

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Применение метода электрохимической проницаемости для определения коэффициента диффузии водорода в трубопроводной стали марки 10Г2 до и после коррозионных испытаний</b>

УДК 539.219:621.643.2-034:620.193

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Саквин Иван		

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	Кудияров Виктор Николаевич	к.т.н		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

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

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	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>		
<b>Р1</b>	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 ФГОСЗ+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
<b>Р2</b>	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 ФГОСЗ+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
<b>Р3</b>	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 ФГОСЗ+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
<b>Р4</b>	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 ФГОСЗ+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
<b>Р5</b>	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 ФГОСЗ+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		

<b>P6</b>	<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 ФГОСЗ+ (ПК-1, ПК-2)
<b>P7</b>	<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)
<b>P8</b>	<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)
<b>P9</b>	<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)



<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></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>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор по литературным источникам проблем старения стале магистральных газопроводов</li> <li>2. Проведение ускоренных коррозионных испытаний во влажной среде</li> <li>3. Металлографический анализ поверхности исследуемых образцов</li> <li>4. Элементный анализ исследуемых образцов</li> <li>5. Структурно-фазовый анализ исследуемых образцов</li> <li>6. Применение метода электрохимической проницаемости для расчета коэффициента диффузии в исследуемых образцах</li> <li>7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</li> <li>8. Социальная ответственность</li> <li>9. Заключение</li> </ol>
--	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	

**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	Саквин Иван		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б51	Саквину Ивану

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	Ставка НДС – 20%; Ставка социального налога – 30%

**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	Выполнить
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Выполнить

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. График проведения и бюджет НИ
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н. доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б51	Саквин Иван		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б51	Саквину Ивану

<b>Школа</b>	Инженерная школа ядерных технологий	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Отделение экспериментальной физики
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Применение метода электрохимической проницаемости для определения коэффициента диффузии водорода в трубопроводной стали марки 10Г2 до и после коррозионных испытаний	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Газоанализатор RHEN-602 для определения содержания водорода в металлах методом нагрева или плавления в автономной электродной печи в среде инертного газа. Анализатор в основном применяется в лабораторных исследованиях.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	Законодательные и нормативные документы по теме: <ul style="list-style-type: none"> <li>– трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ</li> <li>– ГОСТ 30494-96</li> <li>– ГОСТ 12.1.005</li> <li>– СанПиН 2.2.4.548-96</li> <li>– СНиП 21-01-97 от 1998-01-01</li> <li>– ГОСТ 2408.4-98</li> <li>– ГОСТ 30331.4-95 Часть 4.</li> <li>– инструкция № 2-07</li> <li>– ГОСТ Р ИСО 11439-2010</li> <li>– ГОСТ Р 51982-2002.</li> <li>– ГОСТ Р ИСО 17491-4-2009</li> <li>– ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ</li> <li>– инструкция № 2-14</li> <li>– ГОСТ 12.1.038-82</li> <li>– СНиП 3.05.06-85 от 01.07.1986г.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Характеристика факторов изучаемой производственной среды, описывающих процесс взаимодействия человека с окружающей производственной средой: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Воздействие электрического напряжения на организм человека;</li> <li>– Воздействие высокой температуры на организм человека;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Воздействие химических веществ на дыхательные пути и организм человека в целом;</li> <li>– Утечка газа из баллона;</li> <li>– Микроклимат</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Выброс в атмосферу рабочего газа;</li> <li>– Выброс в атмосферу химических веществ;</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Утечка газа из баллона;</li> <li>– Возникновение возгорания;</li> <li>– Поражение оператора установки электрическим током;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**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	Саквин Иван		

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)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2018	Аналитический обзор литературы	15
01.04.2018	Проведение ускоренных коррозионных испытаний во влажной среде	15
01.09.2018	Металлографический, элементный и структурно-фазовый анализ поверхности образцов стали марки 10Г2 подвергнутых различным коррозионным испытаниям	15
30.12.2018	Применение метода электрохимической проницаемости для расчета коэффициента диффузии в образцах стали марки 10Г2 подвергнутых различным коррозионным испытаниям	15
30.04.2019	Анализ результатов	15
25.05.2019	Социальная ответственность	10
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
25.05.2019	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кудияров Виктор Николаевич	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер Андрей Маркович	Д.Т.Н., доцент		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 84 с., 24 рис., 18 табл., 58 источников.

Ключевые слова: водород, проницаемость водорода, сталь марки 10Г2, электрохимическая проницаемость, коэффициент диффузии, время диффундирования, старение, дефекты старения.

Объектом исследования является трубопроводная сталь марки 10Г2 подвергнутая различным коррозионным испытаниям.

Цель работы – применение электрохимического метода измерения коэффициента диффузии водорода в стали марки 10Г2 для определения критерия развития критической дефектной структуры при эксплуатации.

В процессе исследования проводились:

- ускоренные коррозионные испытания во влажной среде образцов стали марки 10Г2;
- металлографический анализ поверхности исследуемых образцов;
- исследование элементного и структурно-фазового состава образцов после испытаний;
- проведение экспериментов по диффузии водорода электрохимическим методом;
- расчет коэффициентов диффузии водорода в образцах до и после коррозионных испытаний.

В результате исследования установлено:

- 1) Металлографические исследования показывают, что в процессе старения происходит уменьшение размеров зерен и выделение частиц вторичной фазы;
- 2) При воздействии на сталь агрессивной среды и высокого давления не происходит существенных изменений в элементном и структурно-фазовом составе стали;

3) Исследование диффузии водорода позволяет производить качественный анализ степени деградации материала трубопровода. Значение коэффициента диффузии в исходной стали близко к литературным данным, что позволяет судить о работоспособности данной методики;

4) При изменении коэффициента диффузии на 2 порядка, как в стали, выведенной из эксплуатации, в материале образуется большое количество дефектов старения;

5) Изменение коэффициента диффузии на 1 порядок в стали, подвергнутой ускоренным коррозионным испытаниям, говорит о возможном появлении дефектов старения в процессе испытаний.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: толщина исследуемых образцов составила  $300 \pm 30$  мкм; коррозионные испытания проводились в стандартном режиме работы газопровода при повышенной температуре ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Область применения: результаты исследований могут быть использованы для лабораторного исследования степени деградации материала газопровода.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в быстром лабораторном анализе степени деградации материала магистральных газопроводов.

В будущем планируется разработка методики позволяющей оценить количество дефектов в стали используя метод электрохимической проницаемости водорода.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	14
ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАРЕНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА СО СТАЛЯМИ.....	16
1.1. Физические комплексные проблемы старения и разрушения магистральных трубопроводов.....	16
1.2 Диффузия водорода .....	21
1.2. Краткая теория водородной хрупкости металлов .....	26
1.3. Современные тенденции в исследовании диффузии водорода в сталях. .	29
ГЛАВА II. МАТЕРИАЛ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ.....	40
2.1. Материал исследования.....	40
2.2. Исследование диффузии водорода электролитическим методом с помощью экспериментальной установки Stand for Testing Electrochemical Permeation.....	41
2.3. Проведение ускоренных коррозионных испытаний на реакторе для симуляции условий работы реального газопровода .....	45
2.4. Структурно-фазовый анализ с использованием рентгеновского дифрактометра «XRD 7000S».....	46
2.5. Атомно-эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда на устройстве GD Profiler 2.....	48
ГЛАВА III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.....	51
3.1. Подготовка экспериментальных образцов .....	51
3.2. Элементный и структурно - фазовый состав исследуемых образцов .....	52
3.3. Применение метода электрохимической проницаемости водорода .....	55
ГЛАВА IV. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	57
4.1 Организация и планирование работ.....	57
4.1.1 Продолжительность этапов работ.....	58
4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта.....	60
4.2.2 Расчет заработной платы.....	60
4.2.3 Расчет затрат на социальный налог .....	61
4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию .....	62
4.2.5 Расчет амортизационных расходов.....	63
4.2.6 Расчет прочих расходов .....	64

4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки.....	64
4.2.8 Расчет прибыли .....	65
4.2.9 Расчет НДС .....	65
4.2.10 Цена разработки НИР .....	65
4.3 Оценка экономической эффективности проекта.....	65
<b>ГЛАВА V. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>66</b>
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	66
5.2 Производственная безопасность .....	69
5.2.1 Выявленные вредные и опасные факторы .....	69
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия .....	72
5.3 Экологическая безопасность.....	74
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	74
Выводы.....	77
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>78</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>79</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Большую долю мировой энергетики занимает различное применение углеводородов [1]. Доставка углеводородов от месторождений до потребителя осуществляется в основном за счет транспортировки по магистральным трубопроводам.

В Российской Федерации в качестве материала для изготовления магистральных газопроводов широкое применение нашла сталь марки 10Г2, что связано с её характеристиками, а именно:

- Высокая эксплуатационная надежность;
- Высокая трещиностойкость;
- Высокая прочность и пластичность;
- Высокая коррозионно-механическая прочность;
- Высокая надежность при статических, циклических и динамических воздействиях;
- Сопrotивляемость вязким и хрупким разрушениям при низких температурах до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Срок службы материалов – не менее 25 лет.

В процессе эксплуатации в магистральных газопроводах существует риск возникновения техногенных аварий, связанных с недостаточной эксплуатационной надежностью материала [2, 3]. Так в процессе эксплуатации материал газопровода подвержен старению по причинам переменных нагрузок, перераспределения углерода и локального наводораживания границ зерен [4]. Совокупность этих причин приводит к возникновению в материале микронапряжений, приводящих к разрушению.

Идентификация локальных поражений материала газопровода не всегда возможна на ранних стадиях. За счет этого аварии на газопроводах носят спонтанный характер и могут привести к большим финансовым потерям компаний и нанести огромный вред окружающей среде [7, 8, 9].

Исходя из вышесказанного, одной из важнейших задач является своевременное выявление критического состояния материала трубопровода. Одним из критериев, позволяющих качественно оценить степень деградации материала, можно считать коэффициент диффузии водорода. Это связано с тем, что водород, диффундирующий сквозь материал, чувствителен к различным изменениям кристаллической структуры. Дефекты кристаллической структуры являются центрами захвата атомов водорода, что приводит к замедлению диффузии в целом [24, 25, 26].

Целью данной работы является применение электрохимического метода измерения коэффициента диффузии водорода в стали марки 10Г2 для определения критерия развития критической дефектной структуры при эксплуатации.

Исходя из цели были поставлены следующие задачи:

- Проведение ускоренных коррозионных испытаний во влажной среде образцов стали марки 10Г2;
- Металлографический анализ поверхности исследуемых образцов;
- Исследование элементного и структурно-фазового состава образцов после испытаний;
- Проведение экспериментов по диффузии водорода электрохимическим методом;
- Расчет коэффициентов диффузии водорода в образцах до и после коррозионных испытаний;
- Анализ полученных результатов.

В данной работе использовался разработанный в отделении экспериментальной физики ИШЯТ НИ ТПУ комплекс STEP для исследования диффузии водорода электролитическим методом.

# ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТАРЕНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА СО СТАЛЯМИ.

## 1.1. Физические комплексные проблемы старения и разрушения магистральных трубопроводов

Одной из важнейших научно-технических проблем современности является проблема продления ресурса безопасной эксплуатации магистральных газопроводов из-за повышенного риска возникновения в них техногенных аварий, вызванных недостаточной эксплуатационной надежностью металла [2, 3, 4, 5].

Основной причиной аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Так исходя из данных представленных ОАО «Газпром» в период с 1991 по 2005 год коррозионное растрескивание под напряжением являлось причиной аварийных ситуаций по меньшей мере в 60 % случаев [6].

Любой аварийный случай может привести к катастрофическим последствиям как для окружающей среды, так и для человеческой жизни. Так во время аварии на нефтепроводе в республике Коми (Россия) 1994 года было загрязнено 100 кв. км почвы. При этом затраты на ликвидацию последствий составили более 100 миллионов долларов США [7, 8]. Еще одним примером можно назвать аварию газопровода в штате Луизиана (США) погибло 17 человек [9]. Причиной этих аварий считается КРН, вызванное старением металла трубопровода.

Старение металлов – изменение механических, физических и химических свойств металлов и сплавов в процессе вылеживания.

Старение обусловлено присутствием в материале термодинамически неравновесных состояний, которые в процессе вылеживания стремятся к равновесию при условии достаточной подвижности атомов.

Основные конструктивные элементы магистральных трубопроводов, как правило, устойчивы при комнатной температуре. Однако в материале присутствует одно структурное составляющее, являющееся неравновесным.

Таким составляющим является перенасыщенный твердый раствор углерода в ферритной решетке. С течением времени происходит распад перенасыщенного твердого раствора с выделением частиц карбидов. Такой процесс также называется старением трубопроводных сталей.

В трубопроводных сталях в ферритной матрице создается высокая концентрация углерода с целью обеспечения высокой прочности в момент поставки изделий. С течением времени, по причине неравновесного состояния такой структуры, она растворяется в дефектах кристалла.

В коррозионной среде около каждой микропримеси возникает микроскопическая гальваническая пара, в которой катодом является примесь, а анодом – основной металл, который и разрушается. В стали в качестве примеси содержится цементит. Около каждой частицы цементита возникает гальваническая пара.

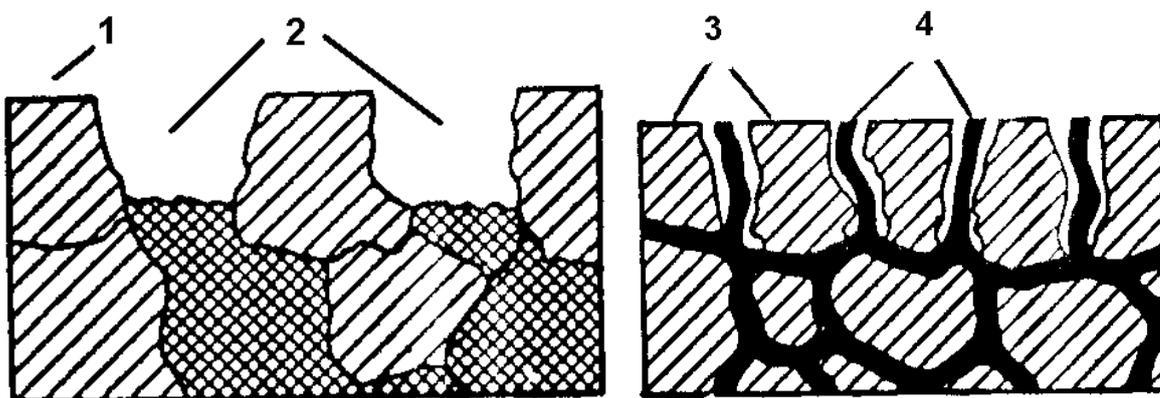


Рисунок 1.1 – Виды локального коррозионного растрескивания вследствие образования микроскопических гальванических элементов в структуре материала. 1, 2 – различные фазы металла; 3 – основной металл; 4 – выделения по границам зерен

При низком перенасыщении весь углерод может раствориться только на дислокациях. Если же перенасыщение значительно, и количества дислокаций недостаточно для захвата всех атомов углерода, то он также диффундирует к границам зерен и накапливается там. На рисунке 1.2 показаны наглядные примеры выделения карбидов на границах зерен. На рисунке 1.3 представлены этапы процесса старения. (ССЦ – структурная составляющая цементита).

