

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование влияния воздействия коррозионной среды на накопление и распределение водорода в трубопроводной стали

УДК 621.643.2-034:620.193:669.788

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Эльман Роман Романович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЭФ ИЯТШ	Кудияров Виктор Николаевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОС3+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
Р2	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
Р3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОС3+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
Р4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОС3+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
Р5	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОС3+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р6	<u>Научно-исследовательская деятельность</u> Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОС3+ (ПК-1, ПК-2)

P7	<u>Научно-инновационная деятельность</u> Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
P8	<u>Организационно-управленческая</u> Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОСЗ+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)
P9	<u>Педагогически-просветительская</u> Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Лидер А.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0Б51	Эльман Роман Романович

Тема работы:

Исследование влияния воздействия коррозионной среды на накопление и распределение водорода в трубопроводной стали.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Часть трубопроводной трубы из стали марки 10Г2, реактор для симуляции условий реального газопровода с максимальной температурой нагрева 100°С газоанализатор RHEN602 фирмы LECO, спектрометр тлеющего разряда GD-Profilier 2 фирмы Horiba Jobin Yvon, дифрактометр XRD-7000S фирмы Shimadzu, испытательная машина DFM-5000 фирмы Com Ten Industries.</p>
---	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Проведение ускоренных коррозионных испытаний с использованием специального реактора при температуре 100 °С, давлении метана 40 атм. в течение 24 часов; – Подготовка образцов для элементного анализа и механических испытаний из части трубы до и после коррозионных испытаний. – Определение влияние ускоренных коррозионных испытаний на структурно-фазовое состояние и элементный состав стали. – Оценка степени деградации механических свойств стали в результате коррозионных испытаний. – Анализ полученных результатов; – Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; – Раздел «Социальная ответственность»; – Заключение.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна, старший преподаватель ООД ШБИП
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич, доцент ОСГН ШБИП

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кудияров Виктор Николаевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Эльман Роман Романович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0Б51	Эльману Роману Романовичу

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Принять по действующим ценам
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	–
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды – 30%; НДС – 20%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	–
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Выполнить

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT 2. Альтернативы проведения НИ 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ - выполнить	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Эльман Роман Романович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0Б51	ФИО Эльману Роману Романовичу
----------------	----------------------------------

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Физика

Тема ВКР: Исследование влияния воздействия коррозионной среды на накопление и распределение водорода в трубопроводной стали

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объектом исследования является часть газопроводной трубы из стали 10Г2, подвергнутая ускоренным коррозионным испытаниям с помощью специального реактора. Вырезанные образцы исследуются на структурно-фазовое состояние и элементный состав с помощью дифрактометра XRD-7000S и спектрометра тлеющего разряда GD-Profiler 2. Исследуется распределение водорода с помощью газоанализатора RHEN-602, а так же оценивается степень деградации механических свойств после коррозионных испытаний на испытательной машине DFM-5000. Исследования в данной области представляют интерес для различных предприятий газодобывающей отрасли.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>1. По данной теме рассматриваются законодательные и нормативные документы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019). – Общие эргономические требования. – инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В. – инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением. <p>Документы по воздействию ПЭВМ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;

	<p>– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.</p> <p>– ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде..</p> <p>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</p>
<p>2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>2. Анализ опасных факторов производственной среды: – электробезопасность; – термическая опасность; – пожаровзрывобезопасность.</p> <p>Анализ вредных факторов производственной среды: – воздействие электрического напряжения на организм человека; – воздействие повышенного уровня шума на организм человека; – воздействие высокой температуры на организм человека; – утечка газа из баллона; – микроклимат.</p>
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>3. Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду: – выброс в атмосферу рабочего газа.</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<p>4. Возможные чрезвычайные ситуации: – Утечка газа из баллона; – Возникновение возгорания; – Поражение оператора установки электрическим током; – Возникновение возгорания.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Скачкова Лариса Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Эльман Роман Романович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Бакалавриат

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2019	Аналитический обзор литературы	15
10.03.2019	Подготовка необходимых образцов	15
05.05.2019	Проведение рентгеноструктурного, элементного анализа и ускоренных испытаний на растяжение	20
10.05.2019	Анализ результатов	15
25.05.2019	Социальная ответственность	15
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2019	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОЭФ ИЯТШ	Кудияров Виктор Николаевич	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель отделения ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 92 страницы, 23 рисунка, 19 таблиц, 74 литературных источника.

Ключевые слова: трубопроводная сталь 10Г2, состояние поверхности, коррозия, наводороживание.

Объектом исследований являлись прямоугольные отрезки трубы диаметром 4,5 мм и длиной 280 мм. Проводился обзор возможных источников водорода, которые определяют процесс гидрирования стали в магистральных газопроводах. С помощью специальной установки для симуляции условий реального газопровода, производилась выдержка образцов в подобных условиях. Далее производилось исследование элементного состава образцов для определения марки стали, а так же анализ распределения концентрации водорода на внешней и внутренней поверхности трубы с помощью оптического спектрометра высокочастотного тлеющего разряда GD Profiler 2, который представляет собой оптический эмиссионный спектрометр радиочастотного тлеющего разряда (RF GD-OES). Для оценки негативного воздействия водорода на механические свойства трубопроводной стали проводились испытания на одноосное растяжение с использованием испытательной машины Com Ten DFM-5000 при постоянной нагрузке. Испытания образцов в коррозионной среде производилось при заданных параметрах: $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 40\text{ атм}$.

Целью работы является проведение исследования, которое подтверждает принципиальную возможность наводороживания внутренней поверхности газопроводов за счет диссоциации углеводородов.

Основными задачами являются: проведение симуляции условий реального газопровода с помощью специального реактора на вырезанном из газопровода куске трубы (длина трубы 280 см, толщина стенки трубы 0.8 мм), подготовка двух видов образцов из куска трубы после симуляции, проведение рентгеноструктурного и элементного анализа стали, определение значение

абсолютной концентрации водорода по толщине образцов, исследование механических свойств образцов трубопроводной стали методом одноосного растяжения.

В первой главе представлены теоретические основы коррозии, описаны виды коррозии, рассмотрены механизмы водородного охрупчивания и приведено описание взаимодействия водорода с трубопроводной сталью.

Во второй главе приведена техническая реализация методов изучения коррозионного воздействия на материал трубопровода.

В третьей главе описаны результаты проведенного исследования, которые подтверждает механизм развития коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), связанный с проникновением водорода в трубопроводную сталь и произведен анализ полученных данных.

Область применения: результаты работы могут быть применены для проведения дальнейших исследований по исследованию процесса водородной коррозии, по выяснению причины стресс-коррозии в трубопроводных сталях, а так же по разработке методов контроля стресс-коррозии.

Содержание

Введение.....	14
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	17
1.1. Теоретические основы явления коррозии и представления о процессах КРН стальных трубопроводов	17
1.1.1. Анодное растворение и электрохимическая коррозия.....	18
1.1.2. Коррозионная усталость	20
1.1.3. Водородное охрупчивание (водородная коррозия)	22
1.2. Источники водорода.....	22
1.3. Механизмы водородного охрупчивания	29
1.4. Взаимодействие водорода с трубопроводной сталью	32
ГЛАВА 2. Техническая реализация методов изучения коррозионного воздействия на металл трубопровода.....	37
2.1. Экспериментальная техника	37
2.2. Схема экспериментальной установки.....	38
2.3. Образцы.....	40
2.4. Методика проведения исследования.....	42
ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	46
4.1. Потенциальные потребители результатов исследования	46
4.2. Организация и планирование работ	46
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	46
4.2.2. Продолжительность этапов работ	48
4.3. Бюджет научного исследования	52
4.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования	52
4.3.2. Расчет заработной платы	53
4.3.3. Расчет затрат на социальный налог.....	54

4.3.4. Расчет затрат на электроэнергию	54
4.3.5. Расчет амортизационных расходов	55
4.3.6. Расчет прочих расходов.....	56
4.3.7. Расчет общей себестоимости разработки	56
4.4. Определение сравнительной эффективности исследования	57
Выводы	57
ГЛАВА 5. Социальная ответственность	58
5.1. Вводный обзор.....	58
5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	58
5.3. Техногенная безопасность.....	59
5.4. Анализ вредных факторов.....	60
5.4. Анализ опасных факторов производственной среды.....	67
5.5. Охрана окружающей среды	70
5.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	70
Выводы	72
Заключение	73
Список литературы	74

Введение

В настоящее время проблема коррозионного воздействия на материал трубопровода является одной из важнейших в нефтегазотранспортной индустрии [1]. Известно, что совокупный прямой ущерб от коррозии как газовых, так и нефтяных трубопроводов оценивается более чем в 1 миллиард долларов США [2]. Кроме того, при их остановке во время ремонтных работ, упущенная прибыль по оценкам специалистов превосходит 10 миллиардов [3]. Согласно некоторым данным, основной причиной отказов газовых и нефтяных трубопроводов является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) является [4]. Процент аварийных ситуаций, связанных с процессами коррозии, разнится в зависимости от специфики района прохождения газопровода и составляет от 12 до 39% [5]. В соответствии с общепринятой экспертным сообществом классификацией, в зависимости от типа и состава почвы, параметров давления и температуры трубопровода, а также режима катодной защиты, КРН развивается по нескольким механизмам, имеющим некоторые различия.

Имеются сведения [6-7] о проявлении КРН, которое по механизмам развития, очевидно, сопряжено с проникновением водорода в трубопроводную сталь, и проявлением водородного охрупчивания. Насыщение водородом стали магистральных газопроводов становится возможным в кислых почвах вследствие миграции ионов водорода H^+ или под действием неадекватно интенсивной катодной защиты, вследствие электрофореза из кислой коррозионной среды в металл трубопровода [8]. Абсорбированный сталью атомарный водород, растворенный в ней по механизму внедрения, испытывает давление со всех сторон кристаллической решетки, кроме дефектов (дислокации, вакансии, границы раздела зерен), и стремится быть в них вытесненным. Там он может молекуляризоваться с увеличением объема в сотни раз, создавая локальное давление до 100 атм. [9]. Более того, он способен

образовывать гидриды с некоторыми легирующими добавками, выводя их из функционального состояния растворов замещения или внедрения. На макроскопическом уровне водород изменяет упруго-пластичные свойства стали, и с его помощью может происходить как снижение ее пластических свойств через водородное охрупчивание, так и локальная пластификация зародышей трещин, приводящая к ускорению их роста [10].

Водородное охрупчивание само по себе является очень серьезной проблемой и широко обсуждается зарубежными исследователями. На данное время, вследствие развития технологий водородной энергетики и необходимости транспорта водорода, в том числе и по газопроводам вместо природного газа, данная проблема стала более актуальной [11]. Но водород может проникать в сталь трубопровода не только с наружной, но и с внутренней и внутренней стороны, из-за диссоциации на ней углеводородов (метана) [12]. Это может происходить как вследствие хемосорбции метана (основного компонента природного газа) трубопровода, так и превращениями метана в присутствии паров воды или диоксида углерода (паровая и уголекислотная конверсия соответственно) на внутренней поверхности трубопровода, представляющей собой сталь, как правило, слегка покрытой продуктами коррозии (оксидами и гидроксидами железа). Возможность низкотемпературных реакций превращения метана подтверждается самой природой. Так, железо используется как катализатор не только в технологиях химической промышленности, но и бактериями-метанотрофами, особенно облигатными, которые получают необходимую для жизнедеятельности энергию и строительный материал для клеток из метана.

Таким образом, **цель данной работы** – определение влияния ускоренных коррозионных испытаний на накопление водорода и механические свойства газопроводной стали 10Г2. Исходя из результатов данного исследования, можно будет подтвердить/опровергнуть принципиальную

возможность наводораживания внутренней поверхности газопроводов за счет диссоциации углеводородов. Для этого проведена разработка специального газового реактора, в котором симулируются условия эксплуатации реального газопровода. С использованием разработанного газового реактора проведено исследование накопления и распределения водорода в образцах газопроводной стали в зависимости от условий проведения ускоренных коррозионных испытаний. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить задачи:

1. Провести ускоренные коррозионные испытания части трубы (длина 500 мм, толщина стенки 0.85 мм) из газопроводной стали 10Г2 в специальном реакторе при температуре 100°C, давлении метана 40 атм. В течении 24 часов.
2. Подготовить образцы для элементного анализа и механических исследований из части трубы до и после коррозионных испытаний.
3. Определить влияние ускоренных коррозионных испытаний на структурно-фазовое состояние и элементный состав стали трубопровода.
4. Оценить степень деградации механических свойств стали в результате коррозионных испытаний.

ГЛАВА 1. Литературный обзор

1.1. Теоретические основы явления коррозии и представления о процессах КРН стальных трубопроводов

Коррозия – это самопроизвольный процесс разрушения металлов и металлических сплавов в результате электрохимических, химических или физико-химических взаимодействий с окружающей средой [13]. Такая среда, в которой материал подвергается коррозионному воздействию, называется коррозионной или агрессивной средой. Коррозионная среда может содержать одно или несколько веществ, которые вступают в реакцию с металлом. Данные среды, как правило, существуют в жидком или газообразном состоянии. Изменение в любой части коррозионной системы, возникающее из-за коррозионного воздействия, называется коррозионным эффектом. Обычно в результате коррозии образуются новые вещества, которые включают в себя окислы и соли корродирующего металла – продукты коррозии. Коррозионное же разрушение – термин, связанный с эффектом повреждения материала в связи с потерями механической прочности. Глубину коррозионного разрушения в единицу времени называют скоростью проникновения коррозии [14]. Первопричиной коррозии является термодинамическая неустойчивость металла в заданной среде [15].

