

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль  
«Надежность и долговечность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Кафедра транспорта и хранения нефти и газа

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы  |
|--|
| «АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ<br>ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ<br>ТРУБОПРОВОДОВ» |

УДК 621.643:620.193

Студент

| Группа | ФИО           | Подпись | Дата |
|--------|---------------|---------|------|
| 2БМ4Б  | Гончаров Е.А. |         |      |

Руководитель

| Должность | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Веревкин А.В. | к.т.н., доцент            |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО       | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Шарф И.В. | к.э.н., доцент            |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Крепша Н.В. | к.г.—э.н.,<br>доцент      |         |      |

Консультант – лингвист кафедры ИЯПР :

| Должность | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|---------------------------|---------|------|
| доцент    | Уткина А.Н. | к.ф.н., доцент            |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| ТХНГ          | Рудаченко А.В. | к.т.н., доцент            |         |      |

Томск – 2016 г.



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное  
 учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт \_\_\_\_\_ Институт природных ресурсов \_\_\_\_\_  
 Направление подготовки (специальность) \_\_\_\_\_ Нефтегазовое дело \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_\_\_\_ Транспорта и хранения нефти и газа \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Рудаченко А.В. \_\_\_\_\_  
 (Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

|   |
|---|
| <b>Магистерской диссертации</b><br>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации) |
|---|

Студенту:

| Группа | ФИО                          |
|--------|------------------------------|
| 2БМ4Б  | Гончарову Евгению Андреевичу |

Тема диссертации:

|   |                      |
|---|----------------------|
| <b>АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫХ<br/>                 ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ<br/>                 ТРУБОПРОВОДОВ</b> |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)   | 28.04.2016г., 2950/с |

|  |                |
|--|----------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 16 мая 2016 г. |
|--|----------------|

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

|   |  |
|---|--|
| <b>Исходные данные к работе</b>   |  |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br><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,</i> | <b>Введение</b><br>1 Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений<br>2 Проблема водородного охрупчивания трубопроводов эксплуатируемых в водородосодержащих средах<br>3 Механизм и кинетика водородного охрупчивания сталей трубного сортамента.<br>4 Влияние режимов катодной защиты трубопровода на |

|  |   |
|--|---|
| <p><i>подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>                                   | <p>выделение водорода на внешней катоднозащищенной поверхности</p> <p>5 Анализ режимов катодной защиты на участках аварийных разрушений магистральных нефтегазопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением</p> <p>6 Предлагаемый критерий катодной защиты трубопровода исключающий выделение водорода и наводороживание</p> <p>7 Расчетная часть</p> <p>8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> <p>9 Социальная ответственность</p> <p>Заключение</p>  |
| <p><b>Перечень графического материала</b><br/>(с точным указанием обязательных чертежей)</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Виды коррозионных повреждений металлов и сплавов</li> <li>2. Статистика коррозионных отказов в Западной Сибири</li> <li>3. Схема локального элемента</li> <li>4. Принципиальная схема коррозионного элемента (по Томашеву)</li> <li>5. Нормальные электродные потенциалы металлов</li> <li>6. Зарождение микротрещины</li> <li>7. Фрагмент развития стресс-коррозионных трещин в стенке трубы стали X70</li> <li>8. Фрагмент развития стресс-коррозионных трещин в сварном соединении в стали X70</li> <li>9. Влияние различных факторов на скорость коррозии</li> <li>10. Зависимость частоты коррозионных отказов от удельного электрического сопротивления грунта.</li> <li>11. Зависимость частоты отказов от расстояния до компрессорной станции (по ходу газа)</li> <li>12. Зависимость количества отказов от состояния изоляционного покрытия (плотности тока, необходимой для защиты)</li> <li>13. Нарушение адгезии изоляционного покрытия трубопровода</li> <li>14. Адсорбция поверхностно-активных элементов на поверхности металла</li> <li>15. Растворение границ зерен с образованием зародышей трещин</li> <li>16. Зарождение микротрещины</li> <li>17. Физико-механическая модель роста трещины</li> <li>18. Стойкость трубных сталей к охрупчиванию</li> <li>19. Зависимость плотности поляризующего тока от потенциала на катоде</li> <li>20. Схема процесса обезуглероживания стали</li> <li>21. Интенсивность наводороживания образцов из стали 17ГС при различных внутренних напряжениях в зависимости от превышения тока катодной защиты над</li> </ol> |

|  |   |
|--|---|
|  | <p>предельным по кислороду</p> <p>22 Схема роста пузырьков газа у верхней боковой и нижней образующих трубопровода</p> <p>23 Катодные поляризационные кривые стального рабочего электрода (сталь 17ГС) в торфяном грунте при полном его влагонасыщении</p> <p>24 Распределение плотности тока катодной защиты и величины катодной поляризации по окружности трубопровода</p> <p>25 Распределение максимальной глубины проникновения коррозии по окружности трубопровода</p> <p>26 Зависимость плотности тока катодной защиты и остаточной скорости коррозии от величины катодной поляризации</p> <p>27 Соотношение затрат электрической энергии на подавление коррозионного процесса трубопровода и на наводороживание стенки трубы при различных режимах катодной защиты</p> <p>28 Экспериментальная зависимость величины катодной поляризации <math>d\varphi</math> от соотношения <math>j_{к.з.}/j_{пр}</math></p> <p>29 Аппаратно-программный комплекс “Магистраль”</p> |
|--|---|

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

| Раздел  | Консультант                    |
|---|--------------------------------|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Доцент, к.э.н., Шарф И.В.      |
| Социальная ответственность                                      | Доцент, к.г.-м.н., Крепша Н.В. |
| Раздел ВКР, выполненный на английском языке                     | Доцент, к.ф.н., Уткина А.Н.    |

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

#### Задание выдал руководитель:

| Должность           | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент<br>каф. ТХНГ | Веревкин А.В. | к.т.н., доцент         |         |      |

#### Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО           | Подпись | Дата        |
|--------|---------------|---------|-------------|
| 2БМ4Б  | Гончаров Е.А. |         | 01.02.16 г. |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное  
 учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Институт природных ресурсов  
 Направление подготовки – Нефтегазовое дело  
 Кафедра – Транспорта и хранения нефти и газа

Форма представления работы:

|  |
|--|
| Магистерская диссертация   |
| (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация) |

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

|  |               |
|--|---------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 16.05.2016 г. |
|--|---------------|

| Дата контроля                | Название раздела (модуля) /вид работы (исследования)   | Максимальный балл раздела (модуля) |
|------------------------------|--|------------------------------------|
| Октябрь 2014 г – июнь 2015 г | Подбор теоретической информации по выбранной теме с использованием литературы из фондов НТБ    | 15                                 |
| Февраль 2015 г               | Рассмотрение различных видов коррозии металла и рассмотрение факторов, влияющих на ее скорость | 10                                 |
| Март 2015 г                  | Рассмотрение влияния режимов катодной защиты трубопроводов                                     | 15                                 |
| Март 2015 г                  | Анализ режимов катодной защиты на участках аварийных разрушений                                | 20                                 |
| Апрель 2015 г                | Постановка задач исследования при подготовке магистерской диссертации                          | 5                                  |
| Июнь 2015 г                  | Социальная ответственность, финансовый менеджмент  | 10                                 |
| Апрель 2016 г                | Согласование с научным руководителем структуры и содержания разделов диссертации               | 10                                 |
| Апрель – май 2016 г          | Написание окончательного варианта диссертации  | 10                                 |
| Май 2016 г                   | Подготовка доклада и презентации для защиты  | 5                                  |

Составил преподаватель:

| Должность           | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|---------------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент<br>каф. ТХНГ | Веревкин А.В. | к.т.н., доцент         |         | 01.02.16г. |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Зав. кафедрой | ФИО                                 | Ученая степень, звание | Подпись | Дата       |
|---------------|-------------------------------------|------------------------|---------|------------|
| ТХНГ          | Рудаченко Александр<br>Валентинович | к.т.н., доцент         |         | 01.02.16г. |

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

Студенту:

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                   |
| 2БМ4Б         | Гончарову Евгению Андреевичу |

|                     |            |                               |   |
|---------------------|------------|-------------------------------|---|
| <b>Институт</b>     | <b>ИПР</b> | <b>Кафедра</b>                | <b>ТХНГ</b>                               |
| Уровень образования | Магистр    | Направление/<br>специальность | «Надежность газонефтепроводов и хранилищ» |

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

|  |   |
|--|---|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих | «Оценка затрат на проведение научно-исследовательской работы «Исследование метода обнаружения возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации трубопроводов» |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов   | СО 153-34.09.101-94 - «Типовая инструкция по учету электроэнергии»;   |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                                  | 1. Налоговый кодекс РФ<br>2. ФЗ – 2013 от 24.07.2009 в редакции от 09.03.2016г. № 55-ФЗ   |

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|   |  |
|---|--|
| 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | Обоснование перспективности разработки в целях повышения технико-экономических показателей   |
| 2. Разработать плана научно-исследовательского проекта  | Составление календарного плана проекта с учетом необходимых временных и трудовых затрат      |
| 3. Произвести расчет затрат научно-исследовательского проекта   | 1. Определение основных статей расходов на реализацию проекта<br>2. Составление сметы затрат |

### Перечень графического материала

1. Расчетные формулы: Заработная плата, страховые взносы
2. Таблицы:
  - Матрица SWOT
  - Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации
  - Календарный план-график проведения НИОКР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

|                  |            |                               |                |             |
|------------------|------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b> | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент           | Шарф И.В.  | к.э.н., доцент                |                |             |

Задание принял к исполнению студент:

|               |                            |                |             |
|---------------|----------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                 | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 2БМ4Б         | Гончаров Евгений Андреевич |                |             |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                  |
| 2БМ4Б         | Гончарову Евгений Андревичу |

|                            |            |                                  |   |
|----------------------------|------------|----------------------------------|---|
| <b>Институт</b>            | <b>ИПР</b> | <b>Кафедра</b>                   | <b>ТХНГ</b>                               |
| <b>Уровень образования</b> | Магистр    | <b>Направление/специальность</b> | «Надежность газонефтепроводов и хранилищ» |

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

|   |   |
|---|---|
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) | Рабочее место трубопроводчика располагается на линейной части трубопровода под открытым небом. В связи со спецификой производства работы ведутся круглосуточно (посменно), без выходных и праздничных дней. |
|---|---|

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|   |   |
|---|---|
| <b>1. Производственная безопасность</b><br>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: | <b>К вредным факторам, которым подвергается трубопроводчик линейный относятся:</b> Отклонение показателей климата на открытом воздухе.<br>Превышение уровня шума и уровня вибрации.<br>Тяжесть и напряженность физического труда, эмоциональные стрессы.  |
| 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:  | <b>К опасным факторам, которым подвергается оператор по добыче нефти и газа относятся:</b><br>Движущиеся машины и механизмы.<br>Электрический ток.<br>Пожаровзрывобезопасность.   |
| <b>2. Экологическая безопасность:</b>   | <b>Анализ воздействия объекта на атмосферу:</b><br>Строительство и эксплуатация объектов нефтедобычи связаны с выделением загрязняющих веществ в атмосферный воздух;<br><b>анализ воздействия объекта на гидросферу:</b><br>Опасных воздействий не обнаружено;<br><b>анализ воздействия объекта на литосферу:</b><br>ликвидация всех замазученных участков, прежде всего, в водоохраных зонах рек и озер; вырубка |



|  |  |
|--|--|
|  | <i>лесов; выбор специальных мест для захоронения отходов (например, отработанные карьеры);</i>   |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>                       | <i>Оценка и прогнозирование чрезвычайных ситуаций.<br/>Описание возможных аварийных ситуаций на скважине<br/>Характеристика мероприятий по защите персонала промышленного объекта в случае возникновения ЧС.</i>   |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> | <i><b>Характерные для проектируемой рабочей зоны:</b><br/>Рабочая смена не более 12 часов, выдача каждому трубопроводчику линейному по пол литра молока в день.<br/><b>Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны:</b><br/>Содержание рабочего места в порядке, проверка заземлений, проверка состояния оборудования и своевременное устранение дефектов; применение исправного электрооборудования и эксплуатация его в соответствии с требованиями технических паспортов, правил устройства электроустановок.</i> |

