

На правах рукописи

Попов Григорий Геннадьевич



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЗАЩИТЫ ПРОМЫСЛОВЫХ
НЕФТЕПРОВОДОВ ОТ РУЧЕЙКОВОЙ КОРРОЗИИ
ПОДБОРОМ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Агиней Руслан Викторович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», ректор;

Подорожников Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра транспорта углеводородных ресурсов, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Защита диссертации состоится 29 сентября 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.13 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Промысловые нефтепроводы относятся к категории опасных промышленных объектов. Как показывает практика эксплуатации, основной причиной их аварий являются различные виды коррозии, из которых наибольший процент приходится на разновидность внутренней коррозии, получившей название «ручейковой». Указанному виду коррозионного разрушения подвергается металл нижней образующей трубы при перекачке по трубопроводу сильно обводненных водонефтяных эмульсий, насыщенных кислородом и содержащих абразивные и коррозионно-активные включения, с сокращением срока службы трубопроводов вплоть до нескольких месяцев. Для предотвращения возникновения данного вида коррозии в настоящее время разработан ряд методов защиты, таких как применение труб с внутренним покрытием, использование установок предварительного сброса воды (УПСВ) и др., которые используются, в основном, на новых объектах нефтепромысла. В то же время предотвращение аварий от последствий ручейковой коррозии на существующих, давно эксплуатируемых, промысловых трубопроводах осуществляется периодической заменой стальных труб наиболее подверженных коррозии участков трубопроводов на новые, которые через некоторое время опять требуют замены. Поэтому тема диссертации, посвященная разработке научно-обоснованного метода выбора трубопроводных сталей, стойких к ручейковой коррозии, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

В работах Абидуллина И.Г., Бекбаулиевой А.А., Гараева И.Г., Гурова С.А., Жарского И.М., Костицыной И.В., Медведева А.П., Подавалова И.Ю., Скромного В.И., Султанмагомедова С.М., Шарыгина А.М., *Chase D.P.*, и др. установлены основные причины возникновения и развития ручейковой коррозии. При этом факторы, от которых зависит стойкость материала трубы к ручейковой коррозии, исследованы недостаточно, что ограничивает возможности поиска новых более эффективных методов защиты.

Цель работы – установление факторов, определяющих интенсивность ручейковой коррозии промышленных нефтепроводов, для разработки научно-обоснованного метода по выбору коррозионностойких трубопроводных сталей.

Идея работы – защита промышленных нефтепроводов от разрушения в результате ручейковой коррозии достигается изготовлением их из сталей, показавших высокую коррозионную стойкость в лабораторных испытаниях, моделирующих комплексное воздействие на трубопровод факторов, определяющих интенсивность ручейковой коррозии.

Задачи исследования

1) Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.

2) Выявление основных факторов, определяющих интенсивность ручейковой коррозии, с использованием разработанных лабораторной экспериментальной установки и результатов компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния трубопровода.

3) Разработка метода лабораторных испытаний трубопроводных сталей в условиях, моделирующих комплексное воздействие на трубопровод факторов, способствующих ручейковой коррозии.

4) Экспериментальная проверка разработанного метода на примере испытаний наиболее типичных трубопроводных сталей.

Научная новизна исследования

1. Предложено кинетическое уравнение процесса ручейковой коррозии, отличающееся от известных моделей коррозионного разрушения учетом изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния корродируемой стенки трубы, и указывающее, что скорость углубления дна ручейка, вследствие возрастания роли механохимического эффекта, возрастает по мере увеличения срока эксплуатации трубопровода.

2. Разработан метод коррозионных испытаний сталей в условиях комплексного воздействия на испытуемый материал факторов, определяющих интенсивность протекания ручейковой коррозии промышленных нефтепроводов, позволяющий в лабораторных условиях исследовать влияние химического состава материала на его стойкость к ручейковой коррозии с разработкой состава коррозионностойкой стали.

Теоретическая значимость работы

Разработана компьютерная модель напряженно-деформированного состояния промышленного нефтепровода, подверженного ручейковой коррозии, с использованием которой выведено уравнение скорости коррозии металла дна ручейка и показано, что скорость ручейковой коррозии зависит от глубины повреждения и возрастает со временем эксплуатации трубопровода.

