

На правах рукописи



БУКЛЕШЕВ ДМИТРИЙ ОЛЕГОВИЧ

**СНИЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПУТЕМ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ОКОЛОШОВНЫХ ЗОН**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Яговкин Николай Германович

Официальные оппоненты: **Глебова Елена Витальевна**
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО РГУ нефти и газа (НИУ) имени
И.М. Губкина / кафедра «Промышленная
безопасность и охрана окружающей среды»,
заведующая кафедрой

Краснов Антон Валерьевич
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет» /
кафедра «Пожарной и промышленной
безопасности», доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тюменский индустриальный
университет» (г. Тюмень)

Защита состоится «10» июня 2022 года в 11.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» по адресу:
450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из основных причин аварий на магистральных газопроводах, эксплуатируемых на территории Российской Федерации (РФ), является разрушение металла с внешней стороны труб по причине коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Известно, что отказы газопроводов вследствие КРН составляют 28-30% от общего числа отказов. Особенно часто коррозионное растрескивание возникает при наличии блуждающих токов, наводимых при пересечении газопроводов с электрифицированными участками железных дорог и высоковольтными линиями электропередач. На появление дефектов КРН существенное влияние оказывает процесс электрохимической коррозии, приводящий к образованию коррозионного повреждения и язв. Возникновение КРН на внешней поверхности труб непосредственно связано с воздействием микронапряжений, возникающих в местах образования коррозионных дефектов и приводящих к трещинообразованию при циклической нагрузке перекачки газа.

При диагностике сварных стыков и их зон микронапряжения определяются путем анализа распределения собственных магнитных полей рассеяния, возникающих в зонах дефектов КРН, при этом в зонах воздействия блуждающих токов погрешность результатов определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) составляет 30-35%, что не позволяет достоверно выявить трещиноподобные дефекты и установить локализации области зарождения КРН.

Для повышения безопасности транспорта газа разработан метод диагностики, позволяющий снизить погрешность результатов контроля микронапряжений в зонах воздействия блуждающих токов, точно определить наличие дефектов 1-го класса опасности, достоверно оценивать необходимость в отбраковке сварных соединений после капитального ремонта или

сооружения, а также определить с высокой точностью места локализации КРН и координаты дефектообразования.

Степень разработанности темы исследования

Существенный вклад в изучение причин образования КРН и поведения трубной стали в зонах разрушения внесли А.Г. Гареев, М.В. Чучкалов, которые установили механизм образования КРН, разработана модель распределения напряжений газопровода с дефектами КРН. Разработкой методов выявления КРН занимались П.В. Климов, В.А. Горчаков, В.О. Соловей, ими даны рекомендации по обнаружению КРН при диагностике. Предупреждением развития КРН занимались В.Л. Онацкий, Д.Г. Репин, ими были предложены решения по предупреждению развития стресс-коррозионного разрушения труб газопроводов. Исследование интенсивности напряжений в дефектных зонах сварных стыков магистральных газопроводов проводили А.Н. Касьянов, Л.Т. Щуланбаева, А.К. Гумеров, которые разработали модели формирования полей напряжений и деформаций в стенке трубопровода и установили зависимость интенсивности внутренних напряжений от наличия дефектов. Оценкой воздействия блуждающих токов на магистральные газопроводы занимались И.Ю. Копьев, В.А. Попов, О.Ю. Александров, А.В. Фуркин, О.В. Хариановский, ими установлена зависимость параметров коррозионных дефектов от параметров блуждающих токов и коррозионной среды, разработаны методы по снижению негативного воздействия и таким образом, наряду с существенными достижениями, вопрос диагностики сварных соединений магистральных газопроводов при воздействии на них блуждающих токов остается недостаточно исследованным.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема работы и содержание исследований соответствуют **пункту 12** области исследований, определяемой паспортом специальности 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль)»: «Разработка и совершенствование способов повышения безопасности

производственного оборудования, технологических процессов, вспомогательных операций и условий труда работников».

Целью диссертационной работы является повышение безопасности технологического процесса транспорта газа на основе применения разработанного метода диагностики, что позволит установить координаты локализации внутренних напряжений в зонах сварных соединений магистральных газопроводов.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1 Анализ причин разрушения труб магистральных газопроводов в зонах воздействия блуждающих токов.

2 Исследование влияния напряженно-деформированного состояния металла зон сварных соединений магистральных газопроводов на надежность и безопасность их эксплуатации при воздействии блуждающих токов.

3 Разработка метода повышения безопасности технологического процесса транспорта газа путем определения величины напряжений в околовшовных зонах сварных соединений магистральных газопроводов, находящихся в зоне воздействия блуждающих токов.

4 Применение метода диагностики и его апробация на участке магистрального газопровода «Уренгой-Новопсков» газотранспортной системы в ООО «Газпром трансгаз Самара».

Научная новизна

1 Создана статическая и динамическая модели коррозионного растрескивания под напряжением зон сварных соединений, которые позволяют установить координаты дефектообразования путем определения участков инкубационного развития дефектов.

2 Впервые разработан метод диагностики газопроводов, позволяющий повысить количество выявляемых дефектов и установить необходимость их отбраковки в зонах воздействия блуждающих токов за счет точной оценки напряженно-деформированного состояния металла элементов сварных соединений с использованием ультразвуковых исследований.