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

**Задание выдал консультант:**

| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b>  | <b>Ученая степень, звание</b>          | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|------------------|-------------|--|----------------|-------------|
| Доцент каф. ЭБЖ  | Крепша Н.В. | Кандидат геолого-минералогических наук |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                 | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
|---------------|----------------------------|----------------|-------------|
| 2БМ4Б         | Гончаров Евгений Андреевич |                |             |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ВКР,  
ВЫПОЛНЕННОГО НА ИНОСТРАННОМ ЯЗЫКЕ**

**Приложение А**

Раздел:

**Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking**

Студенту:

| Группа | ФИО                          | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| 2БМ4Б  | Гончарову Евгению Андреевичу |         |      |

| Институт            | ИПР     | Кафедра                   | ТХНГ                                    |
|---------------------|---------|---------------------------|---|
| Уровень образования | Магистр | Направление/специальность | Надежность газонефтепроводов и хранилищ |

**ЗАДАНИЕ:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> | 1 The Phenomenon of SCC<br>2 Overview of SCC Mechanisms<br>3 Controlling parameters<br>4 Important fracture features<br>5 Phenomenology of Crack-initiation processes |
|---|---|

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

**Задание выдали консультанты:**

Консультант кафедры \_\_\_\_\_ ТХНГ ИПР \_\_\_\_\_:

| Должность        | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ТХНГ | Веревкин А.В. | к.т.н., доцент         |         |      |

Консультант – лингвист кафедры \_\_\_\_\_ ИЯПР ИПР \_\_\_\_\_:

| Должность | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Уткина А.Н. | к.ф.н., доцент         |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО           | Подпись | Дата |
|--------|---------------|---------|------|
| 2БМ4Б  | Гончаров Е.А. |         |      |

## РЕФЕРАТ

Объектом исследования является применение современных методов технической диагностики электрохимической защиты от коррозии трубопроводов.

Цель работы – анализ эффективности электрохимической защиты от коррозии трубопроводных систем позволяющие прогнозировать и предотвращать коррозионный износ трубопроводов.

В работе приведены существующие механизмы разрушения магистральных нефтегазопроводов, основные условия возникновения коррозии, влияние различных факторов на скорость коррозии, а так же проблема водородного охрупчивания.

Проведен анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов. Описаны условия формирования коррозионных трещин. Исследован режим катодной защиты трубопровода исключающий выделение водорода и наводороживание.

## **АННОТАЦИЯ**

Выпускная квалификационная работа состоит из 126 страниц, 29 рисунков, 26 таблиц, 36 источников литературы.

Ключевые слова: НЕФТЕГАЗОПРОВОД, КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ, ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА, СТРЕСС-КОРРОЗИЯ, НАВОДОРОЖИВАНИЕ, КАТОДНАЯ ЗАЩИТА, КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ.

Работа содержит введение, заключение, перечень использованной литературы, одного приложения и восемь разделов основной части диссертации.

В первой главе приведены основные понятия коррозии металлов. Описаны виды коррозионных повреждений металлов и сплавов. Приведена статистика коррозионных отказов Западной Сибири. Раздел содержит условия возникновения коррозии, а так же основные теории, описывающие природу возникновения склонности материалов к коррозионному растрескиванию.

Вторая глава содержит информацию о проблеме водородного охрупчивания трубопроводов эксплуатируемых в водородосодержащих средах. В данной главе содержится информация о влиянии низкотемпературного наводороживания на механические характеристики материалов, вызывающее коррозионное растрескивание.

В третьей главе описаны механизм и кинетика водородного охрупчивания сталей трубного сортамента. Глава так же содержит описание механизма воздействия водорода по Арчакову Ю.И.

Четвертая глава посвящена влиянию режимов катодной защиты трубопровода на выделение водорода на внешней катоднозащищенной поверхности. Представлен анализ режимов катодной защиты на участках аварийных разрушений магистральных нефтегазопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением.

В пятой главе выпускной квалификационной работы предложен критерий катодной защиты трубопровода исключающий выделение водорода и наводороживание. Приводятся значения величины катодной поляризации при различных соотношениях между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду. В разделе приведена информация о аппаратно-программном комплексе для определения плотности предельного тока по кислороду и плотности тока катодной защиты на трубопроводах при транспорте нефти и газа.

В шестой главе выполнена расчетная часть.

В главе финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение путем SWOT-анализа и расчета затрат по проекту на диагностирование трубопровода.

Заключительная глава содержит информацию о социальной ответственности трубопроводчика линейного, анализ вредных и опасных факторов производственной среды, приводятся сведения об экологической безопасности и безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций.

В заключении приводится ряд выводов полученных в результате проведения работы, приложение к ВКР, выполненное на английском языке.

## **ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

КЗП – катодно-защищаемая поверхность;

КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;

МНГП – магистральный нефтегазопровод;

УКПГ – установка комплексной подготовки газа;

ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка;

МСЭ – медно-сульфатный электрод сравнения;

КС – компрессорная станция;

СКЗ – станция катодной защиты;

ЭХЗ – электрохимическая защита;

ОАО – открытое акционерное общество;

СНиП – санитарные нормы и правила;

ВСН – ведомственные строительные нормы;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 19                              |
| 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МНГП, АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ.....  | 22                              |
| 1.1 Основные понятия коррозии металлов .....  | 22                              |
| 1.2 Статистика коррозионных отказов в Западной Сибири   | Ошибка! Закладка не о           |
| 1.3 Механизмы разрушения .....  | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.3.1 Электрохимическая теория .....  | 25                              |
| 1.3.2 Основные условия возникновения коррозии .....   | 29                              |
| 1.4 Основные теории, описывающие природу возникновения склонности материалов к коррозионному растрескиванию         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.5 Условия формирования коррозионных трещин .....  | 36                              |
| 1.6 Влияние различных факторов на скорость коррозии.....  | 43                              |
| 1.7 Механизм образования стресскоррозионных трещин  | Ошибка! Закладка не о           |
| 2 ПРОБЛЕМА ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ.....                   | 50                              |
| 3 МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ТРУБНОГО СОРТАМЕНТА.....                                      | 54                              |
| 4 ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДА НА ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА НА ВНЕШНЕЙ КАТОДНОЗАЩИЩЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ..... | 56                              |
| 4.1 Анализ режимов катодной защиты на участках аварийных разрушений   |                                 |

|           |      |                |         |     |  |              |      |    |  |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|--------------|------|----|--|
|           |      |                |         |     | докум.Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |              |      |    |  |
|           |      |                |         |     |  |              |      |    |  |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |              |      |    |  |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Содержание   | Лит.         | Лист |    |  |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В   |         |     |  |              | 5    | 15 |  |
| Консульт. |      |                |         |     |  | ПУ гр. 2БМ4Б |      |    |  |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |              |      |    |  |
|           |      |                |         |     |  |              |      |    |  |

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| магистральных нефтегазопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением .....  | 60                              |
| 5 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ КРИТЕРИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДА ИСКЛЮЧАЮЩИЙ ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И НАВОДОРОЖИВАНИЕ ..   | 67                              |
| 6 Расчетная часть .....  | 76                              |
| 6.1 Расчет коэффициента полезного использования тока катодной защиты. Ошибка! Закладка не определена.  |                                 |
| 7 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....   | 80                              |
| 7.1 Потребители результатов исследования.....  | 80                              |
| 7.2 SWOT-анализ.....   | 80                              |
| 7.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....  | 81                              |
| 7.4 Организационная структура проекта .....  | 83                              |
| 7.4.1 План проекта.....  | 83                              |
| 7.4.2 Бюджет научного исследования .....   | 85                              |
| 7.4.3 Риски проекта .....  | 89                              |
| 8 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРИ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ДИАГНОСТИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ НА УЧАСТКАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ ..... | 91                              |
| 8.1 Профессиональная социальная безопасность .....   | 92                              |
| 8.1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование по их устранению .....  | 93                              |
| 8.1.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование сероприятий по их устранению .....  | 96                              |
| 8.2 Экологическая безопасность .....   | 99                              |
| 8.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....   | 103                             |
| 8.4 Законодательное регулирование проектных решений Ошибка! Закладка не определена.  |                                 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | Ошибка! Закладка не определена. |

|      |      |          |         |     |            |    |      |
|------|------|----------|---------|-----|------------|----|------|
|      |      |          |         |     | Содержание | 16 | Лист |
|      |      |          |         |     |            |    | 16   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |            |    |      |



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ..... 108

ПРИЛОЖЕНИЕ А ..... 111

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозионное растрескивание трубопроводов под напряжением (стресс-коррозия) в настоящее время является основной причиной аварийных ситуаций преимущественно на магистральных газопроводах, так как транспорт газа осуществляется при более высоких давлениях, по сравнению с магистральными нефтепроводами.

В России за последние пятнадцать лет происходят аварии на газопроводах больших диаметров из-за коррозионного растрескивания металла труб под напряжением. Только за последние пять лет по причине стресс-коррозии число разрушений газопроводов составило около 82 % от всех аварий, которые произошли в результате наружной коррозии, а 65 % составили аварии в следствии разрушения газопроводов диаметром 1420 мм.

Одной из первых аварий от стресс-коррозии в системе магистральных нефтепроводов была авария которая произошла в 2002 году на нефтепроводе диаметром 1220 мм Нижневартовск – Курган – Куйбышев. При этом металл трубопровода в большинстве случаев охрупчивается и растрескивается неравномерно, начиная с внешней поверхности. За последние двадцать пять лет эксплуатации на некоторых участках трубопроводов трещины достигают середины толщины стенки, что соответствует исчерпанию всех предусмотренных проектами запасов прочности. После происходит разрыв труб, под большим давлением выброс газа и далее самовозгорание с высотой пламени более десяти метров. Как правило, части трубопровода оказываются раскрытыми и выброшенными на несколько десятков метров от места разрыва.

|           |      |                |         |     |  |  |  |  |  |               |      |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|--|--|--|--|---------------|------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |  |  |  |  |               |      |        |
|           |      |                |         |     |  |  |  |  |  |               |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат | Введение   |  |  |  |  | Лит.          | Лист | Листов |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     |  |  |  |  |  |               |      |        |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В   |         |     |  |  |  |  |  |               | 18   | 18     |
| Консульт. |      |                |         |     |  |  |  |  |  | ТПУ зр. 2БМ4Б |      |        |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |  |  |  |  |               |      |        |
|           |      |                |         |     |  |  |  |  |  |               |      |        |

Все аварии произошедшие из-за коррозионного разрушений под напряжением наблюдались на катоднозащищаемых трубопроводах, которые имели значение защитного потенциала с омической составляющей от 1,2 до 3,5 В по м.с.э. При одновременном воздействии механических напряжений при высоких потенциалах катодной защиты с большей вероятностью возможно развитие водородного коррозионного растрескивания ферритно-перлитных сталей в нейтральных и слабокислых грунтах.

Результаты анализа образцов, вырезанных из аварийных труб, где происходили стресс-коррозионные разрушения, подтверждают это предположение. Вблизи катодно-защищаемой поверхности (КЗП), в образцах, на глубине 0,1...0,3 мм, обнаружена повышенная концентрация водорода: до 1,7 мг/100 г, при исходном («родословном») содержании 0,18...0,23 мг/100 г. Но до настоящего времени систематических исследований по влиянию режимов катодной защиты на образование коррозионных трещин под напряжением не проведено. Наименьшая степень удельного наводороживания стальных трубопроводов различных диаметров, которая приводит к появлению в стенке трубы колоний продольных трещин, не установлена.