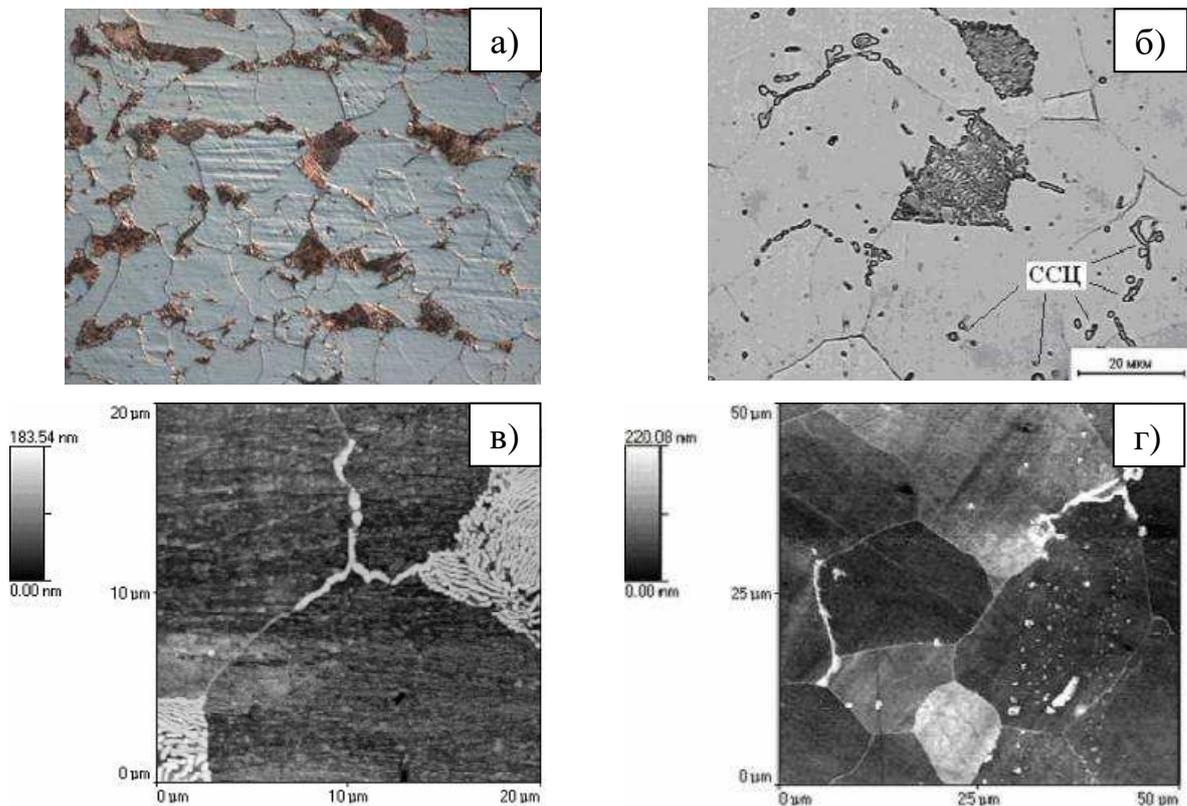


Рисунок 1.2 – Выделение карбидов по границам зерен феррита [10]: а, б) металлографический анализ  $\times 1000$ ; в, г) атомно – силовая микроскопия

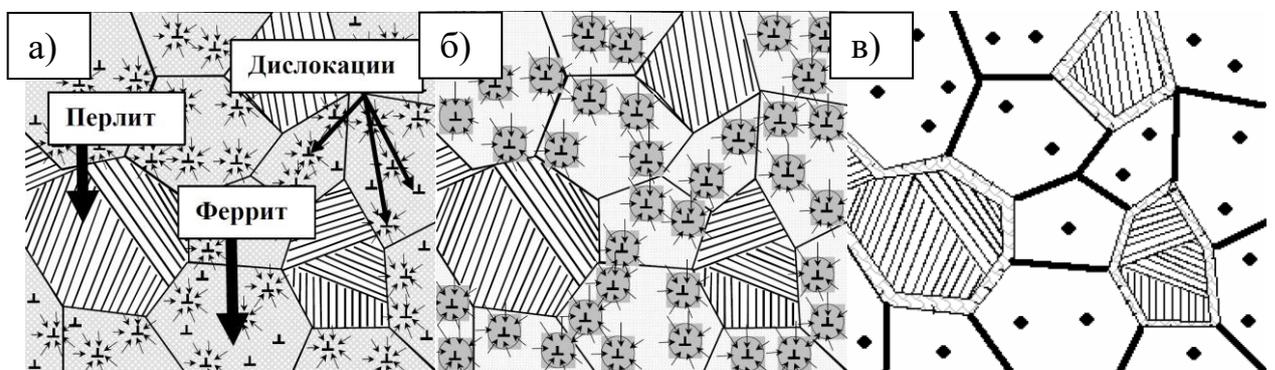


Рисунок 1.3 – Схема эволюции структуры трубопроводных сталей в процессе эксплуатации: а) исходное состояние; б) промежуточное состояние; в) состаренное состояние [10].

( $\perp$ ) – дислокация; ( $\rightarrow$ ) – диффундирующие атомы углерода;

( $\bullet$ ) – частицы  $Fe_3C$  в решетке; (—) – пластины  $Fe_3C$  на границах зерен

Классической моделью для описания процесса старения является модель Котрелла. В этой модели происходит осаждение избыточных атомов углерода на дислокациях. Вследствие этого происходит затруднение движения дислокаций,

что, в свою очередь, приводит к упрочнению металла. Однако, с использованием данной модели невозможно описать все особенности процессов, происходящих при старении. Это связано с тем, что данная модель не учитывает образование наноразмерных карбидоподобных включений.

При высоком уровне перенасыщения углеродом избыточные атомы могут оседать как на дислокациях, так и выделяться на границах зерен. В этом случае процесс старения трубопроводной стали можно описать как двухэтапный. На первом этапе атомы углерода диффундируют к дислокациям и границам зерен. Затем, на втором этапе, атомы углерода образуют карбиды на границах зерен, и в объеме материала.

Также стоит отметить, что в процессе старения труб магистральных газопроводов имеет место локальное наводороживание. Авторы работ [11, 12] отмечают, что согласно электронномикроскопической автордиографии (рисунок 1.4) в процессе старения большеугловые границы остаются свободными от изотопа водорода вплоть до появления вторичных фаз. До их появления изотоп трития локализуется в основном на дислокациях внутри зерна. Только после появления вторичных фаз наблюдается интенсивное насыщение водородом границ зерен. Также авторы [11] подчеркивают, что локальное наводороживание областей выделения вторичных фаз по границам зерен происходит при длительном старении материала. Это в свою очередь приводит к межзеренному хрупкому разрушению при КРН. В процессе наводороживания сталей на границах зерен и дислокациях также могут образовываться карбонитридогидридоподобные ( $\text{Fe}_2(\text{C}, \text{N})\text{H}_{0,6-2}$  и др.) наноразмерные выделения, связанные со старением материала и влияющие на физико-механические свойства.

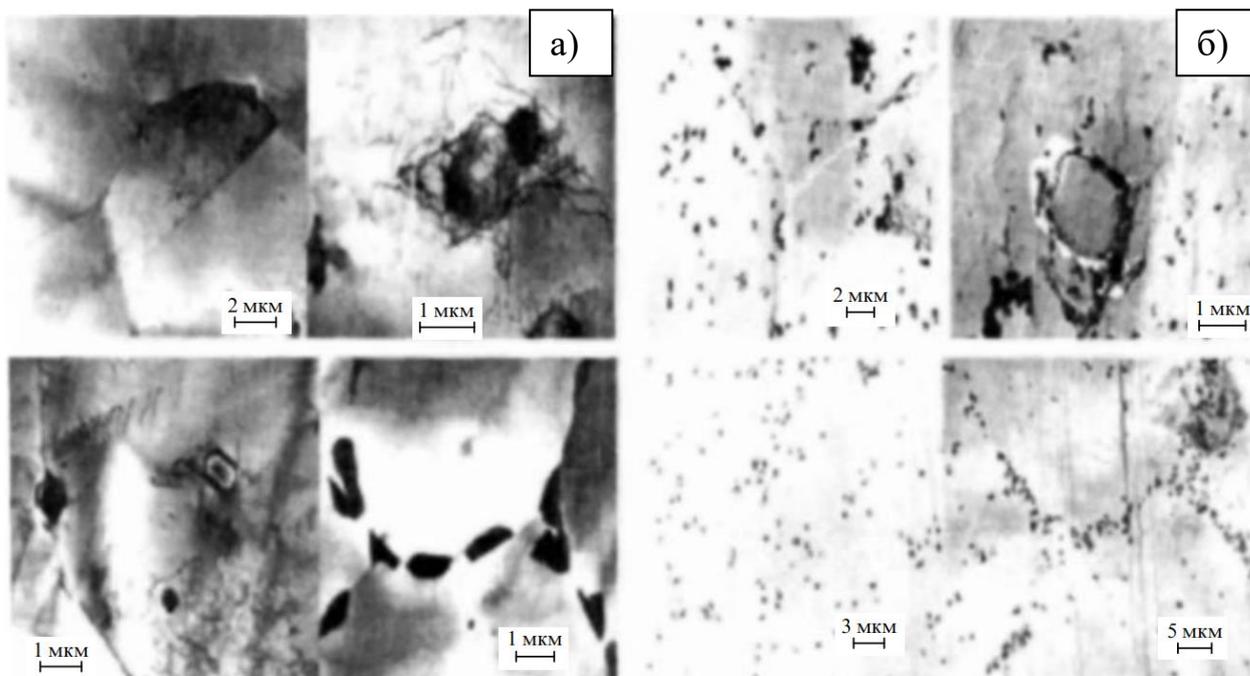


Рисунок 1.4 – Структура стали X16H15M3T1 [11]: а) после старения и закалки; б) после насыщения тритием.

Исходя из факта наводороживания труб магистральных газопроводов были сформулированы следующие дополнения предыдущей модели [13]:

1. В процессе эксплуатации в решетке феррита растворяется малая часть от общего количества водорода. Большая часть водорода находится в виде наноразмерных гидридоподобных включений (типа  $Fe_2CH_{0,6-2}$  и др.) на дислокациях и границах зерен феррита. Такие включения могут занимать сотую долю процента от всего объема материала, в которых также локализовано достаточное количество избыточного углерода. Значительная часть водорода может находиться в несплошностях материала и в неметаллических включениях.

2. Лимитирующим фактором локального наводороживания границ зерен феррита при старении является диффузионная подвижность атомов углерода при их движении к границам зерен. В процессе локального наводороживания может происходить межзеренное коррозионное растрескивание, охрупчивание материала и дальнейшее замедленное разрушение. Время диффузии достигает по меньшей мере 10 лет и в большей степени зависит от концентрации избыточного углерода в решетке феррита.

3. Процесс диффузии водорода к границам зерен феррита не является лимитированным. В сравнении со временем диффузии атомов углерода ( $\geq 10$  лет) к границам зерен, атомы водорода проникают сквозь стенку трубопровода за время порядка 40 дней.

4. Углерод, диффундирующий к границам зерен, может образовывать дискретные наноразмерные выделения вторичной фазы, с которыми водород может образовывать химическую связь.

Зернограничные выделения вторичных фаз могут вызывать локальные микронапряжения, которые приводят к образованию трещин. Увеличение количества трещин приводит к постепенному разрушению материала.

## 1.2 Диффузия водорода

Одной из особенностей диффузии водорода в металлах является её высокая скорость [14, 15, 16]. Это связано с небольшим атомарным объемом водорода. На поверхности металлов водород диссоциирует, и перемещается по междоузлиям кристаллической решетки металлов в виде отдельных атомов. Для перехода от одного междоузлия к другому водороду необходимо преодолеть потенциальный барьер, равный 0,1 – 1 эВ []. Собственной энергии частицы обычно недостаточно для преодоления данного энергетического барьера, поэтому переход по междоузлиям происходит при передаче атому водорода энергии от соседних атомов металла [17, 18, 19]. Исходя из этого коэффициент диффузии подчиняется закону Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

На рис. 1.5 представлен простейший механизм движения водорода по кристаллической решетке металла.

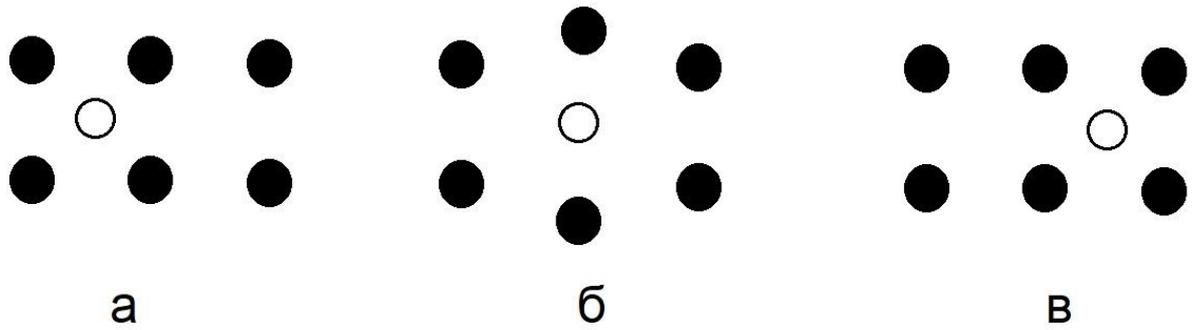


Рисунок 1.5 – Схематическое представление положения водорода внутри металла при переходе в соседнее междуузлие: а, в – атом водорода находится в равновесном состоянии; б – атом водорода расположен между соседними междуузлиями

Для нахождения параметров проницаемости водорода необходимо решить уравнения Фика [15, 16] со следующими граничными условиями:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x'}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x'^2}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} C|_{t=0} = 0, 0 \leq X \leq l \\ C|_{t \geq 0} = S_H \sqrt{P_0}, X = 0 \\ C|_{t \geq 0} = 0, X = l \end{cases} \quad (4)$$

На входной стороне исследуемого образца в начальный момент времени устанавливается концентрация, равная равновесной растворимости водорода, а на выходной стороне концентрация равна нулю.

При решении данной системы уравнений поток водорода сквозь мембрану единичной площади примет следующий вид:

$$J_{\text{вых}} = \frac{DS_H}{l} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \cos\left(\frac{\pi n}{l} x\right) \exp\left(-\frac{D\pi^2 n^2}{l^2} t\right) \right] \right\} \quad (5)$$

Для потока на выходной стороне мембраны исходя из первого закона Фика имеем выражение:

$$J_{\text{ВЫИХ}} = \frac{DS_H}{l} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (-1)^n \exp \left( -\frac{D\pi^2 n^2}{l^2} t \right) \right] \right\} \quad (6)$$

Для расчёта коэффициента диффузии можно воспользоваться величиной стационарного потока, имеющего следующее выражение:

$$J_{\text{СТ}} = J(t, l)|_{t \rightarrow \infty} = \frac{DS_H}{l} \quad (7)$$

Исследуя зависимость  $J(t)$  можно выделить характеристическую точку, это время установления половины стационарного потока  $t_{0.5}$  (рис. 1.6).