Практическая значимость работы

Разработан научно-обоснованный метод коррозионных испытаний трубопроводных сталей, позволяющий в лабораторных условиях исследовать влияние химического состава материала на его стойкость к ручейковой коррозии с разработкой состава коррозионностойкой стали.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач используется комплексный метод, включающий анализ и обобщение литературных источников, получение экспериментальных данных на разработанной установке, их обработку, разработку компьютерной модели и анализ процесса ручейковой коррозии промышленного нефтепровода с использованием расчетных и экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Глубина коррозионного дефекта h_i промышленного нефтепровода в результате ручейковой коррозии определяется скоростью электрохимической коррозии его материала, протекающей с анодным контролем, а также уровнем эквивалентных напряжений σ_0 в трубе и возрастает с увеличением времени эксплуатации трубопровода t_i в соответствии с зависимостью:

$$h_i = v_0 \cdot K_{\text{мх}(\varepsilon)} \cdot t_i + \frac{k_{\sigma} \cdot \sigma_0}{b} (e^{b \cdot v_0 \cdot K_{\text{мх}(\varepsilon)} \cdot t_i} - 1),$$

где v_0 – скорость коррозии ненапряженного материала трубы в водонефтяной эмульсии при интенсивном подводе кислорода к нижней образующей трубы и удалении образовавшихся продуктов коррозии, мм/год;

$K_{\text{мх}(\varepsilon)}$ – механохимический коэффициент степени деформации металла трубы;

k_{σ} – механохимический коэффициент, определяемый напряженным состоянием трубопровода, МПа⁻¹;

b – размерный коэффициент, зависящий от диаметра трубы, мм⁻¹.

2. Метод лабораторных испытаний трубопроводных сталей, моделирующий комплексное воздействие на трубопровод факторов, определяющих интенсивность ручейковой коррозии промысловых нефтепроводов.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует пункту 6 «Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и **методов защиты их от коррозии**» области исследований паспорта специальности 25.00.19 - Строительство и эксплуатация нефтегазоводов, баз и хранилищ.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается сходимостью экспериментальных и расчетных данных, а также с результатами общепризнанных исследований в области коррозионного разрушения нефтепроводов. Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на восьми конференциях, из которых наиболее значимые: II Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» в Санкт-Петербургском горном университете, сентябрь 2018 г.; International conference corrosion in the oil and gas industry - corrosion oil & gas, May, 2019; Международный симпозиум «Нанозифика и Наноматериалы» в Санкт-Петербургском горном университете, ноябрь 2019 г.; VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020, апрель 2020.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследования, проведении анализа основных теоретических представлений о процессе коррозионного разрушения промысловых трубопроводов, проектировании и изготовлении лабораторного стенда, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса внутренней коррозии нефтепроводов, разработке методики коррозионных испытаний в условиях, моделирующих коррозионное разрушение стенки промыслового трубопровода.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в

изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено решение о выдаче патента «Способ оценки стойкости трубопроводных сталей к «канавочной» коррозии» авторов Попова Г.Г., Болобова В.И. и др. от 05.03.2020 (заявка на изобретение № 2019134793 от 29.10.2019).

Структура и содержание

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 105 страниц печатного текста, 6 таблиц, 52 рисунка, список литературы из 114 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Болобову В.И., профессору Николаеву А.К., доценту Баталову А.П. и сотрудникам кафедры ТХНГ Горного университета за помощь в работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В **первой** главе освещены современные проблемы эксплуатации промышленных трубопроводов, произведен анализ аварийности трубопроводов на объектах нефтедобычи и рассмотрены основные существующие методы защиты промышленных нефтепроводов от ручейковой коррозии.

Во **второй** главе рассмотрены основные существующие гипотезы возникновения и протекания ручейковой коррозии. Проанализирована степень влияния на коррозионный процесс различных факторов. Сделано заключение, что для объяснения закономерностей возникновения и протекания ручейковой коррозии необходимо принять, что имеющая место реакция электрохимической коррозии дна ручейка протекает с анодным контролем, что может иметь место только при интенсивном подводе кислорода к реакционной поверхности и удалении продуктов коррозии.

В **третьей** главе с использованием известных формул механохимического эффекта и предложенной компьютерной модели напряженно-деформируемого состояния трубы с продольным надрезом, моделирующим след от ручейковой коррозии, выводится кинетическое уравнение зависимости глубины коррозионного поражения промышленного трубопровода от продолжительности его эксплуатации.