Путем пропуска специальных внутритрубных ультразвуковых и магнитных дефектоскопов обнаруживаются колонии трещин КРН. Дальнейшая расшифровка полученных результатов дает возможность установить степень опасности выявленных дефектов, а так же установить дальнейшие действия ремонтных служб. Однако до сих пор отсутствует инструментальный метод, который бы позволил прогнозировать появление трещин КРН в зависимости от степени электролитического наводороживания, который был вызван недопустимо высокой плотностью тока катодной защиты и воздействием высоких механических напряжений, вызываемых давлением транспортируемого продукта по трубопроводу. В области потенциалов катодной защиты от 0,85 до 2,5 В по м.с.э. на КЗП трубопроводов протекают как минимум две катодные реакции:

|      |      |          |         |     |                |      |
|------|------|----------|---------|-----|----------------|------|
|      |      |          |         |     | 19             | Лист |
|      |      |          |         |     |                |      |
|      |      |          |         |     |                |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат | Введение<br>19 |      |

электровосстановления растворенного молекулярного кислорода и катодного разложения воды с выделением водорода. Протекание последней реакции на КЗП трубопроводов приобретает серьезное значение, так как возникает вопрос о диффузии атомарного водорода в структуру трубной стали. При катодном выделении водорода адсорбированный на КЗП трубопровода атомарный водород  $H_{адс}$  образуется как промежуточный продукт, часть из которого по реакции Гейровского (Тафеля) молизуется и уходит в окружающий грунт (почвенный электролит), другая часть, в виде протона и электрона, внедряется в стенку трубы:  $H_{адс} \rightarrow H_{абс}$ . В составе трубной стали  $H_{абс}$  представляет собой абсорбированные протоны  $(H^+)_{абс}$ , а их электроны входят в электронный газ стенки катоднозащищаемого трубопровода. При наличии в структуре трубной стали вблизи КЗП напряженно-деформированного трубопровода концентраторов (ловушек) водорода, в стенке трубы происходит рекомбинация  $(H^+)_{абс}$  и электронов с образованием незаряженного атомарного  $H_{абс}$ , который, при наличии вблизи КЗП трубопровода микропустот, стремится к последующей рекомбинации с образованием  $H_2$ , давление которого при перезащите, когда плотность тока катодной защиты  $j_{к.з.}$  в десятки раз превышает плотность предельного тока по кислороду  $j_{пр}$ , растет, что приводит к образованию на КЗП «водородного надреза», инициирующего появление стресс-коррозионных трещин. Когда  $j_{к.з.} < j_{пр}$ , остаточная скорость коррозии катоднозащищаемого трубопровода превышает допустимые значения, что приводит к образованию коррозионных дефектов.

Перечисленные проблемы трубопроводного транспорта обуславливают актуальность выбранной темы, которая связана с разработкой методов технической диагностики электрохимической защиты от коррозии современных трубопроводных систем, которые впервые позволили количественно определить очень высокий коррозионный износ и выявить появление трещин КРН на внешней катодно защищаемой поверхности напряженно-деформированных подземных стальных трубопроводов.

|      |      |          |         |     |  |          |   |      |
|------|------|----------|---------|-----|--|----------|---|------|
|      |      |          |         |     |  | Введение | 4 | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |  |          |   | 20   |

Цели данной выпускной квалификационной работы заключаются в следующем:

1. Изучение и обобщение механизмов и кинетических особенностей влияния факторов системы сталь – изоляция - грунт на коррозию подземных стальных трубопроводов через диффузионное торможение кислорода в грунтах, водная вытяжка которых имеет нейтральную или близкую к ней реакцию (рН 5,5...7,5), в которых проложено наибольшее число российских подземных стальных трубопроводов.

2. Анализ новых инструментальных методов количественного определения остаточной скорости коррозии в сквозных дефектах изоляции подземных стальных трубопроводов при разных потенциалах катодной защиты в трассовых условиях.

3. Изучение степени электролитического наводороживания напряженно-деформированных образцов ферритно-перлитных сталей трубного сортамента при разных соотношениях между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду .

4. Выбор критерий и установление методики определения степени электролитического наводороживания напряженно-деформированных трубопроводов при разных потенциалах катодной защиты.

5. Изучение системы прогнозирования инкубационного периода образования стресс-коррозионных трещин на внешней катодно защищаемой поверхности напряженно-деформированных трубопроводов в зависимости от давления транспортируемого продукта и соотношения между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду.

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

# 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МНГП, АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ

## 1.1 Основные понятия коррозии металлов

Коррозией металлов называется разрушение их поверхности в результате окисляющего химического или электрохимического воздействия окружающей среды. Иногда так же называют и сам результат действия коррозии, т.е. разрушение металла. Поэтому для разграничения обоих понятий рекомендуется применять для самого процесса термин «коррозионный процесс», а для результата процесса термин «коррозионное разрушение». Иногда под этим термином неправильно подразумевают продукты коррозии.

Коррозия является поверхностным явлением и классифицируется по тем изменениям, которые происходят с поверхностью материала вследствие протекания процесса коррозии. Общая и сплошная коррозия наблюдается при взаимодействии всей поверхности материала с окружающей средой, а местная и локальная коррозия – при взаимодействии части поверхности.

Так же существует два вида коррозии. Первый тип – равномерная коррозия. При такой коррозии вся поверхность металла равномерно разъедается внешней средой без изменений в топографии поверхности (например, коррозия углеродистой стали в растворах серной кислоты (рис. 1, а)). Второй тип – неравномерная коррозия, когда поверхность металла под слоем продуктов коррозии носит «изрытый» характер, т.е. на поверхности возникают места более глубоких повреждений, которые называют коррозионные каверны (например, коррозия углеродистой стали в морской воде – рис. 1, б). К такому типу коррозии относится структурно-избирательная коррозия, когда одна из фаз или структурных составляющих

|           |      |                |         |     |  |                             |      |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|-----------------------------|------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |                             |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |                             |      |        |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений  | Лит.                        | Лист | Листов |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |                             | 22   |        |
| Консульт. |      |                |         |     |  | ТПУ гр. 2БМ4Б <sup>22</sup> |      |        |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |                             |      |        |
|           |      |                |         |     |  |                             |      |        |

сплава растворяется быстрее, чем остальные, например процесс обесцинкивания латуней (рис. 1, в).

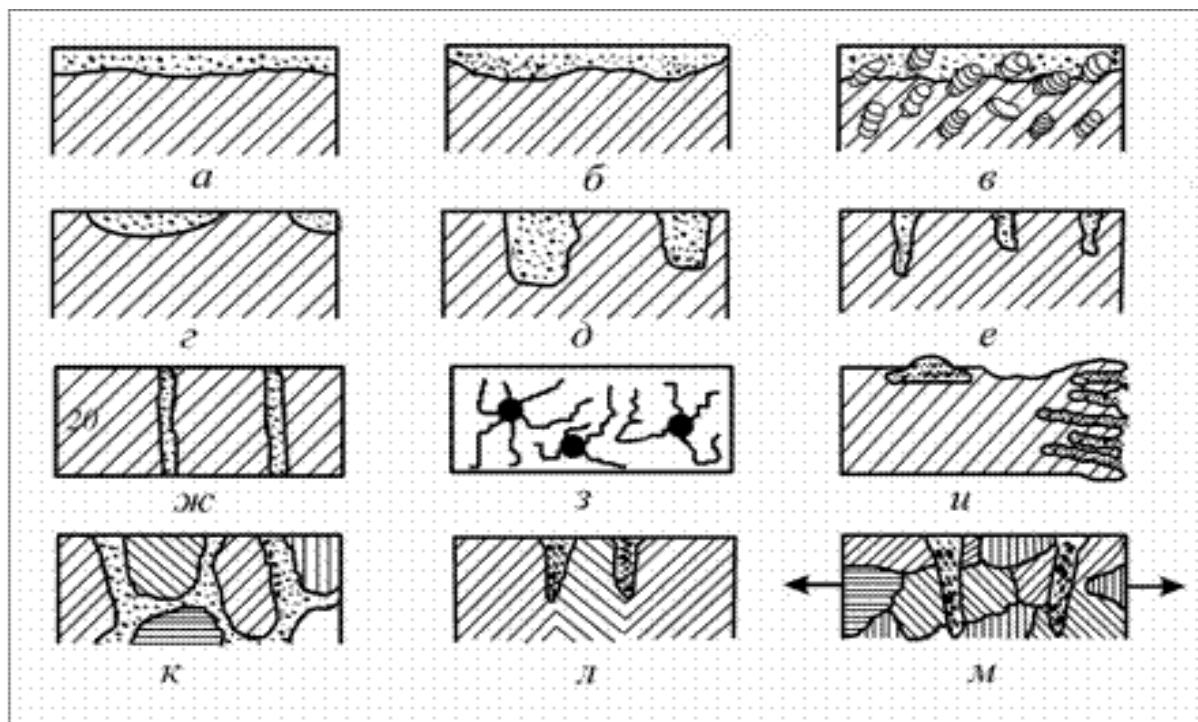


Рисунок 1 – Виды коррозионных повреждений металлов и сплавов:

- а–в) общая коррозия: а) равномерная коррозия,  
 б) неравномерная коррозия, в) избирательная коррозия;  
 г–м) местная коррозия: г) коррозия пятнами, д) язвенная коррозия,  
 е) питтинговая коррозия, ж) сквозная коррозия,  
 з) нитевидная коррозия, и) подповерхностная коррозия,  
 к) межкристаллитная коррозия, л) ножевая коррозия,  
 м) транскристаллитное коррозионное растрескивание

## 1.2 Статистика коррозионных отказов в Западной Сибири

Оценивая особенности коррозии стали в Западной Сибири согласно табл. 1, следует отметить следующее:

1. Скорость коррозии в условиях эксплуатации подземных трубопроводов достигает 0,45 мм/год. В условиях циклически знакопеременных температур она со временем затухает, снижаясь в среднем до 0,2 мм/год.

2. Большое влияние на увеличение скорости коррозии оказывают

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

Существующие механизмы разрушения МНГП,  
 анализ разрушений

Лист  
 23  
 23

техногенные или антропогенные факторы:

- отказ в Медвежьем – сточные воды УКПГ-2;
- отказ на трубопроводе на Игрим-Серов – сточные воды со свалки

увеличение в грунте концентрации минеральных солей до 2 г/л из-за разгерметизации промысловых водоводов, что явилось причиной уменьшения толщины стенки трубы на 1,5 - 3,5 мм.

3. Ряд промысловых трубопроводов, эксплуатировавшихся долгое время без защиты, тем не менее, не имеет существенных коррозионных разрушений.

4. Возрастающий объем откачиваемой из продуктивного пласта высокоминерализованной воды и плохая ее утилизация, а также положительные температуры эксплуатации трубопроводов резко изменяют внешнюю среду, усиливая ее коррозионную активность.

5. Наибольшие коррозионные поражения на трубопроводах обнаружены в зоне контакта грунт (вода) – воздух.

6. В большинстве случаев для защиты от подземной коррозии трубопроводов в Западной Сибири необходима комплексная защита, сочетающая изоляционные покрытия и катодную поляризацию.

7. На трубопроводах, температура стенок и грунта вокруг которых в процессе эксплуатации не превышает минус 5°C, в грунтах невысокой коррозионной активности электрохимическую защиту можно не осуществлять (СНиП 2.05.06-85).