Положения, выносимые на защиту

1 Обоснование существенного влияния блуждающих токов на КРН сварных соединений на основе анализа и нерешенные проблемы диагностики стресс-коррозионных трещин при наличии блуждающих токов.

2 Модель процесса образования и роста внутренних напряжений в околошовных зонах сварных стыков магистральных газопроводов, позволяющая определить наличие и глубину коррозионного растрескивания, а также выполнять прогнозирование координат дефектообразования.

3 Разработанные на основе динамической модели принцип, способ и метод диагностик КРН, позволяющие установить наличие дефектов зон сварных соединений и координат их образования путем оценки по величине внутренних напряжений независимо от наличия блуждающих токов.

4 Применение разработанного метода диагностики зон сварных соединений, показывающего высокую точность результатов контроля при наличии блуждающих токов, в результате применения которого повышается безопасность эксплуатации и снижается количество отказов магистральных газопроводов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в научном исследовании процесса формирования коррозионного растрескивания под напряжением в околошовных зонах магистральных газопроводов. Кроме того, разработанные принцип, метод и способ диагностики, использование которых позволило повысить точность оценки технического состояния околошовных зон сварных стыков при воздействии блуждающих токов, могут быть эффективно применены на других участках магистральных трубопроводов.

Практическая значимость работы:

1 Применение метода диагностики в ООО «Газпром трансгаз Самара» на участке магистрального газопровода «Уренгой-Новопсков» позволило выявить в зоне воздействия блуждающих токов на 7% больше

дефектов, чем при использовании основных методов неразрушающего контроля.

2 Материалы исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ» в курсе «Обеспечение безопасности на нефтехимических предприятиях».

Методология и методы исследования

Методология исследования заключалась в анализе процесса коррозионного растрескивания при разной величине внутренних напряжений, оценки эффективности методов диагностики газопроводов и возможности определения величины напряжений в зонах воздействия блуждающих токов, оценки изменения параметров ультразвуковой волны в зонах деформаций трубной стали.

При лабораторных испытаниях и практическом эксперименте использовались методы металлографического исследования и неразрушающего контроля. Для обработки результатов были применены методы выявления математических зависимостей между величинами и параметрами, методами обобщения, теории вероятности и регрессионного анализа.

Степень достоверности и обоснованности диссертационного исследования подтверждается идентичностью результатов лабораторных испытаний с результатами теоретических с использованием принципов динамического моделирования и эксперимента на действующем объекте газотранспортной системы.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждались на: LXII международной научно-практической конференции «Теоретические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2016); III научно-практической конференции «Актуальные вопросы обеспечения безопасности жизнедеятельности» (Самара, 2016); II международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы в науке и практике» (Уфа, 2017); VI международном экологическом конгрессе «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов»

(Самара, 2017); II Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (Краснодар, 2018); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки в современном мире» (Уфа, 2018); XIII международной научно-практической конференции «Технические и физико-математические науки» (Москва, 2018); XXIII научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (Санкт-Петербург, 2018); Международной научной конференции теоретических и прикладных разработок «Научные разработки. Евразийский регион» (Москва, 2019).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 36 печатных работ, в том числе 9 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Получен Патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 14 таблиц; работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 145 наименований и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована общая характеристика работы, ее актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу статистических данных о надежности и безопасной эксплуатации магистральных газопроводов, выявлению причин их аварийности и исследованию механизма формирования дефектов коррозионного растрескивания под напряжением в элементах сварных соединений, являющихся основной причиной аварий и инцидентов в зонах воздействия блуждающих токов, анализу методов диагностики качества

сварных соединений магистральных газопроводов и возможностей используемого для этих целей оборудования.

Объединенные данные ПАО «Газпром» по количеству аварий по причине КРН, а также по дефектам труб и браку строительно-монтажных работ при сооружении или ремонте магистральных газопроводов приведены на Рисунке 1.



Рисунок 1 – Объединенные данные по количеству аварий на магистральных газопроводах

Наибольшая вероятность возникновения аварий связана с коррозией металла трубы и наличием дефектов, которые составляет 54 % и 24% от общего количества инцидентов. Дефекты наружной и внутренней коррозии связаны как с неизбежностью потери металла при эксплуатации газопровода, так и с процессом КРН, который наиболее распространён на участках воздействия на газопроводы блуждающих токов. Причиной наличия дефектов брака строительно-монтажных работ является неточная оценка технического состояния при допуске газопроводов в эксплуатацию после их сооружения или капитального ремонта.

Наиболее сильное коррозионное воздействие на трубы газопроводов оказывает электрохимическая коррозия, которая возникает при воздействии блуждающих токов и оказывает существенное влияние на процесс КРН.

Особенно проблема КРН присуща сварным соединениям и их зонам по причине неоднородности структуры и наличию остаточных напряжений сварки. Сварные соединения, находящиеся под воздействием блуждающих

токов, являются потенциальными участками стресс-коррозионного разрушения в результате процесса электрохимической коррозии. Таким образом, одной из основных причин аварийности магистральных газопроводов являются дефекты зон сварных соединений.

Установлено, что наиболее опасными и сложными для диагностирования являются дефекты 1-го класса опасности, к которым относятся дефекты КРН.

Анализ механизма образования дефектов показал, что при сварке труб магистральных газопроводов происходит изменение фазового состава трубной стали в зоне температурного воздействия, что способствует образованию внутренних напряжений, которые приводят к образованию трещиноподобных дефектов в околошовных зонах сварных соединений (ОШЗ) при эксплуатации газопроводов.