Объектом расчетного анализа являлись фрагменты трубопроводов 4-х наиболее часто используемых типоразмеров (114x4, 219x6, 325x9 и 426x10 мм), изготовленных из трубопроводной низкоуглеродистой стали ($\sigma_T = 272$ МПа, $\sigma_B = 550$ МПа), с максимальным рабочим давлением ($P_p = 2,0; 2,5; 3,0; 4,0$ МПа). На всем протяжении фрагмента (10 м) с его внутренней стороны проходит продольный надрез полусферической формы шириной 15 мм и глубиной h до 3 - 6 мм, как конфигурации и размера, наиболее типичных для следов от ручейковой коррозии. Для разной глубины надреза рассчитывались кольцевые $\sigma_{кц}$, продольные $\sigma_{пр}$ и эквивалентные напряжения σ_0 в трубопроводе и их распределение по телу трубы. Расчет производился методом конечных элементов на основании построенной модели в программном продукте ANSYS 2019 R1 с линейным размером элемента 0,005 м, обеспечивающим достаточную точность проводимых расчётов (± 1 МПа).

Результаты компьютерного моделирования (рисунок 1) подтвердили закономерность, установленную в работах Поподько Д.В. и Шаймухаметова М.Р для канавок малой относительной ширины, что наличие надреза приводит к эффекту «вдавливания» части трубы внутрь с возникновением в металле, окружающем надрез, значительных растягивающих напряжений.

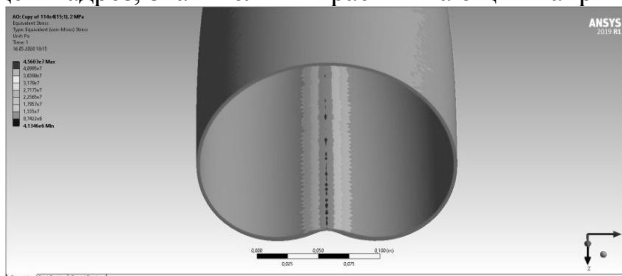


Рисунок 1 – Вид фрагмента трубы 114x4 мм с надрезом глубиной $h = 1$ мм и распределение эквивалентных напряжений ($P_p = 2,0$ МПа)

Напряжения распределены неравномерно: их максимальные значения $\sigma_{\max}$ достигаются вблизи нижней точки надреза, минимальные – в его верхних точках (рисунок 2).

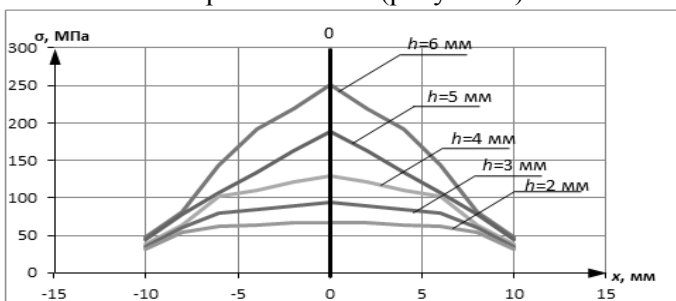


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений в металле, окружающем стенки и дно надреза, для трубы 325х9 мм в зависимости от глубины надреза

Оказалось (рисунок 2), что с увеличением глубины надреза (глубины ручейка) h величина напряжения $\sigma_{\max}$ в металле вблизи нижней точки надреза возрастает в соответствии с зависимостью, имеющей для всех анализируемых размеров трубопровода вид близкий к экспоненциальной (1) (рисунок 3):

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 \exp(b \cdot h), \quad (1)$$

где σ_0 - эквивалентное напряжение в стенках трубы при отсутствии надреза (ручейка), МПа;

b - размерный коэффициент, зависящий от диаметра трубопровода (0,60; 0,49; 0,39; 0,32 мм⁻¹).

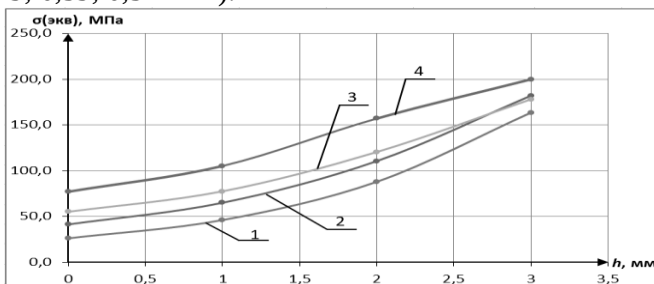


Рисунок 3 – Зависимость напряжения $\sigma_{\max}$ в металле дна надреза от глубины h для труб 114х4 мм (1), 219х6 мм (2), 325х9 мм (3) и 426х10 мм (4)