8. Противокоррозионную защиту промысловых трубопроводов осуществляют со стороны поверхности (внутренней или внешней), которая корродирует с наибольшей скоростью. При условии обеспечения проектного срока службы противокоррозионную защиту промысловых трубопроводов можно не осуществлять (ВСН 51- 2.38-85 Миннефтепром).

|      |      |          |         |     |   |                  |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------------|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | Лист<br>24<br>24 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |                  |



Таблица 1 – Статистика коррозионных отказов трубопроводов в Западной Сибири

| №            | Наименование трубопровода, нитка, км      | Диаметр, толщина стенки, мм. | Год окончания строительства | Дата отказа | Вид отказа: разрыв Р, свищ С | Скорость коррозии, мм/год | Примечание                |
|--------------|---|------------------------------|-----------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Нефтепроводы |   |                              |                             |             |                              |                           |                           |
| 1            | Томск – Омск – Новосибирск, 2н, 831 км.   | 720х8                        | 1959                        | 13.09.85г.  | Р                            | 0,31                      |                           |
| 2            | Томск – Омск – Новосибирск, 2н, 613,3 км. | 720х8                        | 1959                        | 18.02.85г.  | Р                            | 0,31                      |                           |
| 3            | Усть-Балык – Омск, 782км.                 | 1020х11                      | 1967                        | 25.02.85г.  | С                            | 0,61                      |                           |
| 4            | Омск - Иркутск                            | 720х8                        | 1961                        | 6.10.83     | Р                            | 0,36                      |                           |
| 5            | Омск - Иркутск                            | 720х8                        | 1961                        | 1978        |                              | 0,47                      |                           |
| Газопроводы  |   |                              |                             |             |                              |                           |                           |
| 6            | Надым –Пунга – Н.Тура , 1049 км           | 1020х11                      | 1974                        | 30.05.85    | С                            | 1                         |                           |
| 7            | Надым –Пунга – Н.Тура , 1046 км           | 1220х14                      | 1974                        | 30.04.85    | Р                            | 1,27                      | Точечная коррозия до 1мм. |
| 8            | Надым –Пунга – Н.Тура , 1049 км           | 1020х11                      | 1974                        | 23.04.85    | Р                            | 1                         | КРН                       |
| 9            | Игрим – Серов, 476 км                     | 1020х11                      | 1966                        | 19.03.84    | Р                            | 0,62                      | Стоки со свалки           |

### 1.3 Механизмы разрушения

#### 1.3.1 Электрохимическая теория

Теория коррозионных процессов и разрушений достаточно хорошо изучена и с успехом применяется для выбора и использования различных методов защиты. Общепризнанной и хорошо подтвержденной в настоящее время является электрохимическая теория, основанная на законах электрохимии [1-11]. Электрохимическая теория коррозии основана на положении, что при всех условиях работы металлических сооружений, соприкасающихся с электролитом, на поверхности металла вследствие ряда причин возникает большое количество мелких коррозионных гальванических элементов, аналогичных обычным гальваническим элементам. Возникновение таких коррозионных элементов обусловлено прежде всего тем, что отдельные участки поверхности металла имеют самые различные величины потенциалов.

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |
|------|------|----------|---------|-----|

Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений

Лист

255

Это различие потенциалов на поверхности металла обуславливается как внутренними, так и внешними факторами. К числу внутренних факторов относятся: природа металла, его кристаллическое строение, наличие внутренних напряжений, температура, различный характер обработки поверхности металла. Схема работы такого элемента показана на рисунке 2.

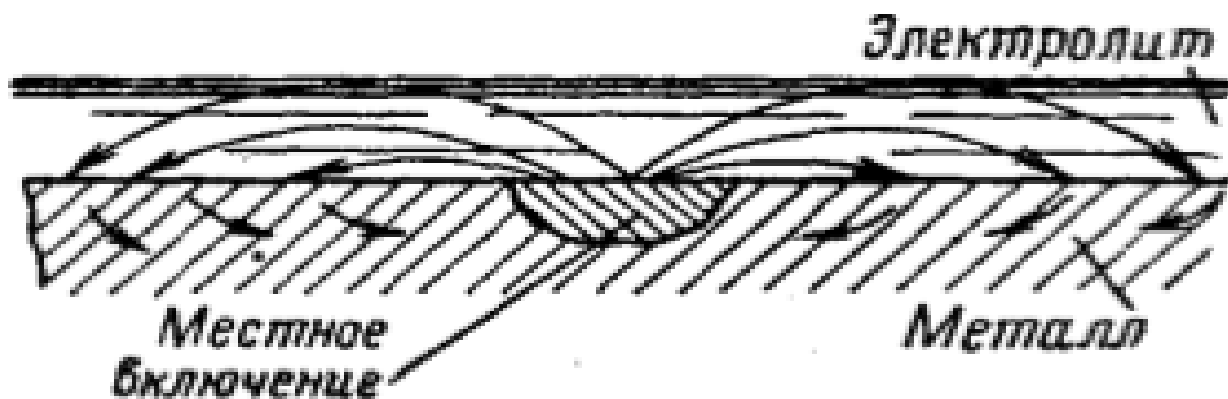
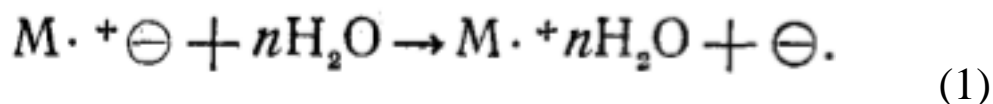


Рисунок 2 – Схема локального элемента (стрелками показан путь тока) загрязнений в металле (сегрегации, шлак и т. д.).

К числу внешних факторов, влияющих на возникновение различных потенциалов на поверхности металла, относятся: природа и концентрация электролита, его температура, скорость движения, доступ кислорода к поверхности металла. В результате наличия разных потенциалов на поверхности металла образуется коррозионный электрический элемент (называемый также локальным элементом, гальванической парой, местным элементом), в цепи которого возникает электрический ток. Как видно из рисунка 2, часть поверхности имеет более положительный потенциал, чем включение в металле с более отрицательным потенциалом. Так как обе части соприкасаются с электролитом, то в результате на поверхности металла создается коррозионный элемент, в котором возникает ток, направление которого показано стрелками. В создавшейся цепи ток будет выходить из включения в окружающий электролит на участке с более положительным потенциалом, называемым анодом, и переходить из электролита на металл на более положительных участках, называемых катодом. В результате движения

тока на анодных поверхностях будет происходить разрушение металла с переносом его ионов в раствор электролита.

Этот анодный процесс может быть characterized следующим образом:

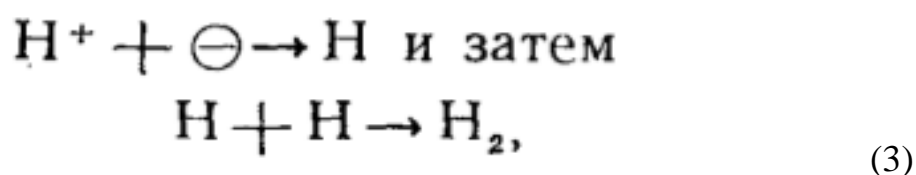


На катоде протекает другой процесс, сводящийся к ассимиляции избыточных электронов каким-либо деполяризатором раствора D, т. е. атомом или ионом, способным восстанавливаться (поглощать электрон):

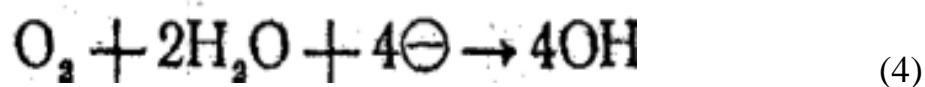


Катодный процесс протекает одновременно и параллельно с анодным процессом, что и обеспечивает возможность непрерывного протекания процесса коррозии.

Практически наиболее важными процессами катодной деполяризующей реакции являются: катодная реакция восстановления иона водорода в газообразный водород, носящая название водородной деполяризации, имеющая следующую схему:



Катодная реакция восстановления кислорода с превращением его в ион гидроксидов, носящая название кислородной деполяризации:



Схематически оба эти процесса изображены на рисунке 3. Как можно видеть, кроме анодного и катодного процессов важным явлением при

коррозии является протекание тока между анодом и катодом. Это протекание осуществляется в металлическом соединении анода с катодом движением электронов, происходящим от катода к аноду, а в растворе электролита – движением катиона от анода к катоду и движением аниона от катода к аноду.

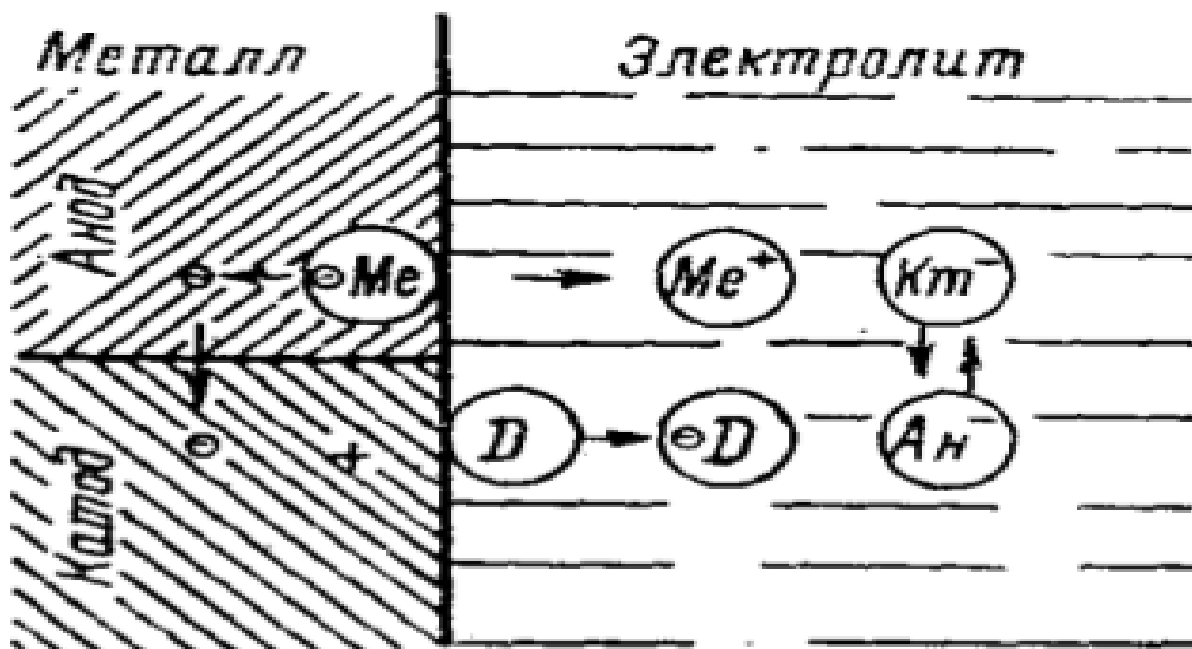


Рисунок 3 – Принципиальная схема коррозионного элемента

Важной особенностью коррозионного процесса является то, что разрушения при электрохимической коррозии происходят только на анодах, в то время как на катодах происходит процесс деполяризации и разрушение металла не имеет места. Однако для некоторых металлов, например таких, как свинец, на катодах могут возникать условия, вызывающие химическую коррозию и вызываемое ею разрушение металла.

В зависимости от условий различают несколько видов коррозии. Как возникновение, так и развитие коррозии имеют свою специфику в зависимости от того, в какой среде они происходят. Поэтому часто различают отдельные виды коррозии, обусловленные средой, в которой находится металлическое сооружение. Так различают:

- 1) Подземную коррозию, происходящую в условиях заложения металла в почву;

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

2) Морскую коррозию, протекающую в условиях погружения металла в морскую воду;

3) Коррозию в водных растворах, имеющую место при соприкосновении металла с пресными водами и водными растворами.

4) Атмосферную коррозию, происходящую в условиях влажного воздуха;

5) Химическую коррозию, имеющую место в различных концентрированных специфических химических средах;

6) Газовую коррозию, происходящую в условиях сухих горячих газов в отсутствии влажности;

7) Коррозию в неэлектролитах, возникающую в условиях контакта с различными неэлектролитами – нефтепродуктами.

Помимо перечисленных выше видов коррозии, существуют факторы, которые могут существовать параллельно с перечисленными выше видами коррозии. К ним относится, в частности, коррозия блуждающими токами, которая может сопутствовать как морской коррозии, так и подземной и химической коррозии в водных растворах, и микробиологическая коррозия.

### **1.3.2 Основные условия возникновения коррозии**

Основные условия возникновения коррозии, как следует из теории коррозии и краткого описания ее основных процессов, приведенного выше, характеризуются необходимостью наличия следующих факторов:

1) Наличие двух разнородных металлов или участков одного и того же металла с различными значениями потенциала;

2) Контакт обоих металлов или обоих участков металла с общим электролитом;

3) Металлическое соединение этих отдельных участков металла между собой, например телом самого объекта или сооружения;

4) Наличие диссоциированных ионов в электролите.

Перечисленные условия почти всегда имеют место на металле, соприкасающемся с различными водными растворами, в том числе хотя бы

|      |      |          |         |     |   |            |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | Лист<br>29 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |            |

периодически смачивающемся, например, атмосферной влагой. Таким образом, условия для возникновения коррозии существуют почти всегда. Поэтому степень опасности коррозии обычно оценивают не по вероятной возможности возникновения коррозии, но по ее ожидаемой скорости и величине разрушения металла.

В дополнение к перечисленным выше условиям необходимо еще раз отметить существенную особенность процессов коррозии, а именно: разрушение металла только на поверхности анодных участков. Эта особенность коррозии и используется при осуществлении электрических методов защиты.