В результате исследований аварийности установлено, что для повышения точности результатов диагностики в зонах блуждающих токов и определения потенциально-опасных участков магистральных газопроводов, склонных к образованию дефектов КРН, наиболее рационально проводить их диагностику путем поиска дефектов по критерию величины внутренних напряжений.

Вторая глава посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния ОШЗ магистральных газопроводов для исследования процесса формирования стресс-коррозионных дефектов и определения величины внутренних напряжений при различной глубине КРН.

Установлено, что основными факторами, влияющими на формирование внутренних напряжений в ОШЗ газопроводов, является наличие остаточных напряжений, характеристики трубной стали, условия сварочного процесса и внутреннее давление перекачиваемого газа. Эти факторы необходимо учитывать при оценке величины внутренних напряжений, для чего требуется разработка статической модели с применением математического аппарата. При этом необходимо вывести зависимость пластической деформации металла сварного соединения от температуры:

Для одномерного элемента (участок заданной длины по оси x) функция температуры в заданных точках (T) имеет вид:

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x. \quad (1)$$

Коэффициенты α_1 и α_2 определяются с помощью условий в точках i и j на координатной оси (x) свариваемой поверхности:

$$T = T_i \text{ при } x = x_i,$$

$$T = T_j \text{ при } x = x_j.$$

На Рисунке 2 показана разбивка ОШЗ на расчетные элементы для учета граничных условий температурного воздействия, необходимая для создания трёхмерной модели.

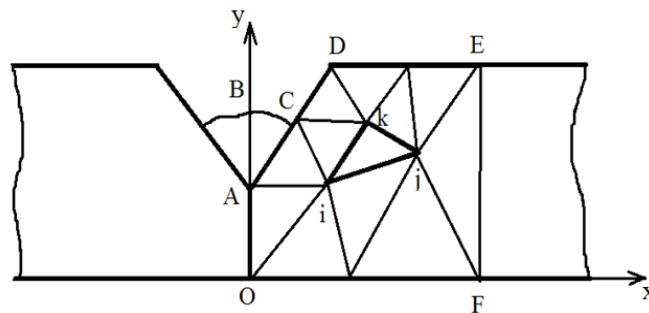


Рисунок 2 – Разбивка на расчетные элементы стыкового соединения

Расчет можно свести к плоской задаче. Для нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений определяется интерполяционная функция рассматриваемой поверхности по оси x и y .

Подставив в уравнение значения, определяется интерполяционная функция по оси x и y (объемного тела). Для приближенных условий сварки, нестационарное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q, \quad (2)$$

где λ_x и λ_y – коэффициенты теплопроводности Вт/(м·°К);

Q – удельная мощность источника теплоты, Вт/м³;

c – изохорная теплоемкость, Дж/(м²·°К);

ρ – плотность трубной стали, кг/м³.

Граничные условия:

а) на части граничной поверхности выполняется условие:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y - q + \alpha_T (T - T_\infty) = 0. \quad (3)$$

где q – удельная плотность теплового потока через поверхность, Вт/м²;

α_T – коэффициент теплообмена, Вт/(м³·°К);

λ_x и λ_y – коэффициенты теплопроводности;

T_∞ – температура окружающей среды;

l_x, l_y – длина рассматриваемого участка по оси x и y , м;

$T - T_\infty$ – разность температур, °К;

Q – удельная мощность источника теплоты, Вт/м³.

б) на части граничной поверхности выполняется условие:

$$T = T_B.$$

Уравнение (2) дает возможность рассчитать температуру на удалённой границе EF (Рисунок 2), описать теплоотдачу от поверхности, регулировать ввод теплоты.

Решение задачи методом конечных элементов основано на вариационном подходе, который устанавливает, что решение данного уравнения сводится к установлению минимума функционала:

$$X(T) = \int_V \left[\frac{1}{2} \lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - T \left(Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dV + \int_S \left[-qT + \frac{1}{2} \alpha_T (T - T_\infty)^2 \right] dS, \quad (4)$$

где $X(T)$ – минимум функционала при температуре T ;

λ_x и λ_y – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·°К);

dV – удельный объем, м³;

α_T – коэффициент теплообмена, Вт/(м³·°К);

S – количество тепла в теле – теплосодержание, Вт/(м³·°К).

После дифференцирования системы равновесия и совместности деформаций получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуем эти уравнения, с помощью выражения приращения деформаций через напряжения:

$$F(\sigma_{11}, \sigma_{22}) = \frac{1}{2\Psi} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (B_1 \sigma_{11} + B_2 \sigma_{22}) + \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} (B_1 \sigma_{22} + B_2 \sigma_{11}) \right), \quad (6)$$

где $\Psi = \frac{1}{2G} + \Phi$;

Φ – функция, зависящая от деформации;

$B_{1,2}$ – приращения деформации.

Далее проводятся расчеты при заданных граничных условиях и решенной температурной задаче, после чего находятся значения величин напряжений. Модель учитывает основные факторы НДС, но не учитывает их изменение при циклических режимах работы магистрального газопровода, не учитывает изменения факторов при циклической работе МГ и не предоставляет возможность определить уровень влияния каждого из факторов на процесс дефектообразования в ОШЗ.