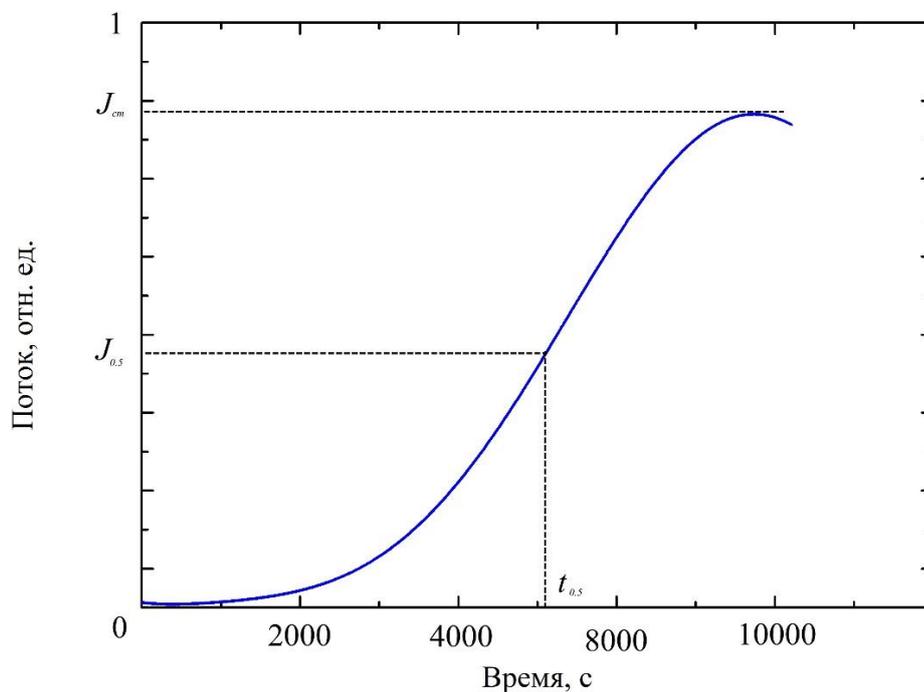


Рисунок 1.6 – Теоретическая кривая проницаемости водорода сквозь металлическую мембрану

Для определения коэффициента диффузии, используя время установления половины стационарного потока, необходимо воспользоваться следующим выражением:

$$D = \frac{l^2}{6t_{0.5}} \quad (8)$$

Еще одним важным фактором при исследовании проницаемости являются различного рода дефекты, находящиеся в объеме исследуемого образца.

Так как кристаллическая решетка металла не может быть идеальной и имеет в объеме дефекты кристаллической структуры, которые затрудняют переход водорода от одного равновесного состояния в другое. Такими дефектами могут быть дислокации, вакансии, границы зерен, а также различные скопления атомов кристаллической решетки. Если дефектом являются различного рода поры, то водород в них также может накапливаться в виде газа. Дефекты можно рассматривать как центры захвата атомов водорода, диффундирующих сквозь решетку. Это приводит к замедлению диффузии водорода за счет того, что атомы, находящиеся около дефектов, имеют потенциальную энергию ниже, чем в междоузельном положении. Следовательно, такие атомы образуют некий барьер, препятствующий движению других атомов водорода.

Примеры некоторых дефектов представлены на рис. 1.7, 1.8.

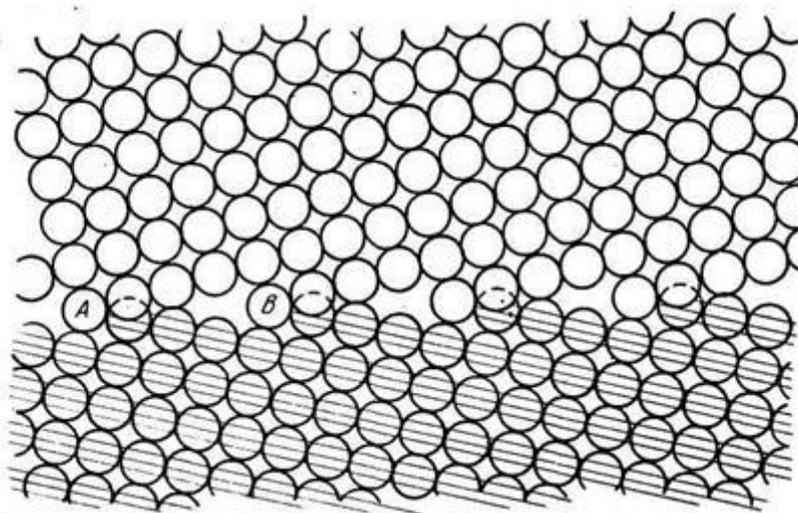


Рисунок 1.7 – Пустоты в кристаллической структуре на границах зерен.

А и В – узлы совпадения на границе

Как можно увидеть на рис. 1.3 при малых атомарных объемах диффундирующих атомов возможно их накопление в данных пустотах.

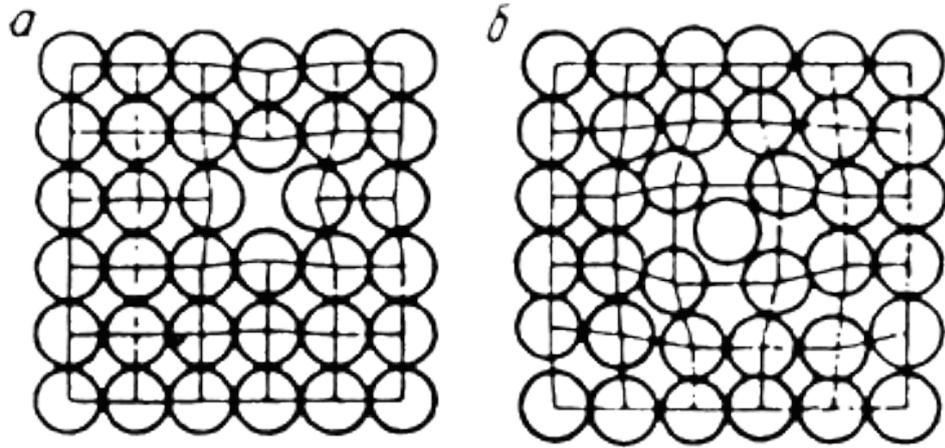


Рисунок 1.8 – Точечные дефекты кристаллической решетки: а – вакансия; б – дислоцированный атом

Для определения концентрации водорода в дефектах можно использовать два уравнения (9, 10):

$$\frac{dc_t}{dt} = 4\pi RD \left( (n_t - c_t) \cdot c - c_t n_q \right), \quad (9)$$

где  $c$  – концентрация свободного водорода в междоузлиях;

$c_t$  – концентрация водорода в дефектах;

$n_t = z \cdot n_a$  – концентрация дефектов в металле;

$z$  – доля дефектов по отношению к концентрации атомов металла  $n_a$ ;

$R$  – радиус захвата водорода в дефект.

$$n_q = \mu \cdot n_a \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right). \quad (10)$$

Наряду с дефектами кристаллической структуры металла в объеме исследуемых образцов могут находиться поры, имеющие технологический характер, и образованные, например, в результате радиационного воздействия или в процессе сварки материала. Наличие таких пор оказывает влияние на проходимость водорода через металлы. Атомы водорода, попав на поверхность поры, взаимодействуют друг с другом и образуют атомарный газ. Количество

газа будет определяться двумя потоками: абсорбции из поры внутрь металла и десорбции из металла в объем поры.

Концентрация водорода в поре прямо пропорционально давлению и обратно пропорционально температуре. Вычислить концентрацию водорода в порах можно используя следующую формулу:

$$n = \frac{p}{kT} \quad (11)$$

На рис. 1.9 представлено наглядное изображение пористости в металлах.

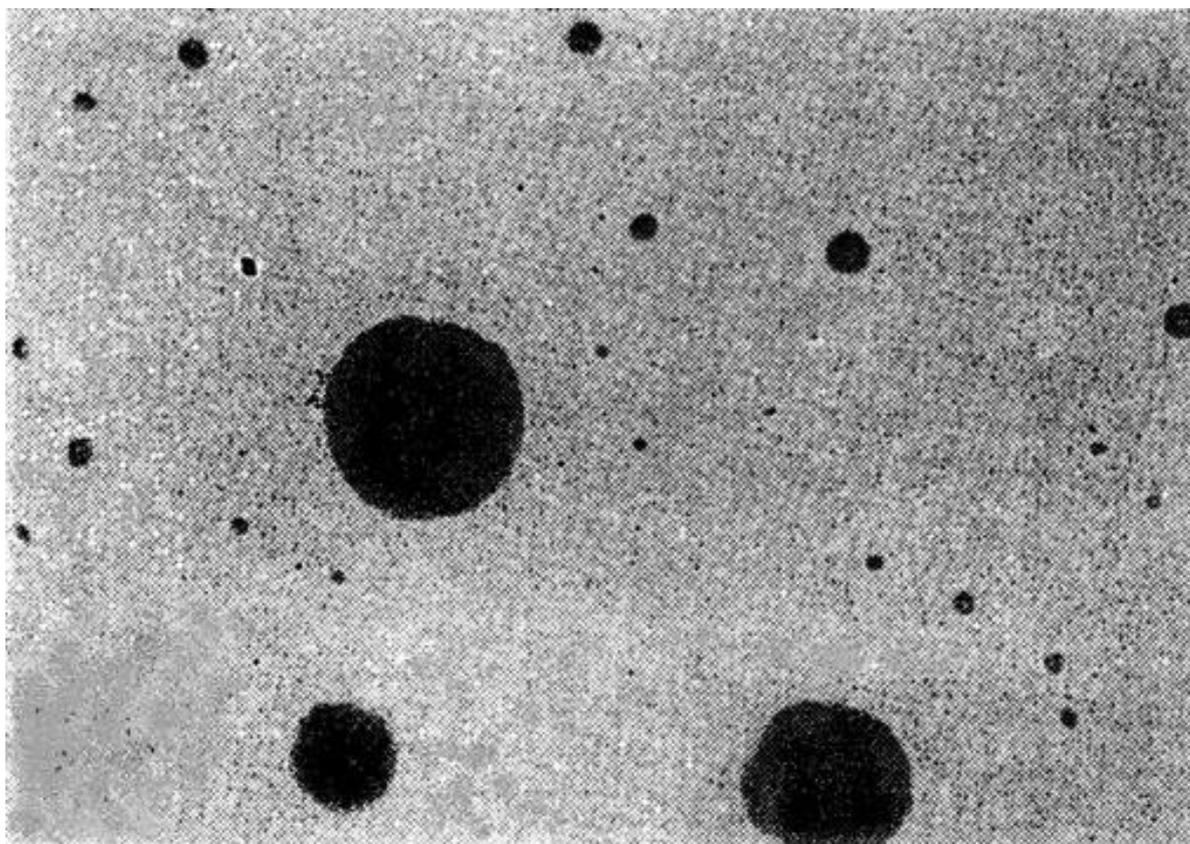


Рисунок 1.9– Пористость металлической мембраны.

## 1.2. Краткая теория водородной хрупкости металлов

В настоящее время термин «водородная хрупкость» подразумевает в себе все негативные воздействия, связанные с взаимодействием водорода с металлами.

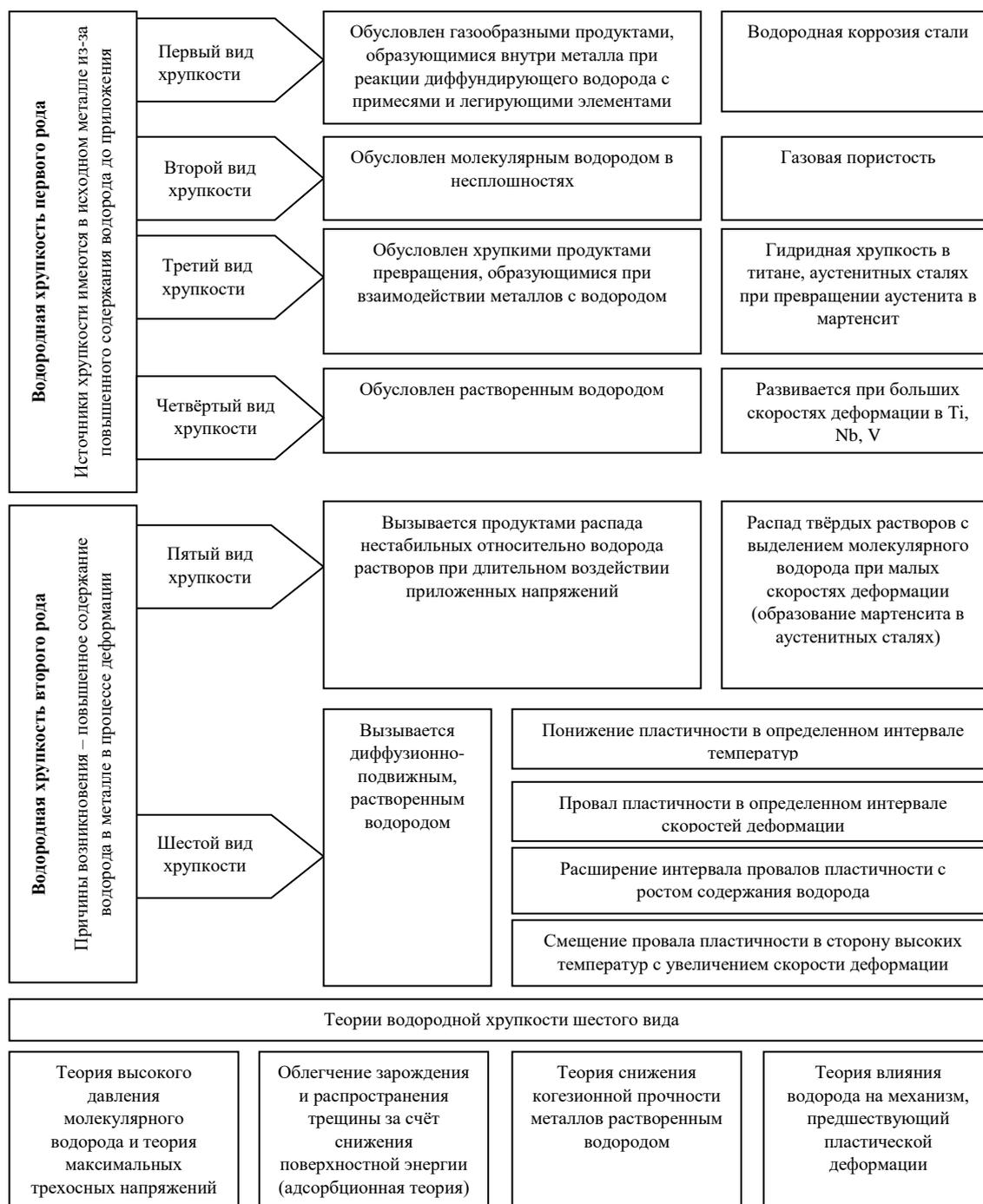
По степени воздействия на материал водородную хрупкость можно разделить на обратимую и необратимую. При обратимом водородном охрупчивании после удаления водорода из материала повышенная хрупкость

снижается. Это явление можно наблюдать в результате отжига материала на воздухе или в вакууме, или в результате десорбции при комнатной температуре. Если негативные эффекты, связанные с накоплением водорода в материале, не исчезают после удаления, то этот тип хрупкости называется необратимым. К числу таких необратимых явлений относятся трещины, пузыри или поры [20].

Хрупкость водорода в стали, как правило, имеет обратимый характер, если концентрация водорода не превышает определенных критических значений [21]. При достаточно высоком начальном содержании водорода или длительной выдержке деталей и образцов в атмосфере водорода при высоком давлении сталь существенно меняет сопротивление пластической деформации. Обеззараживание металла в этом случае не обеспечивает восстановления пластичности. Это связано с тем, что в металле происходят необратимые фазовые превращения, изменения химического состава, а также возникают различные трещины.

Также водородную хрупкость можно разделить на 2 большие подгруппы по причинам ее возникновения. Это водородная хрупкость I и II рода, каждая из которых делится еще на несколько видов. Классификация видов водородной хрупкости приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Классификация видов водородной хрупкости.



Хрупкость первого рода связана с накоплением молекулярного водорода в несплошностях материала под высоким давлением. При увеличении скорости деформации и/или понижении температуры хрупкость материала либо увеличивается, либо остается постоянной. Данный вид хрупкости может возникнуть во всех металлах при определенных условиях, в частности, в сталях при большом содержании водорода. В некоторых металлах, сорбирующих

водород при экзотермической реакции (цирконий, титан), хрупкость первого рода связана с выделением пластинчатых хрупких гидридов, создающих внутренние напряжения, и облегчающих распространение трещин [22, 23].

Водородная хрупкость второго рода возникает лишь в определенных металлах в связи с повышенным содержанием водорода в процессе пластической деформации. Такой вид водородной хрупкости характеризуется следующими закономерностями:

1. Он проявляется в определенном интервале температур, зависящем от скорости деформации, химического состава и природы сплавов;
2. Температура вязко-хрупкого перехода повышается с увеличением содержания водорода;
3. При малых скоростях деформации происходит межзеренное разрушение;
4. Водород мало влияет на предел текучести и сильно уменьшает поперечное сужение.