Процессы коррозии отличаются обширным разнообразием условий и сред, в которых они протекают. Поэтому пока не существует единой мировой и всеобъемлющей систематизации всех встречающихся случаев коррозии [16]. Однако можно вывести виды коррозии в соответствии с тем, какие факторы влияют на ее возникновение, в каких внешних средах она происходит, какой характер разрушения носит подвергшийся материал и т.п.

На материалы трубопроводов оказывают влияние множество факторов, приводящих к развитию коррозионного процесса. К данным факторам

относятся наличие полостей для грунтовых вод вблизи пролегания трубопровода, наличие в грунтовых водах солей металлов, присутствие в грунте углекислого газа, азота, способствующих анаэробным условиям, микроклимат некоторых участков труб и т. д.

Процессу КРН подвержен широкий диапазон материалов при контакте с коррозионно-активными средами различного состава в процессе эксплуатации [17, 18]. Причем состав агрессивной среды напрямую влияет на чувствительность материала к КРН. Так, в работе [18] указано, что присутствие незначительной концентрации определенного вещества в коррозионной среде способно перевести материал в стадию, на которой будет происходить коррозионное растрескивание. Кроме того, в этой же работе отмечаются случаи растрескивания стекла в присутствии влаги, а также различных видов керамики и полимерных материалов при контакте с агрессивной средой. В соответствии с общепризнанными модельными представлениями о коррозионном растрескивании под напряжением конструкционных сталей, развитие трещин происходит по одному из следующих ведущих механизмов [17, 18, 19]:

- анодное растворение материала;
- коррозионно-усталостное разрушение;
- водородное охрупчивание (растрескивание).

Рассмотрим подробнее данные механизмы.

1.1.1. Анодное растворение и электрохимическая коррозия

Разрушение металла путем анодного растворения связано с электрохимической неоднородностью внешнего слоя металла. Различия в величине электродного потенциала разных участков и зон поверхности трубопровода приводит к возникновению гальванических пар и, как результат, к локализованному растворению анодных участков. В результате формируются

поверхностные микротрещины или язвы. Образование данных дефектов может реализовываться различными способами, к примеру, избирательным растворением межзеренных и межфазных границ, полос скольжения или дефектов упаковки. Дальнейшее образование и развитие более глубоких трещин обуславливается значительной быстротой растворения металла в вершине трещины по сравнению со скоростью растворения стенок [20, 21]. Такая высокая скорость растворения в вершине трещины объясняется тем, что пластическая деформация в данном регионе приводит к разрыву пассивирующих оксидных пленок [20]. При этом возникает незащищенный открытый участок поверхности металла, являющийся анодом, тогда как катодом будут являться покрытые оксидной пленкой стенки трещины. Как следствие, в вершине трещины образуются локальные напряжения, которые сопровождаются пластической деформацией, что, в свою очередь, мешает восстановлению защитной пленки в данной области и обеспечивает дальнейшее локальное растворение. Процессу пластической деформации в окрестностях вершины может способствовать хемомеханический эффект [22] – явление, которое представляет собой пластификацию приповерхностных слоев материала под влиянием химических или электрохимических реакций на его поверхности. В нейтральных средах (рН 5 ÷ 7.5) развитие трещины может сопровождаться внедрением атомарного водорода в сталь.

Электрохимическая коррозия возникает, если наряду с анодным растворением металла возможен катодный процесс, происходящий в иной окислительно-восстановительной системе с более положительным равновесным потенциалом. При электрохимической коррозии требуется наличие какого-либо электролита. Обычно в эксплуатационных условиях, это конденсат или дождевая вода. Для возникновения коррозионных процессов, с подобным электролитом необходим контакт электродов. Ими являются либо два участка поверхности материала одного изделия, либо два различных

материала в контакте друг с другом с различающимися окислительно-восстановительными потенциалами. Наличие во влаге (воде) ионов солей или кислот способствуют повышению электропроводности и, как следствие, увеличению скорости коррозии [23]. Механизм электрохимической коррозии представлен на рисунке 1.

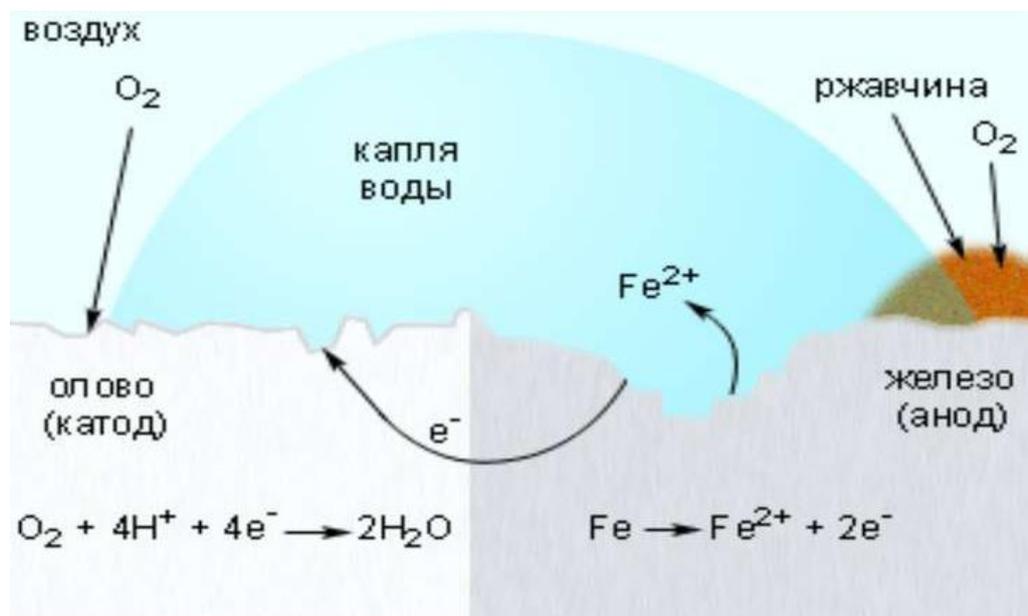


Рис. 1. Коррозионный элемент при электрохимической коррозии.

В образованной электродами и электролитом гальванической ячейке происходит длительное растворение металлического материала с более низким окислительно-восстановительным потенциалом. Обычно, второй электрод в паре не подвергается коррозии. Данному виду коррозии особенно подвержены металлам с большими отрицательными потенциалами. Места соприкосновения металлов с различными потенциалами, такие как сварные швы или заклёпки, подвержены риску в наибольшей степени [24].

1.1.2. Коррозионная усталость

Коррозионная усталость, представляющая собой комбинированное воздействие циклических напряжений и агрессивной среды, довольно распространенная проблема, которая приводит к разрушению материала.

Агрессивная среда в данном случае является ускоряющим фактором в уменьшении срока службы изделия, сокращающая количество циклов нагружения до зарождения трещин. Растрескивание в этом случае может иметь место в таких условиях среды, при которых в состоянии статических напряжений растрескивания не наблюдается. Данный факт может быть обусловлен более активной депассивацией вершины трещины под воздействием циклической нагрузки по сравнению с ползучестью в статических условиях. Как правило, возникающие трещины имеют транскристаллитный характер распространения.

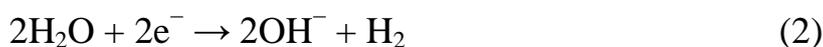
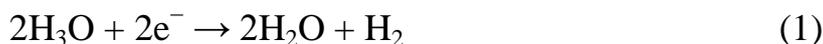
Влияние агрессивной среды на усталость материала может быть рассмотрено на двух стадиях: образования трещин и развития сформировавшейся трещины. На третьей стадии происходит ускоренное разрушение (доллом) [18]. В отсутствии коррозионной среды локализованная пластическая деформация, проявляющаяся в виде выходящих на поверхность полос скольжения, начнет вызывать трещины (стадия I). Коррозионная реакция в агрессивной среде сокращает время данной стадии за счет введения дополнительных механизмов возникновения трещин, включая локальный гальванический эффект между фазами, растворение металла после механического разрушения пассивирующего покрытия из-за пластической деформации, а так же точечную коррозию. В результате слияний вакансий, дислокаций и других дефектов решетки, а так же возникновения разрывов, которые обусловлены высокой концентрацией напряжений, начинают образовываться субмикротрещины вблизи границ зерен, частичек второй фазы, различных включений а так же в полосах скольжения. Со временем субмикротрещины превращаются в микротрещины. Любая из таких микротрещин, которая находится в более благоприятных для нее условиях, может пересечь границы зерна или нескольких зерен, превратившись в локализованную трещину. Развитие данной трещины и есть усталостное

разрушение тела. Последующий процесс усталостного разрушения материала, как правило, связан с развитием сформировавшейся трещины (стадия II). Третья стадия заканчивается тогда, когда трещина достигает критического размера и происходит окончательное разрушение [18].

1.1.3. Водородное охрупчивание (водородная коррозия)

Под термином водородное охрупчивание обычно понимают ухудшение механических свойств стали под влиянием водорода, поступающего из жидкой или газовой среды. Водородное охрупчивание изучается довольно продолжительное время, однако некоторые аспекты данного механизма до сих пор неясны. Так, в работе [25] отмечается, что в растрескивании, которое инициируется водородом, принимает участие ряд определенных процессов, выделить из которых ведущий далеко не всегда удается. В соответствии с развитыми в работах [26, 27, 28] представлениями, роль водорода заключается в облегчении зарождения дислокаций в вершине трещины, приводящей к существенно большей локализации пластической деформации.

Если наблюдается восстановление ионов H_3O^+ или молекул воды H_2O , то в таком случае говорят о водородной коррозии. Часто явления водородного охрупчивания и водородной коррозии накладываются друг на друга. Восстановление ионов водорода происходит по схемам:



1.2. Источники водорода

Источниками водорода, который поступает в металл при транспортировке нефтегазоконденсатной смеси, может являться сероводородородная среда, сульфатопродуцирующие и метанотрофные бактерии, углеводородосодержащие соединения (например, метан), а также пластовая вода

и влага, попавшая в поток даже в незначительных количествах, в непродолжительный отрезок времени [29]. Помимо всего вышеперечисленного, источником водорода, поступающего в окрестность поверхностных микродефектов, является сам металл труб, в котором изначально присутствует определенное количество водорода.

Коррозионное растрескивание под действием сероводорода – довольно распространенное явление. Оно часто приводит к выходу из строя нефте- и газопроводов и других нефтепромысловых объектов, где сероводород присутствует в различных количествах и концентрациях. Данный вид водородного охрупчивания связывают с образованием пленки FeS и водорода в результате реакции сероводорода со сталью [30]:



Полученные в результате реакции атомы водорода поглощаются и проникают в сталь в областях с высокими растягивающими внутренними напряжениями. Схема коррозионного растрескивания с участием сероводорода представлена на рисунке 2. Кроме того возможна реакция ионизации сероводорода в водном растворе с образованием ионов водорода и гидросульфида:



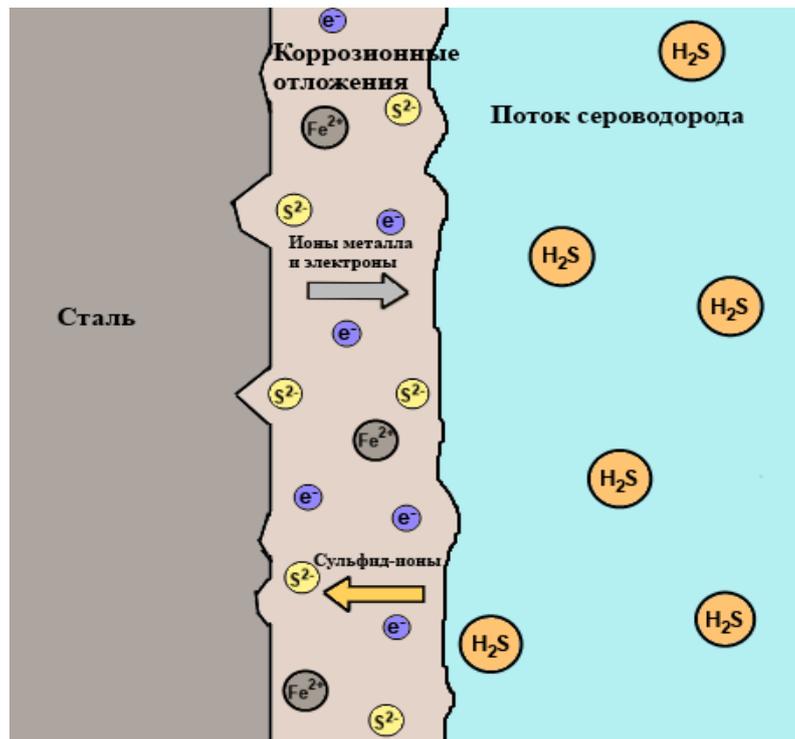


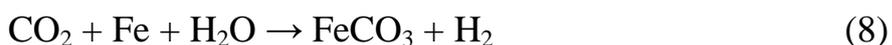
Рис.2 Схема механизма коррозионного растрескивания с участием сероводорода.