Для решения этой задачи, с использованием метода конечных элементов, разработана динамическая модель, которая учитывает основные факторы формирования и роста величины внутренних напряжений, позволяющая оценить величину напряжений при различной глубине КРН и начале процесса трещинообразования, а также учесть дефекты, свойственные участкам газопроводов, залегающим в зонах воздействия блуждающих токов.

На начальном этапе моделирования в программном комплексе ANSYS задаются три разных параметра трещины КРН металла ОШЗ для оценки величины внутренних напряжений. На Рисунке 3 показана величина внутренних напряжений в зависимости от глубины трещины КРН, образовавшейся при воздействии электрохимической коррозии.

Установлено, что интенсивность внутренних напряжений возрастает с увеличением геометрических размеров дефектов КРН. Получены результаты величины эквивалентных напряжений при разной глубине трещины КРН.

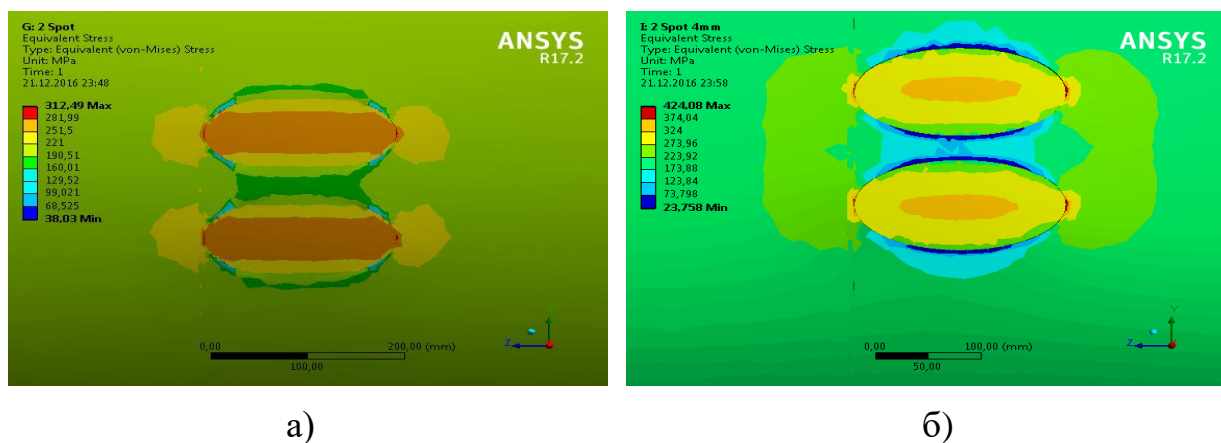


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений в фрагменте ОШЗ трубопровода с двумя трещинами КРН с различной глубиной:

а) 2 мм б) 4мм

При обработке результатов проведен регрессионный анализ и рассчитаны линии регрессии для линейной и параболической интерполяции, приведенные на Рисунке 4.

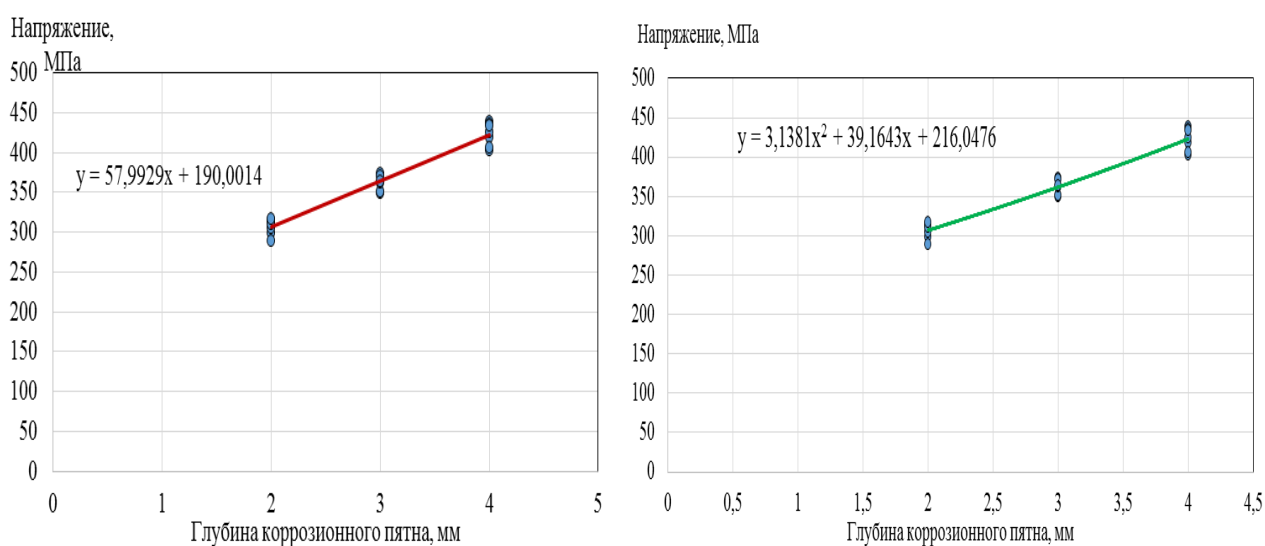


Рисунок 4 – Графики зависимостей линейной (слева) и параболической (справа)

Уравнения зависимостей:

- линейной: $\tilde{y} = 190,0014 + 57,9929x$,
- параболической: $\tilde{y} = 3,1381x^2 - 39,1643x + 216,0476$.