При электролитическом насыщении металла и малых концентрациях абсорбированного водорода, хрупкость развивается в результате диффузионного перераспределения и носит обратимый характер. С увеличением концентрации водорода в несплошностях материала, хрупкость приобретает необратимый характер. Накопленный в несплошностях водород может создавать давление порядка нескольких тысяч МПа, вызывая разрушение без приложения внешней нагрузки.

### **1.3. Современные тенденции в исследовании диффузии водорода в сталях.**

П. Кастаньо Ривера и др. [24] в 2012 году в исследованиях по проницаемости в трубопроводной стали API 5L X60 показали зависимость холодной прокатки на коэффициент диффузии водорода. Исследования проводились при низких температурах с целью нахождения ловушек водорода в равновесии. Показано, что в сталях преобладают слабые (обратимые) ловушки, энергия связи в которых составляет  $\Delta G = 35$  кДж/моль. При холодной

прокатке образуются необратимые ловушки с энергией связи  $-72 < \Delta G < -57$  кДж/моль.

Эксперимент на проницаемость заключался в следующем: исследуемый образец закрепляется между двумя электролитическими отсеками. В каждый из отсеков наливается 0.1 М раствор NaOH. Во входном отсеке подается разность потенциалов, равная +200мВ. Также данный отсек продувается водородом. В выходном отсеке водород регистрируется за счет изменения разности потенциалов между образцом и электродом сравнения.

Полученные коэффициенты диффузии представлены на рис. 1.10. (Raw steel – исходная сталь, Arter cold-rolling – после холодной прокатки)

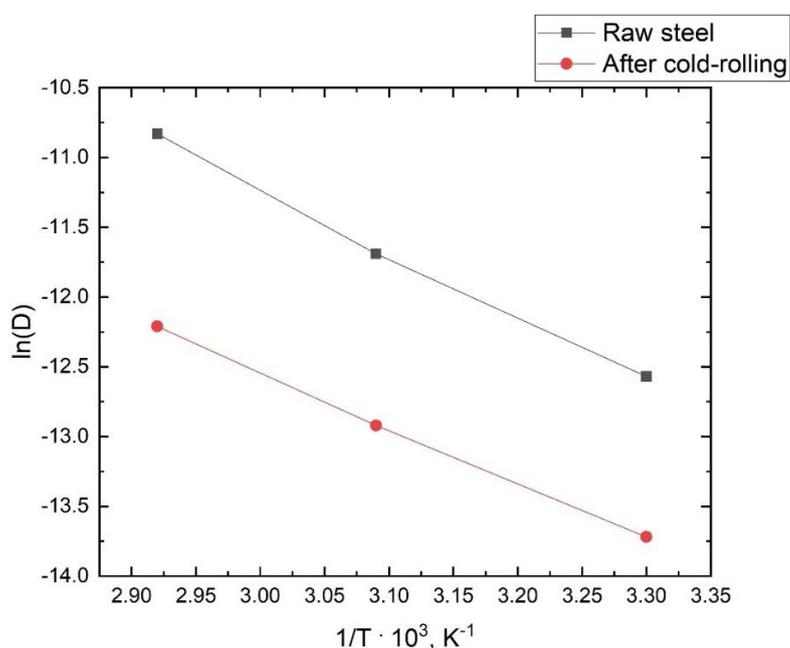


Рисунок 1.10 – Зависимость  $\ln(D)$  от  $1/T$  для стали API 5L X60 до и после холодной прокатки.

Авторы считают, что понижение коэффициента диффузии в стали после холодной прокатки связано с повышением количества ловушек водорода. Так в исходной стали плотность слабых ловушек составляет  $N=1.5 \cdot 10^{-5}$  моль/см<sup>3</sup>, а плотность сильных  $N=0,8 \cdot 10^{-8}$  моль/см<sup>3</sup>. После холодной прокатки плотность слабых ловушек составляет  $N=7,9 \cdot 10^{-4}$  моль/см<sup>3</sup>, а сильных -  $N=1,3 \cdot 10^{-7}$  моль/см<sup>3</sup>. При повышении количества дефектов, водород, накапливаясь в них, препятствует диффузии создавая так называемые барьеры.

Айеша Дж. Хак и др. [25] в исследовании влияния микроструктуры и состава стали X70 на проницаемость водорода используя методику электрохимической проницаемости водорода показали, что изменение количества легирующих элементов напрямую влияет на диффузию водорода. Так для стали с содержанием марганца 1,2 мас. % коэффициент диффузии при комнатной температуре лежит в диапазоне  $(1,7 \div 2,3) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ . А для стали с содержанием 0,5 мас. % марганца –  $(1,5 \div 1,7) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ . В данном исследовании наблюдается следующая тенденция: диффузия в поверхностном слое протекает медленнее чем в центральной части образца. Автор предполагает, что различие коэффициентов диффузии связано с различием микроструктуры от поверхности к объему, также с различным количеством дислокаций.

Е. С. Дрекслер и др. [26] изучая усталостное разрушение сталей на воздухе и в среде водорода показывает, что сталь марки API X70 в среде водорода разрушается быстрее чем на воздухе. Данный автор связывает это с проникновением водорода в глубь образца и последующему накоплению в дефектах. Водород, накапливаясь в дефектах приводит к повышению внутренних микронапряжений и появлению микротрещин. При испытаниях на усталость микротрещины разрастаются, приводя к разрушению материала.

Пример микротрещин показан на рис. 1.11.

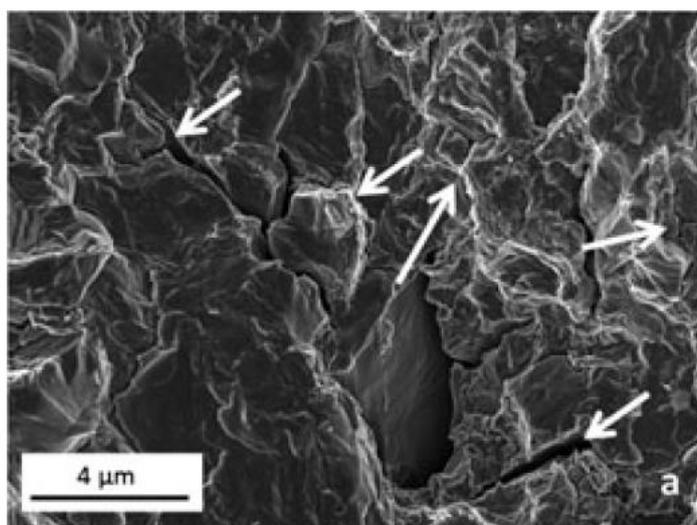


Рисунок 1.11 – Электронная микроскопия микротрещин в стали марки X70 после испытаний на усталость в среде водорода под давлением 5.5 Мпа [26]

Д. Переш Эскобар и др. [27] в 2012 году представили результаты исследования термо – стимулированной десорбции водорода в стали до и после холодной деформации. Холодная деформация производилась до 5%, 10% и 15% растяжением. Наводораживание производилось электролитическим методом в растворе 1 г/л тиомочевинны в 0,5М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при плотности тока 0,8 мА/см<sup>2</sup>. Условия наводораживания были выбраны таким образом, чтобы не создавать пузырьков на поверхности или внутренних повреждений образца. Для оценки насыщения водородом исследуемых образцов использовался метод горячей экстракции. По представленным результатам видно, что при увеличении процента пластической деформации пик смещается в сторону более низких температур. Это говорит о том, что в материале образуются более энергетически выгодные ловушки водорода.

В данной работе, для расчета энергии активации термо – десорбции водорода, используется методика Ли и Ли [28, 29]. Исследуемый образец нагревают при различных скоростях, регистрируя температуру выхода водорода. Температура выхода определяется как характерные пики интенсивности выходящего водорода. Далее для каждой температуры рассчитывается  $\ln(\phi/T_{max}^2)$  и  $1/T_{max}$ . Далее строится зависимость  $\ln(\phi/T_{max}^2)$  от  $1/T_{max}$  и по формуле Киссинджера рассчитывается энергия активации:

$$\frac{d \ln(\phi/T_{max}^2)}{d (1/T_{max})} = - \frac{E_a}{R}, \quad (12)$$

где  $\phi$  – скорость нагрева (К/мин);  $T_{max}$  – температура пика при ТСД (К);  $E_a$  – энергия активации ТСД (Дж/моль);  $R$  – универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)).

Используя данную методику авторами получены следующие результаты. (1st peak – 1й пик, 2nd peak – 2й пик, 3rd peak – 3й пик)

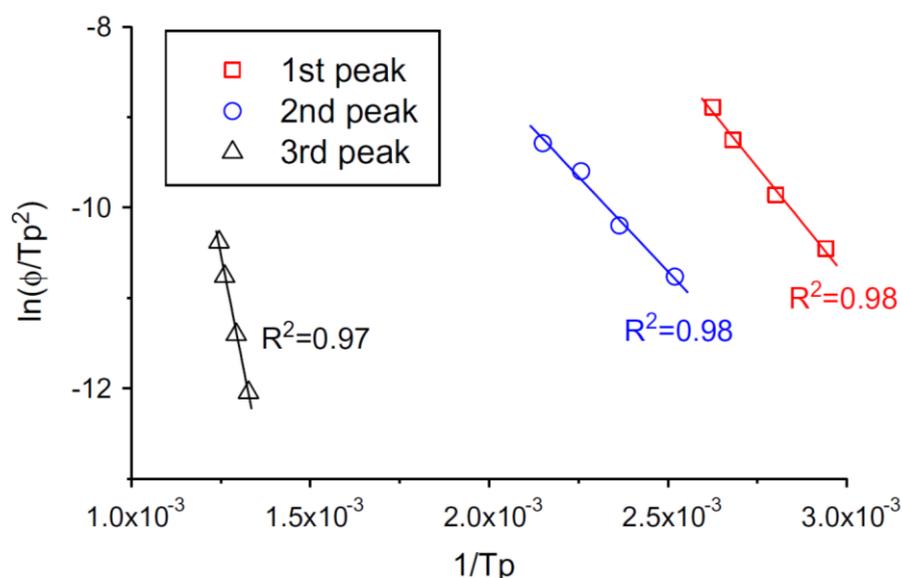


Рисунок 1.12 – Зависимость  $\ln(\phi/Tr^2)$  от  $1/Tr$  для недеформированной TRIP стали [27]

В таблице 1.2 приведены полученные энергии активации для различных пиков.

Таблица 1.2. Энергия активации для различных ловушек недеформированной TRIP стали.

Энергия активации, кДж/моль	
1й максимум	33±5
2й максимум	28±5
3й максимум	90±25

Авторы считают, что первый максимум связан с дефектами, индуцированными деформацией, т.е. образованию мартенсита. Полученная энергия активации в 33 кДж/моль соответствует литературным данным. Измеренная энергия активации второго пика может быть скоррелирована с границами зерен. Для границ зерен энергия активации может варьироваться от 18 до 59 кДж/моль в зависимости от экспериментальных установок и используемых методов. Наличие третьего пика говорит о присутствии достаточно больших дисперсных частиц, в которых водород улавливается в вакансиях углерода самой частицы.

Вигдис Олден и др. [30] исследовали трубопроводную сталь API X70 в отношении диффузии водорода и механических свойств. Был исследован исходный материал, сварной шов и зона термического воздействия. Для исследования был использован лист стали полученный методом горячей прокатки. Далее имитировался процесс сварки путем нагрева до температуры 1350 °С в течении 3 – 5 сек с последующим быстрым охлаждением в воде. Для получения структуры шва использовалась проволока с низким содержанием легирующих элементов. Зона термической обработки имитировалась с помощью нагрева до 1300 °С в течении 15 минут с последующим охлаждением в воде. При этом получены следующие структуры, представленные на рис. 1.13.

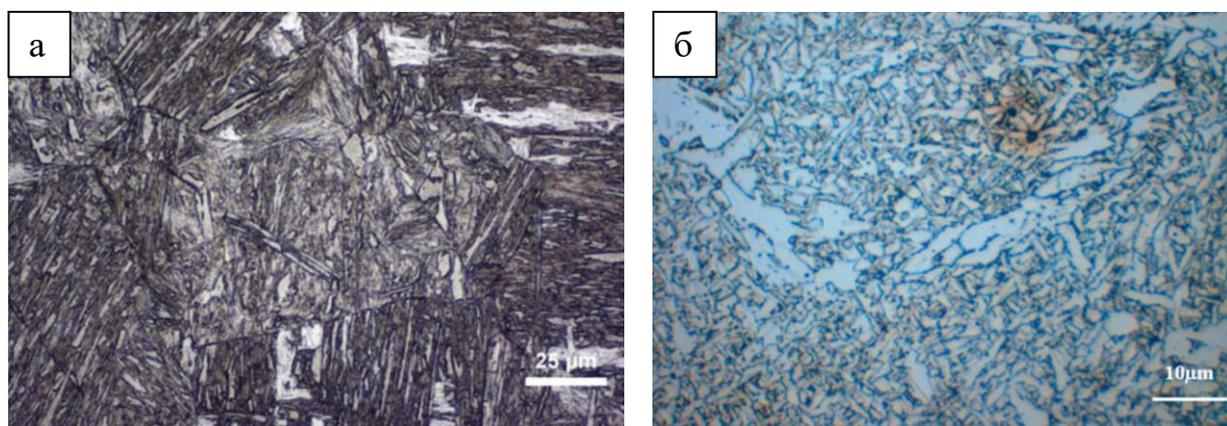


Рисунок 1.13 – Микроструктура стали X70. а) зона термического воздействия (более светлая часть верхний бейнит, а темная – мартенсит); б) сварной шов с зернистым ферритом, игольчатым ферритом, многоугольным ферритом и некоторыми боковыми пластинами [30]

Средний коэффициент диффузии при комнатной температуре составил  $7,6 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с для основного металла,  $4 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с для зоны термического воздействия и  $1,3 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с для сварного шва. Авторами было доказано, что восприимчивость к водороду более выражена для образцов подверженных термической обработке. Это было показано исследованиями образцов на ударную вязкость. Так для исходного металла предел прочности составляет  $\sigma_c=1500$  МПа, для сварного шва  $\sigma_c=1800$  МПа и для зоны термического воздействия  $\sigma_c=1840$  МПа.

Для расчета экспериментально полученных коэффициентов диффузии авторы воспользовались следующей формулой:

$$D_{eff} = \frac{L^2}{6t_{lag}} \quad (13)$$

Где  $L$  – толщина исследуемого образца,  $t_{lag}$  – время, за которое устанавливается 63 % стационарного потока.

Автором получены следующие данные закона Аррениуса:

$$D = 1.5 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{-43 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}}}{RT}\right) m^2/c \quad (14)$$

Также им было замечено, что концентрация водорода в исследуемых образцах не превышает 1 ppm, что говорит о незначительном накоплении водорода в сталях. Тот факт, что самый низкий коэффициент диффузии наблюдается в сварном шве говорит о том, что задерживающим фактором является наличие мартенситной структуры.

Николас Винзер и др. [31] исследовали влияние модификации стали титаном с целью уменьшения влияния водорода на материал. Авторы связывают это с тем, что водород находясь в вакансиях углерода крупных дисперсных частиц имеет энергию связи 70 – 150 кДж/моль. Это приводит к тому, что водород, чтобы попасть в частицу TiC должен преодолеть достаточно большой потенциальный барьер. Следовательно, процесс проникновения водорода может проходить только при высоких температурах.