Наличие углеводородосодержащих соединений (например, распространенный в нефтегазовой отрасли метан) так же вызывает протекание коррозионных процессов на поверхности стали. Наиболее распространены реакции взаимодействия метана с влагой, в результате которой образуется атомарный водород, диффундирующий в объем стали (паровая конверсия) [31]. Реакции паровой конверсии, как правило, записывается в следующем виде:



Образующийся при этом углекислый газ так же может приводить к получению водорода из уравнений (7) и (8):





Метан может прореагировать с кислородом с образованием влаги и водорода по реакциям окисления (9), (10) и (11):



Реакции паровой конверсии метана (5) и (6) обычно проводят при достаточно высокой температуре (около 400 – 900°C) и давлении 1 – 4 МПа в присутствии таких катализаторов, как никель, медь, кобальт или железо [32].

Разница в воздействии реакций образования водорода из сероводорода и углекислого газа (8) на коррозионное растрескивание стали обуславливается природой образующих анионов $-\text{SH}^-$ и CO_3^{2-} соответственно, которые обладают разной адсорбционной способностью [32].

Сульфиды образуют плотные пленки FeS, способствующие проникновению водорода в объем металла. Атомарный водород в силу своей сверхподвижности диффундирует в объем стали и накапливается в местах сосредоточения внутренних напряжений и несовершенств кристаллической решетки.

Значительное влияние на ход указанных выше реакций оказывает пластовое давление газа. Повышение давления способствует возрастанию парциальных давлений углекислого газа и сероводорода, приводящих к существенному ускорению реакций. Возрастание парциального давления сероводорода приводит к увеличению количества проникающего в сталь водорода, а так же повышению скорости коррозии. В случае большего парциального давления углекислого газа возрастает скорость общей коррозии стали [33]. Кроме того, рост парциальных давлений сероводорода и

углекислого газа во влажной среде непрерывно снижает pH раствора, что, в конечном итоге, может так же привести к уменьшению сопротивления коррозии.

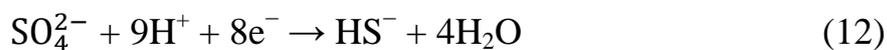
Водородное охрупчивание может наблюдаться при сварке углеродистой стали. Некоторые исследования показывают, что водородная коррозия распространяется не только вдоль границы раздела феррит-перлит, но и через сам феррит и перлит [18]. При этом, восприимчивость сварного шва к водородному растрескиванию в средах, содержащих H_2S , увеличивается с увеличением доли зернограничного феррита в зоне сплавления за счет повышенной подводимой теплоты сварки. [34]. Количество же водорода, поглощаемого металлом сварного шва, зависит от размера зерна и характера границ зерен в данной зоне. Так, небольшой размер зерна и высокоугловые границы зерен игольчатого феррита содержат больше центров захвата водорода, чем феррит, располагающийся на границах зерен. Таким образом, предполагается, что критическая концентрация водорода для образования трещин в игольчатом феррите выше, чем в зернограничном феррите.

В коррозионном процессе с участием водорода может присутствовать широкий спектр различных микроорганизмов. Известны такие виды бактерий, как сульфатредуцирующие (сульфидогенные), железоредуцирующие, сульфидокисляющие бактерии, кислотообразующие микроорганизмы и кислотообразующие грибы и т. д. Такие микробы могут значительно повлиять на ускорение процессов водородного охрупчивания на поверхности нефтегазопровода. Кроме того, колонии бактерий и грибов могут находиться на внутренней поверхности трубопровода, так как даже незначительное попадание кислорода в трубу в совокупности с влагой может спровоцировать условия для их роста, а их продукты жизнедеятельности способны реагировать с метаном и конденсатом.

Сульфатредуцирующие бактерии являются микроорганизмами, способные получать энергию за счёт окисления в анаэробных условиях водорода. Они являются причинами многочисленных проблем связанных с коррозией металлов и сплавов [35]. Большинство распространенных видов данных бактерий существуют в диапазоне температур от 25 до 35°C, хотя некоторые сульфатредуцирующие микроорганизмы выдерживают температуры до 60°C. Эти бактерии химически восстанавливают сульфаты до сульфидов, образуя такие соединения, как H₂S, значительно влияющие на анодные и катодные процессы при коррозии. В случае черных металлов, сульфатредуцирующие бактерии могут приводить к появлению пленки сульфида железа.

Биопленка, которая образуется в присутствии бактерий, значительно усиливает коррозию сталей. Кроме того, эта биопленка является электронно-проводящей благодаря включениям в неё сульфида железа [36].

На рисунке 3 показано схематическое изображение функции бактерий в коррозионных процессах. Микроорганизмы могут использовать элементарное железо в качестве источника энергии или донора электронов (анодная реакция). Кроме того, чтобы производить энергию и поддерживать электронейтральность, они используют сульфат в качестве терминального акцептора электронов в реакции на катоде [18]. Продукты коррозии в результате реакции образуются исходя из следующих уравнений:



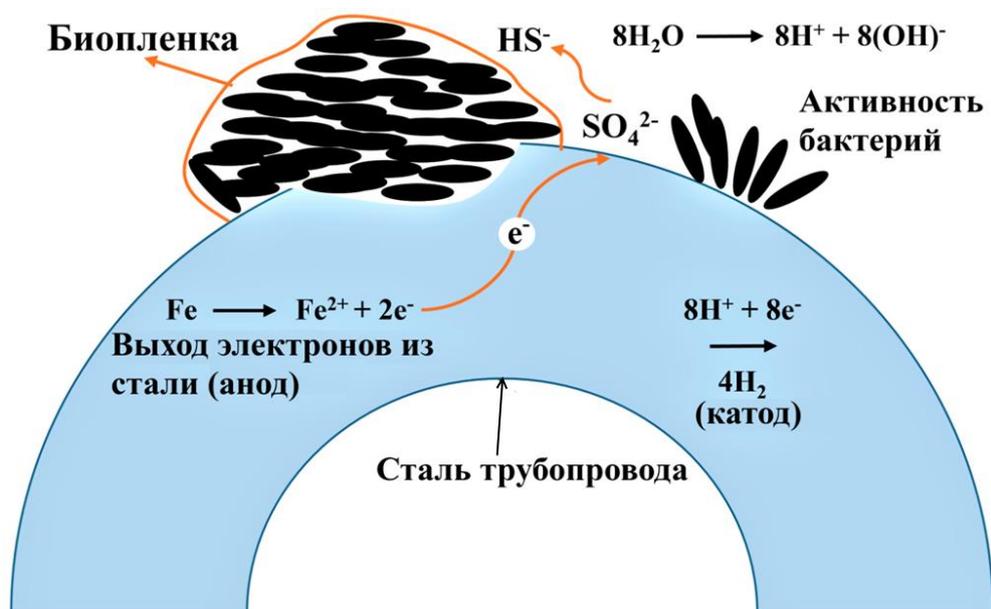


Рис. 3. Схематическое изображение функции сульфатредуцирующих бактерий в коррозии на внешней стороне трубопровода [37].

Некоторые виды сульфатредуцирующих бактерий способны окислять серу в серную кислоту (H_2SO_4), которая приводит к возникновению сильноокислой среды ($\text{pH} < 1$). Существуют бактерии, вырабатывающие иные органические кислоты, и виды, способные окислять поверхность газопровода. Все они в той или иной мере способны ускорять процессы коррозии и способствовать быстрой диффузии водорода в объем материала.

Коррозионному процессу с внутренней стороны трубопровода могут способствовать бактерии метанотрофы – уникальная группа микроорганизмов, способных использовать метан (CH_4) в качестве источника углерода и энергии. За окисление метана отвечает фермент метанмонооксигеназа (ММО), который обнаруживается только у представителей данных видов бактерий и существующий в двух формах: растворимой (рММО) и мембранной (мММО) [38].

Растворимая метанмонооксигеназа катализирует восстановленную форму никотинамидадениндинуклеотидфосфата НАДФ(Н)- и O-зависимое окисление метана до метанола вместе с влагой по формуле (16) [39]:



Мембранный метанмонооксигеназный комплекс менее изучен по сравнению с растворимым.

Большинство метанотрофов являются аэробными бактериями, которым для существования необходим атмосферный кислород. К настоящему времени описаны 18 родов аэробных метанотрофов из класса *Gamma*proteobacteria [39]. Такие микроорганизмы, конечно, не могут существовать в неблагоприятных условиях внутри трубопровода с минимальным содержанием кислорода. Однако существуют группы анаэробных метанотрофов, способных существовать в бескислородной среде [39]. Кроме того, неблагоприятные условия внутри газопровода способны даже стимулировать развитие новых микроорганизмов, устойчивых к подобному неблагоприятному воздействию со стороны окружающей среды. Так, недавние исследования показывают, что микробное окисление CH_4 наблюдалось практически во всех видах почв, вплоть до вечной мерзлоты, где существование подобных микроорганизмов должно быть крайне затруднено [39]. Протекание процессов микробного образования и окисления метана было зарегистрировано в донных осадках и в водной толще постоянно покрытых льдом озер в восточной Антарктиде [40]. И с каждым годом число новых видов метанотрофов, приспособленных к окружающей среде, увеличивается. Таким образом, существует вероятность того, что такие микроорганизмы, как анаэробные метанотрофы, могут существовать внутри газопровода.

1.3. Механизмы водородного охрупчивания

В соответствии с многочисленными источниками и факторами водородного охрупчивания было разработано множество различных теорий и моделей, которые могут объяснить различные формы водородного разрушения

материалов. выделяют следующие известные и экспериментально обоснованные механизмы инициированного водородом растрескивания:

1. Модель декогезии. Данная модель является одной из самых первых моделей, которая используется для объяснения изменения свойств материалов в результате внедрения в материал атомарного водорода [41]. Механизмы снижения когезионной прочности основываются на теории ослабления межатомных связей в результате химического взаимодействия водорода с металлом. Ослабленные связи, в свою очередь, подвергаются разрыву под действием растягивающих напряжений [42, 43]. Влияние напряжений, возникающих при скапливании водорода в вершинах трещин, приводит к хрупкому межзерновому или транскристаллитному разрушению. Механизм декогезии подтверждается наблюдением за некоторыми негидридообразующими системами, однако прямых подтверждений этого механизма получено не было [18].

2. Водородное усиление локальной пластичности (HELP – hydrogen-enhanced localized plasticity). Эта модель была предложена на основе наблюдения небольших ямок, которые обычно связаны с коалесценцией микропор на поверхности металлов в присутствии водорода [26]. Необходимым условием для этого механизма является скопление водорода в областях повышенных напряжений, например, вблизи вершины трещины или в полях напряжений дислокации. Так, скопившийся в подобных областях напряжений водород значительно уменьшает сопротивление движения дислокаций. Локальное же движение дислокации, происходящее при низких уровнях напряжения сдвига, сопровождается охрупчиванием материала [26].

3. Механизм образования гидридов. Механизм образования гидридов является хорошо известным механизмом взаимодействия водорода с металлом как с экспериментальным, так и с теоретическим подтверждением. Зарождение и рост гидридов наблюдался в образцах титана, наводороженных из газовой

фазы [44]. Было обнаружено, что гидриды зарождались в полях напряжений трещины, а затем выросли до больших размеров за счет зарождения и роста новых гидридов в полях напряжений других гидридов. Этот автокаталитический процесс зародышеобразования и роста гидридов, по-видимому, и является главной причиной охрупчивания типичных гидридообразующих элементов (например, V, Nb, Ti и Zr) [45].

4. Возникновение очагов высокого давления. Эта теория основана на механизме охрупчивания путем скопления водорода на внутренних дефектах, таких как пустоты, с последующим ростом трещин вследствие повышенного давления, скопившегося в пустотах газообразного водорода. Давление, создаваемое этим процессом, уменьшает требуемое напряжение до начала разрушения материала. Согласно данному механизму, перенос водорода движущимися дислокациями (так называемая дислокационно-динамическая диффузия) создает большие внутренние давления, даже когда внешнее давление низкое [46].

5. Теория поверхностной адсорбции. Согласно этой теории, водород адсорбируется на поверхности, примыкающей к вершине трещины, уменьшая свободную энергию поверхности и, как следствие, работу разрушения [47].

6. Захват водорода ловушками. Одним из основных факторов, определяющих подверженность стали водородному охрупчиванию, является наличие различных ловушек в металлах. Захват водорода ловушками связан со взаимодействием (соединением) атомов водорода с примесями, структурными дефектами или микроструктурными составляющими в сплаве. Ловушки водорода могут быть подвижными (дислокации), или стационарными (границы зерен или примесные атомы). Так же существует разделение на обратимые ловушки и необратимые. Первый тип относится к кратковременному захвату водорода и характеризуется низкой энергией связи; последний характеризуется

длительным временем пребывания водорода в ловушке, и характеризуется высокой энергией связи [48, 49].