Здесь y – величина внутренних напряжений, МПа;

x – глубина коррозии, мм.

Оценка качества регрессий проведена с помощью индекса корреляции. Для линейной зависимости $R = 0,9753$, для параболической – $R = 0,9757$. Поскольку теснота связи между величиной внутренних напряжений и глубиной КРН практически одинакова для двух рассмотренных зависимостей (с точностью до 0,001), то можно выбрать более простую зависимость для дальнейшего рассмотрения в силу того, что ее удобнее интерпретировать.

Таким образом, по линейной модели можно описать следующее соотношение величины напряжений и глубиной КРН: при увеличении глубины трещины КРН на 1 мм величина внутренних напряжений возрастает на 57,9929 МПа (соответственно, в меньших измерениях можно сказать, что при увеличении глубины КРН на 0,1 мм величина напряжений возрастает на примерно на 6 МПа.).

Полученное соотношение позволяет определять размеры и глубину КРН при известной величине внутренних напряжений, а также изменения величины напряжений в дефектной области сварного соединения относительно бездефектного участка труб газопровода.

При моделировании изменения нагрузки давления в магистральном газопроводе установлено, что при критической величине напряжений в ОШЗ происходит образование дефектов 1-го класса опасности. Величина допустимых напряжений определяется согласно ГОСТ Р34233.1-2017 с учетом параметров используемой при моделировании марки трубной стали. Условия образования дефекта 1-го класса опасности в ОШЗ следующее: растрескивание происходит при достижении значения нагрузки $F = 126$ кН, что соответствует напряжениям 400-510 МПа. Рассчитанные при моделировании напряжения в разрезе ОШЗ магистрального трубопровода показаны на Рисунке 5.

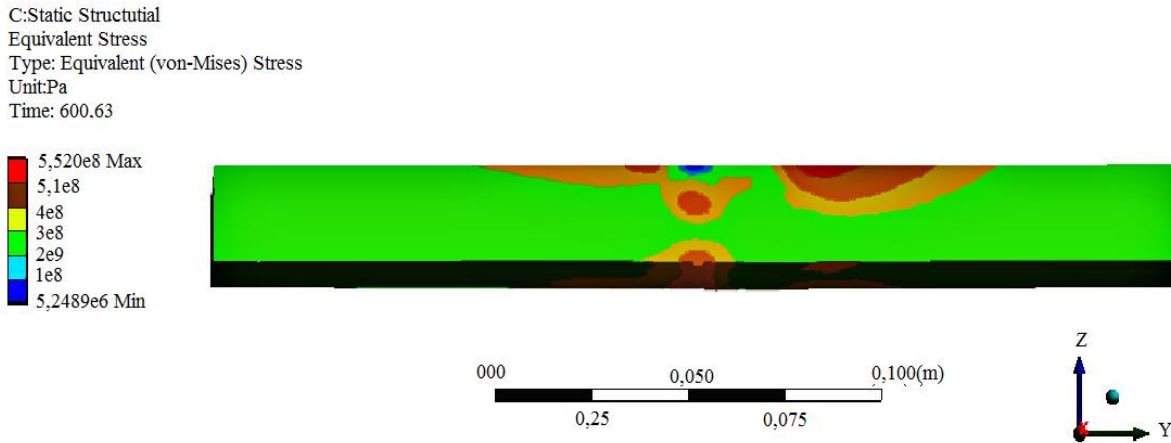


Рисунок 5 – Напряжения в разрезе околошовной зоны сварного соединения магистрального трубопровода

Таким образом определено, что наличие и характер дефектов околошовных зон напрямую зависит от величин внутренних напряжений. Рассчитанное значение величины напряжений 400-510 МПа позволило определить условие начала процесса дефектообразование в металле ОШЗ. Полученные результаты позволяют по величине внутренних напряжений установить наличие дефектов и выявлять потенциально-опасные участки, в которых дефекты КРН находятся в инкубационном периоде, тем самым повысить надежность и безопасность эксплуатации магистральных газопроводов.

Третья глава посвящена разработке принципа, способа и метода повышения безопасности эксплуатации магистральных газопроводов путем увеличения точности диагностики их сварных соединений, находящихся в зоне воздействия блуждающих токов.

Известно, что воздействие блуждающих токов не оказывает влияния на точность измерений диагностики при использовании ультразвука. Основное влияние на скорость распространения ультразвуковой волны (УЗВ) в металле оказывает наличие неоднородностей и внутренних напряжений. В ходе проведения исследований выявлено, что оценка скорости распространения ультразвуковой волны в металле ОШЗ позволяет определить наличие дефектов путем оценки величины внутренних напряжений.

Таким образом, принципом диагностики наличия дефектов в ОШЗ является определение координат участков неоднородности структуры трубной стали, имеющих более высокую величину внутренних напряжений относительно основного металла труб. Для реализации этого принципа разработан соответствующий метод.

Способ основывается на изменении акустических характеристик в зонах концентрации внутренних напряжений, что позволяет определить координаты этих зон оценкой изменения скорости проходящей через металл УЗВ. Метод диагностики заключается в оценке изменения скорости УЗВ, проходящей через контролируруемую зону сварного соединения, относительно скорости в бездефектных участках газопровода. Лабораторная проверка разработанного метода заключается в оценке изменения величины внутренних напряжений и скорости УЗВ, проходящий через металл околошовной зоны сварного соединения магистрального газопровода при различной величине создаваемой нагрузки на исследуемый образец.