Установленная зависимость (1) использовалась для вывода уравнения скорости коррозии v металла дна ручейка в зависимости от его глубины h и других переменных. Для этого, параметр «интенсивность напряжения» σ_i в известной формуле механической активации коррозионных процессов заменялся на значение величины $\sigma_{\max}$ из (1), а параметр «интенсивность деформации» ε_i - на степень пластической деформации ε металла, достигаемый при производстве трубы:

$$v = v_0 \cdot (1 + k_\sigma \cdot \sigma_0 \cdot e^{b \cdot h}) \cdot (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon), \quad (2)$$

где v_0 – скорость коррозии материала трубопровода в реакционной среде в ненапряжённом состоянии, мм/год;

k_σ – механохимический коэффициент напряжений, МПа⁻¹, рассчитываемый по известному выражению $k_\sigma = \frac{V_M(1+m_\sigma)}{3RT(1-m_\sigma+m_\sigma^2)}$

(здесь V_M - мольный объём стали, м³/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; m_σ - коэффициент, равный отношению продольных напряжений к кольцевым в трубопроводе);

k_ε – механохимический параметр деформации (для низкоуглеродистых сталей $k_\varepsilon = 5$, для низколегированных $k_\varepsilon = 7$).

Представление скорости v в виде производной dh / dt , множителя $(1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon)$, как коэффициента $K_{\text{MX}(\varepsilon)}$, а выражения (2) в виде дифференциального уравнения и интегрирование последнего позволили получить зависимость (3) глубины ручейка от времени воздействия агрессивной среды:

$$h_i = h_0 + h_\sigma = v_0 \cdot K_{\text{MX}(\varepsilon)} \cdot t_i + \frac{k_\sigma \cdot \sigma_0}{b} (e^{b \cdot v_0 \cdot K_{\text{MX}(\varepsilon)} \cdot t_i} - 1) \quad (3)$$

Слагаемые h_0 и h_σ в (3) представляют собой вклад в суммарную глубину коррозионного поражения h_i составляющих за счет процесса электрохимической коррозии ненапряженного металла и увеличения интенсивности этого процесса за счет влияния напряженного состояния трубы.

Возможность применения выведенного уравнения (3) для реальных условий эксплуатации промысловых нефтепроводов проверялась на трубопроводе 325x9 мм ($P_p = 3,0$ МПа) из низкоуглеродистой стали, как из материала, скорость коррозии

которого ($v_0 = 0,9$ мм/год) в условиях, приближенных к необходимым (при непрерывном перемешивании смеси электролита, близкого по составу к пластовой воде, с песком), обнаружена в литературе. Значения других постоянных (3) для этого случая составляли: $b = 0,39$ м⁻¹, $K_{\text{мх}(\varepsilon)} = 1,15$; $k_\sigma = 0,0021$ МПа⁻¹, $\sigma_0 = 144,7$ МПа (эквивалентные напряжения рассчитывались для восходящего участка трубопровода с учетом минимального радиуса упругого изгиба оси трубопровода, расчетного температурного перепада и остаточных напряжений технологического происхождения). Полученное изменение глубины надреза h_i и его составляющих h_0 , h_σ от времени эксплуатации трубопровода иллюстрирует рисунок 4.

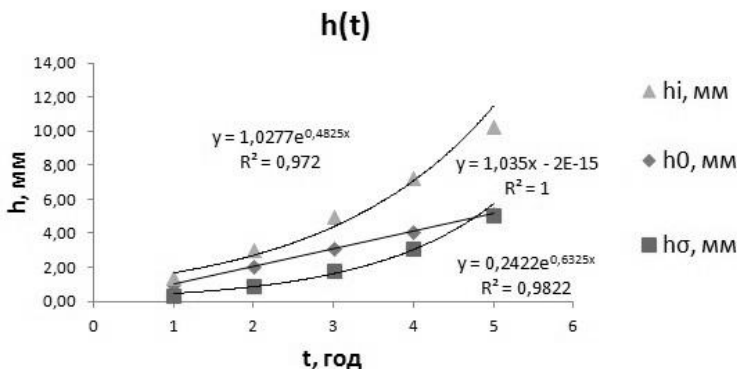


Рисунок 4 – Расчетная временная зависимость глубины коррозионного поражения промыслового нефтепровода в результате ручейковой коррозии: h_i , h_0 , h_σ – результаты расчета за каждый год, линии - экстраполяционные кривые