1.4. Взаимодействие водорода с трубопроводной сталью

Взаимодействие водорода с трубопроводной сталью и образование стресс-коррозионных трещин может быть охарактеризовано следующим образом. Одновременно химические и физические процессы в коррозионной среде, которая контактирует со стенками трубопровода, сопровождаются возникновением в ней ионов водорода. Обладая сверхподвижностью, ионы частично проникают в стенки трубопровода, где при некоторых определенных условиях остаются внутри кристаллической решетки стали. В существенной степени на это оказывают влияние различные несовершенства решетки, такие как дефекты упаковки, дислокации и пустоты. В результате скапливания ионов H^+ в этих дефектах возникает значительная вероятность образования атомов и даже молекул водорода [50]. При этом из-за резкого увеличения объема подобных новообразований в кристаллической решетке появляются локальные зоны с огромным внутренним давлением, которое вызывает внутреннее механическое растрескивание стали. Веским стимулятором процесса стресс-коррозии может являться поле тока катодной защиты, которое, энергетически взаимодействуя с водородсодержащими ионами электролита грунта, способствует разрыву связей и переходу ионов водорода к самостоятельному активному существованию. В зависимости от величины энергии разорванной связи ионы, полученные данным способом, обладают различными запасами собственной энергии, разной проникающей способностью и подвижностью. Поэтому чаще всего наблюдается скапливание водорода на разной глубине стенок труб [50].

На данный момент механизм зарождения трещины при подробном рассмотрении разделяется на семь стадий [50].

Стадия 1. Коррозионная среда проникает к телу трубы в результате разрыва изоляции, как показано на рисунке 4.

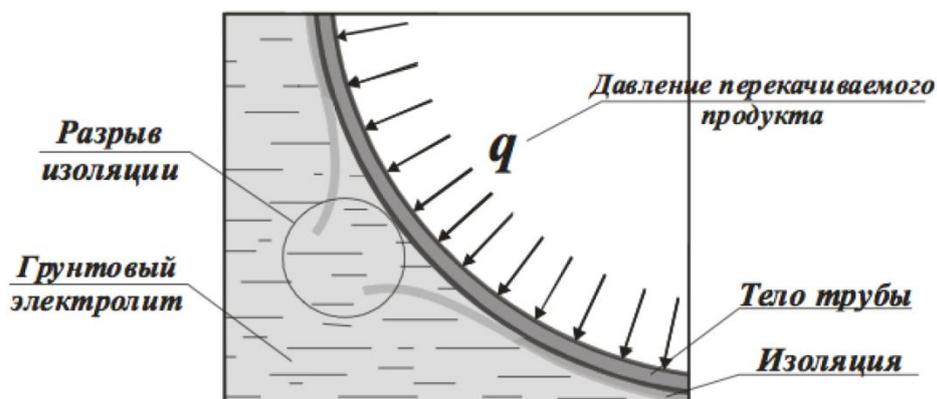


Рис. 4. Нарушение адгезии изоляционного покрытия трубопровода [50].

Стадия 2. Происходит уменьшение поверхностной энергии металла, что облегчает разрушение.

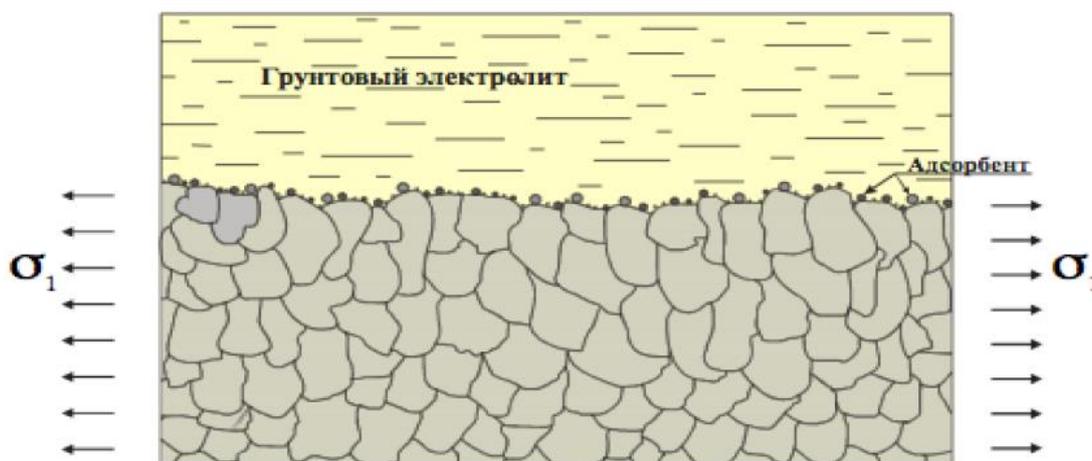


Рис. 5. Адсорбция поверхностно-активных элементов на поверхности металла [50].

Стадия 3. На данной стадии под воздействием водорода происходит микропластическая деформация поверхностного слоя.

Стадия 4. Осуществляется процесс электрохимической коррозии границ зерен, активированный различными напряжениями. В результате этого образуется поверхность металла с растворенными границами зерен.

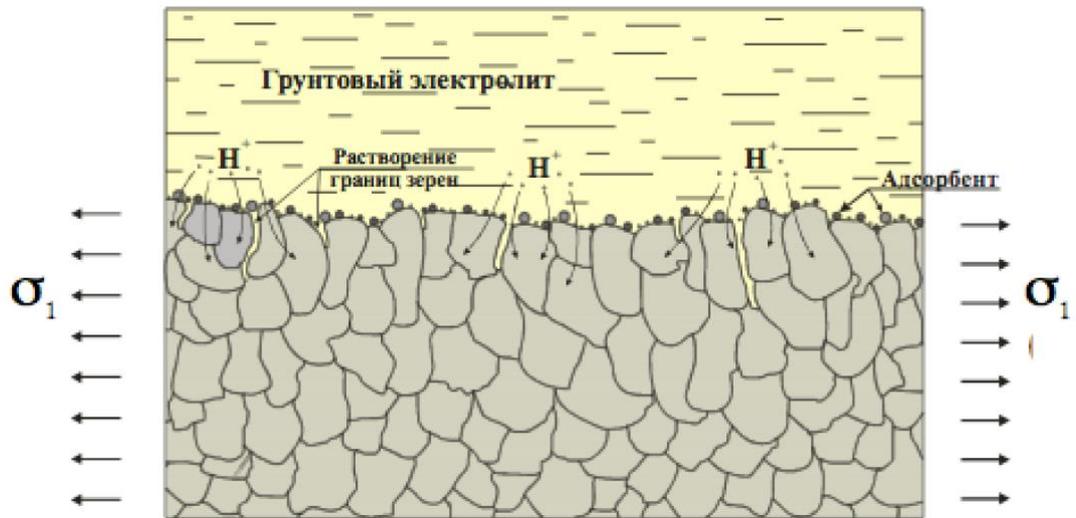


Рис. 6. Растворение границ зерен с образованием зародышей трещин [50].

Стадия 5. Здесь осуществляется процесс зарождения микротрещины. Основным элементом, способствующим разрушающему воздействию на металл, является водород (рис. 7):

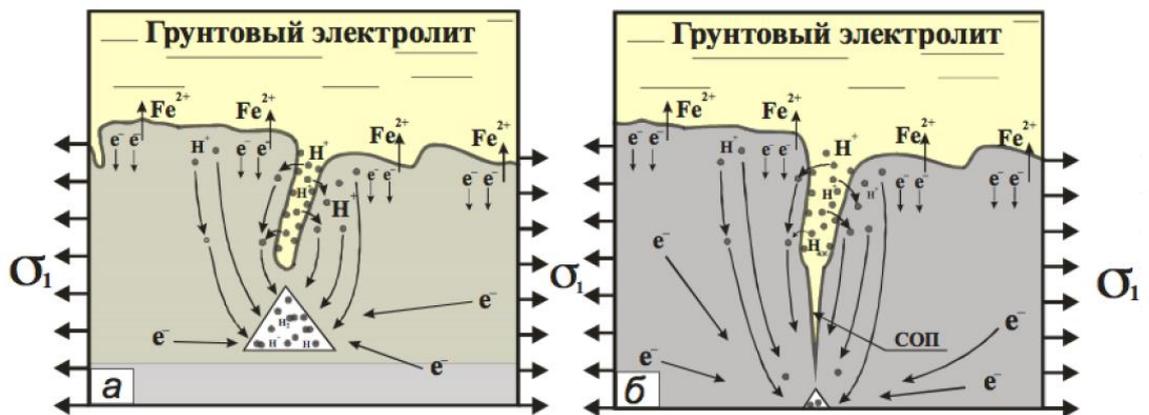


Рис. 7. Зарождение микротрещин на поверхности стали: а – диффузия ионов водорода в зону напряжений, б – образование микротрещины [50].

Стадия 6. Совершается развитие зародившейся микротрещины. Микротрещина распространяется как по глубине, так и по поверхности металла.

Стадия 7. На этой стадии в наиболее дефектной зоне последовательно расположенные трещины объединяются в одну доминирующую (магистральную) [50].

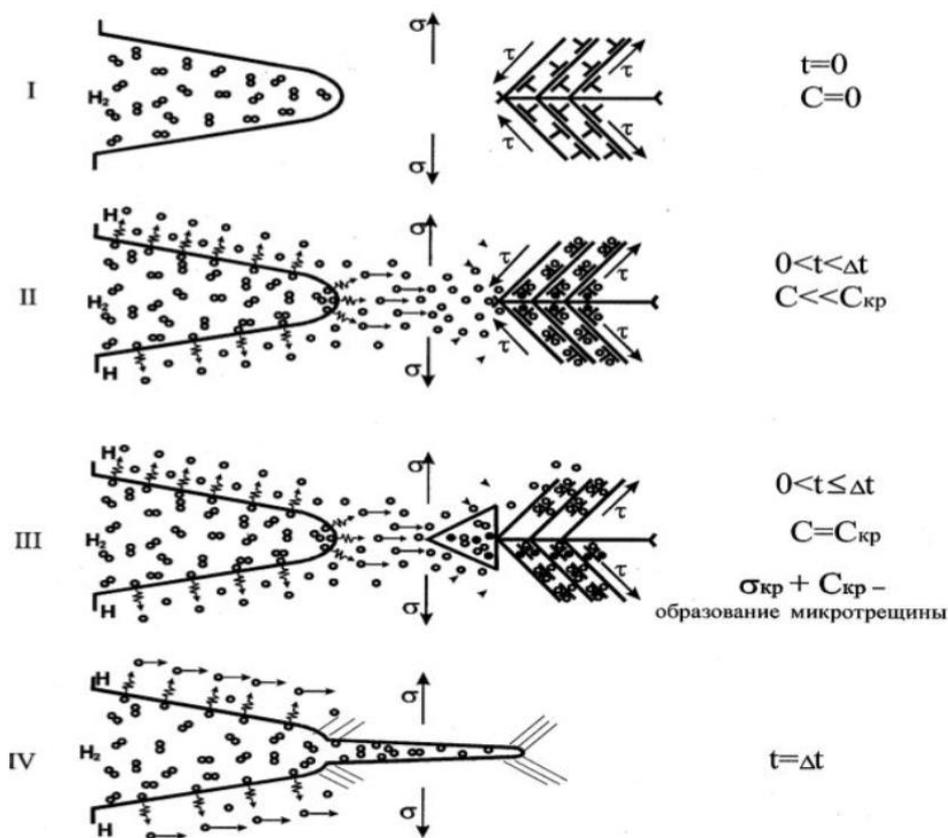


Рис. 8. Физико-механическая модель роста трещины.

Данная стресс-коррозия проходит на внешней стороны трубы. Некоторые авторы при исследовании стенок трубопровода указывали на то, что поверхность металла со стороны внутренней поверхности оставалась с исходными свойствами и достаточным запасом пластичности. При этом наблюдалось значительное охрупчивание и растрескивание наружного слоя стенки трубы [51]. Однако стоит заметить, что проблема внутреннего КРН так же хорошо освещена. В частности, в присутствии сероводорода или небольшого количества влаги в перекачиваемом продукте может идти процесс КРН со стороны внутренней поверхности [52]. Механизм стресс-коррозионного разрушения трубопровода с внутренней стороны изображен на рисунке 9.

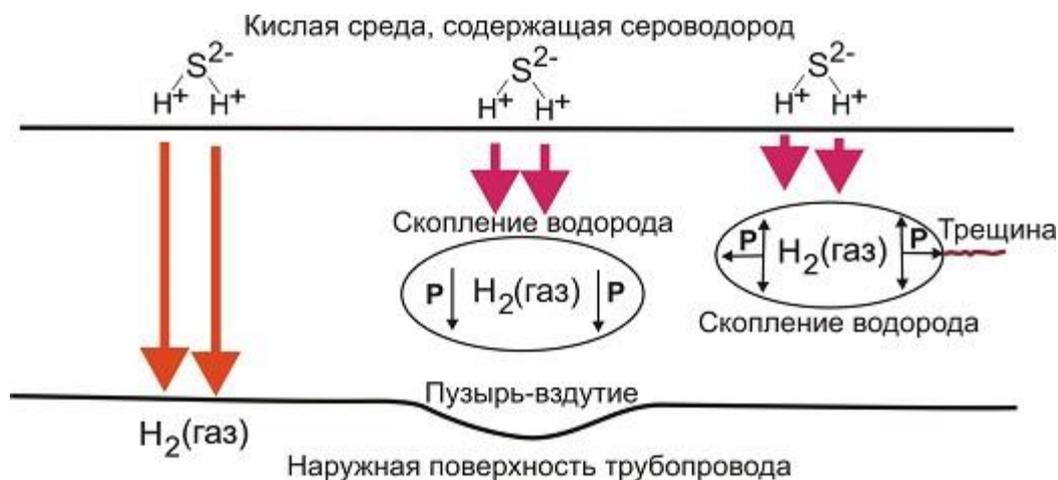


Рис. 9. Механизм внутреннего КРН [52].