Для обеспечения достоверности результатов лабораторных исследований, при каждой величине нагрузки, создаваемой в 3-х точках фрагмента, замеры скорости УЗВ выполнялись 40 раз. При выполнении визуального контроля ОШЗ установлено, что при нагрузке 120 кН произошло образование трещины, что соответствует значению нагрузки при дефектообразовании, смоделированной в ANSYS, при этом скорость УЗВ волны, проходящей через контролируемый участок ОШЗ, упала на 2,0% относительно изначальной скорости.

Для определения величины внутренних напряжений используется действующий метод диагностики на основе магнитной памяти металла, позволяющий обнаружить дефекты и выполнить отбраковку по значениям градиента магнитного поля. Нахождение аналитической зависимости между градиентом изменения магнитного поля, характеризующего величину внутренних напряжений в контролируемом элементе, и скоростью УЗВ проведен регрессионный анализ результатов лабораторной проверки по методу наименьших квадратов. Его результаты приведены на Рисунке 6.

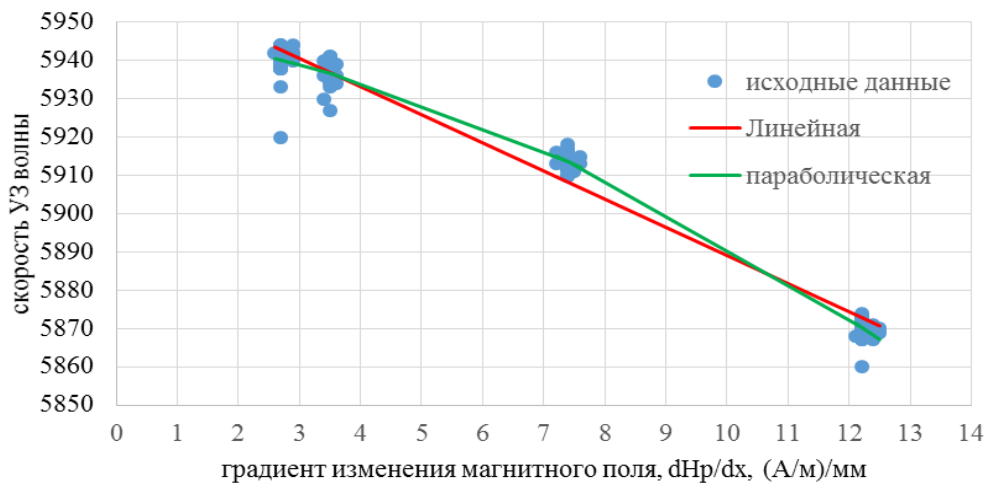


Рисунок 6 – Графики линейной и параболической зависимостей скорости УЗВ от градиента изменения магнитного поля

Уравнения зависимостей:

- линейной: $\tilde{y} = 5962,639 - 7,354x$,
- параболической: $\tilde{y} = -0,3543x^2 - 2,0638x + 5948,2919$.

Здесь y – скорость УЗВ, м/с;

x – градиент магнитного поля, А/м.

Оценка качества регрессий показала, что для линейной интерполяции индекс корреляции $R = 0,9879$, для параболической $R = 0,9948$. Графики линейной и параболической зависимости имеют близкие характеристики качества, поэтому можно выбрать линейную (в силу ее простоты, без серьезной потери качества). Результаты позволяют сделать вывод о том, что при повышении градиента изменения магнитного поля на 1 А/м (при использовании метода на основе магнитной памяти металла) скорость УЗВ уменьшается на 7,354 м/с (для разработанного метода).

Таким образом, разработанный метод диагностики позволит выявить наличие и необходимость в отбраковке дефектов строительного брака, а также дефекты КРН сварных соединений, находящиеся в инкубационном периоде развития, независимо от наличия блуждающих токов.

Результаты лабораторных исследований подтвердили правильность теоретического обоснование затухания скорости УЗВ в зонах концентрации напряжений, полученным при динамическом моделировании значение

приложенной нагрузки в момент дефектообразования и величины внутренних напряжений при начале образования трещины в металле ОШЗ. Результаты теоретических исследований и динамического моделирования полностью совпали с результатами лабораторных испытаний, что говорит о достоверности проведенных исследований.

Четвертая глава посвящена оценке результатов практической проверки применимости разработанного метода в зоне воздействия на магистральный газопровод блуждающих токов. В качестве объекта контроля был выбран участок газопровода «Уренгой-Новопсков» Ду1420, залегающий вблизи высоковольтной линии электропередач.

С помощью разработанного метода и метода на основе магнитной памяти металла, определены координаты и величины напряжений на двух участках ОШЗ, в которых предварительно выполнен ультразвуковой контроль (УЗК). На Рисунке 7 приведена магнитограмма результатов контроля методом магнитной памяти металла одного из участков. Сравнение результатов диагностики показало, что метод на основе магнитной памяти металла имеет погрешность результатов контроля 30-35%, в зависимости от условий распространения блуждающих токов. Разработанный метод показал отсутствие погрешности и точное определение координат дефектов на основе оценки величины внутренних напряжений.