Как видно из графика рисунка 4, с увеличением времени эксплуатации скорость коррозионного поражения дна ручейка возрастает: если за первый год $v \sim 1$ мм/год ($h_i \sim 1$ мм), то за пять уже ~ 2 мм/год ($h_i \sim 10$ мм). Полученные в результате расчета глубины поражения (1 - 10 мм) оказались того же порядка, что и обнаруживаемые при осмотре реальных трубопроводов, пораженных ручейковой коррозией. Таким образом, **первое защищаемое положение следует считать доказанным.**

В **четвертой** главе на основе уточненного механизма ручейковой коррозии разрабатывается метод лабораторных испытаний, позволяющий ранжировать стали по стойкости к данному виду коррозии, с представлением результатов его апробирования.

Испытания по разработанному методу предлагается проводить в условиях, соответствующих необходимым требованиям для протекания "ручейковой" коррозии, а именно:

- использование в качестве рабочей среды водного раствора NaCl;
- непрерывная продувка раствора воздухом с целью обогащения его кислородом;
- нахождение анализируемого образца под воздействием остаточных растягивающих напряжений $\sigma_{ост}$, близких к уровню эквивалентных напряжений σ_0 в стенке трубопровода;
- наличие на поверхности напряженной части образца надреза формы ручейка, имеющей место при "ручейковой" коррозии;
- при периодической очистке надреза от продуктов коррозии.

Алгоритм подготовительных операций перед испытаниями представлен ниже.

Изготовление образцов анализируемой трубопроводной стали в виде пластин 150x50x3 мм
Изгиб пластин с помощью струбцин на остаточную стрелу прогиба $f_{ост}$, соответствующую нахождению металла внутренней стороны изогнутой пластины под действием остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, близких к уровню эквивалентных напряжений σ_0 в трубе
Нанесение на внутреннюю сторону пластин поперечного надреза полусферической формы глубиной h и радиусом R , равным 0,5 мм
Покрытие поверхности пластины вне надреза эмалью KUDO, предохраняющей находящийся под ней металл от коррозионного воздействия среды
Шлифовка продольных боковых поверхностей пластин

Необходимая стрела прогиба $f_{ост}$ пластин устанавливается экспериментально-расчетным путем. Измеряя длину средней части

пластины до (l_0) – и после (l_k) изгиба на различную стрелу прогиба $f_{ост}$ определяется зависимость остаточной деформации металла с внутренней стороны пластины $\varepsilon_{ост} = (l_0 - l_k) / l_0$ от величины $f_{ост}$. Переход от величины $\varepsilon_{ост}$ к соответствующему ей остаточному напряжению (рисунок 5) осуществлялся с использованием известной формулы для упруго-пластичного тела: $\sigma_{ост} = E \cdot \varepsilon_{ост}$. Поскольку значения модуля нормальной упругости E для всех трубопроводных сталей существенно не различаются (~ 200 ГПа), принималось, что установленные зависимости рисунка 5 справедливы для пластин из всего спектра анализируемых трубопроводных сталей.