В подобном случае, ионы водорода, образованные вследствие диссоциации сероводорода, диффундируют в объем металла. При этом одна часть водорода проходит насквозь стенки трубопровода и выходит с обратной стороны, а другая часть водорода или растворяется в кристаллической решетке железа, тем самым вызывая ее охрупчивание, или выходит на поверхность, образуя пузыри (блистеры). В соответствии с этим не исключено, что и диссоциация углеводородов в холодных условиях может приводить к наводороживанию и КРН внутренней поверхности трубопровода.

ГЛАВА 2. Техническая реализация методов изучения коррозионного воздействия на металл трубопровода

2.1. Экспериментальная техника

Коррозионные исследования – это ряд испытаний, которым подвергают какой-либо материал для определения его долговечности в определенных коррозионных условиях [53]. Данные исследования проводятся для того, чтобы:

- установить механизм, по которому протекает коррозионный процесс;
- определить активный компонент окружающей среды, который вызывает процесс коррозии;
- определить факторы, влияющие на протекание процессов коррозии и коррозионную стойкость материалов;
- выбрать сплав или металл, выделяющийся лучшей коррозионной стойкостью в данных условиях эксплуатации;
- определить эффективность методов защиты металлов от коррозии;
- производить контроль качества выпускаемых материалов.

Все методы исследования коррозионных процессов подразделяются на три группы:

- лабораторные исследования (испытания проводятся в лабораториях, где имитируют различные эксплуатационные условия металлов и сплавов);
- эксплуатационные исследования (исследования машин, агрегатов и различного оборудования, средств защиты в условиях их дальнейшей эксплуатации);
- внелабораторные исследования (испытания образцов в эксплуатационных естественных условиях, например, в море, на воздухе и т.п.).

Рассмотрим методы лабораторных исследований, так как именно они в основном используются для испытаний образцов металлов и сплавов.

Основным преимуществом лабораторных испытаний является возможность жесткого контроля отдельных факторов, а также относительная дешевизна методов. Наиболее важными среди лабораторных коррозионных испытаний являются так называемые ускоренные испытания. При проведении ускоренных испытаний создаются условия, способные достаточно быстро вызвать коррозионное разрушение. Как правило, такие условия достигаются путем увеличения агрессивности среды, а при выборе условий учитывается, что механизм коррозии не должен изменяться. В качестве коррозионной среды для лабораторных испытаний может использоваться газовая среда, различные электролиты, влажная атмосфера, содержащая коррозионноактивные вещества, конденсацию влаги и т. п. [53].

Для дальнейшего исследования, например, для определения концентрации водорода в образце (при использовании наводороживания – водородной коррозии) или определения влияния коррозии на прочность/пластичность могут использоваться такие устройства, как дифрактометры, спектрометры, разрывные машины и т. д.

2.2. Схема экспериментальной установки

Для симуляции воздействия агрессивной среды в исследованиях, представленных в данной выпускной квалификационной работе, использовался реактор с подачей газа (метан). В качестве образца использовался сектор трубы, вырезанный из магистрального трубопровода. Схема установки приведена на рисунке 10. Данная система изготовлена для моделирования условий, соответствующих условиям реального газопровода.

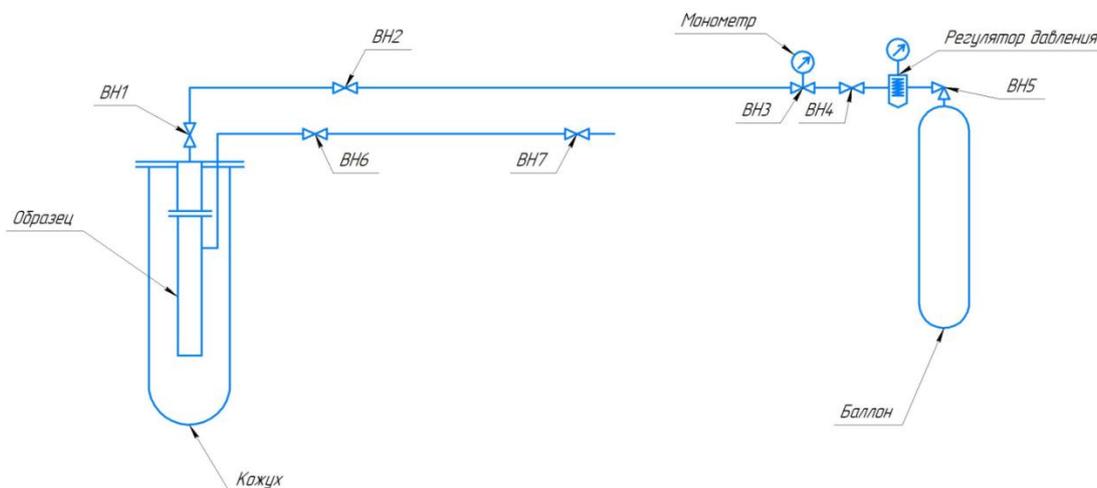


Рис. 10. Принципиальная схема реактора для симуляции условий реального газопровода.

Основная часть реактора (кожух) представляет собой закругленный цилиндр из нержавеющей стали. Чертеж кожуха показан на рисунке 11. Стенки кожуха имеют множественные отверстия для поддержания контакта образца с воздухом. Вырезанная часть трубы помещается внутрь кожуха и жестко закрепляется крышкой с фланцем. Подача газа осуществляется с помощью баллона с метаном и поддерживает давление 40 атм. внутри части трубы. Регулятор давления позволяет определить необходимое количество газа, которое нужно подать для проведения лабораторных испытаний.

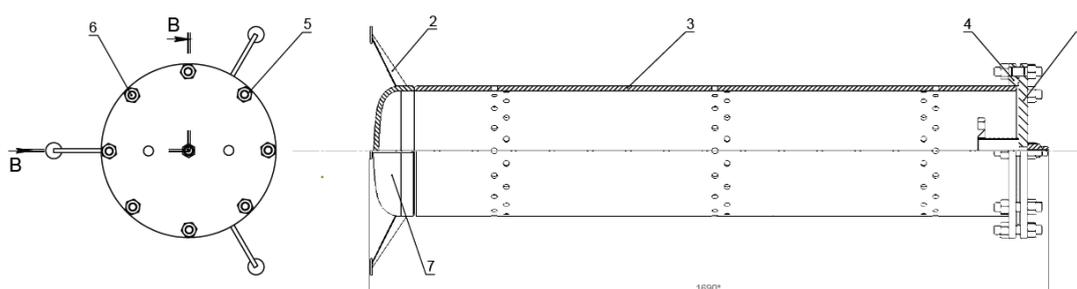


Рис. 11. Чертеж кожуха реактора. 1 – фланец, 2 – держатели (ножки), 3 – корпус, 4 – крепления, 5 и 6 – крепеж, 7 – поддон.

Принцип работы данной установки в следующем: заданное количество метана подается в резервуар. Газ проходит сквозь часть исследуемой трубы,

находящийся в резервуаре, аналогично тому, как газ подается через трубопровод под землей. С внешней стороны сектора через систему клапанов может быть подан кислород, воздух с повышенной влажностью или иной газ/жидкость. Кроме того, часть трубы, помещаемая внутрь основной части реактора, может находиться под напряжением, которое имитирует катодную защиту трубопровода. Максимальная температура, которую можно поддерживать внутри реактора, составляет 100°C. Основное количество водорода, которое влияет на водородную коррозию образца, производится путем реакций (16) и (17) из метана при добавлении перегретого водяного пара:



В сумме этот процесс можно записать уравнением (18):



Такое приспособление позволяет провести ускоренные коррозионные испытания в условиях, приближенных к условиям реального газопровода.

2.3. Образцы

Материалы для исследования были предоставлены ООО «Газпром трансгаз Томск». В качестве исходной заготовки, которая была подвергнута ускоренным коррозионным испытаниям, предоставлен отрезок трубы длиной 280, толщина стенки составляла 8 мм. Так же был предоставлен еще один отрезок трубы длиной 290 мм и толщиной стенки 7.8 мм, который не подвергался какому-либо воздействию агрессивной среды. Образцы для механических испытаний, а так же для определения элементного состава трубы, вырезались методом электроискровой резки из центральной части заготовки вдоль осевого и перпендикулярного осевому, направления трубы. Для рентгеноструктурного анализа были вырезаны плоские образцы (темплеты),

геометрические размеры которых указаны на рисунке 13 (а). Темплеты были вырезаны из сектора трубы на различной глубине, толщина данных образцов составляет ~2мм. На рисунке 12 показана ориентация образцов для испытаний и где они должны разрезаться.



Рис. 12. Чертеж образцов для проведения испытаний: а – для элементного анализа, б – для испытаний на одноосное растяжение.

Образцы для механических испытаний вырезались в форме двусторонней лопатки по ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) [54-58]. Чертеж вырезанных образцов представлен на рисунке 13 (б).

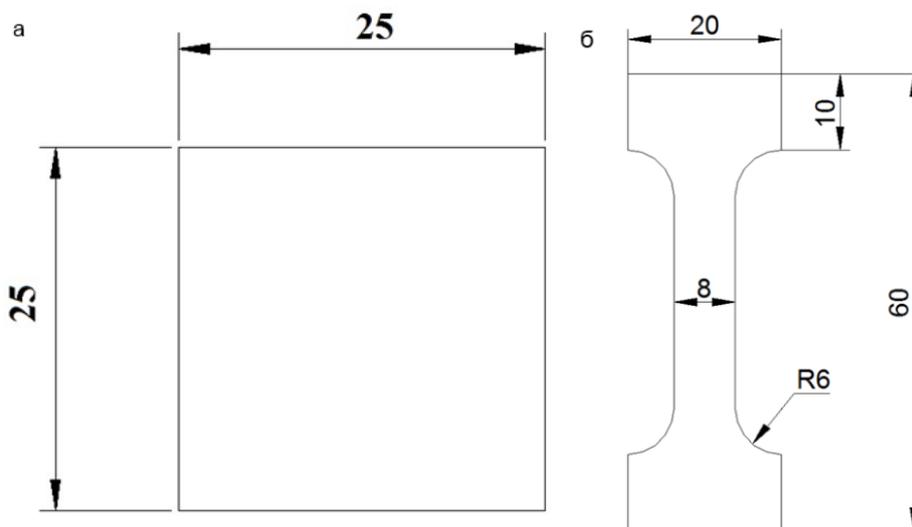


Рис. 13. Чертеж образцов для проведения испытаний: а – для элементного анализа, б – для испытаний на одноосное растяжение.

Поверхность образцов была тщательно отшлифована и отполирована механически до шероховатости 0,25 мкм. Шероховатость измерялась на установке Hommel Tester T1000.

Для исследования степени пораженности трубопроводной стали коррозионным растрескиванием под напряжением всего были изготовлены две серии экспериментальных образцов:

- серия 1 – образцы стали в исходном состоянии;
- серия 2 – образцы стали после испытания в газовой среде с влагой и нагревом.

Образцы стали в исходном состоянии вырезались из трубопровода без применения реактора с подачей метана. Для образцов 2 серии проводились испытания в течении 24 ч. при давлении 40 атм. в агрессивных условиях газовой среды с влагой и нагревом до 100°C. В дальнейшем из данной заготовки и вырезались темплеты и лопатки для проведения дальнейших исследований.

2.4. Методика проведения исследования

Для определения фазового состава темплетов трубопроводной стали были проведены рентгеноструктурные исследования. Рентгеноструктурный анализ проводился путем анализа дифрактограмм исследуемых образцов, полученных на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S, внешний вид которого представлен на рисунке 14.



Рис. 14. Внешний вид дифрактометра Shimadzu XRD-7000S.

Данный дифрактометр анализирует кристаллические состояния при нормальных условиях. Принцип работы устройства заключается в дифрагировании образцом сфокусированного на нём рентгеновского пучка. Упрощенная схема устройства изображена на рисунке 15.

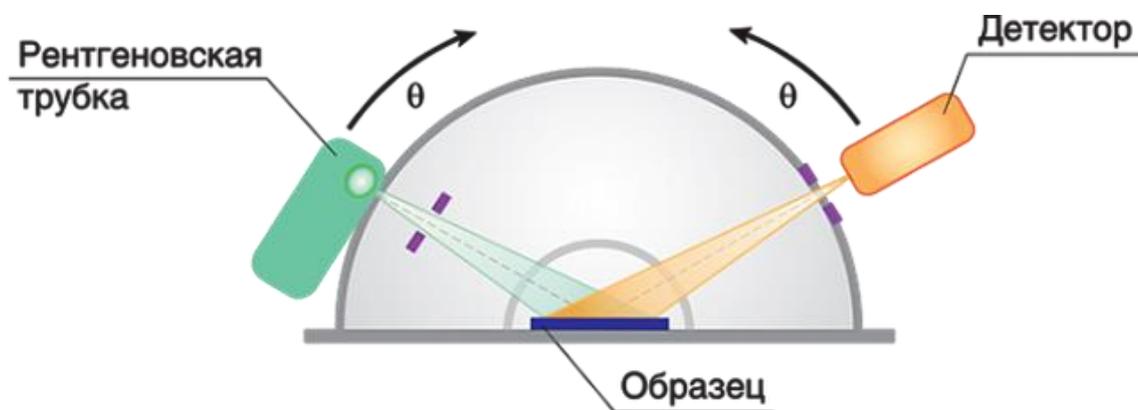


Рис. 15. Схема рентгеновского дифрактометра.

