содержал 54 дефекта, 30 из которых были плоскостными, а 24 – объемными. Для данных дефектов было зарегистрировано 78 измерений: 30 соответствовало глубинам плоскостных дефектов, 24 – глубинам объемных дефектов и еще 24 – ширине объемных дефектов. В результате работы моделей классификация всех дефектов на плоскостные и объемные прошла без ошибок. Итоговое значение RMSE по определению параметров дефектов составило 0,011 мм, при этом 70 и 78 измерений (90%) находились в пределах одного RMSE, а 73 из 78 (94%) измерений находились в пределах двух значений RMSE.

В пятой главе приведено описание разработанного Комплекса автоматизированного неразрушающего контроля линейной части магистральных газопроводов, который реализует комплексный контроль с использованием систем ультразвукового, вихретокового, а также визуального и измерительного контроля, кроме того позволяет осуществлять классификацию дефектов с помощью разработанных моделей классификаторов и определять их размеры с помощью разработанных моделей регрессии в разработанном программном обеспечении. Оценка производительности показала, что применение Комплекса позволяет повысить производительность на 21,86% по сравнению с существующей технологией контроля. Представлена разработанная технология комплексного неразрушающего контроля поверхности основного металла магистральных газопроводов, которая легла в основу создания нормативного документа Р Газпром 27.3-3.2-005-2023 «Методика автоматизированного неразрушающего контроля линейной части магистральных газопроводов».

Основные выводы и результаты

1. Наиболее подходящими для автоматизированного контроля, который позволит исключить ручной подтверждающий контроль, являются следующие методы: ультразвуковой с ЭМАП, вихретоковый, визуальный и измерительный с использованием телевизионной камеры и лазерного профилемера.

2. Установлены границы областей неоднозначности, не позволяющих осуществлять классификацию поверхностных дефектов ультразвуковым и вихретоковым методами по отдельности, поскольку пересечение амплитудных значений сигналов от дефектов для ультразвукового контроля составляет порядка 17 дБ, а для вихретокового контроля для амплитудных значений – порядка 2 дБ, а для фазовых значений – порядка 0,2 рад.

3. Установлено, что для классификации и определения размеров поверхностных дефектов необходимо использовать комплексный контроль, состоящий из ультразвукового, вихретокового, визуального и измерительного методов контроля. На основе положений теории вероятностей и математической статистики по критериям ANOVA и ETC установлено, что на классификацию дефектов основное влияние оказывают амплитуда и фаза вихретокового контроля, а на определение размеров дефектов – амплитуда ультразвукового контроля, а также глубина и ширина, определенные по результатам визуального и измерительного контроля.

4. В результате проверки возможностей выбранной конфигурации оборудования ультразвукового контроля по выявлению поверхностных эксплуатационных дефектов было установлено что диаметр и глубина объемных дефектов, а также глубина залегания и угол наклона к поверхности плоскостных дефектов и амплитуда ультразвукового сигнала имеют сильную линейную зависимость с коэффициентами корреляции r^2 равными 0,84, 0,94, 0,87, 0,87, 0,73, соответственно. Ультразвуковой метод контроля позволяет с вероятностью 90% с учетом доверительного интервала 95% выявить объемные дефекты с диаметром 1,1 мм и/или глубиной 0,25 мм и плоскостные дефекты глубиной 0,1 мм, минимальным углом наклона 12° , а максимальным – 156° .

5. В результате проверки возможностей выбранной конфигурации оборудования вихретокового контроля по выявлению поверхностных эксплуатационных дефектов было установлено что глубина залегания, ширина раскрытия и угол наклона к поверхности плоскостных дефектов и амплитуда вихретокового сигнала имеют линейную зависимость с коэффициентами корреляции r^2 равными 0,78 и 0,83, 0,79, 0,82 соответственно. Также вихретоковый метод контроля позволяет с вероятностью 90% с учетом доверительного интервала 95% по амплитуде выявить плоскостные дефекты глубиной 0,15 мм, шириной раскрытия 0,26 мм, с минимальным углом наклона 31° и максимальным углом наклона 167° .

6. Разработана общая схема проведения совместного анализа данных по результатам комплексного контроля системами УК, ВК и ВИК, в которой используются модели на основе алгоритмов машинного и глубоко обучения, позволяющие выполнять классификацию эксплуатационных дефектов на плоскостные (трещины, КРН) и объемные (язвенная, питтинговая коррозия), а

также позволяющие определять глубину плоскостных дефектов, глубину и ширину объемных дефектов. Оценка работоспособности моделей была проведена на тестовой выборке содержащей как плоскостные так и объемные дефекты, классификация всех дефектов была выполнена без ошибок. Итоговое значение RMSE по определению параметров дефектов составило 0,011 мм, при этом 70 и 78 измерений (90%) находились в пределах одного RMSE, а 73 из 78 (94%) измерений находились в пределах двух значений RMSE.

7. Разработана технология комплексного неразрушающего контроля поверхности основного металла магистральных газопроводов, которая легла в основу создания нормативного документа Р Газпром 27.3-3.2-005-2023. Результаты исследований внедрены в ООО «Компания «Нординкрафт».

8. Разработан опытный образец комплекса автоматизированного неразрушающего контроля линейной части магистральных газопроводов, который реализует комплексный контроль с использованием систем ультразвукового, вихретокового и визуального и измерительного контроля и позволяет осуществлять классификацию дефектов с помощью разработанной модели классификатора и определять их размеры с помощью разработанной регрессионной модели в разработанном ПО. Оценка производительности разработанной технологии показала, что она позволяет повысить производительность на 21,86% по сравнению с существующей технологией контроля.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Кусый А. Г. [и др.] // Дефектоскопия. 2021. № 5. (0,56 п.л. / 0,25 п.л.)

2. Исследование выявляемости поверхностных плоскостных дефектов ультразвуковым методом с применением волн Рэлея / Кусый А. Г. [и др.] // Дефектоскопия. 2021. № 6. С. 26-34. (0,56 п.л. / 0,25 п.л.)

3. Подходы на основе цифровых технологий при комплексной диагностике различными физическими методами неразрушающего контроля / Кусый А. Г. [и др.] // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022) : сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. 2022. С. 141-145. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.)

4. Ультразвуковой контроль и комплексное применение методов дефектоскопии в процессе диагностирования магистральных трубопроводов / Кусый А. Г. [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13, № 1. С. 8-17. (0,62 п.л. / 0,3 п.л.)

5. Классификация поверхностных дефектов основного металла трубопроводов по результатам комплексной диагностики / Кусый А. Г. [и др.] // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 170-178. (0,56 п.л. / 0,25 п.л.)

6. Классификация и определение размеров поверхностных дефектов трубопроводов на основе результатов комплексной диагностики ультразвуковым, вихретоковым, визуальным и измерительным методами неразрушающего контроля / Кусый А. Г. [и др.] // Дефектоскопия. 2023. №12. С. 69-78. (0,62 п.л. / 0,3 п.л.)

7. Deep Learning Approach for Pitting Corrosion Detection in Gas Pipelines / Kusyy A. [et al.] // Sensors. 2024. Vol. 24. P. 1-17. <https://doi.org/10.3390/s24113563> (1,1 п.л. / 0,5 п.л.)