Склонность различных металлов к коррозии определяет электрохимический ряд напряжений. Хотя на величину возникающего потенциала какого-либо металла заметно влияют также природа и концентрация соприкасающегося с ним электролита, однако величина этого потенциала в первую очередь зависит от природы самого металла. На основании природы самого металла можно достаточно точно определить, какой из двух соприкасающихся металлов будет играть в создавшемся коррозионном элементе роль анода и какой роль катода. Для такого определения может служить электрохимический ряд электродных потенциалов металлов, приведенный в таблице 2.

При соединении в гальваническую пару двух разнородных металлов более отрицательный из них будет являться анодом коррозионного элемента, а более положительный - катодом. Если потенциалы двух металлов близки друг к другу, то в этом случае природа и концентрация электролита могут иногда изменить значение потенциалов настолько, что их относительное расположение в ряду напряжений перестанет быть определяющим фактором.

Таблица 2 – Нормальные электродные потенциалы металлов при 25°C.

| Металл   | Потенциал, н.в.э. | Металл   | Потенциал |
|--|-------------------|--|-----------|
| $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$ | -3,02             | $\text{Ia} \rightarrow \text{Ia}^{++} + 3\text{e}^-$ | -0,340    |
| $\text{Ca} \rightarrow \text{Ca}^+ + \text{e}^-$ | -3,02             | $\text{Tl} \rightarrow \text{Tl}^+ + \text{e}^-$     | -0,336    |

|   |        |   |         |
|---|--------|---|---------|
| $\text{Rb} \rightarrow \text{Rb}^+ + \text{e}^-$      | -2,99  | $\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,277  |
| $\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$        | -2,92  | $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,250  |
| $\text{Sr} \rightarrow \text{Sr}^{++} + 2\text{e}^-$  | -2,89  | $\text{Sa} \rightarrow \text{Sa}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,136  |
| $\text{Ca} \rightarrow \text{Ca}^{++} + 2\text{e}^-$  | -2,87  | $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,126  |
| $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$      | -2,71  | $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+++} + 3\text{e}^-$ | -0,036  |
| $\text{La} \rightarrow \text{La}^{+++} + 3\text{e}^-$ | -2,37  | $\text{D} \rightarrow 2\text{D}^+ + 2\text{e}^-$      | -0,0034 |
| $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{++} + 2\text{e}^-$  | -2,34  | $\text{H} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$      | -0      |
| $\text{Tl} \rightarrow \text{Tl}^{++} + 2\text{e}^-$  | -1,75  | $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{++} + 2\text{e}^-$  | 0,345   |
| $\text{Be} \rightarrow \text{Be}^{++} + 2\text{e}^-$  | -1,70  | $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}^-$      | 0,522   |
| $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{+++} + 3\text{e}^-$ | -1,67  | $2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^+ + 2\text{e}^-$  | 0,7985  |
| $\text{Mn} \rightarrow \text{Mn}^{++} + 2\text{e}^-$  | -1,05  | $\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$      | 0,7995  |
| $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,762 | $\text{Pd} \rightarrow \text{Pd}^{++} + 2\text{e}^-$  | 0,83    |
| $\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{+++} + 3\text{e}^-$ | -0,71  | $\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}^{++} + 2\text{e}^-$  | 0,854   |
| $\text{Ga} \rightarrow \text{Ga}^{+++} + 3\text{e}^-$ | -0,52  | $\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{++} + 2\text{e}^-$  | 1,2     |
| $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,440 | $\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{+++} + 3\text{e}^-$ | 1,42    |
| $\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{++} + 2\text{e}^-$  | -0,402 | $\text{Au} \rightarrow \text{Au}^+ + \text{e}^-$      | 1,68    |

\*Примечание: н.в.э. – по нормальному водородному электроду

Разрушения на трубопроводах, в большей степени диаметром 1220, 1420 мм, по причине коррозионного растрескивания под напряжением представляют особую опасность. Вышедший из строя трубопровод во время эксплуатации может привести к таким последствиям как:

- значительный материальный ущерб;
- загрязнение окружающей среды;
- человеческие жертвы.

Задача обеспечения технической и экологической безопасности нефтегазопроводов на сегодняшний день очень актуальна, так как зона распространения разрушения возможна на расстояния от сотен метров до нескольких километров.

#### 1.4 Основные теории, описывающие природу возникновения склонности материалов к коррозионному растрескиванию

|      |      |          |         |     |   |             |
|------|------|----------|---------|-----|---|-------------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | Всест<br>31 |
|------|------|----------|---------|-----|---|-------------|

К настоящему времени сформировалось несколько основных теорий, описывающих природу возникновения и развития процесса коррозионного растрескивания. Выдвигаемые различными научными школами предложения можно обобщить в несколько основных моделей, которые с большим или меньшим уровнем приближения, с большей или меньшей степенью достоверности описывают коррозионные процессы в сталях и сплавах при одновременном воздействии агрессивной среды и деформаций (напряжений), возникающих в материалах.

**Адсорбционная теория.** Теория основана на открытом в начале двадцатого века эффекте понижения поверхностной энергии в результате адсорбции (эффекте Ребиндера). Согласно этой теории адсорбция типичных поверхностно-активных веществ из окружающей среды вызывает облегчение деформации и разрушения твердых тел, часто в значительно большей степени, чем при химическом воздействии. Эффект адсорбционного понижения прочности, согласно этой теории, обусловлен тем, что поверхностно-активные вещества, понижая поверхностную энергию металлов, способствуют зарождению пластических сдвигов. При этом процесс коррозионного растрескивания проходит не путем химического или электрохимического растворения металла в вершине трещины, а в результате ослабления межатомных связей в напряженном сплаве при адсорбции специфических компонентов раствора. Благодаря адсорбции уменьшает поверхностная энергия, это облегчает разрыв межатомных связей металла, находящегося под растягивающим напряжением. Уменьшение сродства между атомами на поверхности металла происходит при наличии одного адсорбционного монослоя, при этом наиболее эффективно действуют частицы, проявляющие специфическую адсорбцию. Инициирование трещины стресс-коррозии вызывается адсорбционным снижением сил взаимодействия между смежными атомами в вершине надреза материала, подвергающегося действию высоких растягивающих напряжений.



При коррозионном растрескивании материалов анионы адсорбируются главным образом на подвижных дислокациях или прочих недостатках структуры, выходящих на подвергающуюся агрессивному воздействию поверхность. Так как адсорбция протекает с конечной скоростью, дефекты кристаллической решетки на поверхности, которые могли бы служить зародышем стресс-коррозионной трещины, должны существовать в течение определенного времени. Примеси в сплаве могут оказывать сильное влияние на время жизни поверхностных дефектов. Атомы примесей, скапливаясь вокруг дислокаций, образуют облака Коттрелла, тормозящие движение дефекта. Такое торможение увеличивает время жизни дислокации, которое становится достаточным для хемосорбции нитрат- или гидроксид-иона на активных плоскостях скольжения сталей. Если же поверхностные дефекты успевают мигрировать с поверхности сплава до того, как завершится процесс адсорбции аниона, склонность к коррозионному растрескиванию не наступает.

**Водородная теория.** В процессе наводороживания аустенитных сталей наблюдается увеличение параметров решетки аустенита, а, следовательно, дополнительно возрастает растворимость водорода в ГЦК решетке. В сплавах, подверженных коррозионному растрескиванию в процессе наводороживания, возникает ферритная фаза, которая получила название «деформированный феррит», или ОЦК мартенситная фаза. После насыщения сталей водородом их структура представляет собой смесь фаз – исходный стабильный аустенит, и метастабильные фазы – аустенит с повышенным параметром решетки и деформированный водородом феррит. Изменение параметров кристаллических решеток исходной – аустенитной фазы и вновь образующихся метастабильных фаз вызывает появление в сталях значительных внутренних напряжений, провоцирующих стресс-коррозионные процессы. После непродолжительного старения при комнатной температуре происходит распад метастабильных фаз на исходный аустенит и гексагональную гидридную фазу

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

Существующие механизмы разрушения МНГП,  
анализ разрушений

Лист  
33  
33

Таким образом, наводороживание способствует объемным изменениям и возникновению внутренних напряжений в сталях, приводит к увеличению дефектов структуры и зарождению микротрещин на вновь образованной межфазной границе.

**Дислокационная теория.** Коррозионное растрескивание с точки зрения дислокационного строения металла хорошо объясняет взаимосвязь между величиной приложенного напряжения и склонностью материала к стресс-коррозионному растрескиванию. Увеличение приложенных растягивающих напряжений до определенных значений повышает скорость образования и развития стресс-коррозионной трещины в материале, что связано с возникновением дислокаций в процессе деформирования, их движением и образованием плоских скоплений. Если упорядочение выражено не слишком сильно, приложенные высокие напряжения могут вызвать поперечное скольжение и снизить восприимчивость металла к стресс-коррозии. Поэтому в ряде случаев склонность материалов к коррозионному растрескиванию после значительных степеней пластической деформации оказывается ниже, чем у слабодеформированных сталей и сплавов. Это не относится к аустенитным сталям, где при значительных степенях пластической деформации возможно протекание структурных ( $\square \rightarrow \square$  и  $\square \rightarrow \square$ ) мартенситных превращений, резко повышающих склонность этих материалов к коррозионному растрескиванию, что объясняется перестройкой кристаллической решетки сплава, в результате которой на границе раздела фаз возникает скопление дислокаций, которые становятся зародышами микротрещин.

**Механохимическая теория.** В этой теории предпринята попытка количественно связать напряжения, возникающие в материалах, и скорость развития стресс-коррозионного дефекта с помощью термодинамики необратимых процессов. Деформация металла рассматривается на стадии линейного упрочнения, когда дислокации выстраиваются и двигаются в системе параллельных плоскостей скольжения при отсутствии поперечного

скольжения. Из математических построений этой теории вытекает ряд феноменологических уравнений, указывающих на взаимосвязь процессов пластической деформации и стресс-коррозии в металлах, которые при одновременном процессе деформирования и электрохимической коррозии принимают следующий вид:

$$N = L_a \cdot A + L_b \cdot \dot{\eta}; \quad (5)$$

$$I = L_c + L_d \cdot \dot{\eta}, \quad (6)$$

Где  $N$  – плотность потока дислокаций (дислокационный ток);

$I$  – плотность тока при коррозии;

$A$  – обобщенная сила – химическое сродство процесса образования и движения дислокаций;

$\dot{\eta}$  – перенапряжение;

Феноменологические коэффициенты:

$L_a$  – коэффициент, регулирующий проводимость;

$L_d$  – характеризует поляризуемость электрода;

$L_c = L_b$  регулируют степень взаимного влияния деформации и электрохимической коррозии и выражают количественно явление механохимического эффекта. Физический смысл этого коэффициента заключается в изменении химического потенциала металла в результате его пластического деформирования, которое связано с ослаблением межатомных связей в местах скопления разрезающих дислокаций.

**Пленочная теория.** Согласно этой теории при пластической деформации металла у концентратора напряжения разрушается защитная оксидная пленка значительно более хрупкая, чем основной металл. При этом поверхность металла-анода по отношению к покрытой пленкой поверхности обнажается, а процесс коррозионного растрескивания ускоряется. На основании этой теории был сформулирован ряд условий, необходимых для развития стресс-коррозии. Для образования трещины стресс-коррозии

необходимо, чтобы в материале, в ходе пластической деформации, образовывались широкие ступени скольжения; металл должен обладать способностью образовывать на поверхности защитную пленку (для того, чтобы образовалась пара металл-пленка); необходима среда, в которой участки поверхности металла с дефектами кристаллической решетки не смогли бы полностью репассивироваться.

**Электрохимическая теория.** Идея, положенная в основу этой теории, заключается в признании того, что существует разница в электродных потенциалах в пластически деформированном – напряженном металле (вершина трещины) и ненапряженной боковой поверхности трещины. Роль растягивающих напряжений при этом сводится главным образом к созданию разности потенциалов между отдельными участками поверхности и образованию электрохимических пар, являющихся ответственными за процесс зарождения коррозионной трещины. Таким образом, в деформированном металле создается активно-пассивное состояние, причем в активном состоянии находится деформированный металл, в пассивном – недеформированный. Разница, возникающая в скорости растворения деформированного и недеформированного металлов, приводит к возникновению локальных процессов, способствующих возникновению коррозионной трещины.