Для исследования влияния титана на диффузию водорода использовались промышленные стали CP1200 и AHSS, в которые дополнительно вводили 0,13 мас. % Ti. Каждый из экспериментальных образцов подвергался специальной термической обработке для получения определенной структуры. Один из образцов характеризуется примерно равным соотношением феррита и мартенсита (1200 M04), а другой - закаленной мартенситной матрицей, содержащий примерно 10 об. % феррита (1200TM09). Также образцы, один из которых полностью состоит из мартенсита (1400 M), а другой - из закаленного

мартенсита (1400TM). Все материалы нагревали со скоростью 15 °С/сек до температуры 900 °С.

Исследования на проницаемость водорода производили в соответствии со стандартом ISO 17081. В катодном отсеке использовался 0.1М раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, тогда как в анодном отсеке использовался 0,1М раствор NaOH. Испытания проходили при постоянной плотности тока 12 мА/см<sup>2</sup> для смоделированных сталей и 1,2 – 12 мА/см<sup>2</sup> для сталей CP1200.

Авторами получены следующие диффузионные кривые (рис. 1.14).

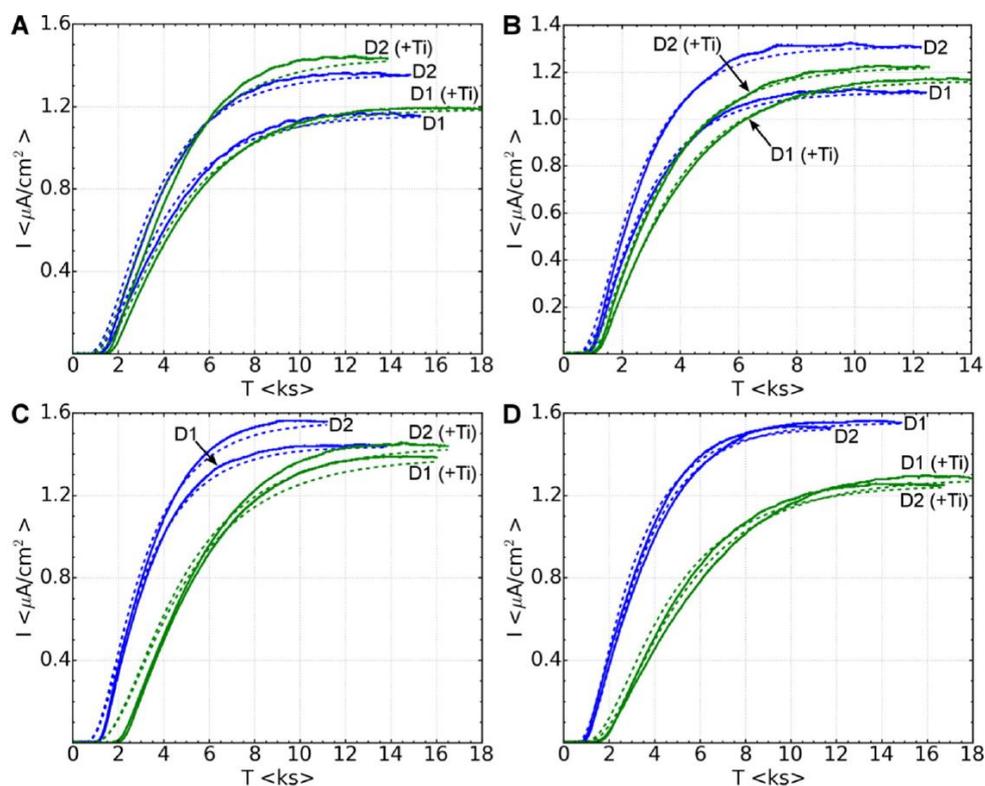


Рисунок 1.14 – Кривые проницаемости сталей 1400M (A), 1400TM (B) 1200M04 (C), 1200TM09 (D) [31]

На каждом графике показаны первая (D1) и вторая (D2) кривые проницаемости как для образцов без Ti (синяя) и Ti – содержащих образцов. Пунктирными линиями показаны теоретически рассчитанные кривые по закону Фика.

Для стали CP1200 экспериментально полученные кривые проницаемости хорошо коррелируются с аналитическим решением закона Фика, причем  $D_{\text{eff}}$  находится в диапазоне  $(7,1 \div 9,6) \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с. Для сталей, полученных сталелитейным методом кривые проницаемости, хорошо коррелируются с

аналитическим решением закона Фика, за исключением 1200M04. Для образцов, не содержащих Ti,  $D_{\text{eff}}$  находится в диапазоне  $(6 \div 10) \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с. Тогда как для Ti – содержащих образцов  $D_{\text{eff}} = (4,5 \div 8) \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, что подтверждает ранее выдвинутую теорию. Авторы подчеркивают, что влияние Ti на стали, которые полностью состоят из мартенсита (1400M и 1400TM), было незначительным. Тогда как влияние Ti на диффузию водорода в сталях, содержащих 10 % и 40 % феррита (1200TM09 и 1200M04 соответственно), было более ощутимым. Причем влияние Ti увеличивается с увеличением объемной доли феррита. Эти результаты объясняются наилучшим образом с точки зрения захвата водорода вблизи и на фазовых границах.

Веймин Чжо и др. [32] разработали методику исследования диффузии водорода с одновременным растяжением образца. Исследование производится путем фиксации образца на машине для растяжения между двумя электролитическими ячейками при температуре  $303 \pm 5$  К. Катодная поляризация производится в растворе 3,5 мас. % NaCl + 0,1 мас. % Na<sub>2</sub>S при разности потенциалов -1100 мВ. Анодная поляризация производится в окислительной камере с раствором 0,4 мас. % NaOH при разности потенциалов +300 мВ для уменьшения фонового потока. Выходная поверхность образца предварительно покрывается никелем для уменьшения окисления поверхности. Испытания на растяжение производятся со скоростью  $1 \cdot 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.15. (Anodic cell – анодный отсек, Cathodic cell – катодный отсек, Specimen – образец, Graphite electrode – графитовый электрод, Purge gas – продувочный газ, Outlet – выход, Inlet – вход, electrode – электрод, SCE – электрод сравнения, wt. % - мас. %)

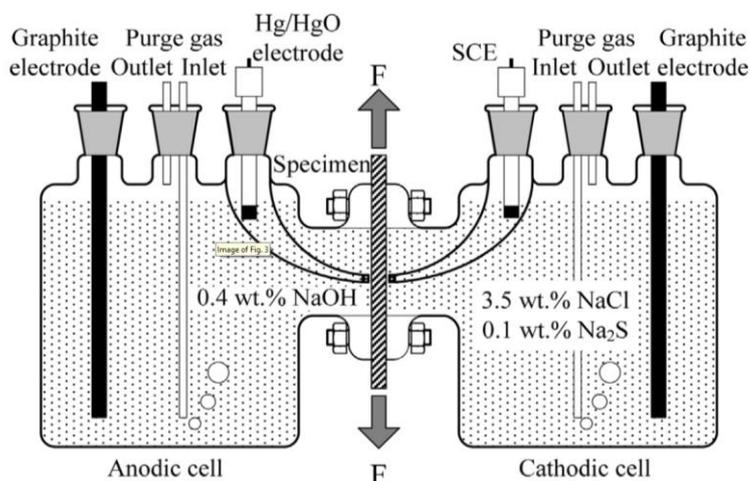


Рисунок 1.15 – Установка для исследования проникновения водорода [32]

Полученные кривые растяжения и диффузионные кривые наносятся на один график (рис. 1.16). (Background current density – фоновая плотность тока, Stress – напряжение, Time - время)

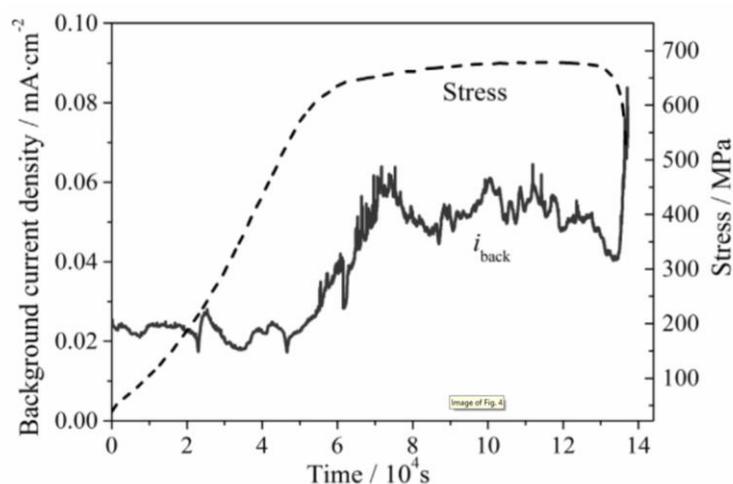


Рисунок 1.16 – Изменение плотности фонового тока с временем растяжения при скорости деформации  $1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  [32]

Плотность фонового тока ( $i_{\text{back}}$ ) увеличивается со значением деформации, но при растяжении  $i_{\text{back}}$  можно поддерживать на уровне, не выше  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ . Низкая плотность фонового тока обеспечивает обнаружение атомов водорода с высокой чувствительностью.

В трубопроводных сталях в процессе эксплуатации образуется большое количество различного рода дефектов кристаллической структуры и различного рода включений вторичных фаз, одним из критериев позволяющих оценить степень развития критической дефектной структуры материала можно считать

коэффициент диффузии водорода в материале. Это связано с тем, что различного рода дефекты являются центрами захвата водорода и тормозят непосредственно процесс диффундирования атомов в материале. Следовательно, исходя из того, что коэффициент диффузии водорода имеет обратную зависимость от времени, чем ниже его значение, тем больше в материале дефектов.

## ГЛАВА II. МАТЕРИАЛ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ.

### 2.1. Материал исследования.

Сталь марки 10Г2 относится к нержавеющей легированной стали, которая предназначена для изготовления высоконагруженных деталей, работающих на кручение и изгиб под динамической нагрузкой, а также в агрессивных кислых средах с высоким содержанием солей щелочных и щелочно-земельных металлов, солей азотной и серной кислот, ионов хлора, сероводорода. Сталь имеет следующий химический состав (таблица 2.1)

Таблица 2.1. Химический состав стали 10Г2

Химический элемент	Содержание, мас. %
C	0,07 – 0,15
Si	0,17 – 0,37
Mn	1,2 – 1,6
Ni	до 0,3
S	до 0,035
P	до 0,035
Cr	до 0,3
Cu	до 0,3
Fe	~97

Сталь данной марки нашла широкое применение в изготовлении магистральных трубопроводов в связи с тем, что имеет хорошие механические свойства (таблица 2.2), достаточно высокий срок службы (не менее 25 лет) и не имеет ограничений свариваемости.

Таблица 2.2. Механические свойства стали марки 10Г2 при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
265	470	21	197

Где  $\sigma_{0.2}$  – предел текучести,  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении,  $\delta$  – относительное удлинение после разрыва, НВ – твердость по Бринеллю.

## **2.2. Исследование диффузии водорода электролитическим методом с помощью экспериментальной установки Stand for Testing Electrochemical Permeation.**

Экспериментальная установка Stand for Testing Electrochemical Permeation (STEP) для исследования водородной проницаемости через металлические мембраны методом электрохимического проникновения используется для изучения диффузии водорода в металлах, а также для исследования системы металл-водород в целом [33]. Кроме того, используя экспериментальный комплекс можно изучать влияние всевозможных режимов одностороннего наводораживания металлической мембраны на различные защитные покрытия, кинетику дефектообразования в поверхностном слое металла. Установка для исследования водородной проницаемости позволяет подтверждать фундаментальные гипотезы, как правило, созданные, чтобы объяснить экспериментальные данные.

Принцип работы экспериментального стенда STEP для исследования проницаемости водорода сквозь металлические мембраны методом электрохимической проницаемости заключается в следующем: между двумя электрохимическими отсеками помещается металлическая исследуемая мембрана, которая герметично закрепляется. В анодном отсеке на поверхности исследуемого образца, выступающего катодом, происходит выделение ионов водорода за счет протекания постоянного тока, а на аноде происходит осаждение кислотного остатка. Осажденные на поверхности ионы водорода диффундируют в объем материала и спустя некоторый промежуток времени выделяются с обратной стороны в другой отсек, где происходит их осаждение на электроде сравнения.

Исследование водородной проницаемости сквозь металлические мембраны с использованием экспериментального стенда STEP позволяет определить коэффициент диффузии водорода в исследуемом материале, т. е. время диффундирования ионов водорода сквозь мембрану определенной толщины. Кроме того, с применением данного стенда возможно исследование

влияния всевозможных защитных покрытий, различных состояний поверхности и объема образца на кинетику диффузии водорода. Анализируя экспериментальные данные и используя дополнительный комплекс различных экспериментальных устройств, возможно определение степени насыщения материала водородом.

Методологически эксперимент на водородную проницаемость выглядит следующим образом. Необходимо предварительно подготовить тонкие образцы определенного размера 25 x 25 мм. Для этого их механически подвергают длительной шлифовке, так как состояние поверхности сильно влияет на проникновение водорода, вследствие чего происходит утончение исследуемого образца, что необходимо для более качественного проведения эксперимента.

Независимо от способа шлифования, процесс утончения металла заключается в механическом снятии поверхностного слоя. Это достигается за счет срезания высоты микровыступов абразивными зернами. Шлифование обязательно осуществлять на плоском основании или на вращающемся круге с целью сохранения плоско-параллельности исследуемых образцов.

Необходимым условием получения качественной поверхности микрошлифа является постепенный переход к шкуркам с более мелкими размерами абразивных зерен. Следующей стадией обработки поверхности исследуемого образца является полирование. Данный процесс сопровождается съемом небольшого поверхностного слоя металла и направлен на устранение рисков, связанных с воздействием абразивных частиц. Также важную роль играют химические и термохимические процессы, развивающиеся под действием полировочных паст. Процесс полирования заканчивается при получении зеркальной поверхности образца. Завершающим этапом подготовки поверхности, непосредственно перед проведением эксперимента, является химическое травление с целью избавления от тонкого слоя оксида металла.

После получения утонченного зеркального образца следует измерить его толщину на микрометре, что необходимо для получения стабильности результатов. Завершающим этапом подготовки образца является химическое

травление в растворе кислот в течении определенного времени. Для каждого конкретного материала время и состав раствора подбираются индивидуально.

Затем конструкция держателя с металлической мембраной герметично фиксируется к каждой ячейки установки, используя пазы конструкции. Электролитические отсеки заполняются 20% раствором NaOH и туда помещаются платиновые электроды. Важно учесть, чтобы контакты электрической цепи с электродами не находились в электролитической среде, для чего используются специальные крепления для электродов, расположенные на каждом из отсеков. Один электрод выполняет функцию анода. Катодом в данном случае является исследуемая металлическая мембрана. Вторым электродом, изготовленный из платины, помещенный в другой электролитический отсек, является электродом сравнения, необходимый для регистрации вольтметром разности потенциалов между электродами. Далее на источнике тока устанавливают необходимое значение силы тока и фиксируют достаточное время эксперимента.

При прохождении электрического тока через раствор электролита происходит выделение на электродах составных частей растворённых веществ или других веществ, являющихся результатом вторичных реакций на электродах.

Наличие процесса разряда ионов водорода является необходимым условием наводороживания металлов в водных, щелочных и кислотных средах. Наличие напряжений как внешних, так и внутренних, приводит к ускорению сорбции водорода и может привести к появлению трещин и последующему хрупкому разрушению. Также на кинетику поглощения водорода металлами влияет величина и форма кристаллитов.

Прохождение электрического тока через электролитический раствор приводит к его диссоциации молекул с последующем выделением ионов водорода на поверхности металлической мембраны в анодном отсеке экспериментального комплекса, и осаждение кислотного остатка на аноде.

Процессы химических реакций, проходящие при данном исследовании на экспериментальном стенде СТЕР, в 20% растворе едкого натрия NaOH представлены на рис. 2.1.