Изменения в дифрагированных рентгеновских лучах измеряются и наносятся на график в зависимости от углов поворота образца. Компьютерный анализ положений пиков и интенсивностей позволяет проводить качественный анализ, а так же дает возможность определить постоянную кристаллической

решетки. Качественный анализ может проводиться на основе высоты пика или площади пика. Углы и профили пиков могут быть использованы для определения диаметров частиц и степени кристаллизации.

Дифракционные картины для трубопроводной стали регистрировались с использованием $\text{Cu } K\alpha_1/\alpha_2$ излучения. В ходе проведения исследования использовался диапазон углов $10 - 90^\circ$, шаг сканирования составлял 0,0143, накопление в точке – 2,149 секунды. Дифракционные картины регистрировались при помощи широкоугольного высокоскоростного 1280-канального детектора OneSight. Средний размер кристаллитов был определен с помощью уравнения Дебая-Шеррера по уширению дифракционных максимумов с учетом инструментального уширения и программного обеспечения PowderCell 2.4. Уравнение Дебая-Шеррера:

$$d = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (19)$$

где d – средний размер кристаллитов, K – постоянная Шеррера, λ – длина волны, β – ширина рефлекса на полувысоте, θ – угол дифракции.

Инструментальное уширение было определено на полуширине максимума стандартного порошка кремния и составило 0,1.

Исследование элементного состава образцов трубопроводной стали было проведено с помощью оптического спектрометра высокочастотного тлеющего разряда GD Profiler 2, представляющего собой оптический эмиссионный спектрометр радиочастотного тлеющего разряда (RF GD-OES). В приборе сочетаются – тлеющий разряд (GD), возбуждаемый радиочастотным источником RF и спектрометр оптической эмиссии (OES).

Исследование механических свойств испытанием на одноосное растяжение проводилось с использованием испытательной машины Com Ten DFM-5000 при постоянной нагрузке (0.5 мм/мин). Внешний вид установки представлен на рисунке 16.

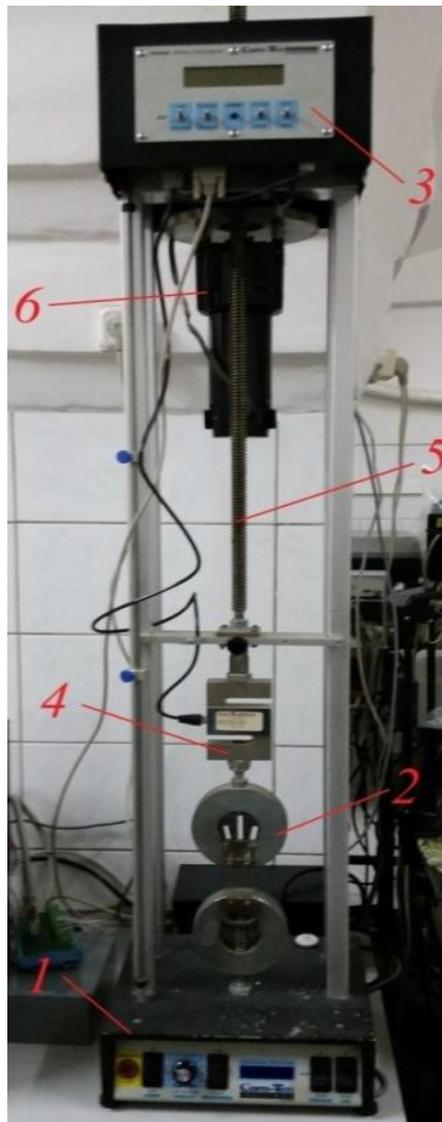


Рис. 16. Разрывная машина: 1 – панель управления; 2 – зажимы образца; 3 – цифровой датчик усилия; 4 – тензодатчик; 5 – силовой винт; 6 – мотор

Исследования на ударную вязкость проводились в соответствии с ГОСТ 9454-78 [58] на образцах Шарпи сечением $5 \times 5 \text{ мм}^2$ при комнатной температуре на испытательной машине Instron 450 MPX.

ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе поиска источников финансирования научных исследований и коммерциализации их результатов необходимым условием является оценка коммерческой ценности результатов работы. Прежде всего, необходимо произвести анализ потребителей результатов исследования и выявить сегмент рынка.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. Для данной научной работы целевым рынком являются различные высокотехнологичные предприятия газодобывающей отрасли, связанные с обслуживанием газопровода.

4.2. Организация и планирование работ

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Для достижения и выполнения конкретной цели при выполнении научных исследований в выпускной квалификационной работе, необходимо формирование рабочей группы. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. В таблице 8 приведен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования в выпускной работе.

Таблица 8. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Номер работы	Этапы работы	Содержание работ	Должность исполнителя
1	Разработка задания на НИР	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель (НР)

2	Выбор направления исследований	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель (НР)
		Календарное планирование работ по теме	Студент-инженер (СИ)
3	Теоретические и экспериментальные исследования	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент-инженер (СИ)
		Проведение симуляции условий реального трубопровода на куске трубы	Инженер (И), научный руководитель (НР)
		Получение образцов двух типов из куска исследуемой трубы	Инженер (И)
		Подготовка образцов для исследований	Студент-инженер (СИ)
		Проведение рентгеноструктурного анализа	Студент-инженер (СИ)
		Проведение элементного анализа и анализа распределения водорода по глубине трубы	Студент-инженер (СИ)
		Проведение испытаний на одноосное растяжение	Студент-инженер (СИ)
		Проведение испытаний на ударную вязкость	Студент-инженер (СИ)
4	Обобщение и оценка результатов	Оценка эффективности полученных результатов	Студент-инженер (СИ)
		Определение целесообразности проведения НИР	Студент-инженер (СИ)
5	Оформление отчета по НИР	Составление пояснительной записки	Студент-инженер (СИ)
		Составление, оформление и защита ВКР	Студент-инженер (СИ)

4.2.2. Продолжительность этапов работ

Главным фактором отражения основной части стоимости научной разработки являются трудовые зарплаты. Исходя из этого, важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Для оценки трудоёмкости выполнения научного исследования выпускной квалификационной работы используют экспертный путь, определяемый человеко–днями. Для определения ожидаемого значения трудоемкости используют следующее соотношение (формула 20):

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (20)$$

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; t_{min} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы чел.-дн.; t_{max} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя (формула 21):

$$t_{ож} = \frac{3 * 15 + 2 * 18}{5} = 16,2 \text{ чел. - дн.} \quad (21)$$

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для студента (формула 22):

$$t_{ож} = \frac{3 * 180 + 2 * 280}{5} = 220 \text{ чел. - дн.} \quad (22)$$

Произведем оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для инженера (формула 23):

$$t_{ож} = \frac{3 * 10 + 2 * 15}{5} = 12 \text{ чел. - дн.} \quad (23)$$

Рассчитав ожидаемую трудоемкость работ, определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующему соотношения (формула 24):

$$T_{pд} = \frac{t_{ож}}{K_{И}} * K_{д}, \quad (24)$$

где $T_{pд}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.; $K_{И}$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе; $K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию не предвиденных задержек и согласование работ, $K_{д} = 1$.

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя (формула 25):

$$T_{pд} = \frac{16,2}{3} = 5,4 \text{ раб. дн.} \quad (25)$$

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для студента (формула 26):

$$T_{pд} = \frac{220}{3} = 73,3 \text{ раб. дн.} \quad (26)$$

Произведем расчет продолжительности работы выполнения научного исследования для инженера (формула 27):

$$T_{pд} = \frac{12}{3} = 4 \text{ раб. дн.} \quad (27)$$

Для проведения научного исследования, представленного в выпускной квалификационной работе, выбирают специальную узконаправленную научную тему. Для этого строится специальный ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения графика необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением (формула 28):

$$T_{КД} = T_{РД} * T_{К}, \quad (28)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{К}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением (формула 29):

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (29)$$

где $T_{КАЛ}$ – количество календарных дней в году; $T_{ВД}$ – количество выходных дней в году; $T_{ПД}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитаем коэффициент календарности (формула 30):

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205 \quad (30)$$

Результаты расчетов сводятся в таблице 9.

Таблица 9. Временные показатели проведения научного исследования

Номер работы	Исп.	Трудоемкость работ			Длитель. работ в рабочих днях $T_{РД}$	Длитель. работ в календар. днях $T_{КД}$
		t_{\min} , чел- дни	t_{\max} , чел- дни	$t_{ож}$, чел-дни		
1	НР	2	4	2,8	0,9	1,1
2	НР	2	3	2,4	0,8	1
	СИ	4	6	4,8	1,3	1,6
3	НР	8	15	10,8	3,6	4,3
	СИ	100	210	144	48	57,8
	И	10	15	12	4	4,8
4	СИ	18	30	22,8	7,6	9,2

5	СИ	30	45	36	12	14,5
Итого	НР			16	5,3	6,4
	СИ			207,6	68,9	83,1
	И			12	4	4,8

На основании таблицы 9 построим календарный план-график.

Таблица 10. Календарный план-график проведения ВКР по теме «Исследование влияния коррозионной среды на накопление и распределение водорода в трубопроводной стали».

№ работ	Вид работ	Исп.	Т _{кд} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь			февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Разработка задания на НИР	НР	1,1															
2	Выбор направления исследований	НР, СИ	1															
			1,6															
3	Теоретические и экспериментальные исследования	НР, СИ, И.	4,3															
			57,8															
			4,8															

4	Обобщение и оценка результатов	СИ	9,2						
5	Оформление отчета по НИР	СИ	14,5						

Таблица 11. Исполнители календарного план-графика

Научный руководитель	
Студент	
Инженер	

4.3. Бюджет научного исследования

4.3.1. Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчет материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий.

Таблица 12. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Газопроводная сталь 10Г2	Кг.	5	25	125
Бумага	Лист	120	0,52	62,4
Газовый баллон с метаном	Л.	12500	500	12500
Интернет	М/бит (пакет)	1	350	402,5
Графитовый тигель для ЛЕСО	шт.	10	1000	10000
Дополнительная литература	шт.	2	960	1920
Всего за материалы				25010
Транспортно-заготовительные расходы (3 – 5%)				1200
Итого по статье				26210

4.3.2. Расчет заработной платы

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе.

Среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по формуле 31:

$$Z_{\text{дн-т}} = \frac{MO}{25,083}, \quad (31)$$

где MO – месячный должностной оклад работника, руб.

Таблица 13. Расчёт основной заработной платы

Исп.	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб
НР	39464	1573,34	6	1,699	16038,63
СИ	9584	382,09	69	1,6	42182,74
И	23470	935,69	4	1,62	6063,27
Итого:					64284,64

4.3.3. Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляет 30% от полной заработной платы по проекту и рассчитывается по формуле 32:

$$C_{\text{соц}} = 64284,64 * 0,3 = 19285,39 \text{ руб} \quad (32)$$

4.3.4. Расчет затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность реактора для симуляции условий газопровода составляет 4,2 кВт/час; потребляемая мощность анализатора RHEN-602 фирмы LECO составляет 8,8 кВт/час; дифрактометра – 8 кВт/час; спектрометра тлеющего разряда GD Profiler 2 – 10,9 кВт/час; разрывной машины – 5 кВт/час.

Реактор работал непрерывно в течении 24 ч. Ежедневная работа на анализаторе составляет 0,1 часа; на дифрактометре – 0,06 часа; на спектрометре тлеющего разряда – 1 час; на разрывной машине – 0,06 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5,748 рубля за 1 кВт/час. Следовательно, стоимость электропотребления за 5 месяцев составляет (формула 33):

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} * C_{\text{э}} * t_{\text{об}} \quad (33)$$

где $P_{\text{ОБ}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $\text{Ц}_{\text{Э}}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию приведены в таблице 14.

Таблица 14. Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты, $\text{Э}_{\text{ОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	206,7	0,3	356,4
Реактор для симуляции условий газопровода	24	4,2	100,8
Анализатор RHEN-602	5,2	8,8	263,03
Дифрактометр	3,1	8	142,55
Спектрометр тлеющего разряда	52	10,9	3257,97
Разрывная машина	3,1	5	89,1
Итого:			4209,85

4.3.5. Расчет амортизационных расходов

Средства на покупку всех установок не затрачивались, так как были давно приобретены лабораторией. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления на оборудование. Рассчитаем амортизацию для анализатора RHEN-602 фирмы LECO. Срок полезного использования анализатора составляет 10 лет, поэтому норма амортизации равна (формула 34):

$$H_a = \frac{1}{n} * 100 = \frac{1}{10} * 100 = 10\% \quad (34)$$

где H_a – норма амортизации в процентах, n – срок полезного использования в годах.

Первоначальная стоимость оборудования составляет 7 000 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит (формула 35):

$$C_{AM} = \frac{C_{OB} * H_a * t_{pф}}{F_D} = \frac{7000000 * 0,1 * 5,2}{100} = 36400 \text{ (руб.)} \quad (35)$$

где C_{OB} – первоначальная стоимость оборудования; $t_{pф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования.