### 1.5 Условия формирования коррозионных трещин

Физико-химическое разрушение стальных конструкций и сооружений происходит в результате деструкции их металла, проявляющейся в двух основных формах - электрохимической коррозии и трещинообразовании. В отличие от нее растрескивание конструкционных и, особенно, трубных сталей вызывает многочисленные дискуссии по поводу кинетики этого процесса. Коррозионное или водородное охрупчивание, коррозионное растрескивание под напряжением, водородное растрескивание, межкристаллитная (транскристаллитная) коррозия. Такие разнообразные наименования получил процесс трещинообразования в стали, находящейся в

|      |      |          |         |     |   |            |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | Лист<br>36 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |            |

коррозионно-активной среде. В последнее время к ним добавился еще один термин – стресс-коррозия, которым назвали многочисленные случаи разрушения котодно защищаемых подземных трубопроводов (в основном – газопроводов) в результате образования на их внешней поверхности множественных мелких трещин, сливающихся в итоге в крупную магистральную трещину, приводящую к разрыву стенки трубы.

Явление разрушения трубопровода, появляющееся в следствии образования трещины в стенках тубы и локальной коррозии трубной стали на поверхности этих трещин называется стресс-коррозией или корозинным разрушением под напряжением. Такое явление появляется при определенном обязательном комплексе таких условий как:

- 1) Наличие в электролите грунта химических соединений, а именно: бикарбонат, нитрат, сульфид, алюминат;
- 2) Наложения на трубопровод внешнего катодного поля, создающего на его границе с грунтом действующий потенциал в диапазоне 0,6 -0,8 В м.с.э.;
- 3) Наличие в грунте избытка свободной воды и создание на границе трубопровод-грунт действующего катодного потенциала, модуль которого превышает 1,15В м.с.э.

Что бы создать эффективные методы защиты от стресс-коррозионного растрескивания и новые марки трубных сталей, которые будут выносливы к такому виду разрушений, нужно создать модель, позволяющую объяснить механизм процесса, протекающего в материалах трубопровода.

Повреждение и дальнейшее разрушение трубопровода высокого давления в результате стресс-коррозии происходит главным образом в нижней части трубы. В средней части трубопровода появляются коррозионные повреждения в зависимости от состояния изоляции. Вблизи компрессорных станций возникают аварии трубопроводов высокого давления, потому что на данных участках имеется существенное повышение температуры газопровода и вибрационные нагрузки.

|      |      |          |         |     |   |            |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | Лист<br>37 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |            |

Стресс-коррозионные разрушения фиксируются во многих странах мира. Особенно часто это происходит в России, Канаде, США и в странах Европейского союза. Причины и механизмы стресс-коррозионных повреждений трубных сталей не выявлены даже в результате интенсивных исследований данной проблемы. Связано это со множеством факторов приводящих к стресс-коррозионным повреждениям магистральных труб [1].

Стресс-коррозия появляется там, где имеются одновременное воздействие на трубопроводы таких факторов как:

- циклическое растягивающее напряжение,
- металлургическая неоднородность металла трубы,
- агрессивная среда в околотрубном пространстве.

Так же большинство разрушений газопроводов диаметром 1420 мм из стали Х70 происходят в зонах, которые располагаются от продольного сварного на расстоянии до 200 мм.

Поэтому главной задачей становится создание принципиально новых типов образцов, которые позволят смоделировать условия работы металла в трубах.

Разработанные методика и образец испытания позволяют исследовать в лабораториях механизм и природу образования стресс-коррозионных трещин в трубных сталях с учетом всех действующих факторов в условиях, которые приближены к эксплуатационным.

В лабораториях были получены стресс-коррозионные трещины на сталях Х46, Х70, свидетельствующие о сложной природе их образования и о многостадийном процессе, который происходит в течение долгого периода при контакте напряженного металла трубы с околотрубной агрессивной средой.

Процесс зарождения и развития стресс-коррозионных трещин совершается с нарушением изоляционного покрытия, когда коррозионная среда входит в контакт с поверхностью металла трубы. Коррозионная среда формируется под отслоившимся покрытием трубопровода. Подкисление

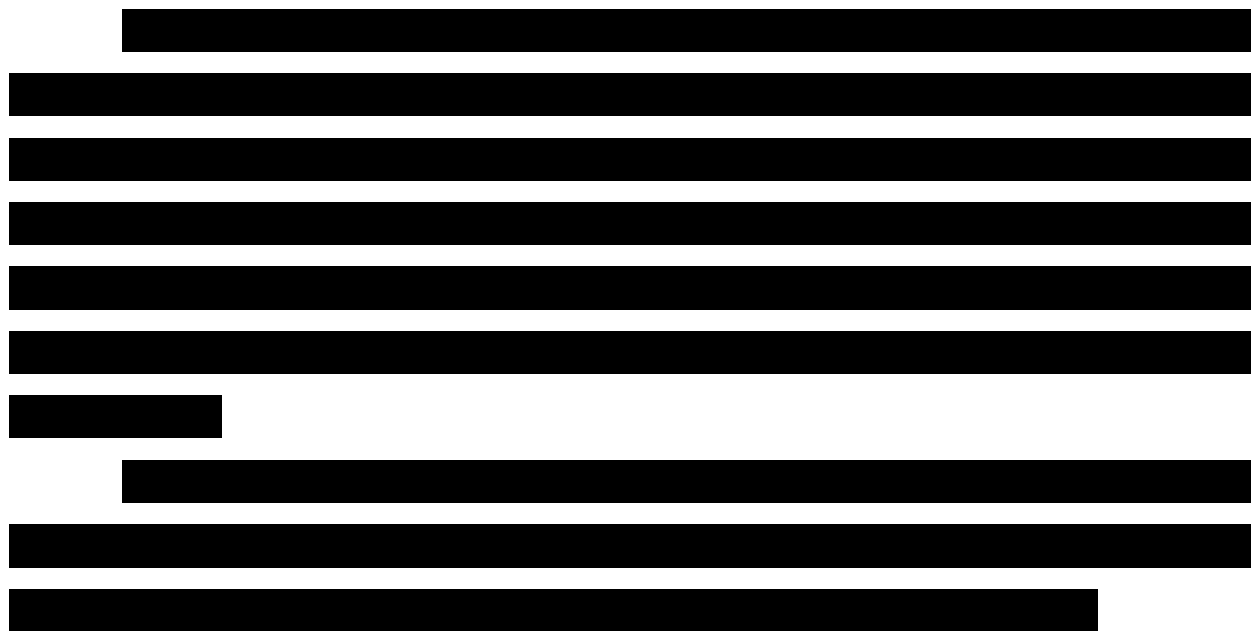
|      |      |          |         |     |  |      |
|------|------|----------|---------|-----|--|------|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП,<br>анализ разрушений | Лист |
|      |      |          |         |     |  | 38   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |  |      |

среды до слабокислых и кислых, происходит в местах контакта металла трубы с коррозионной средой под изоляцией. Это содействует снижению поверхностной энергии и ускорению разрушения пассивной пленки. Более активными элементами грунтовых электролитов являются галоидный ион хлора (Cl) и адсорбированный водород  $H_{\text{адс}}$ .

Общая коррозия, при отсутствии пассивной пленки и при наличии дефекта, протекает ускоренная локальная питтинговая или щелевая коррозия.

В зоне дефекта поверхностно-активные элементы коррозионной среды способствуют зарождению микропластических деформаций, которые характеризуются большим уровнем остаточных напряжений и скоплением неметаллических включений.

Под действием водорода интенсифицируется процесс микропластических деформаций поверхностного слоя.



В результате коррозионного растворения металла создается атомарный водород, способный диффундировать сквозь кристаллическую решетку металла в область объемных напряжений, где достигая предельных концентраций, молизуется, развивает в несовершенствах кристаллической решетки высокое давление, являющееся источником зарождения микротрещин (рисунок 4).

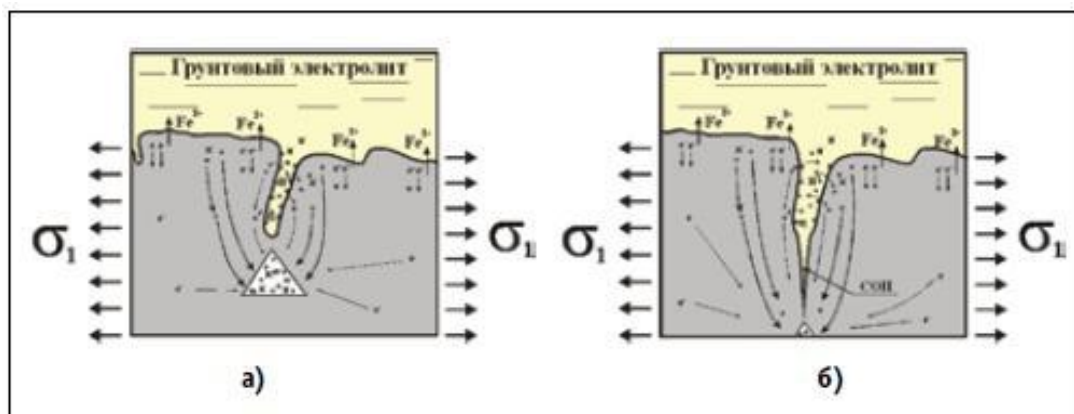


Рисунок 4 – Зарождение микротрещины

- а) диффузия ионов водорода в зону максимальных напряжений,  
б) образование микротрещины

Дестабилизация внутреннего энергетического состояния происходит в следствии микропластических деформаций в локальных участках поверхностного слоя, а так же повышается восприимчивость к концентраторам напряжений под действием водорода. Тогда как увеличение напряжений сопутствует снижением пластичности деформируемого металла, что увеличивает тягу к коррозионному растрескиванию при воздействии водородсодержащих сред.

Протекание коррозионного процесса облегчает растягивающее напряжение, а также совершается разрушение твердых пленок продуктов коррозии и облегчается доступ электролита к вершине дефектов.

Достигая предельной комбинации «водород-напряжение» перед вершиной дефекта случается зарождение микротрещины (рисунок 4б).

Химический ионный и микробиологический составы грунтов, их обводненность, показатель pH [3] оказывают влияние на процесс образования стресс-коррозионных повреждений.

Устремляются к вершине трещины газообразные продукты реакций, например, ионы водорода и сероводорода, порождая охрупчивание и



предразрушение металлической матрицы перед фронтом распространения трещины.

Анализ большинства данных фрагментов труб показанных на рисунке 4, разрушившихся вследствие КРН, представляет что стресс-коррозионные повреждения образуют питтингоподобные дефекты на поверхности трубы. Зародившиеся стресс-коррозионные трещины характеризуются существенным повышением поверхностного размера над поперечным и настроены нормально к действующим растягивающим напряжениям.

В зависимости от размера начального дефекта изменяет отношение полуосей эллипса, в процессе развития трещин, вследствие этого главной задачей изучения является изучение скорости распространения трещин в направлении глубины, поверхности и кинетики формоизменения трещины.

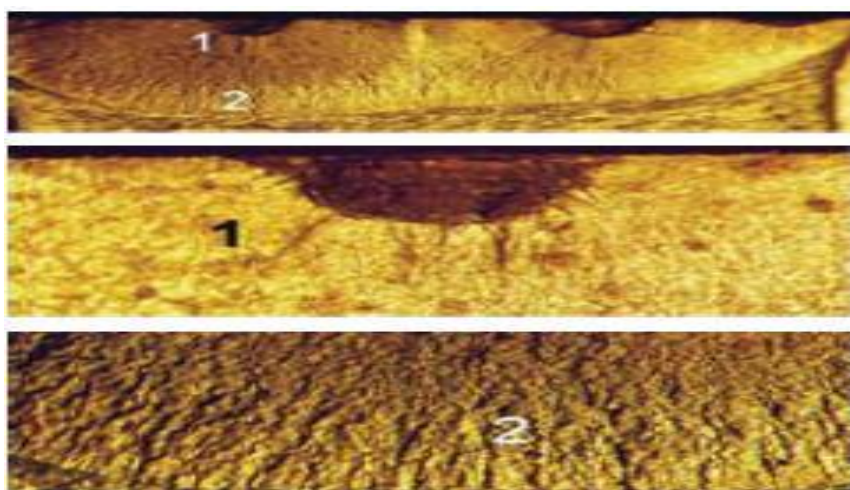


Рисунок 5 – Фрагмент развития стресс-коррозионных трещин в стенке трубы стали X70

- 1) зона коррозионно-механического развития трещин
- 2) зона роста трещин при циклическом нагружении

На дне концентратора зарождаются другие микротрещины причиной этого является увеличение уровня воздействующих в вершине трещины напряжений.