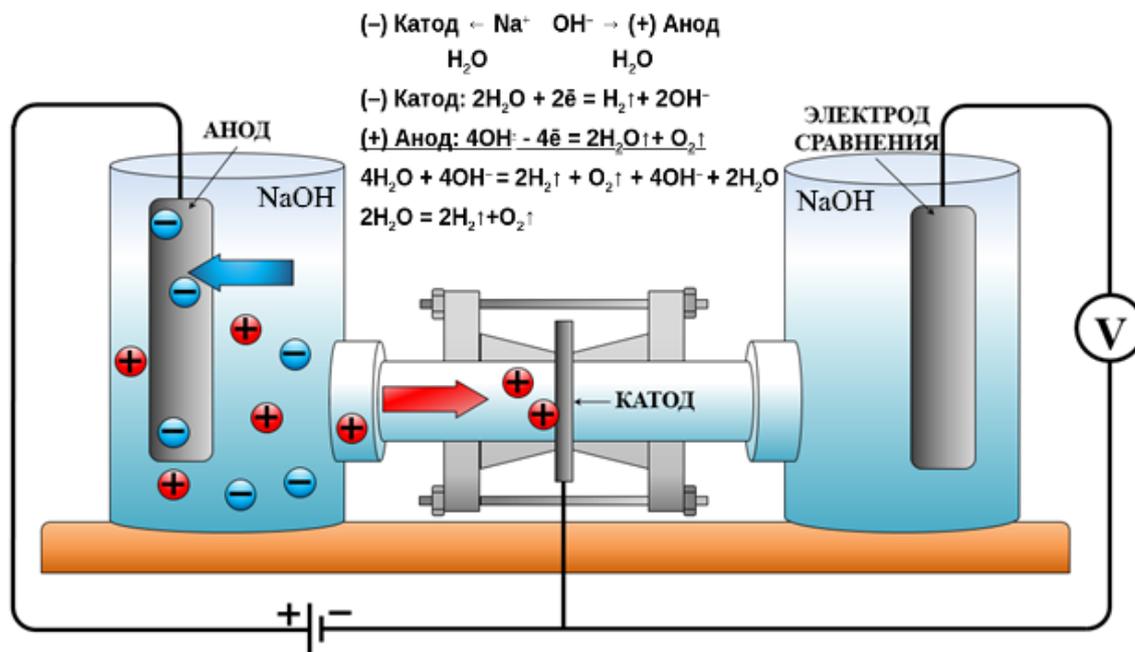


Рисунок 2.1 – Процессы химических реакций, протекающие при электрохимическом проникновении ионов водорода через металлическую мембрану в 20% растворе едкого натрия NaOH

Ионы водорода осаждаются на входной стороне исследуемой металлической мембраны (катодная сторона). В дальнейшем, благодаря процессам диффузии, водород начинает проникать через металлическую мембрану, и с течением определенного промежутка времени, проходит всю толщину исследуемого образца с последующим выделением на электроде сравнения в другом отсеке.

Детектором прохождения ионов водорода сквозь исследуемый образец является изменение заряда электрода сравнения в приповерхностной области, а также изменение химического состава приповерхностной области электрода при его взаимодействии с водородом. В качестве измеряемой величины, позволяющей судить об изменении зарядового состояния «выходной» области исследуемого образца, использовался электродный потенциал поверхности

образца и электрода сравнения, введенного в ячейку. Контакты присоединялись к торцевой поверхности электродов, располагались вне пространства ячейки и не имели контакта с раствором электролита.

### **2.3. Проведение ускоренных коррозионных испытаний на реакторе для симуляции условий работы реального газопровода**

Проблема коррозии магистральных трубопроводов в нефтегазовой отрасли остается актуальной по сей день [34]. Это связано с тем, что прямой ущерб от коррозии нефтяных и газовых трубопроводов оценивается по меньшей мере в 1 миллиард долларов США [35], тогда как ущерб от упущенной прибыли, связанный с остановкой магистрали во время ремонтных работ, превосходит 10 миллиардов [36]. Одной из причин отказов нефтяных и газовых трубопроводов является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) [37]. В связи с этим существует необходимость лабораторных исследований магистральных трубопроводов с целью определения критерия изношенности материала для своевременной замены и минимизации финансовых потерь.

Для достижения поставленной задачи необходима разработка специального газового реактора, в котором будут симулироваться условия эксплуатации реального газопровода.

Для симуляции воздействия агрессивной среды НИ ТПУ совместно с Газпром трансгаз Томск был разработан специальный реактор с подачей природного газа [38]. Схема установки представлена на рис. 2.2.

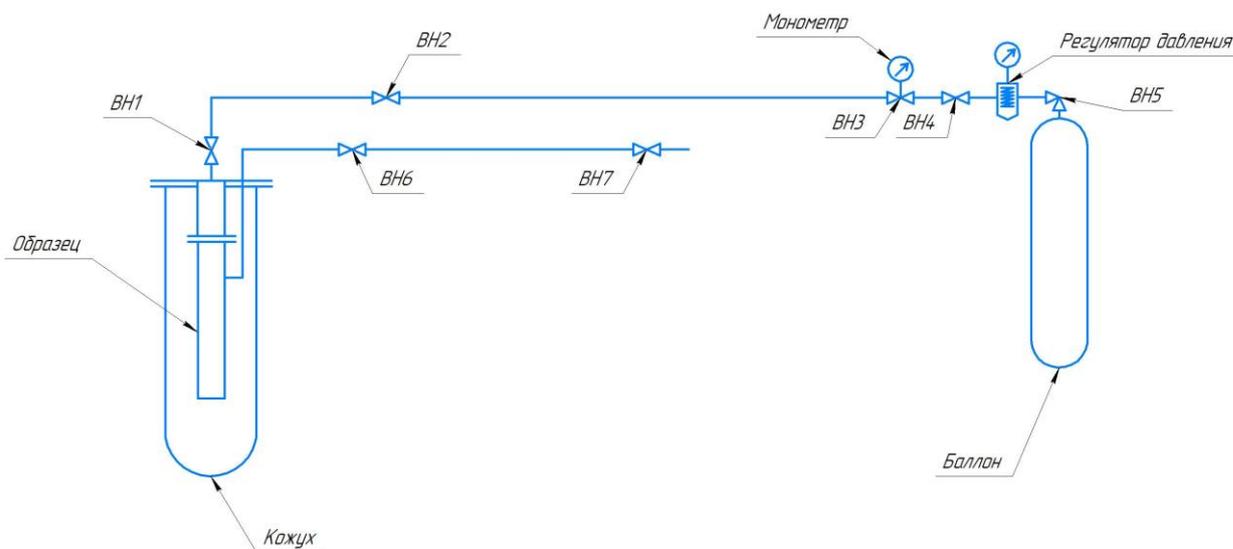


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема реактора для симуляции условий реального газопровода

Реализация условий эксплуатации реального трубопровода выглядит следующим образом. Заданное количество природного газа подается в резервуар. Газ проходит сквозь сектор исследуемой трубы, находящийся в резервуаре, аналогично тому, как газ подается через трубопровод под землей. С внешней стороны сектора может быть подан кислород, воздух с повышенной влажностью или иной газ/жидкость. Такое приспособление позволяет смоделировать внешнее воздействие сырой почвы на обшивку трубопровода. Система нагрева образца позволяет проводить ускоренные коррозионные испытания при различных температурах.

#### 2.4. Структурно-фазовый анализ с использованием рентгеновского дифрактометра «XRD 7000S».

Для определения структурно – фазового состава стали марки 10Г2 использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 7000S (Япония). Дифракционные картины для трубопроводной стали были зарегистрированы с использованием  $\text{Cu K}\alpha_1/\alpha_2$  излучения. Параметры съемки при исследовании составили 40 кВ и 30 мА, диапазон углов  $10 \div 90^\circ$  с шагом сканирования  $0,0143^\circ$ .

Принцип работы устройства заключается в дифрагировании образцом сфокусированного на нём рентгеновского пучка. Упрощенная схема устройства изображена на рисунке 2.3.

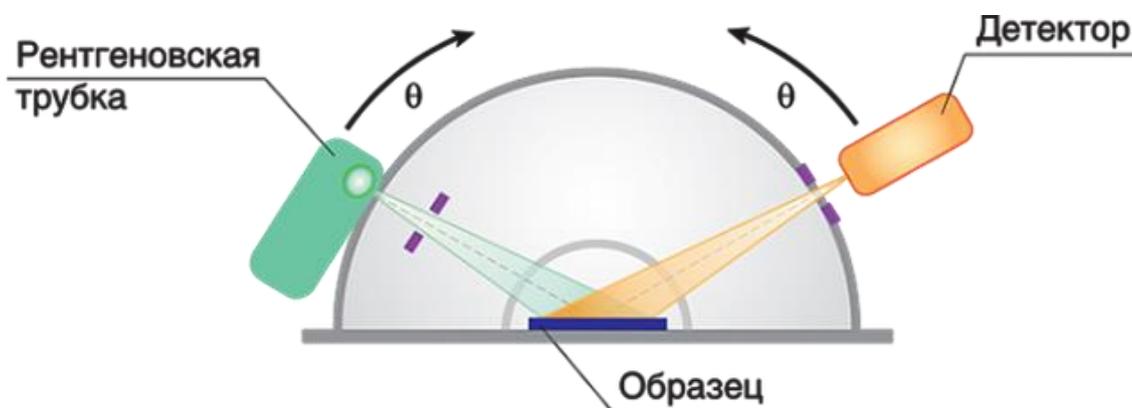


Рисунок 2.3 – Схема рентгеновского дифрактометра.

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 также 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.

Данный дифрактометр обладает следующими особенностями:

- Система поликапиллярной оптики, обеспечивающая параллельный рентгеновский пучок высокой интенсивности и принципиальное улучшение соотношения пик/фон.
- Противомонохроматор для снижения фона.
- 5-позиционный автосамплер.
- Высокотемпературные (до 2300°C) и низкотемпературные камеры.
- Приставки для анализа напряжений, тонких плёнок, волокон, измерения микрообразцов с использованием цифровой камеры, текстурного анализа с построением полюсных фигур.

Технические характеристики рентгеновского дифрактометра XRD 7000S представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Технические характеристики дифрактометра XRD-7000S

<b>Рентгеновская трубка</b>	
Материал и тип анода	Cu, Co, Fe, Cr
Размеры фокуса и максимальная мощность	1,0 x 10,0 мм; максимальная мощность 2,0 кВт 0,4 x 12,0 мм; максимальная мощность 2,2 кВт 2,0 x 12,0 мм; максимальная мощность 2,7 кВт
<b>Гониометр</b>	
Тип	Вертикальный ( $\theta$ - $\theta$ )
Минимальный шаг сканирования	0,0001 градуса ( $\theta$ )
Режимы работы	Непрерывное сканирование, пошаговое сканирование, калибровка, позиционирование, осцилляция по оси тета
Скорость сканирования	0,1~50 градусов/мин ( $\theta_s$ , $\theta_d$ ), 0,1~100 градусов/мин ( $2\theta$ )
<b>Детектор/счётчик</b>	
Сцинтилляционный счетчик	Сцинтилятор NaI, количество каналов: 1
OneSight (опция)	Высокоскоростной широкоугольный детектор, количество каналов: 1280

## 2.5. Атомно-эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда на устройстве GD Profiler 2

Атомно-эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда применяется для послыйного исследования материалов различного рода [39].

Анализ производится за счет распыления поверхности исследуемого образца бомбардировкой ионами инертного газа (зачастую аргона). Типичная схема конструкции и процесса распыления представлена на рис. 2.4. Анодом выступает медная трубка диаметром, как правило, 4 мм. Исследуемый образец является катодом, который располагается непосредственно перед анодом и отделен от анода керамикой с кольцевидным уплотнителем. Исследуемый образец плотно устанавливается к кольцевидному уплотнителю, после чего производится вакуумирование внутреннего пространства анода и полости между исследуемым образцом и керамикой. Затем в анодную трубку подается аргон.

Под действием электрического поля, возникающего между анодом и исследуемым образцом, ионы аргона ускоряются до энергий, достаточных для распыления поверхности исследуемого образца. Поступающие в плазму распыленные частицы возбуждаются за счет соударений с ионами используемого газа. В процессе релаксации, распыленные с поверхности исследуемого образца, атомы испускают квант света, характерный для каждого элемента. Поскольку в процессе исследования постоянно происходит удаление распыленных атомов вакуумным насосом, то непрерывное измерение оптической эмиссии отражает изменение состава исследуемого образца. Регистрация спектров излучения распыляемых атомов осуществляется с применением оптического спектрометра.

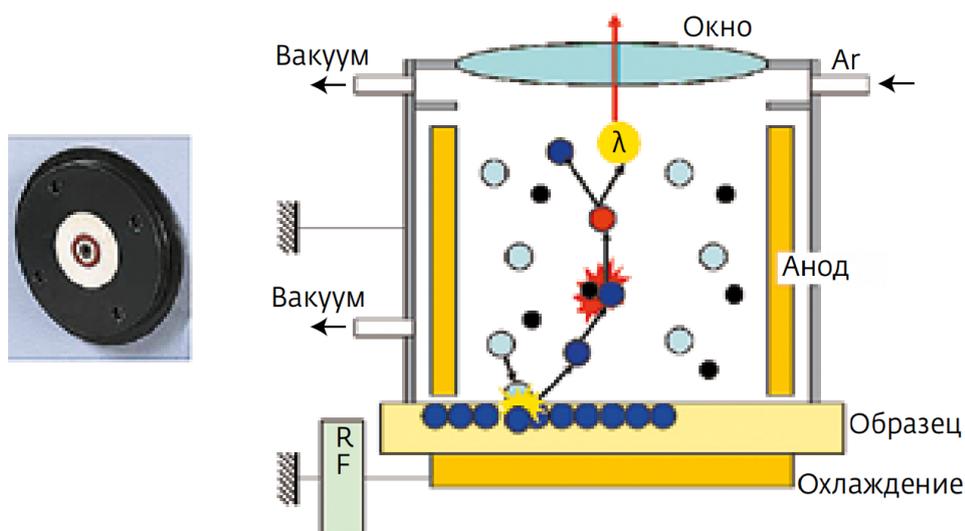


Рисунок 2.4 – Основные процессы и устройство лампы тлеющего разряда [40]

В спектрометре Profiler-2 используется полихроматор высокого разрешения Пашена-Рунге, позволяющий исследовать послойный состав поверхности исследуемого образца в широком диапазоне элементов. В приборах исследовательских конфигураций в дополнение к полихроматору устанавливается дополнительный монохроматор. Монохроматор настраивается на любую спектральную линию, что дает возможность измерения элементов, не вошедших в аналитическую программу.

Узкие спектральные линии в методах, основанных на возбуждении тлеющим зарядом, являются главным достоинством этих методов. Температура газа в тлеющем разряде низка, что обеспечивает, в отличие от искрового разряда, нетермический характер поступления атомов пробы в зону возбуждения спектра за счет катодного распыления поверхности пробы в результате ионной бомбардировки. Это делает возможным применять в целях калибровки одну спектральную линию на весь диапазон концентраций.

Пределы обнаружения спектрометра тлеющего разряда Profiler-2 лежат в диапазоне 1–10 ppm для большинства элементов для однородных образцов. Как и в любом эмиссионном спектрометре, в спектрометре тлеющего разряда пределы обнаружения зависят от чувствительности эмиссионной линии, выбранной для элемента. Другие факторы, влияющие на пределы обнаружения – это тип материала и рабочие настройки прибора.