Первоначальная стоимость персонального компьютера составляет 45 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит (формула 36):

$$C_{AM} = \frac{C_{OB} * H_a * t_{pф}}{F_D} = \frac{45000 * 0,4 * 206,7}{2384} = 6680,54 \text{ (руб.)} \quad (36)$$

4.3.6. Расчет прочих расходов

Прочие расходы научного исследования составляют 10 % от суммы всех предыдущих расходов, а именно (формула 37):

$$C_{проч} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об} + C_{AM}) = (26210 + 64284,64 + 19285,39 + 4209,85 + 43080,54) * 0,1 = 15707,042 \text{ руб} \quad (37)$$

4.3.7. Расчет общей себестоимости разработки

Формирование бюджета научно-исследовательского проекта является основой для определения бюджета затрат проекта, и формируется исходя их вышеприведенных расчетов. Результатом является таблица 15 расчетов бюджета затрат проекта.

Таблица 15. Расчет бюджета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условные обозначения	Сумма, руб
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	26210
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	64284,64
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	19285,39
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл}}$	4209,85
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	43080,54
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	15707,042
Итого:	C	172777,46
Прибыль	$C_{\text{приб}} = C * 20\%$	34555,49
НДС	$\text{НДС} = (C_{\text{приб}} + C) * 20\%$	41466,59
Цена разработки НИР		248799,54

4.4. Определение сравнительной эффективности исследования

Т.к. полученный результат выполненного проекта предполагает использование только в сфере научных исследований, то оценка его экономического эффекта и эффективности не корректна.

Вывод

В данной выпускной квалификационной работе проводились исследования с использованием различного оборудования. Бюджет затрат, приведенный в таблице 15, обуславливается сравнительно большими затратами по электроэнергии и затратами на амортизацию. Большинство оборудования уже самортизировано, поэтому расчет амортизации проводился для относительно новых установок.

ГЛАВА 5. Социальная ответственность

5.1. Вводный обзор

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды. Для выполнения данной работы проводилась серия экспериментов с применением различных установок, помогающих решить поставленные задачи. Рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ особенно важно при проведении экспериментальных исследований.

В процессе выполнения этих исследований было использовано несколько помещений. Большинство работ проводилось в научно-учебных аудиториях третьего корпуса ТПУ, так как в данных помещениях находятся необходимые установки и техника для выполнения исследований. Для одного из рабочих помещений в данном разделе будет приведен расчет производственных факторов, таких как освещенность.

5.2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе со всеми вышеперечисленными установками допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте [59]. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с использованием спектрометра тлеющего разряда, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора имеющие не менее II группы по электробезопасности и

получившие допуск к работе с газовыми баллонами, работающими под давлением.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца. Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж.

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
- инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением;
- инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

5.3. Техногенная безопасность

Большинство установок, которые использовались для выполнения данной работы, работают за счет питания от сети переменного тока напряжением 220 В. Такие установки, как реактор для проведения коррозионных испытаний и газоанализатор RHEN-602, используют токсичные или взрывопожароопасные газы. При утечке газа из баллона возможно удушье, отравление, а также возгорание и взрыв, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами. Необходимо проверять целостность газового баллона и прочность его закрепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне [60].

Для оценки вредных и опасных факторов рассмотрим одну из аудиторий, используемую для выполнения исследований. Помещение, в котором располагается анализатор RHEN-602 а так же спектрометр тлеющего разряда GD-Profilер 2 имеет линейные размеры 6×5,5 м и высоту 3,5 м и располагается на цокольном этаже.

5.4. Анализ вредных факторов

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [61]. Выявленные опасные и вредные факторы при выполнении исследований приведены в таблице 16.

Таблица 16. Возможные опасные и вредные факторы.

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	– СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [62].
2. Превышение уровня шума	-	+	-	– СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [63].
3.Отсутствие или недостаток естественного света	-	-	-	-
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	-	+	-	– СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-

				05-95 [64].
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	–СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях [65]. –ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [66]. –ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности [67].

5.3.1. Микроклимат

На человека воздействует микроклимат, который включает в себя температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха, атмосферное давление, тепловую радиацию нагретых предметов, солнца и вредные вещества в воздухе. Неблагоприятное сочетание параметров микроклимата может вызвать перенапряжение механизмов терморегуляции, перегрев или переохлаждение организма.

В производственных помещениях, где производится работа, связанная с использованием высокотехнологичных и высокоточных установок, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата для категории работ Ib по затрачиваемой работниками энергии (физические энергозатраты от 120 до 150 ккал/ч). В ходе исследований производилось закрепление образцов а так же подключение установок, что по энергозатратам соответствует именно этой категории работ. Санитарными нормами микроклимата производственных помещений СанПин 2.2.4.548-96 [62] установлены оптимальные нормы

температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха с учетом тяжести выполняемой работы и периодов года (таблица 17).

Таблица 17. Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений.

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, ф%	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21 – 23	20 – 24	40 – 60	0,1
Теплый	22 – 24	21 – 25		0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. В аудиториях с газоанализатором и спектрометром тлеющего разряда вентиляция может проводиться как с помощью кондиционера, так естественным путем – наличие двух окон является достаточной мерой. Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемых помещениях регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1м/с, температура летом – от 20 до 25°С, зимой – от 15 до 19°С. Данные значения укладываются в допустимые показатели микроклимата в рабочих помещениях.

5.3.2. Производственный шум

Всякий нежелательный в данный момент звук человек воспринимает как шум. Машины и механизмы, используемые на производстве, являются источниками звуков различной частоты и интенсивности, изменяющихся во

времени. Шум может вызвать головную боль, раздражительность, быструю утомляемость, потерю слуха, повышение артериального давления [71].

Соответственно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [63], предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для работ с измерительными и аналитическими приборами в лабораториях представлены в таблице 18.

Таблица 18. Допустимые уровни звукового давления.

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами	Полоса частот, Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	Уровни звука, дБ	93	79	70	68	58	55	52	52	49
Уровни звука и эквивалентные уровни звука (дБА)	60									

При выполнении исследований, представленных в данной выпускной квалификационной работе, уровень шума на рабочем месте находится в пределах нормы (незначительное превышение уровня звука). Несмотря на посторонние шумы, исходящие из соседних помещений (например, от форвакуумных насосов), необходимый для комфорта уровень звукоизоляции достигается за счет использования средств коллективной защиты: акустических экранов и виброизолирующих опор. Так же предусмотрены средства индивидуальной защиты: спецодежда и противозумные наушники [71].

5.3.3. Электромагнитные поля

Выпускная квалификационная работа была выполнена с использованием ПЭВМ и различных исследовательских установок, которые являются источниками электромагнитного излучения. Экраны, провода, кабеля и блоки

аппаратуры являются источниками электромагнитного излучения. Длительное систематическое воздействие электромагнитных полей на организм человека приводит к функциональным изменениям, в первую очередь нервной системы [67].

Согласно санитарно-эпидемиологическим правилам [65, 67] оценку электромагнитных полей осуществляют отдельно по напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля.

Ослабление мощности электромагнитного поля достигается путем удаления источника излучения от рабочего места (экраны ПЭВМ должны находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя); либо путем экранирования источников излучения. К средствам индивидуальной защиты от электромагнитного излучения относятся комбинезоны и халаты из металлизированной ткани, осуществляющие защиту организма человека по принципу сетчатого экрана.

5.3.4. Освещенность

Рациональное освещение помещений и рабочих мест является важной и непростой технической задачей, решение которой обеспечивает нормальные гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные источники света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдение правил и техники безопасности. В зависимости от источника света освещение может быть трех видов: естественное, искусственное и совмещенное (смешанное). Основные требования и значения нормируемой освещенности рабочих поверхностей изложены в СНиП 23-05-95 [64].

При учете особенностей процесса работ на газоанализаторе RHEN-602, спектрометре тлеющего разряда GD-Profilер 2, а так же на других установках,

используемых в данной работе (не требуют освещения для работ высокой точности) допускается применение системы общего равномерно освещения.

Помещения с газоанализатором и спектрометром имеет следующие параметры: $H = 350$ см; $S = 33$ м²; $h_c = 35$ см; Рассчитаем высоту светильника над полом, высоту подвеса (формула 42):

$$h_n = H - h_c = 350 - 35 = 315 \text{ см.} \quad (42)$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{рп} = 75$ см; Рассчитаем высоту светильника над рабочей поверхностью (формула 43):

$$h = h_n - h_{рп} = 315 - 75 = 260 \text{ см.} \quad (43)$$

При освещении рабочего помещения двухламповыми светильниками ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников, в соответствии с требованиями, наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 м. Рассчитанная величина $h = 2,6$ м не соответствует требованиям.

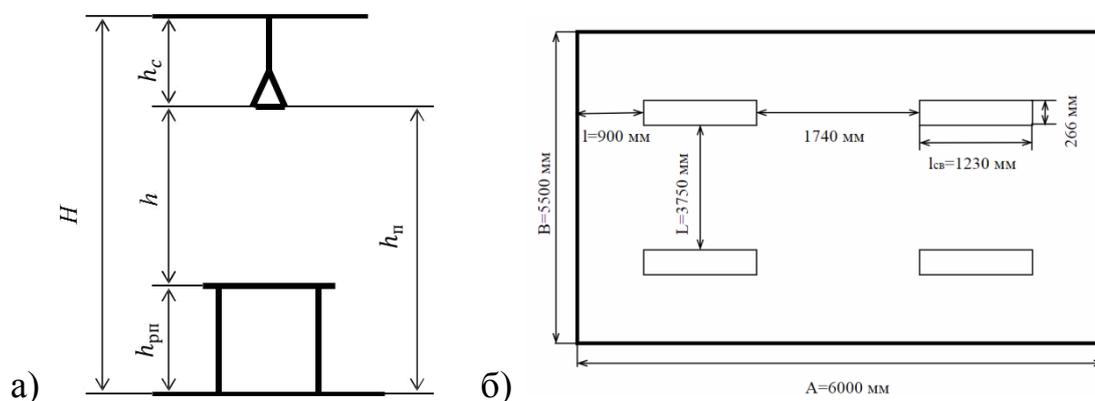


Рис. 22. Основные расчетные параметры общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности (а) и план помещения с люминесцентными лампами (б).

Для искусственного освещения наиболее распространено применяются люминесцентные лампы, так как они более экономичны энергетически и обладают большим сроком службы. В помещении используют лампы типа ЛД с мощностью 40 Вт и световым потоком 2300 Лм, двухламповые светильники

типа ОД–2–40. Длина светильника – 1230 мм, ширина – 266 мм, высота – 158 мм. Расстояние между соседними светильниками: $L = 3,75$ м; расстояние от крайних светильников до стены: $l = 0,9$ м. Данное расстояние от крайних светильников до стены является подходящим, так как необходимая величина равна (формула 44):

$$\frac{L}{3} = \frac{3,75}{3} = 1,25 \text{ м.} \quad (44)$$

Интегральный критерий оптимальности расположения светильников должен составлять 1,4 для люминесцентных светильников. Рассчитаем оптимальное расстояние между светильниками (формула 45):

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,6 = 3,64 \text{ м.} \quad (45)$$

Эта величина полностью соответствует настоящему расположению светильников. Число рядов светильников в помещении рассчитывается по формуле 46:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{5,5 - \frac{2}{3} \cdot 3,64}{3,64} + 1 \approx 2 \quad (46)$$

Число светильников в ряду рассчитывается по формуле 47:

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{6 - \frac{2}{3} \cdot 3,64}{1,23 + 0,5} \approx 2 \quad (47)$$

Количество ламп, используемых в помещении (формула 48):

$$N = n_{\text{ряд}} \cdot n_{\text{св}} \cdot 4 = 2 * 2 * 4 = 8 \quad (48)$$

Индекс помещения определяется по формуле 49:

$$i = \frac{S}{h(A + B)} = \frac{33}{2,6 \cdot (6 + 5,5)} = 1,104 \quad (49)$$

Коэффициент использования светового потока для светильников с люминесцентными лампами при коэффициенте отражения потолка $\rho_{\text{п}} = 70 \%$, коэффициенте отражения стен $\rho_{\text{ст}} = 50 \%$, и индексе помещения $i = 1,1$ равен $\eta = 0,5$ [64]. Потребный световой поток одной люминесцентной лампы светильника определяется по формуле 50:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 33 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,5} = 2722 \quad (50)$$

Делаем проверку выполнения условия (формула 51):

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{станд}}} \cdot 100\% \leq 20\% \quad (51)$$

$$\frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{станд}}} \cdot 100\% = \frac{2300 - 2722}{2300} \cdot 100\% = -18,4 \%$$

Таким образом, необходимый световой поток светильника выходит за пределы требуемого диапазона. Как было указано ранее, высота $h = 2,6$ м не соответствует требованиям. Наименьшая допустимая высота подвеса над полом должна составлять 3,5 м.

5.4. Анализ опасных факторов производственной среды

5.4.1. Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока. Воздействие электрического напряжения на человека связано с протеканием через него тока. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. По ГОСТ 12.1.038-82 [66] установлены предельно

допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при взаимодействии их с переменным током частотой 50 Гц, соответственно 2 В и 0,3 мА.

Для характеристики воздействия переменного тока частотой 50 Гц на человека установлены три степени его воздействия и пороговые значения.

Таблица 19 – Пороговые значения токов.

Значение порогового тока	ощутимого	неотпускающего	фибрилляционного
Переменный, 50 Гц	0,5 мА – 1,5 мА	10 мА – 15 мА	100 мА – 5 А

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещение без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещение с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасное помещение). Лаборатория относится к помещению с особой опасностью поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. К средствам коллективной защиты относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов [70].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия: содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами; своевременно проводить техническое обслуживание; соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием; проводить инструктаж для работников [70].