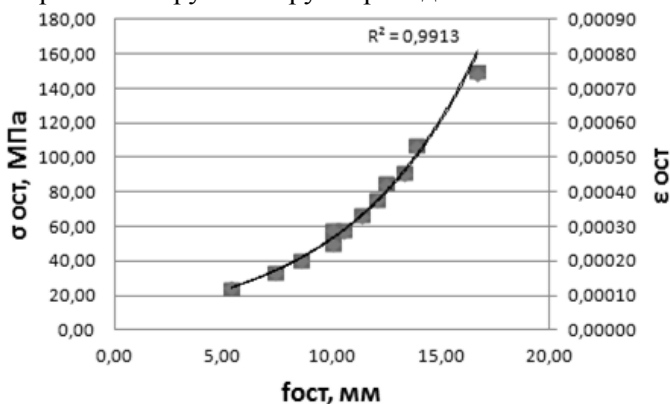


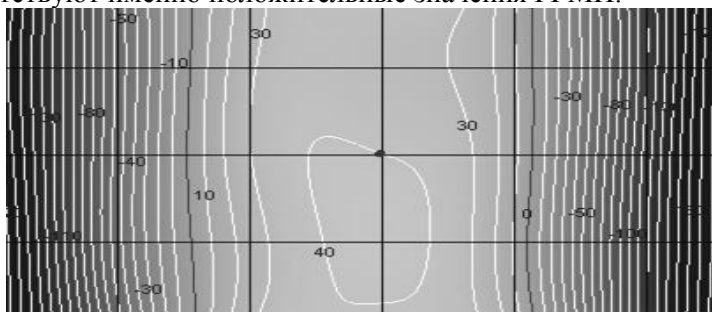
Рисунок 5 – Установленные экспериментально-расчетным путем зависимости остаточных деформаций металла и остаточных напряжений с внутренней стороны пластины из низкоуглеродистой стали от стрелы прогиба $f_{ост}$

Изгибая пластины до необходимой остаточной стрелы прогиба $f_{ост}$, считали, что металл поверхностного слоя средней части пластины с внутренней ее стороны находится под действием остаточных растягивающих напряжений $\sigma_{ост}$ того же значения, что и заданная величиной σ_0 в стенке трубопровода.

Утверждение, что металл с внутренней стороны пластины находится под действием именно растягивающих, а не сжимающих остаточных напряжений, подтверждалось магнитоанізотропним методом по распределению по длине пластины разности главных

механических напряжений (РГМН), которые с внутренней стороны пластины имели знак плюс, а с внешней – минус (рисунок 6, а, б).

Предварительно, в экспериментах по растяжению пластин на разрывной машине ZwickRoell с замером сигнала РГМН было получено, что растягивающим напряжениям в пластине соответствуют именно положительные значения РГМН.



(а)



(б)

Рисунок 6 — Карта распределения РГМН по длине стальной пластины при замере сигнала с внутренней (а) и внешней (б) ее стороны

Нанося надрез на часть пластины, находящуюся под действием остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, в соответствии с Шапошниковым Н.А. считали, что он выступает источником дополнительных напряжений $\sigma_{ост}^*$ в металле его донной части, аналогичных напряжению σ_{max} , возникающему в металле дна «ручейка» трубопровода с напряжением σ_0 в стенке. Для моделирования влияния «ручейка» на распределение напряжений в стенке трубы, при выборе глубины надреза пластины ($h = 0,5$ мм)

исходили из требования выполнения равенства $\sigma_{ост*}/\sigma_{ост} \approx (\sigma_{max}/\sigma_0)_{cp} \sim 3$ (в соответствии с рисунком 3 для глубины $h = 3$ мм). При этом напряжение $\sigma_{ост*}$ рассчитывалось по известной формуле: $\sigma_{ост*} = \sigma_{ост} \cdot 1,3 \sqrt{\frac{h_n}{\rho}} = \sigma_{ост} \cdot 2,9$; где h_n – остаточная толщина пластины в месте надреза (2,5 мм); ρ – радиус закругления надреза (0,5 мм).

Ниже представлен алгоритм проведения испытаний сталей на стойкость к ручейковой коррозии.

С использованием металлографического микроскопа Leica DM ILM (X 200) фотографирование сечения надреза с каждой стороны пластины
Обработка полученных изображений в компьютерных программах - фоторедакторе Adobe - Photoshop и САПР Autodesk AutoCAD с определением точного значения (± 1 мкм) исходной глубины надреза H_{01} и H_{02} для каждой стороны пластины
Помещение пластин стороной с надрезом вниз в термостат с 3%-м водным раствором NaCl
Выдержка $t = 80$ часов пластин в среде при $T = 70 \pm 1^\circ\text{C}$ с непрерывной обдувкой места надреза воздухом и периодическим (через 10 часов) удалением продуктов коррозии с места надреза
Повторное фотографирование и компьютерная обработка места надреза с определением глубин H_{11} и H_{12} после воздействия среды (рисунок 7)
Определение глубины коррозионного повреждения стали $\Delta H_1 = H_{11} - H_{01}$, $\Delta H_2 = H_{12} - H_{02}$, $h = (\Delta H_1 + \Delta H_2)/2$
Расчет скорости коррозии стали в соответствии с нормативным документом