## ГЛАВА IV. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование, а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

### 4.1 Организация и планирование работ

Трудоемкость выполнения ВКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Разделим выполнение выпускной квалификационной работы на этапы, представленные в таблице 4.1:

Таблица 4.1. Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1. Разработка задания на НИР	НР	НР – 100%
2. Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР, Ст.	НР – 100% Ст. – 50%
3. Составление и утверждение ТЗ	НР, Ст.	НР – 100% Ст. – 10%
4. Подбор и изучение материалов по тематике	НР, Ст.	НР – 30% Ст. – 100%
5. Разработка календарного плана	НР, Ст.	НР – 100% Ст. – 10%
6. Разработка концепта исследования	НР, Ст.	НР – 50% Ст. – 100%
7. Поиск методов решения	НР, Ст.	Ст. – 100%
8. Обобщение и оценка результатов	Ст.	Ст. – 100%
9. Оформление отчета по НИР	Ст.	Ст. – 100%
10. Оформление расчетно-пояснительной записки	Ст.	Ст. – 100%
11. Подведение итогов	НР, Ст.	НР – 60% Ст. – 100%

НР – научный руководитель; Ст. – студент.

#### 4.1.1 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:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

где  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{maxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Для установления продолжительности этапов в рабочих днях используем формулу:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}$$

где  $t_{ож}$  – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно  $K_{ВН} = 1$ ;

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ( $K_{Д} = 1-1,2$ ; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Для проведения научного исследования, представленного в выпускной квалификационной работе, выбирают специальную узко направленную научную

тому. 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:

$$T_{КД} = T_{РД} T_{К}$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{РД}$  – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_{К}$  – коэффициент календарности, определяющийся выражением:

$$T_{К} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пд}}$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$  – количество выходных дней в году;

$T_{пд}$  – количество праздничных дней в году.

Рассчитаем коэффициент календарности:

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 4.2, 4.3.

Таблица 4.2 Трудозатраты на выполнение работ

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям, чел. - дн.			
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	Ст.	НР	Ст.
1. Разработка задания на НИР	НР	6	12	8,4	10,08	-	12,15	-
2. Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР, Ст.	16	20	17,6	21,12	10,56	25,45	12,72
3. Составление и утверждение ТЗ	НР, Ст.	3	6	4,2	5,04	0,5	6,07	7,31
4. Подбор и изучение материалов по тематике	НР, Ст.	4	7	5,2	1,87	6,24	2,25	2,71
5. Разработка календарного плана	НР, Ст.	7	18	11,4	13,68	1,67	16,48	19,86
6. Разработка концепта исследования	НР, Ст.	7	9	7,8	4,68	9,36	5,64	6,8
7. Поиск методов решения	НР, Ст.	3	6	4,2	-	5,04	-	6,07
8. Обобщение и оценка результатов	Ст.	10	20	14	-	16,8	-	20,24
9. Оформление отчета по НИР	Ст.	16	18	16,8	-	20,16	-	24,29
10. Оформление расчетно-пояснительной записки	Ст.	6	9	7,2	-	8,64	-	10,41
11. Подведение итогов	НР, Ст.	9	12	10,2	7,34	12,24	8,84	14,75
<b>Итого</b>		<b>87</b>	<b>137</b>	<b>107</b>	<b>63,81</b>	<b>91,21</b>	<b>76,88</b>	<b>125,16</b>

Таблица 4.3. Линейный график работ

Этап	НР	Ст.	Февраль			Март			Апрель			Май	
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1	12,15	-	■										
2	25,45	12,72	■	■									
3	6,07	7,31		■	■								
4	2,25	2,71			■								
5	16,48	19,86				■							
6	5,64	6,8					■						
7	-	6,07						■					
8	-	20,24							■				
9	-	24,29								■			
10	-	10,41									■		
11	8,84	14,75										■	■

НР - ■ ; Ст. - ■ .

#### 4.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Таблица 4.4. Расчет затрат на материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Едкий натрий (NaOH)	кг	1	500	500
Медные провода	см.	30	2	60
Вольтметр	шт.	1	560	560
Халат для электрохимии	шт.	1	490	490
Резиновые перчатки	шт.	5	21	105
<b>Итого</b>				<b>1715</b>

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $C_{\text{мат}} = 1715 * 1,05 = 1800$  руб.

#### 4.2.2 Расчет заработной платы

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/25,083$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчет затрат на полную заработную плату приведен в таблице 4.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{ПР} = 1,1$ ;  $K_{доп.ЗП} = 1,188$ ;  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{и} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$ . Вышеуказанное значение  $K_{доп.ЗП}$  применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае  $K_{и} = 1,62$ .

Таблица 4.5. Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	<b>33 664</b>	1342,09	77	1,699	<b>175576,24</b>
Ст.	<b>15 470</b>	616,75	126	1,62	<b>125891,01</b>
<b>Итого:</b>					<b>301467,25</b>

#### **4.2.3 Расчет затрат на социальный налог**

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.

$C_{соц} = K_{соц} \cdot C_{осн}$   $C_{соц.} = C_{зп} * 0,3$ . Итак, в нашем случае  $C_{соц.} = 301467,25 * 0,3 = 90440,18$  руб.

#### 4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об.}} \cdot t_{\text{об.}} \cdot \text{ЦЭ}$$

где  $P_{\text{об.}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$\text{ЦЭ}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об.}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $\text{ЦЭ} = 5,748$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ( $T_{\text{рд}}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об.}} = T_{\text{рд}} * K_t$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{рд}}$ , определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{об.}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об.}} = P_{\text{ном.}} * K_C$$

где  $P_{\text{ном.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$ , час	Потребляемая мощность $P_{об}$ , кВт	Затраты $\mathcal{E}_{об}$ , руб.
Персональный компьютер	91,21·8·0,6	0,3	131,34
Стендовый компьютер	23·3·0,6	0,3	12,42
Экспериментальный стенд STEP	23·3·1	0,12	8,28
<b>Итого:</b>			<b>152,04</b>

#### 4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула:

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{об} * t_{рф} * n}{F_d},$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{об}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

$F_d$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку  $C_{AM}$ . Например, для ПК в 2015 г.

(298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять  $F_{\text{д}} = 298 * 8 = 2384$  часа;

$t_{\text{рф}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Постановление правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы», позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования  $\equiv$  СА. Например, для ПК это  $2 \div 3$  года. Необходимо задать конкретное значение СА из указанного интервала, например, 2,5 года. Далее определяется  $N_{\text{д}}$  как величина обратная СА, в данном случае это  $1 : 2,5 = 0,4$ .

Стоимость ПК 45000 руб, время использования 607 часа, тогда для него  $C_{\text{ам}}(\text{ПК}) = (0,4 * 45000 * 607 * 1) / 2408 = 4537,38$  руб. Итого начислено амортизации 4537,38 руб.

Амортизационные отчисления для экспериментального стенда STEP не подлежат расчету, так как срок его службы истек.

#### **4.2.6 Расчет прочих расходов**

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их принимают равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1$$

$$C_{\text{проч.}} = (1715 + 301467,25 + 90440,18 + 152,04 + 4537,38) \cdot 0,1 = 42\,961,49 \text{ руб.}$$

#### **4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки**

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Макет демонстрационной модели принципов КТ».

Таблица 4.7. Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	1715
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	301467,25
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	90440,18
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	152,04
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	4537,38
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	31303,07
<b>Итого:</b>		429 614,92

Таким образом, затраты на разработку составили  $C = 429\ 614,92$  руб.

#### **4.2.8 Расчет прибыли**

Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль принимают в размере  $5 \div 20\%$  от полной себестоимости проекта. В нашем случае прибыль составляет 85 922,984 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

#### **4.2.9 Расчет НДС**

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это  $(403411,81 + 80682,36) * 0,2 = 103\ 107,58$  руб.

#### **4.2.10 Цена разработки НИР**

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 429\ 615 + 85\ 923 + 103\ 107 = 528\ 644 \text{ руб.}$$

#### **4.3 Оценка экономической эффективности проекта**

Оценка экономической эффективности для данной работы невозможна, так как для получения окончательных результатов требуется дополнительное исследование, для которого необходимо спроектировать и изготовить специальное оборудование.

## ГЛАВА V. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Для выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Применение метода электрохимической проницаемости для определения коэффициента диффузии водорода в трубопроводной стали марки 10Г2 до и после коррозионных испытаний» проводилась серия экспериментов с применением различных установок, помогающих решить поставленные задачи, следующего типа: станок шлифовально-полировальный подготовки образцов, анализатор водорода RHEN602, экспериментальная установка STEP и другие. Стальные образцы измерялись на газоанализаторе RHEN-602, применяемого в отделении экспериментальной физики инженерной школы ядерных технологий для определения содержания водорода в металлах методом нагрева или плавления в автономной электродной печи в среде инертного газа. Водород измеряется по регистрации изменения теплопроводности в термокондуктометрической ячейке. В результате чего, рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ на газоанализаторе RHEN-602 особенно важно при проведении экспериментальных исследований, входящих в выпускную квалификационную работу. В данном разделе рассматриваются правовые вопросы характерные при эксплуатации газоанализатора RHEN-602, а именно: безопасность при работе с электроприборами с напряжением до 1000В; безопасность работы с газовыми баллонами; безопасность работы с химическими веществами; микроклиматические условия. Также рассматриваются аспекты охраны окружающей среды и защита в чрезвычайных ситуациях.

### 5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе с газоанализатором допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте [44]. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов

выполнения работы с использованием газоанализатора, 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, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

По данной теме рассматриваются законодательный и нормативные документы;

Опасность поражения электрическим током:

- инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В [45];
- ГОСТ 12.1.038-82 Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [46].

Нормативными значениями напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, для ГОСТа 12.1.038-82, не должны превышать значений, указанных в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Нормативные параметры тока

Ток рода	U, В	I, mA
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

– СНиП 3.05.06-85 от 01.07.1986 г. Электротехнические устройства [47].

Опасность действия высокой температуры:

– ГОСТ 2408.4-98 Топливо твердое минеральное. Метод определения углерода и водорода сжиганием при высокой температуре [48].

– ГОСТ 30331.4-95 Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий [49].

Нормативными значениями максимальных температур доступных для прикосновения частей электрооборудования при нормальных условиях работы, для ГОСТа 30331.4-95 Часть 4, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Нормативными значениями максимальных температур

Доступные для прикосновения части электрооборудования	Материал доступных частей	Максимальные температуры, °С
Ручки управления	Металл	55
	Не металл	65
Части, не предназначенные для удерживания руками	Металл	70
	Не металл	80
Части, не предназначенные для прикосновения при нормальных условиях обслуживания	Металл	80
	Не металл	90

Опасность поражения химическими веществами:

– ГОСТ Р ИСО 17491-4-2009 Одежда специальная для защиты от химических веществ [50].

– ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ Организация обучения безопасности труда. Общие положения [51].

Опасность при работе с газовыми баллонами:

– инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением [52].

– ГОСТ Р ИСО 11439-2010 Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения природного газа. Технические условия [53].

– ГОСТ Р 51982-2002 Регуляторы давления для газовых аппаратов с давлением на входе до 20 кПа. Общие технические требования и методы испытаний [54].

Микроклимат:

- ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении [55].
- ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [56].
- СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [57].
- СНиП 21-01-97 от 1998-01-01 Пожарная безопасность зданий и сооружений [58].

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании.

## **5.2 Производственная безопасность**

### **5.2.1 Выявленные вредные и опасные факторы**

Определение содержания водорода в образцах осуществлялось анализатором водорода RHEN-602 – это инструмент на платформе Windows, для определения концентрации водорода в образце, методом нагрева или плавления в автономной электродной печи в среде инертного газа, работа которого производится за счет питания от сети переменного тока напряжением 220 В. Работая на газоанализаторе RHEN-602 возможно воздействие вредных и опасных факторов, негативно влияющих на здоровье сотрудников, которые представлены в таблице 5.4. По причине того, что в данной работе подразумевается только эксплуатация данного оборудования, вредные и опасные факторы на стадиях разработки и изготовления не рассматриваются.

Таблица 5.3. Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изготов- ление	Эксплуа- тация	
1. Отклонение показателей микроклимата	-	-	+	<b>Микроклимат:</b> – ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении [55]. – ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [56]. – СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [57]. – СНиП 21-01-97 от 1998-01-01 Пожарная безопасность зданий и сооружений [58].
2. Опасность действия высокой температуры	-	-	+	<b>Опасность действия высокой температуры:</b> – ГОСТ 2408.4-98 Топливо твердое минеральное. Метод определения углерода и водорода сжиганием при высокой температуре [48]. – ГОСТ 30331.4-95 Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий [49].
3. Работа с газовыми баллонами	-	-	+	<b>Опасность при работе с газовыми баллонами:</b> – инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением [52]. – ГОСТ Р ИСО 11439-2010 Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения природного газа. Технические условия [53]. – ГОСТ Р 51982-2002 Регуляторы давления для газовых аппаратов с давлением на входе до 20 кПа. Общие технические требования и методы испытаний [54].
4. Опасность поражения химическими веществами	-	-	+	<b>Опасность поражения химическими веществами:</b> – ГОСТ Р ИСО 17491-4-2009 Одежда специальная для защиты от химических веществ [50]. – ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ Организация обучения безопасности труда. Общие положения [51].
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	-	+	<b>Опасность поражения электрическим током:</b> – инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В [45]; – ГОСТ 12.1.038-82 Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [46]. – СНиП 3.05.06-85 от 01.07.1986 г. Электротехнические устройства [47].

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний и своеобразный характер. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый ток составляет 10-15 мА. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое, биологическое, световое воздействие.

Термическое воздействие тока характеризуется нагревом кожи и тканей до высокой температуры вплоть до ожогов.

Электролитическое воздействие заключается в разложении органической жидкости, в том числе крови, и нарушении ее физико-химического состава.

Механическое действие тока приводит к расслоению, разрыву тканей организма в результате электродинамического эффекта, а также мгновенного взрывоподобного образования пара из тканевой жидкости и крови. Механическое действие связано с сильным сокращением мышц вплоть до их разрыва.

Биологическое действие проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей и сопровождается судорожными сокращениями мышц.

Световое действие приводит к поражению слизистых оболочек глаз.

Для обеспечения электробезопасности необходимо точное соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок и проведение мероприятий по защите от электротравматизма.

Работа в условиях высокой температуры сопровождается интенсивным потоотделением, что приводит к обезвоживанию организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов, вызывает серьезные и стойкие изменения в деятельности сердечно-сосудистой системы, увеличивает частоту дыхания, а также оказывает влияние на функционирование других органов и систем – ослабляется внимание, ухудшается координация движений, замедляется реакция и т.д. При работе на газоанализаторе важно отметить, что запрещается прикасаться к высоко разогретым элементам экспериментального комплекса, во избежание получения термических ожогов при работе.

При работе на газоанализаторе возможно поражение химическими веществами, которые при попадании в атмосферу могут воздействовать на работников, а также заражать воздух, разные предметы и материалы. Для защиты от поражения химических веществ следует выполнять комплекс мероприятий, проводимых с целью предотвращения или ослабления воздействия на

сотрудников химической обстановки, а также точное соблюдение правил технической эксплуатации.

При утечке газа из баллона возможно удушье, отравление, а также возгорание и взрыв, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами. Проверить целостность газового баллона и прочность его крепления, наличие видимых повреждений. Вентиль газового баллона и резьба должны находиться в исправленном состоянии, редуктор должен соответствовать газу в баллоне.

Для удобства работы в помещении необходима нормировка параметров микроклимата. Необходимо применение защитных мероприятий по способам и средствам защиты от высоких и низких температур, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, искусственное освещение и т.п.

### **5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению воздействия**

Для обеспечения безопасности работы на газоанализаторе необходимо соблюдать требования инструкций, правила внутреннего трудового распорядка, режим труда и отдыха, а также знать местонахождение аптечки первой помощи и уметь правильно ее использовать при несчастных случаях.

Перед началом работы необходимо надеть спецодежду и подготовить рабочее место, произвести внешний осмотр газоанализатора RHEN-602. Также необходимо проверить отсутствие внешних повреждений электрооборудования, наличие и исправность контрольных, измерительных и сигнальных приборов, компьютера, тумблеров, переключателей и т.п. При нахождении неисправностей необходимо доложить вышестоящему сотруднику, работающему на данной установке, либо руководителю лаборатории.