5.4.2. Факторы пожарной и взрывной природы

Согласно НПБ 105-03 [72] по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д. Лаборатории, в которых проводились исследования, представленные в данной работе, относятся к категории А – вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой или кислородом воздуха. Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам электрического характера, в том числе: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия: использование только исправного оборудования; проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности; отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ; содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды. Первичные средства пожаротушения включают в себя пожарные рукава, пожарный кран, переносные и передвижные огнетушители. В зависимости от применяемого огнетушащего вещества огнетушители разделяются на водные, пенные, газовые, порошковые и комбинированные [73].

При возникновении возгорания необходимо немедленно прекратить работу, закрыть баллон с газом, отключить электрооборудование, позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 010, сообщить о случившемся руководителю подразделения и приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения.

5.5. Охрана окружающей среды

Охрана природы и рациональное использование природных ресурсов – это комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор водорода и рабочего газа для реактора в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух). Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера.

Помимо всего вышеперечисленного, необходимо улучшить систему улавливания/фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов, так как масло и масляные пары непосредственно влияют на окружающую среду в целом. В данный момент стоят фильтры улавливающие масло и масляные пары, но все же, используемые фильтра не улавливают все вредные вещества.

Кроме того, существует необходимость применения отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика, резины и т. д. В этом случае необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

5.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Производство находится в городе Томске типичными чрезвычайными ситуациями на объекте могут быть сильные морозы, пожар и диверсии. Достижение критически низких температур может привести к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы или обморожениям.

В случае заморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели.

Самым распространенным видом ЧС является пожар. Под пожаром понимают неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государству. В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей [73, 74].



Рис. 23. План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса № 3, подвал

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (рис 1.), порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу [74].

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения,

круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Вывод

В результате рассмотрение безопасности работы и гигиены труда при осуществлении эксплуатации различных установок, были рассмотрены важные факторы техногенной безопасности, такие как опасность поражения электрическим током и опасность возникновения пожаров. Также были проанализированы различные вредные факторы и рассмотрены чрезвычайные ситуации. В целях практической работы, был произведен расчет искусственной освещенности рабочей зоны помещения. В результате расчета выявлено, что наименьшая допустимая высота подвеса над полом не соответствует требованиям. В таких случаях производят корректировку количества ламп или высоты подвеса.

Заключение

В данной работе было рассмотрено влияние агрессивной среды на внутреннюю структуру и элементный состав, а также на механические свойства и ударную вязкость образцов трубопроводной стали. Были представлены результаты экспериментальных исследований методами рентгеноструктурного анализа и оптической спектрометрии высокочастотного тлеющего разряда, а также испытаний на одноосное растяжение и ударную вязкость, влияния агрессивной среды на фазовый и элементный состав, а также механические характеристики трубопроводной стали на спиле и внутренней и внешней поверхности трубы.

Содержание водорода с внутренней поверхности трубы в исходном состоянии составляет 0,00069 масс.%. Содержание водорода с внутренней поверхности трубы после испытаний в газовой среде с нагревом составляет 0,00086 масс.%, что на 20% больше, чем содержание на внутренней поверхности трубы в исходном состоянии. Из этого следует, что водород проникает в трубу в результате испытаний в газовой среде с нагревом. Ухудшения механических свойств образца после испытаний в условиях реального газопровода подтверждают проникновение водорода в объем образца. Данные результаты исследований свидетельствуют о возможности внутреннего КРН вследствие разложения метана и последующей адсорбции водорода в материал газопровода. Дальнейшие исследования в этой области позволят лучше понять механизм и причины стресс-коррозии, что позволит разрешить некоторые аспекты и упростить проблему коррозии.

Список литературы

1. Popoola L. T. et al. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation //International Journal of Industrial Chemistry. – 2013. – Т. 4. – №. 1. – С. 35.
2. Simons M. R. Report of offshore technology conference (OTC) presentation //NACE International oil and gas production. – 2008.
3. Champion Technologies (2012) Corrosion mitigation for complex environments. Champion Technologies, Houston.
4. Ляпичев Д. М. Оценка влияния напряженного состояния подземных газопроводов на их стойкость к коррозионному растрескиванию : дис. – М. : Ляпичев Дмитрий Михайлович, 2015.
5. Комлев И. М. КРУПНЫЕ АВАРИИ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ //ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГИИ И ОСВОЕНИЯ НЕДР. – 2012. – С. 419-420.
6. Liu Z. Y. et al. Field experiment of stress corrosion cracking behavior of high strength pipeline steels in typical soil environments //Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 148. – С. 131-139.
7. Gao S. et al. Corrosion behavior of the expandable tubular in formation water //International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2015. – Т. 22. – №. 2. – С. 149-156.
8. Zoski C. G. (ed.). Handbook of electrochemistry. – Elsevier, 2006.
9. Barrera O. et al. Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum //Journal of materials science. – 2018. – Т. 53. – №. 9. – С. 6251-6290.
10. Nechaev Y. S., Veziroglu T. N., Filippov G. A. On physics of the hydrogen plastification and embrittlement of metallic materials, relevance to the safety and standards' problems //Book of Abstracts and Proceedings of 16th

World Hydrogen Energy Conference «Expanding Hydrogen», Lyon, France, 13-16 June. – 2006.

11. Briottet L., Moro I., Lemoine P. Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations //International journal of hydrogen energy. – 2012. – Т. 37. – №. 22. – С. 17616-17623.

12. Нечаев Ю. С. Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных газопроводов //Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – №. 7. – С. 709-726.

13. Григорьев В. П. Электрохимическая коррозия металлов //Ростов-на-Дону.: Ростовский госуниверситет. Образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – №. 9. – С. 61-72.

14. Килимник А. Б., Гладышева И. В. Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии //ТГТУ, Тамбов. – 2008.

15. Богданченко В. А. и др. Низкоконцентрированные электролиты-коллоиды никелирования //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2003. – №. 1.

16. Андреева Д. Д., Фахрутдинов Р. З. Коррозионно-опасная микрофлора нефтяных месторождений //Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №. 10.

17. Ряховских И. В. Комплексная методика исследования коррозионномеханических свойств малоуглеродистых низколегированных трубных сталей и оценка их стойкости против КРН //Москва. – 2013.

18. Cheng, Y. F. Stress corrosion of pipeline / Y.F. Cheng // Hoboken: John Wiley & Sons Publishing.– 2013.– 257 p.

19. Богданов Р. И., Маршаков А. И., Игнатенко В. Э. Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали Х70 в средах с рН близким к нейтральному //ФИЗИКОХИМИЯ: VI Конференция

молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН 2011. 1-30 ноября, 2011. Сборник тезисов докладов.–М.: ИФХЭ РАН. – 2011. – С. 55.

20. Форд Ф. П. Коррозионное растрескивание под напряжением сплавов на основе железа в водных средах. Охрупчивание конструкционных сталей и сплавов //М.: Metallurgy. – 1988.

21. Scully J. C. Kinetic features of stress-corrosion cracking //Corrosion Science. – 1967. – Т. 7. – №. 4. – С. 197-207.

22. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – Metallurgy, 1981.

23. Мальцева Г. Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие./Под редакцией СН Виноградова. – 2000.

24. Леонова О. Н. Методика использования образовательных ресурсов на электронных носителях // Химия. Первое сентября, 2005. – №8. – С.78–82.

25. Малкин А. И. Процессы зарождения и роста коррозионных трещин на стали магистральных трубопроводов //Коррозия: материалы, защита.– 2009. – № 10. – С. 1-15.

26. Beachem C. D. A new model for hydrogen-assisted cracking (hydrogen “embrittlement”) //Metallurgical and Materials Transactions B. – 1972. – Т. 3. – №. 2. – С. 441-455.

27. Lynch S. P. Mechanisms of hydrogen-assisted cracking //Metals Forum. – THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD, ENGLAND OX5 1GB : PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, 1979. – Т. 2. – №. 3. – С. 189-200.

28. Lynch S. P. Towards understanding mechanisms and kinetics of environmentally assisted cracking //Environment-Induced Cracking of Materials. – Elsevier, 2008. – С. 167-177.

29. Смирнов О. В. Адсорбция водорода металлом трубопровода при контакте с перекачиваемой нефтегазоконденсатной смесью. – 2006.

30. Ефремов А. П., Ким С. К. Анализ коррозионного разрушения и ингибиторная защита промышленного оборудования нефтяных месторождений ООО "Лукойл-Коми" //Защита металлов. – 2006. – Т. 42. – №. 2. – С. 210-216.
31. Крылов О. В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ //Российский химический журнал. – 2000. – Т. 44. – №. 1. – С. 19-33.
32. Брагин О. В., Либерман А. Л. Превращения углеводов на металлсодержащих катализаторах //Химия. – 1981. – С. 264.
33. Гафаров Н. А. и др. Ингибиторы коррозии: В 2-х томах.: Том 2. Диагностика и защита от коррозии под напряжением нефтегазопромышленного оборудования //М.: Химия.–2002.–367 с.: ил. – 2002.
34. Huang H. H., Tsai W. T., Lee J. T. Cracking characteristics of A516 steel weldment in H₂S containing environments //Materials Science and Engineering: A. – 1994. – Т. 188. – №. 1-2. – С. 219-227.
35. Zhang C., Wen F., Cao Y. Progress in research of corrosion and protection by sulfate-reducing bacteria //Procedia Environmental Sciences. – 2011. – Т. 10. – С. 1177-1182.
36. Dong Z. H. et al. Heterogeneous corrosion of mild steel under SRB-biofilm characterised by electrochemical mapping technique //Corrosion Science. – 2011. – Т. 53. – №. 9. – С. 2978-2987.
37. Kiani Khouzani M. et al. Microbiologically Influenced Corrosion of a Pipeline in a Petrochemical Plant //Metals. – 2019. – Т. 9. – №. 4. – С. 459.
38. Hanson R. S., Hanson T. E. Methanotrophic bacteria //Microbiol. Mol. Biol. Rev. – 1996. – Т. 60. – №. 2. – С. 439-471.
39. Ошкин И. Ю. Микробные агенты окисления метана в холодных сипах осадков северных рек. дис. канд. биол. наук. Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Москва, 2017.

40. Vecherskaya M. S. et al. Activity and species composition of aerobic methanotrophic communities in tundra soils //Current microbiology. – 1993. – Т. 27. – №. 3. – С. 181-184.
41. Oriani R. A. Hydrogen effects in high-strength steels //First International Conference on Environment-induced Cracking of Metals, NACE-10. NACE, Houston, TX. – 1990. – С. 439-447.
42. Troiano A. R., Hehemann R. F. Stress Corrosion Cracking of Ferritic and Austenitic Stainless Steels //Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. – 1980. – С. 231-248.
43. Frohmberg R. P., Barnett W. J., Troiano A. R. Delayed failure and hydrogen embrittlement in steel. //Trans ASM. – 1954. – Т. 47. – С. 941-954.
44. Teter D. F., Robertson I. M., Birnbaum H. K. The effects of hydrogen on the deformation and fracture of β -titanium //Acta Materialia. – 2001. – Т. 49. – №. 20. – С. 4313-4323.
45. Parkins R. N. Parkins symposium on fundamental aspects of stress corrosion cracking //TMS Publication, Pennsylvania, pp3. – 1992.
46. Верховых А. В. Компьютерное моделирование взаимодействия водорода с вакансиями и межзеренными границами в железе, а также с межфазной границей феррит-цементит : дис. – Челябинск, 2016.
47. Hirth J. P. Theories of Hydrogen-Induced Cracking of Steels //Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. – 1980. – С. 29-41.
48. Pressouyre G. M., Bernstein I. M. A quantitative analysis of hydrogen trapping //Metallurgical transactions A. – 1978. – Т. 9. – №. 11. – С. 1571-1580.
49. Сергеев Н. Н., Кутепов С. Н. О взаимодействии водорода с дефектами кристаллической решетки в металлах и сплавах //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №. 4.

50. Гончаров Е. А. Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов. – 2016.

51. Сунагатов М. Ф., Гумеров К. М. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В БОРЬБЕ СО СТРЕСС-КОРРОЗИЕЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ //Нефтегазовое дело. – 2009. – Т. 7. – №. 2. – С. 165-168.

52. Сайт компании ООО «Трансэнергострой». Природа возникновения стресс-коррозионных разрушений нефтегазопроводов. [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: http://transenergostroy.ru/blog/priroda_vozniknoveniya.html, свободный.

53. Житарь Б. Е., Самойлов В. В. Системный анализ коррозионных исследований металлов //Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2017. – №. 44.

54. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]: (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) – Изд. апр. 2014 с Изм. 1, 2, 3.

55. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств [Текст]: (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81) – Изд. янв. 2005 с Изм. 1, 2, 3, 4.

56. ГОСТ 28840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования [Текст]: – Изд. дек. 2003.

57. ГОСТ 9.901.1-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Общие требования к методам испытаний на коррозионное растрескивание [Текст]: – Изд. июл. 1999.

58. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах - Изд. 10.04.2018.

59. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).
60. ГОСТ Р ИСО 11439-2010. Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения природного газа. Технические условия.
61. ГОСТ 12.1.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация".
62. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
63. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
64. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
65. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.
66. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
67. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности.
68. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
69. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение".
70. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
71. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003.
72. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

73. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
74. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.