### 1.6. Влияние различных факторов на скорость коррозии

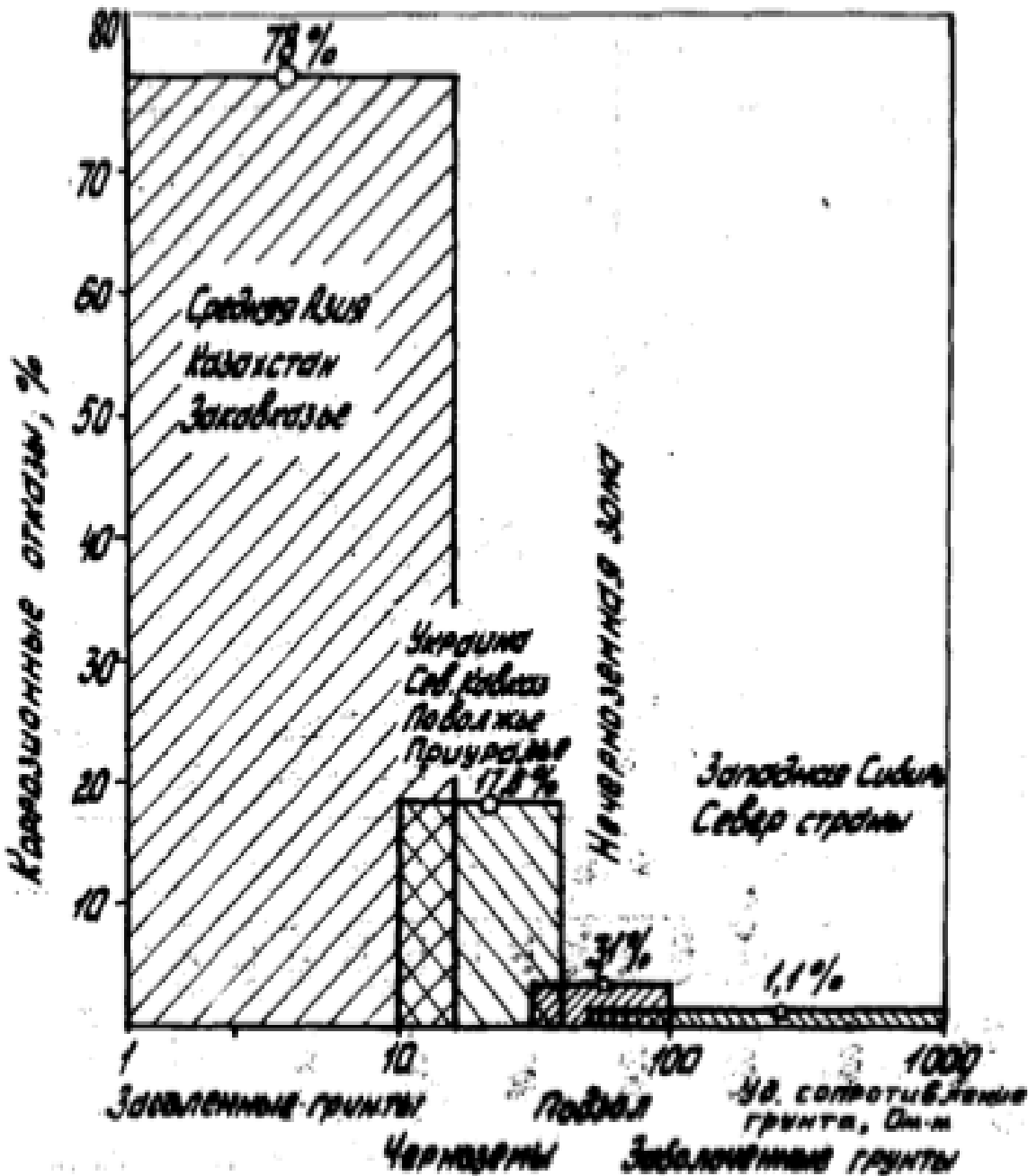


Рисунок 8 – Распределение коррозионных отказов по почвенно-климатическим регионам

### Влияние удельного электрического сопротивления грунта.

Величина удельного сопротивления грунта характеризует влажность, количество растворенных минеральных солей, диффузию кислорода и пр., т.е. дает оценку агрессивности грунтов. Как показали исследования

ВНИИСТА и АзНефтехима, предсказывающая способность методов, основанных на использовании удельного электрического сопротивления, составляет 70%. Из данных, приведенных на рисунке 9, следует, что в грунтах с удельным сопротивлением до 10 Ом.м происходит более 72.% отказов. Причем такая картина характерна для значительного ряда трубопроводов.

Часть отказов имеет место в грунтах высокого удельного сопротивления. Вероятно, что в высокоомных грунтах могут содержаться агрессивные включения с большой проводимостью, однако вероятность контакта их с металлом в дефектах изоляции уменьшается с ростом удельного сопротивления.

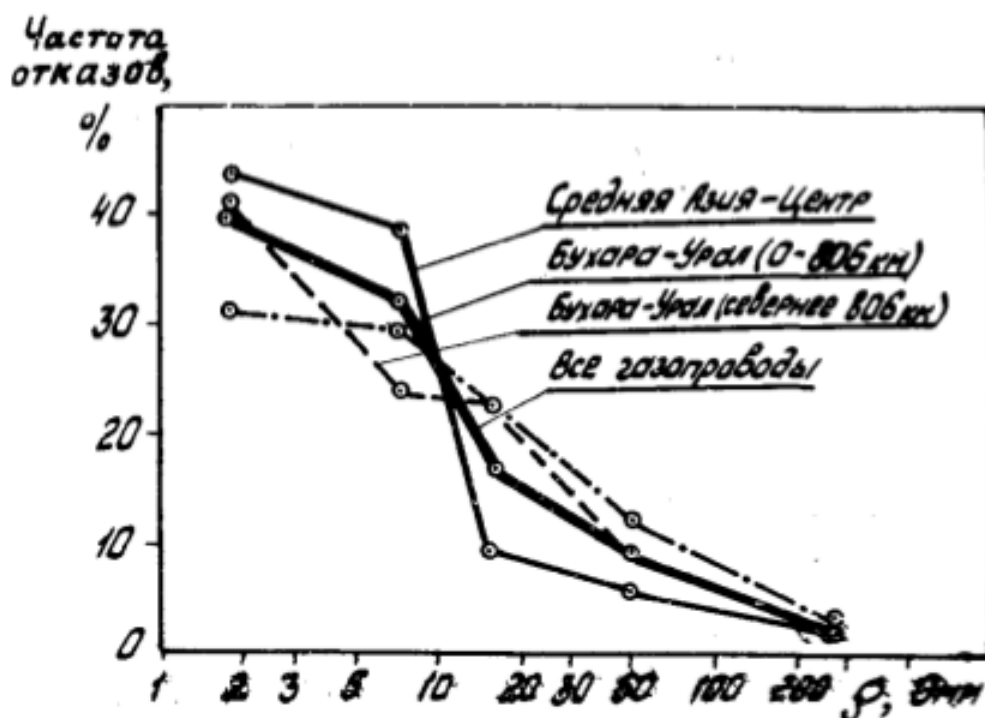


Рисунок 9 – Зависимость частоты коррозионных отказов от удельного электрического сопротивления грунта

Хорошая корреляция между количеством коррозионных отказов и удельным электрическим сопротивлением грунта наблюдается по различным почвенно-климатическим регионам страны (рисунки 8, 9). Степень минерализации грунтовых вод, в значительной мере определяющая удельное сопротивление грунта, зависит от количества осадков, величины стока рек,

среднегодовой температуры и испаряемости осадков. В соответствии с этими показателями наблюдаются грунты высокой проводимости на юге страны и более низкой в северных регионах.

**Влияние температуры транспортируемого продукта.** Повышение температуры с 20 до 80°C увеличивает скорость коррозии в 2,5 – 3 раза [6]. Статистика коррозионных отказов показывает, что на участке газопроводов непосредственно около компрессорных станций (КС) по ходу газа количество отказов в 40 раз больше, чем на участках, удаленных от КС на 100 км. Причем, чем выше разность температур газа на входе и выходе, тем эта зависимость грубее (рис.10). Уменьшение удельного количества отказов с увеличением расстояния от КС нельзя объяснять только одной температурой, так как одновременно изменяются (уменьшаются) давление в трубопроводе, турбулентность потока и вибрация. То есть уменьшение механических напряжений, в том числе многоцикловых их изменений, ведет к снижению скорости коррозии и потока коррозионных отказов.

Влияние температуры сказывается в значительной степени на старении изоляционных покрытий, что ведет к увеличению незащищенной поверхности металла труб, контактирующего с агрессивной средой.

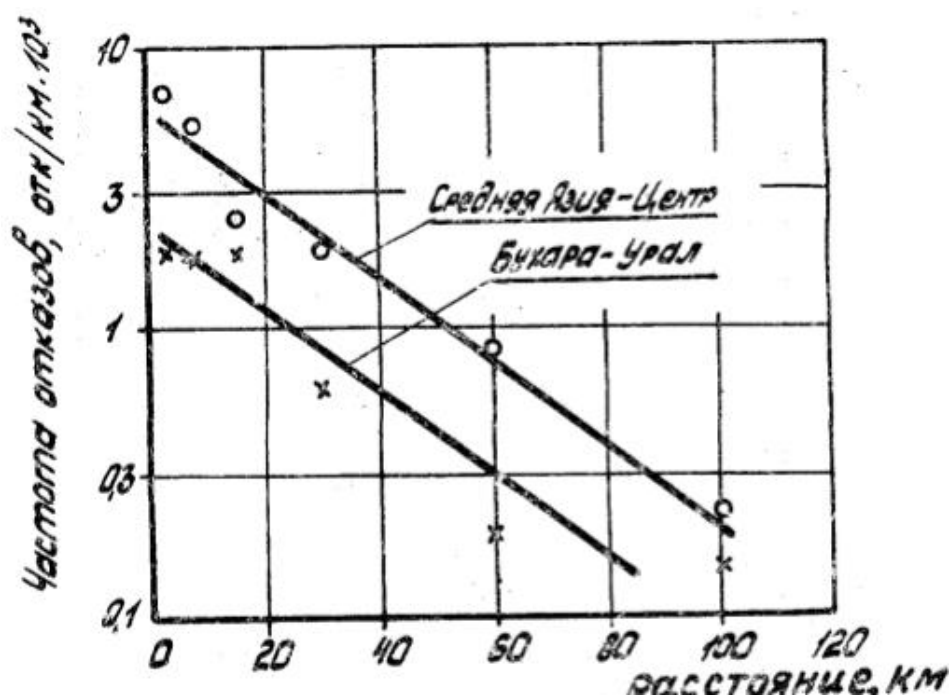


Рисунок 10 – Зависимость частоты отказов от расстояния до компрессорной

станции (по ходу газа)

**Влияние состояния изоляционного покрытия.** Статистика коррозионных отказов полностью подтверждает вывод о том, что, чем более оголена поверхность металла, тем чаще происходят коррозионные отказы (рис. 11).

Вышеприведенная статистическая зависимость прослеживается не всегда. Есть и другая тенденция, на первый взгляд парадоксальная: чем лучше изоляционное покрытие, тем скорость коррозии выше, – если отсутствует электрохимическая защита. Эта тенденция проявляется в условиях действия блуждающих токов. Например, аммиакопровод Тольятти - Одесса имел сквозное коррозионное поражение уже на стадии пуска в эксплуатацию из-за неэффективной работы средств электрохимической защиты. Объяснение этому факту дает теория коррозии стали в гетерогенных условиях, разработанная на основе анализа системы «металл-изоляция-грунт». Немногочисленные дефекты изоляции малого размера обладают достаточно низким переходным сопротивлением, что обуславливает в местах их расположения высокую анодную плотность тока и высокую скорость коррозии, до 10 мм/год, трубопроводов в зонах блуждающих токов.