В дальнейшем необходимо проверить не только сам прибор, но и дополнительные элементы экспериментальной установки, баллоны, их прочность крепления, отсутствие утечки газа, исправность вентиля и их резьбы, а также показания манометров и редукторов, состояние фильтров. Если требуется их замена, сообщить это сотруднику, отвечающему за техническое

обслуживание установки. Проверить исправность компьютера и системы охлаждения газоанализатора.

Запрещается приступать к работе, если выявлены неисправности любого используемого оборудования, если истек срок очередного освидетельствования баллона, истек срок проверки манометра, если персонал не прошел в установленном порядке обучение и проверку знаний безопасности труда.

Работа с газоанализатором должна производиться в чистом помещении, свободном от пыли, паров, кислот и щелочей, агрессивных газов и других вредных примесей, вызывающий коррозию.

При работе на установке необходимо следить за состоянием баллонов, и закреплением. При обнаружении опасных ситуаций: повышение давления после редуктора, обнаружение пропусков, принять срочные меры для их устранения. Запрещается производить подтяжку гаек редукторов на баллоне, работающих под давлением. Во время работы необходимо следить за показанием манометров.

Если во время работы произошел несчастный случай, нарушился технологический процесс, возникли опасные или вредные факторы, которые могут нанести вред здоровью или угрожают жизни персонала, необходимо остановить работу оборудования и срочно сообщить об этом руководителю работ.

После окончания работы с газоанализатором RHEN-602 необходимо:

- закрыть воду;
- закрыть вентиль газового баллона;
- выйти из программы;
- отключить питание компьютера;
- отключить газоанализатор от электросети;
- проверить целостность газовых баллонов, их закрепление, отсутствие утечки газа;
- проверить общее состояние помещения, убедиться в возможности загорания;

- осмотреть и привести в порядок рабочее место, вымыть теплой водой с мылом руки и лицо.

### **5.3 Экологическая безопасность**

Охрана окружающей среды — это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения — это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Для перехода к безотходным производствам в лаборатории Н01 3-го корпуса НИ ТПУ необходимо осуществлять сбор водорода в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух).

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

При обнаружении неисправностей работы газоанализатора RHEN-602 необходимо выполнить следующие действия:

- выйти из программы;
- отключить питание компьютера;
- отключить газоанализатора RHEN-602 от электросети;
- известить об этом вышестоящего руководителя;

В случае обнаружения утечки газа из баллона немедленно прекратить подачу газа из баллона и сообщить об аварийной ситуации непосредственному руководителю.

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.

При поражении работника электрическим током необходимо как можно скорее освободить пострадавшего от воздействия электрического тока, проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь, до приезда скорой помощи оказать пострадавшему необходимую первую помощь или, при необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение, о произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя структурного подразделения.

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г, Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д.

Категории взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий определяются для наиболее неблагоприятного в отношении пожара или взрыва периода исходя из вида находящихся в аппаратах и помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, особенностей технологических процессов.

Помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории А, т.е. помещения, в которых находятся горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости.

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.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

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 на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 5.1).

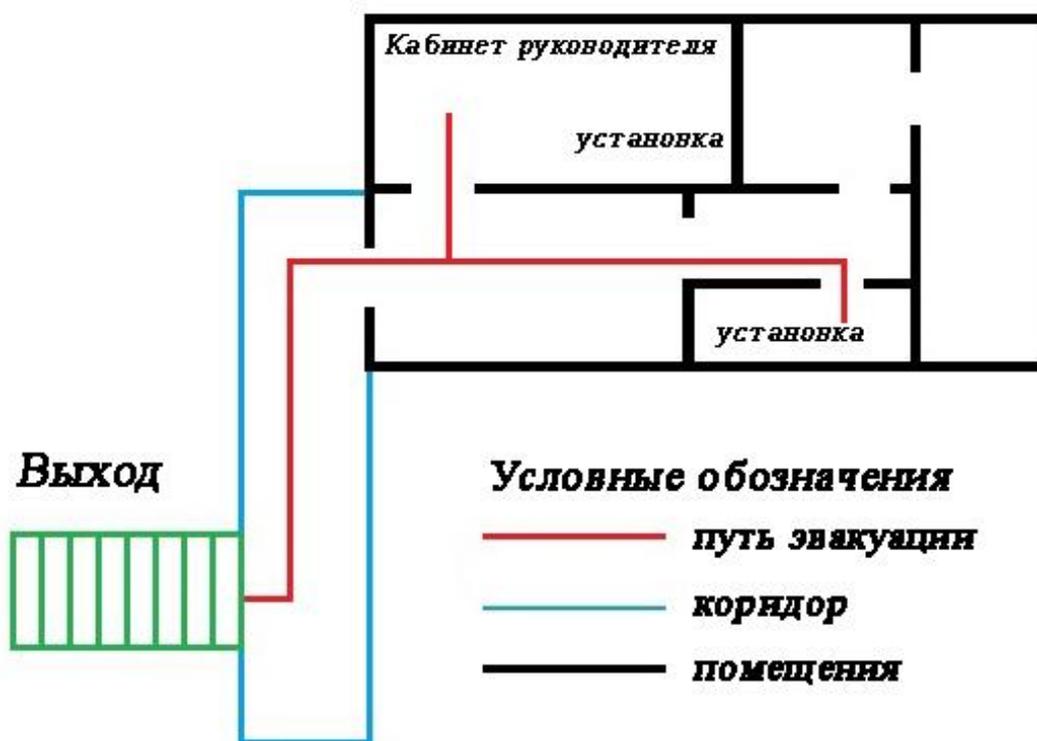


Рисунок 5.1 – План эвакуации из лаборатории.

## **Выводы**

В результате рассмотрение безопасности работы и гигиены труда при осуществлении эксплуатации газоанализатора RHEN-602, для определение содержания водорода в металлах методом нагрева или плавления в автономной электродной печи в среде инертного газа, были рассмотрены важные факторы техногенной безопасности, такие как опасность поражения электрическим током, химическими веществами, опасность поражения действием высокой температуры. Также были рассмотрены различные чрезвычайные ситуации при работе на газоанализаторе и поведение в них, а также правила работы с установкой в целях предотвращения несчастных случаев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе производился выбор критерия, позволяющего оценить степень безопасности использования трубопровода. Одним из таких параметров можно считать коэффициент диффузии водорода, т.е. время диффузии в материале определенной толщины. В связи с тем, что любые дефекты влияют на диффузионную подвижность водорода в материале, можно качественно оценить степень повреждения.

В данной работе был произведен металлографический, структурно-фазовый и элементный анализ стали марки 10Г2 в различных состояниях:

- Металлографические исследования показывают, что в процессе старения происходит уменьшение размеров зерен и выделение частиц вторичной фазы;
- При воздействии на стлать агрессивной среды и высокого давления не происходит существенных изменений в элементном и структурно-фазовом составе стали.

Исследование диффузии водорода позволяет производить качественный анализ степени деградации материала трубопровода.

- Значение коэффициента диффузии в исходной стали близко к литературным данным, что позволяет судить о работоспособности данной методики;
- При изменении коэффициента диффузии на 2 порядка, как в стали, выведенной из эксплуатации, в материале образуется большое количество дефектов старения;
- Изменение коэффициента диффузии на 1 порядок в стали, подвергнутой ускоренным коррозионным испытаниям, говорит о возможном появлении дефектов старения в процессе испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Knorus, 2010.
2. Sinha S. K., Pandey M. D. Probabilistic neural network for reliability assessment of oil and gas pipelines //Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2002. – Т. 17. – №. 5. – С. 320-329.
3. Mahmoodian M., Li C. Q. Failure assessment and safe life prediction of corroded oil and gas pipelines //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Т. 151. – С. 434-438.
4. Nechaev Y. S. Metallic materials for the hydrogen energy industry and main gas pipelines: complex physical problems of aging, embrittlement, and failure //Physics-Uspekhi. – 2008. – Т. 51. – №. 7. – С. 681.
5. Nykyforchyn H., Tsyurulnyk O., Zvirko O. Electrochemical fracture analysis of in-service natural gas pipeline steels //Procedia Structural Integrity. – 2018. – Т. 13. – С. 1215-1220.
6. Медведев В. Н. и др. О причинах аварийности труб магистральных газопроводов //Сборник трудов научно-практического семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов».–Нижний Новгород. – 2006.
7. Kharionovsky V. V. and Tcherniv P. Stress and strain state of a gas pipeline in conditions of stress-corrosion // Proc. of the Int. Pipeline Conf. – New York: ASME, 1996. – Vol. 1. – P. 479 – 483.
8. Steklov O. I. On the stress corrosion cracking of pipeline steels // Protect Metals. – 1999. – 35. – P. 305 – 309.
9. Shipilov S. A. and May I. L. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection // Eng. Failure Analysis. – 2006. – 13. – P. 1159 – 1176.
10. Чувильдеев В. Н., Вирясова Н. Н. Деформация и разрушение конструкционных материалов: проблемы старения и ресурса. Учебное пособие/Под общей ред. ВН Чувильдеева //Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. – 2010.

11. Сагарадзе В. В., Филиппов Ю. И., Матвиенко А. Ф. Структурные аспекты коррозионного растрескивания под напряжением сталей магистральных газопроводов //Тр. науч.-практич. сем.«Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов». Н. Новгород. – 2006. – С. 148-163.
12. Нечаев Ю. С. Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс-коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения //Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – №. 11. – С. 108-117.
13. 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.
14. Руюцов А. Н., Олесов Ю. Г., Антонова М. М. Гидрирование титановых материалов. – Наукова думка, – 1971.
15. Mueller W. M., Blackledge J. P., Libowitz G. G. (ed.). Metal hydrides. – Elsevier, 2013. 51-87
16. Г.М. Полетаев// Исследование процессов абсорбции и диффузии водорода в ГЦК металлах методом молекулярной динамики. – 2014
17. В.Н. Кудияров, А.М. Лидер, Н.С. Пушилина, Н.А. Тимченко// Особенности накопления и распределения водорода при насыщении титанового сплава ВТ1-0 электролитическим методом и из газовой среды. – 2013.
18. Гордиенко Ю. Н., Кульсартов Т. В., Заурбекова Ж. А., Понкратов Ю. В., Гныря В. С., Никитенков Н. Н.// Применение метода водородопроницаемости в реакторных экспериментах по исследованию взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами. -2014
19. Petr Hruška, Jakub Čížek, Jan Knapp, František Lukáč, Oksana Melikhova, Silvie Mašková, Ladislav Havela, Jan Drahoukoupil // Characterization of defects in titanium created by hydrogen charging, - International Journal of Hydrogen Energy, - 2017.

20. Шиховцов А. А. Влияние внутренних и внешних факторов на замедленное хрупкое разрушение стали //Фундаментальные исследования. – 2013. – Т. 9. – №. 11.
21. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – 1985.
22. Арчаков Ю. И. Водородоустойчивость стали. – Металлургия, 1978.
23. Присевок А. Ф. Механизм водородного изнашивания металлов и сплавов //НАУКА и ТЕХНИКА. – 2018. – №. 3. – С. 23-35.
24. Rivera P. C., Ramunni V. P., Bruzzoni P. Hydrogen trapping in an API 5L X60 steel //Corrosion Science. – 2012. – Т. 54. – С. 106-118.
25. Haq A. J. et al. Effect of microstructure and composition on hydrogen permeation in X70 pipeline steels //International journal of hydrogen energy. – 2013. – Т. 38. – №. 5. – С. 2544-2556.
26. Drexler E. S. et al. Fatigue crack growth rates of API X70 pipeline steel in a pressurized hydrogen gas environment //Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2014. – Т. 37. – №. 5. – С. 517-525.
27. Escobar D. P. et al. Combined thermal desorption spectroscopy, differential scanning calorimetry, scanning electron microscopy and X-ray diffraction study of hydrogen trapping in cold deformed TRIP steel //Acta Materialia. – 2012. – Т. 60. – №. 6-7. – С. 2593-2605.
28. Lee S.M., Lee Y.L. Structural relaxation and hydrogen solubility in an amorphous Pd80Si20 alloy // Journal of Applied Physics. – 1988. – Т. 63. – №. 9. –С. 4758-4760.
29. Choo W.Y., Lee J.Y. Hydrogen trapping phenomena in carbon steel //Journal of Materials Science. – 1982. – Т. 17. – №. 7. – С. 1930-1938.
30. Olden V., Alvaro A., Akselsen O. M. Hydrogen diffusion and hydrogen influenced critical stress intensity in an API X70 pipeline steel welded joint– Experiments and FE simulations //International journal of hydrogen energy. – 2012. – Т. 37. – №. 15. – С. 11474-11486.
31. Winzer N. et al. Hydrogen diffusion and trapping in Ti-modified advanced high strength steels //Materials & Design. – 2016. – Т. 92. – С. 450-461.

32. Zhao W. et al. Determination of the critical plastic strain-induced stress of X80 steel through an electrochemical hydrogen permeation method //Electrochimica Acta. – 2016. – Т. 214. – С. 336-344.
33. Kudiiarov V. N., Pushilina N. S., Harchenko S. Y. Development of Stand for Testing Electrochemical Permeation (STEP) of Hydrogen through Metal Foils //Advanced Materials Research. – 2015. – Т. 1085. – С. 224.
34. 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.
35. Walsh M. R. et al. Preliminary report on the commercial viability of gas production from natural gas hydrates //Energy Economics. – 2009. – Т. 31. – №. 5. – С. 815-823.
36. 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.
37. US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Opened Report: Development of Guidelines for Identification of SCC Sites and Estimation of Re-Inspection Intervals for SCC Direct Assessment; US Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration: New Jersey Ave, Washington, USA, 2010
38. Titov A. I. et al. Hydrogen Accumulation and Distribution in Pipeline Steel in Intensified Corrosion Conditions //Materials. – 2019. – Т. 12. – №. 9. – С. 1409.
39. Marcus R. K., Broekaert J. A. C. (ed.). Glow discharge plasmas in analytical spectroscopy. – Chichester: Wiley, 2003. – С. 293-315.
40. Нехин М., Кузнецов А., Шапон П. Спектрометр тлеющего разряда PROFILER-2-мощный аналитический инструмент послойного анализа материалов //Аналитика. – 2012. – Т. 5. – №. 4. – С. 34-43
41. Huang F. et al. Effect of microstructure and inclusions on hydrogen induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of X120 pipeline

steel //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – №. 26. – С. 6997-7001.

42. Li L. et al. Effects of vanadium precipitates on hydrogen trapping efficiency and hydrogen induced cracking resistance in X80 pipeline steel //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Т. 43. – №. 36. – С. 17353-17363.

43. Gan L. et al. Hydrogen trapping and hydrogen induced cracking of welded X100 pipeline steel in H<sub>2</sub>S environments //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Т. 43. – №. 4. – С. 2293-2306.

#### **НОРМАТИВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

44. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)

45. инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В

46. ГОСТ 12.1.038-82 Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

47. СНиП 3.05.06-85 от 01.07.1986 г. Электротехнические устройства.

48. ГОСТ 2408.4-98 Топливо твердое минеральное. Метод определения углерода и водорода сжиганием при высокой температуре.

49. ГОСТ 30331.4-95 Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Защита от тепловых воздействий.

50. ГОСТ Р ИСО 17491-4-2009 Одежда специальная для защиты от химических веществ.

51. ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ Организация обучения безопасности труда. Общие положения.

52. инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.

53. ГОСТ Р ИСО 11439-2010 Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения природного газа. Технические условия.

54. ГОСТ Р 51982-2002 Регуляторы давления для газовых аппаратов с давлением на входе до 20 кПа. Общие технические требования и методы испытаний.

55. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении.

56. ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

57. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

58. СНиП 21-01-97 от 1998-01-01 Пожарная безопасность зданий и сооружений.