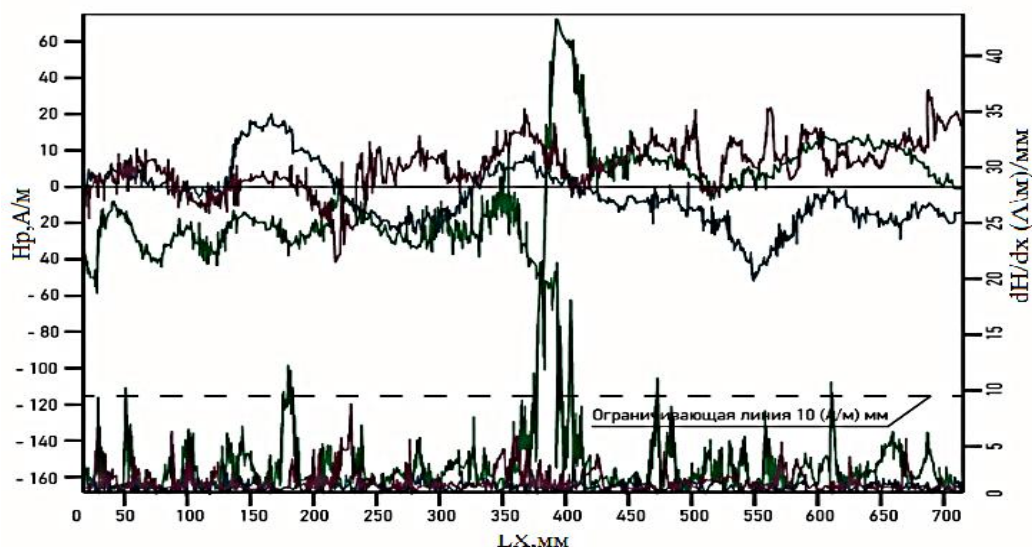


Рисунок 7 – Результаты МПМ с погрешностью в зоне воздействия блуждающих ТОКОВ

Установлено, что разработанный метод диагностики не имеет погрешности при выявлении дефектов по критерию величины внутренних напряжений в зонах воздействия блуждающих токов и по сравнению с УЗК не имеет погрешность в определении расположенных перпендикулярно поверхности контроля трещин и расслоений, но не позволяет установить характер дефектов, годных к эксплуатации, в отличие от УЗК.

Проведена статистическая обработка результатов измерений, которая подтвердила, что на участках ОШЗ с дефектами, скорость проходящих через них УЗВ уменьшается. Применение разработанного метода позволило выявить дефект 1-го класса опасности за счет уменьшения скорости распространения УЗ волны на 110 м/с относительно бездефектной зоны сварного соединения. Результаты диагностики на действующем магистральном газопроводе полностью подтвердили результаты теоретических и лабораторных исследований. Предложенный метод показал высокую точность результатов диагностики независимо от наличия блуждающих токов.

Разработанный метод диагностики позволил определить координаты потенциально-опасных участков ОШЗ, склонных к дефектообразованию и дефекты КРН, находящиеся в инкубационном периоде развития. Определить характер обнаруженных дефектов, годных к эксплуатации, не удалось. Установление наличия дефектов в ОШЗ разработанным методом совпала с результатами УЗК. Совпадение результатов лабораторной проверки и диагностики элементов сварного соединения на действующем магистральном газопроводе говорит о возможности устанавливать необходимость участков ОШЗ в отбраковке по критерию величины внутренних напряжений при использовании разработанного метода в зонах воздействия блуждающих токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ аварий на магистральных газопроводах показал, что одной из их основных причин являются дефекты строительного брака и коррозионное растрескивание под напряжением зон сварных соединений. Установлено, что основные методы диагностики имеют сложность в выявлении дефектов 1-го класса опасности, расположенных перпендикулярно поверхности контроля.

Метод магнитной памяти металла, позволяющий выявить дефекты по критерию величины внутренних напряжений, имеет высокую погрешность при воздействии блуждающих токов.

2 Разработанная математическая модель позволила получить параметры и алгоритмы, необходимые для изначальных условий при динамическом моделировании напряженно-деформированного состояния сварного соединения газопровода. В результате обработки результатов динамического моделирования с использованием комплекса ANSYS установлено соотношение, позволяющее определять размеры и глубину КРН при известной величине внутренних напряжений: при увеличении глубины коррозионного растрескивания на 0,1 мм напряжение возрастает на 6 МПа. Полученное значение величины напряжений при начале процесса трещинообразования 400-510 МПа позволяет выявлять начало процесса КРН, тем самым повысить безопасность эксплуатации газопроводов.

3 При разработке принципа, способа и метода диагностики установлено, что наличие дефектов в околошовных зонах возможно выполнять путем оценки величины внутренних напряжений. Изменение акустических характеристик трубной стали в зонах концентрации напряжений позволяет выявлять имеющиеся дефекты КРН и дефекты, находящиеся в инкубационном периоде развития. Установление координат затухания ультразвуковой волны дает возможность выявлять дефекты по критерию величины напряжений независимо от наличия блуждающих токов.