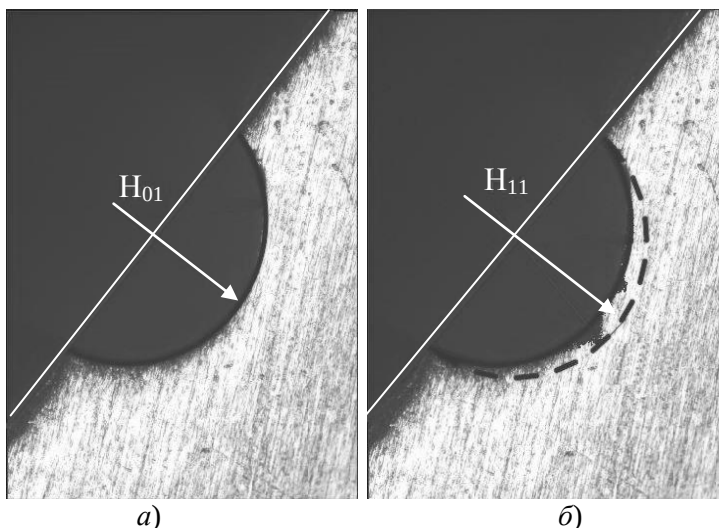


Рисунок 7 – Изображение сечения надреза на пластине до (а) и после (б) воздействия агрессивной среды

Подтверждением зависимости скорости коррозии v дна надреза от остаточного напряжения $\sigma_{\text{ост}}^*$ в металле и справедливости выведенного уравнения (2) служили представленные в таблице 1 результаты коррозионных испытаний пластин, изогнутых до различной стрелы прогиба $f_{\text{ост}}$ (степени остаточной деформации $\varepsilon_{\text{ост}}$). Там же приведена скорость коррозии v_0 материала пластин, свободного от воздействия остаточного напряжения. Для ее установления на анализируемую пластину с надрезом перед коррозионными испытаниями наносился еще один аналогичный надрез, но только на неизогнутую ее торцевую часть, свободную от воздействия остаточных напряжений. Микроскопическим анализом устанавливалось изменение глубины надреза в результате коррозии, по которому, с учетом продолжительности испытаний, рассчитывалась величина v_0 материала пластины. Значения $\sigma_{\text{ост}}^*$, v_0 вводили в уравнение (2), заменяя σ_i на $\sigma_{\text{ост}}^*$ и, принимая $m_\sigma = 1$, $k_\sigma = 0,002 \text{ МПа}^{-1}$ определяли величину v расчетным путем.

Таблица 1 – Скорость коррозии v дна надреза пластин из стали 20 в зависимости от величины остаточного напряжения в металле (3% р-р NaCl, $t = 80$ часов, $T = 343$ K)

$f_{\text{ост}},$ мм	$\varepsilon_{\text{ост}}$	$\sigma_{\text{ост}},$ МПа	$\sigma_{\text{ост}}^*,$ МПа	$v_0,$ мм/год	v , мм/год по результатам:	
					экспери мента	расчета (2)
5,3	0,000121	24,6	71,2	1,42	1,53	1,62
10,0	0,000251	50,9	147,7		1,93	1,84
13,3	0,000452	91,8	267,5		2,29	2,18

Как видно из данных таблицы, с увеличением стрелы прогиба пластин с надрезом, способствующему возрастанию остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^*$ в окружающем надрез металле, скорость коррозии v металла дна надреза повышается: для возрастания $\sigma_{\text{ост}}^*$ с 71,2 до 267,5 МПа в 1,5 раза. При этом экспериментально установленные и расчетные значения v показывают удовлетворительную сходимость, что подтверждает правомочность предлагаемого метода испытаний и справедливость выведенного кинетического уравнения.

Исходя из результатов испытаний потенциально возможных трубопроводных сталей по разработанной методике, все испытанные материалы ранжируются по величине показателя v , с выбором стали с наименьшим его значением, которая принимается за наиболее стойкую к «ручейковой» коррозии.

В качестве примера в таблице 2 представлены установленные значения параметров v_0 , h , v двух широко используемых трубопроводных сталей – 20 и 17ГС, испытанных по предлагаемому методу.

Как видно из данных таблицы, более стойкой из испытанных сталей является легированная сталь 17ГС, скорость коррозии которой в полтора раза меньше, чем углеродистой стали 20. Это можно объяснить, как несколько меньшим содержанием углерода в составе стали 17ГС ($\sim 0,16\%$ по сравнению с $\sim 0,2\%$), так и большим содержанием кремния и марганца, наличие которых благоприятным

образом влияет на коррозионную стойкость стали. При этом установленные значения скоростей коррозии обоих материалов имеют тот же порядок, что и демонстрируемый трубопроводными сталями в промышленных нефтепроводах при ручейковой коррозии. Исходя из имеющихся литературных данных, можно ожидать, что трубопроводная сталь, стойкая к ручейковой коррозии, должна отличаться повышенным содержанием в своем составе меди и никеля.