4 Для проверки точности разработанного метода, выявление дефектов проводилось на участке действующего магистрального газопровода, расположенного в зоне воздействия блуждающих токов. Результаты практического применения совпали с результатами теоретических и лабораторных исследований. Установлено, что снижение скорости проходящей через металл околошовной зоны ультразвуковой волны на 110 м/с (потеря скорости УЗ волны на 2%, относительно начальной скорости) говорит о наличии недопустимого до эксплуатации дефекта и необходимости его

отбраковки, при повышении градиента изменения магнитного поля на 1 А/м скорость ультразвуковой волны уменьшается на 7,354 м/с. Применение разработанного метода позволит добиться снижения промышленной опасности эксплуатации магистральных газопроводов путем выявления большего числа дефектов за счет высокой точности диагностики по критерию величины внутренних напряжений, установления координат как уже имеющихся трещиноподобных дефектов, так и участков, склонных к дефектообразованию. Применение данного метода возможно в зонах воздействия блуждающих токов, так как параметры УЗ волны не зависят от их наличия.

5 Патент №2653955 «Способ определения наличия и координат напряжений в околошовных зонах трубопроводов методом измерения скорости прохождения ультразвуковой волны» прошел апробацию на предприятиях ООО «Газпром трансгаз Самара», результаты применения показали снижение инцидентов, связанных с техническим состоянием газопроводов, находящихся в зонах воздействия блуждающих токов, за счет повышения количества выявленных дефектов сварных стыков на 7%, по сравнению с основными методами неразрушающего контроля.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 научных трудах, в том числе:

– публикации в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1 Буклешев, Д.О. Неразрушающий контроль околошовных зон сварных стыков магистральных газопроводов / Д.О. Буклешев // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 111-114.

2 Буклешев, Д.О. Имитационное моделирование безопасной для эксплуатации магистральных трубопроводов нагрузки на околошовные зоны с различной степенью коррозионного повреждения / Д.О. Буклешев // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 2. – С. 12-17.

3 Буклешев, Д.О. Лабораторные исследования свойств металла околошовных зон для оценки безопасности эксплуатации магистральных газопроводов / Д.О. Буклешев, Н.Г. Яговкин, И.А. Сумарченкова // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 3. – С. 22-28.

4 Буклешев, Д.О. Лабораторные исследования характера распределения трещин на наружной поверхности трубы магистрального газопровода / Д.О. Буклешев, Н.Г. Яговкин // Технологии нефти и газа. – 2020. – № 2(127). – С. 59-63.

5 Буклешев, Д.О. Современные методы определения наличия напряжений в околошовной зоне трубопроводов / Д.О. Буклешев // Трубопроводный Транспорт. Теория и практика. – 2016. – № 1(53). – С. 26-30.

6 Буклешев, Д.О. Анализ методики расчета величины напряжений в околошовных зонах трубопроводов / Д.О. Буклешев, Н.Г. Яговкин, И.А. Сумарченкова // Производство проката. – 2017. – № 3. – С. 31-35.

7 Буклешев, Д.О. Установление возможности использования термографии для определения наличия напряжений в околошовных зонах газопроводов / Д.О. Буклешев // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 2. – С. 83-91.

8 Буклешев, Д.О. Моделирование разрушения трубной стали околошовных зон сварных стыков модуле Fatigue Module для оценки аварийности при эксплуатации магистральных трубопроводов / Д.О. Буклешев // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 7(241). – С. 36-42.

9 Буклешев, Д.О. Результаты применения методики определения координат и величины напряжений на действующем магистральном газопроводе в трассовых условиях / Д.О. Буклешев // Территория Нефтегаз. – 2019. – № 4. – С. 32-36.

– ***в прочих изданиях:***

10 Буклешев, Д.О. Компьютерное моделирование образования дефектов в околошовных зонах газопроводов. / Д.О. Буклешев, Н.Г. Яговкин // Теория. Практика. Инновации. – 2016. – № 9. – С. 40-48.

11 Буклешев, Д.О. Определение характера дефектов путем исследования внутренней структуры сварных соединений газопровода различными методами. / Д.О. Буклешев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №10. – С. 7-12.

12 Буклешев, Д. О. Лабораторные методы определения возможных причин разрушения магистрального газопровода / Д.О. Буклешев, И.А. Сумарченкова, Н.Г. Яговкин // Технические науки – от теории к практике 2016. – № 9(57). – С. 22-32

13 Буклешев, Д.О. Комплексный подход к оценке эксплуатационной надежности и безопасной эксплуатации магистральных газопроводов / Д.О. Буклешев, И.А. Сумарченкова // Теория. Практика. Инновации. – 2019. – №4. – С. 563-571.

14 Буклешев, Д.О. Исследование интенсивности напряжений в процессе коррозионного растрескивания стали магистральных газопроводов / Д.О. Буклешев // Технические науки. – 2019. – №2 (59). – С. 17-21.

15 Буклешев Д.О. Лабораторная проверка методики определения наличия и координат внутренних напряжений в околошовных зонах сварных швов магистральных газопроводов, основанной на изменении скорости ультразвуковой волны в трубных сталях. / Д.О. Буклешев // Коррозия Территории Нефтегаз. – 2019. – № 1(41). – С. 12-16.

– патент на изобретение:

16 Пат. RU №2653955 Российская Федерация. МПК G 01 N 29/07. Способ определения наличия и координат напряжений в околошовных зонах трубопроводов методом измерения скорости прохождения ультразвуковой волны / Буклешев Д.О.: заявитель и патентообладатель Буклешев Д.О. – №2017127221; заявл.28.07.2017; опубл. 15.05.2018. Бюл. №14.