Таблица 2 – Глубина коррозионного разрушения и скорость коррозии дна надреза анализируемых сталей

Марка стали	v_0 , мм/год	h , мм за 80 часов	v , мм/год
17ГС	1,13	0,011	1,24
20	1,42	0,018	1,93

Предлагаемый метод коррозионных испытаний заинтересовал представителей ПАО «Северсталь», как производителя трубопроводных сталей, с которыми при использовании разработанного метода начаты совместные работы по оценке стойкости к ручейковой коррозии существующих и разрабатываемых на предприятии композиций сталей.

Таким образом, второе положение, вынесенное на защиту, **считается доказанным.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи защиты промышленных нефтепроводов от ручейковой коррозии подбором коррозионностойких сталей.

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований механизма ручейковой коррозии промышленных нефтепроводов показали, что факторы, от которых зависит стойкость материала трубы к ручейковой коррозии, исследованы недостаточно, что ограничивает возможности поиска новых более эффективных методов защиты.

2. С использованием разработанной компьютерной модели напряженно-деформированного состояния трубопровода со следами ручейковой коррозии подтверждено, что появление коррозионного дефекта в виде ручейка на нижней образующей трубы приводит к перераспределению эквивалентных растягивающих напряжений в стенке трубы с достижением ими максимальных значений в металле вблизи нижней точки ручейка, возрастающих с увеличением глубины коррозионного дефекта в соответствии с экспоненциальной зависимостью.

3. Предложено кинетическое уравнение процесса ручейковой коррозии, отличающееся от известных моделей коррозионного разрушения учетом изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния корродируемой стенки трубы, и указывающее, что скорость углубления дна ручейка, вследствие возрастания роли механохимического эффекта, возрастает по мере увеличения срока эксплуатации трубопровода.

4. Разработан научно-обоснованный метод коррозионных испытаний трубопроводных сталей в условиях комплексного воздействия на испытуемый материал факторов, определяющих интенсивность ручейковой коррозии промышленных нефтепроводов, позволяющий в лабораторных условиях выявлять стали, наиболее стойкие к данному виду коррозии, с разработкой соответствующих рекомендаций организациям, занимающимся вопросами проектирования и эксплуатации промышленных нефтепроводов.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с изучением влияния различных легирующих элементов на стойкость трубопроводных сталей к ручейковой коррозии с целью разработки коррозионностойких сталей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. Попов, Г.Г. Методика подбора отечественных хромомолибденовых сталей взамен импортных для арматуростроения / Болобов В.И., Самигуллин Г.Х., Попов Г.Г. // Отдельная статья: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. - №2 (специальный выпуск 6). – 20 с.

2. Попов, Г.Г. Сравнительная стойкость сталей промышленных нефтепроводов к ручейковой коррозии / Болобов В.И., Попов Г.Г., Кривокрысенко Е.А., Злотин В.А., Жуйков И.В., Гареев Д.В. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2020. - №1. - С. 128 – 140.

3. Попов, Г.Г. О вкладе механохимического фактора в скорость протекания «ручейковой» коррозии промышленных нефтепроводов / Болобов В.И., Попов Г.Г., Кривокрысенко Е.А., Злотин В.А., Жуйков И.В., Гареев Д.В. // Технологии нефти и газа. – 2020. - №4. – С. 59-64.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

4. Popov, G.G. Study of factors enabling initiation and behavior of grooving corrosion. / Popov G.G., Kasyanov A.V., Bolobov V.I., Krivokrysenko E.A. // E3S Web of Conferences. - 2019. - Vol/121. - P. 3004. DOI: 10.1051/e3sconf/201912103004.

5. Popov, G.G. Use of Magnetic Anisotropy Method for Assessing Residual Stresses in Metal Structures / Krivokrysenko E.A., Popov G.G., Bolobov V.I. and Nikulin V.E. // Key Engineering Materials. – 2020. - Vol. 854. - pp 10-15.

Патенты на изобретения:

Получено решение о выдаче патента «Способ оценки стойкости трубопроводных сталей к «канавочной» коррозии» авторов Попова Г.Г., Болобова В.И. от 05.03.2020 (заявка на изобретение №2019134793 от 29.10.2019).