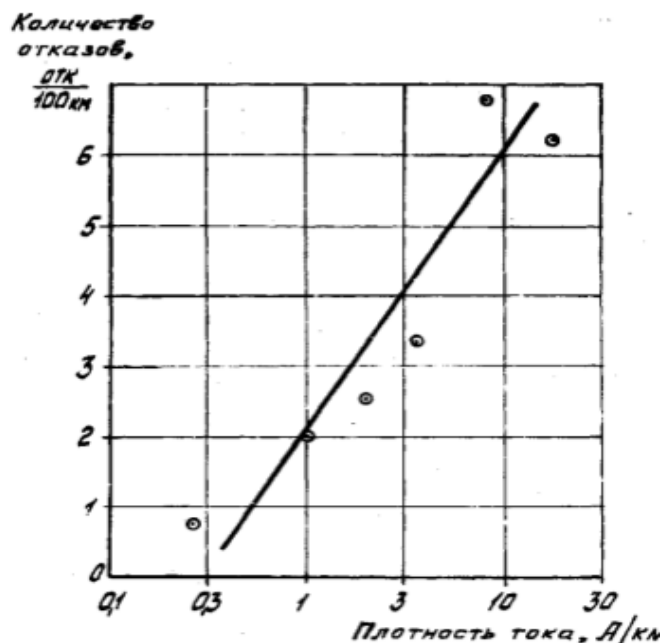


Рисунок 11 – Зависимость количества отказов от состояния изоляционного

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений

покрытия (плотности тока, необходимой для защиты)

### 1.7 Механизм образования стресскоррозионных трещин

Для правильного понимания механизма стресс-коррозии трубной стали и реалистического анализа кинетики этого процесса необходимо интерпретировать его физическую сущность.

Наиболее подходящая форма такой интерпретации это создание физической модели с ее последующим переводом в математическую модель. Электролит грунта, оказывает электрохимическое влияние, вызывающее коррозионное окисление на трубной поверхности с поврежденной изоляцией.

В последнее время в водоснабжении, например обсадная труба, уже применяются ПВХ и другие полимерные трубы.

Физическая модель может быть представлена следующим образом. Одновременно химические и физические процессы в среде, контактирующей со стенками труб, сопровождаются появлением в ней ионов водорода. Обладая суперподвижностью, ионы частично проникают в стенки труб, где при определенных условиях задерживаются внутри кристаллической решетки стали. В результате их накопления возникает реальная вероятность образования атомов и даже молекул водорода. При этом из-за резкого увеличения объема таких новообразований в кристаллической решетке возникают локально участки с гигантским внутренним давлением, вызывающим внутреннее механическое растрескивание стали. При условии соприкосновения фронтов электрохимического и механического разрушения дискретно происходит дополнительное повреждение решетки трубной стали из-за локальной потери несущей способности напряженной стенки трубы, находящейся под внутренним давлением. Веским стимулятором процесса стресс-коррозии может быть поле тока его катодной защиты, которое, энергетически взаимодействуя с водородсодержащими ионами электролита грунта (при определенных условиях), способствует разрыву связи и переходу ионов водорода к самостоятельному активному существованию. В зависимости от величины энергии разорванной связи электрохимически

|      |      |          |         |     |   |    |
|------|------|----------|---------|-----|---|----|
|      |      |          |         |     | Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений | 46 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |    |

образованные ионы обладают разным запасом собственной энергии, подвижностью и проникающей способностью. Вследствие этого они, как правило, накапливаются на разной глубине стенок труб и в разной степени инициируют процесс стресс-коррозии. Такова в целом физическая модель этого процесса.

Процесс КРН является многостадийным процессом. Осуществляется он в семь стадий.

*Первая стадия.* Коррозионная среда проникает к телу трубы, как показано на рисунке 12.1.

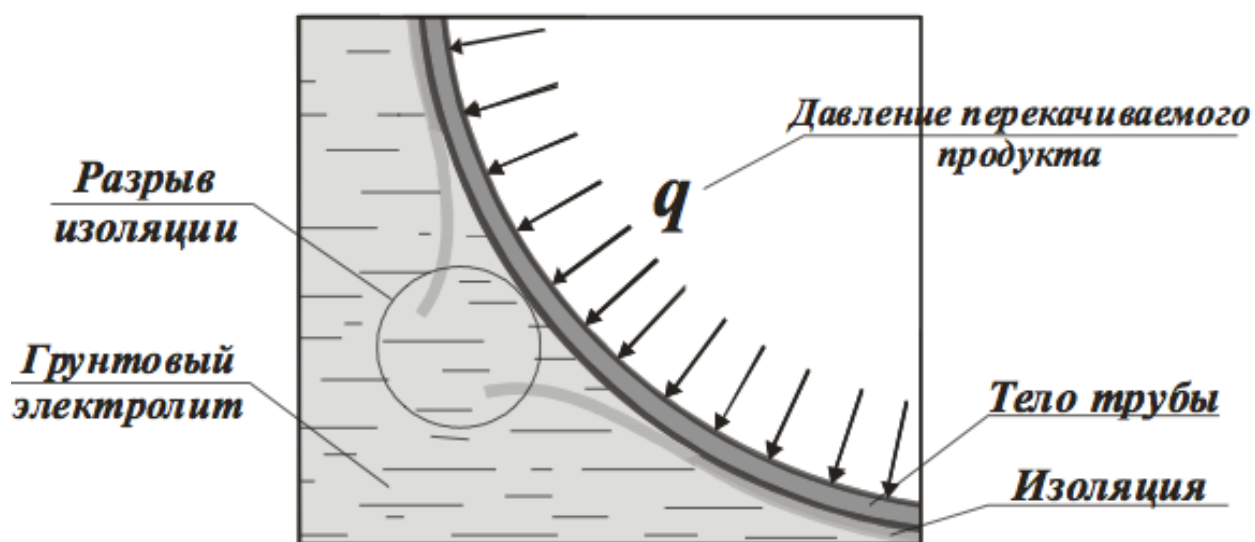
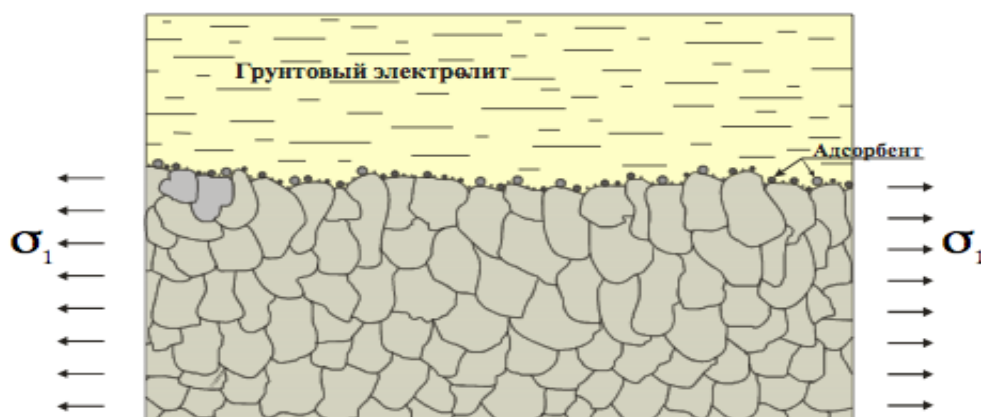


Рисунок 12.1 Нарушение адгезии изоляционного покрытия трубопровода

*Вторая стадия.* При этом уменьшается поверхностная энергия металла и облегчается разрушение (эффект Ребиндера)



## Рисунок 12.2 – Адсорбция поверхностно-активных элементов на поверхности металла

*Третья и четвертая стадии.* На третьей стадии под воздействием водорода происходит микропластическая деформация поверхностного слоя.

На четвертой стадии механизма КРН решающая роль отводится процессу электрохимической коррозии границ зерен, активированному напряжениями.

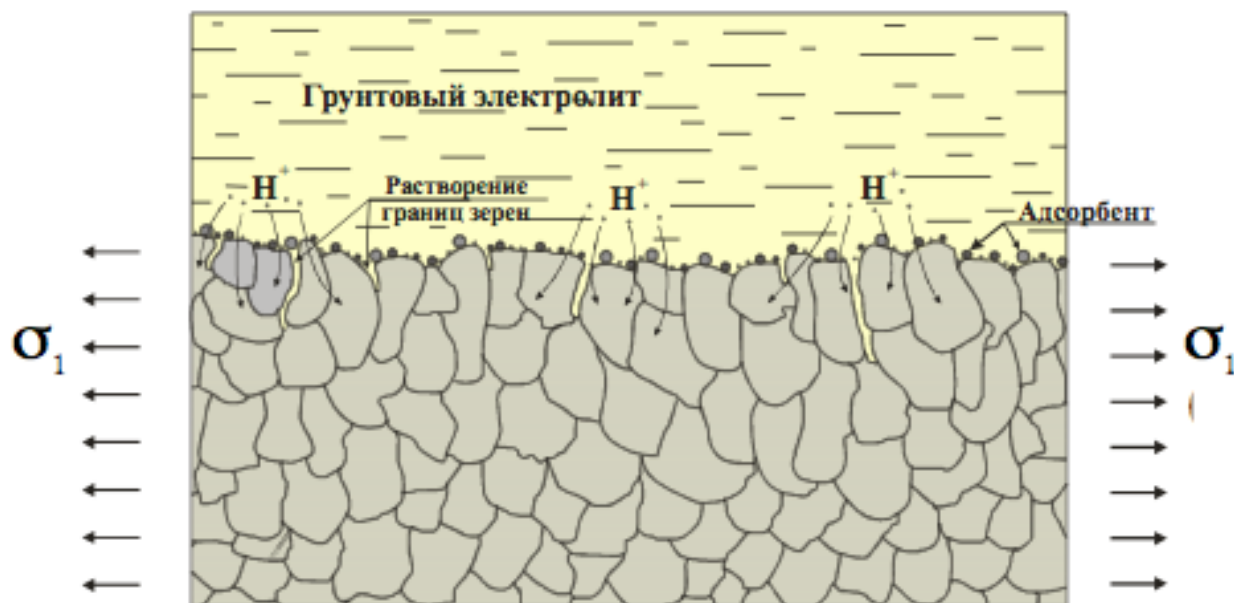


Рисунок 12.3 – Растворение границ зерен с образованием зародышей трещин

Исходя из предыдущих стадий процесса КРН имеем поверхность металла с растворенными границами зерен после пластической деформации:

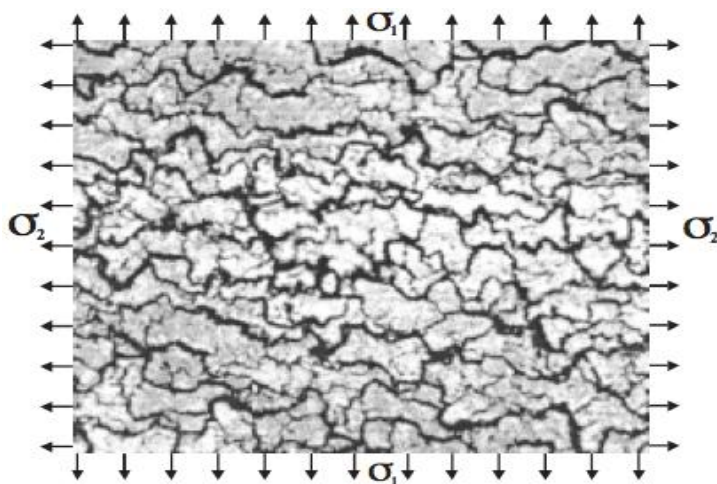


Рисунок 12.4



Пятая стадия. На пятой стадии происходит процесс зарождения микротрещины, при этом основным внешним, по отношению к металлу, разрушающим агентом является водород (рис. 12.5а):

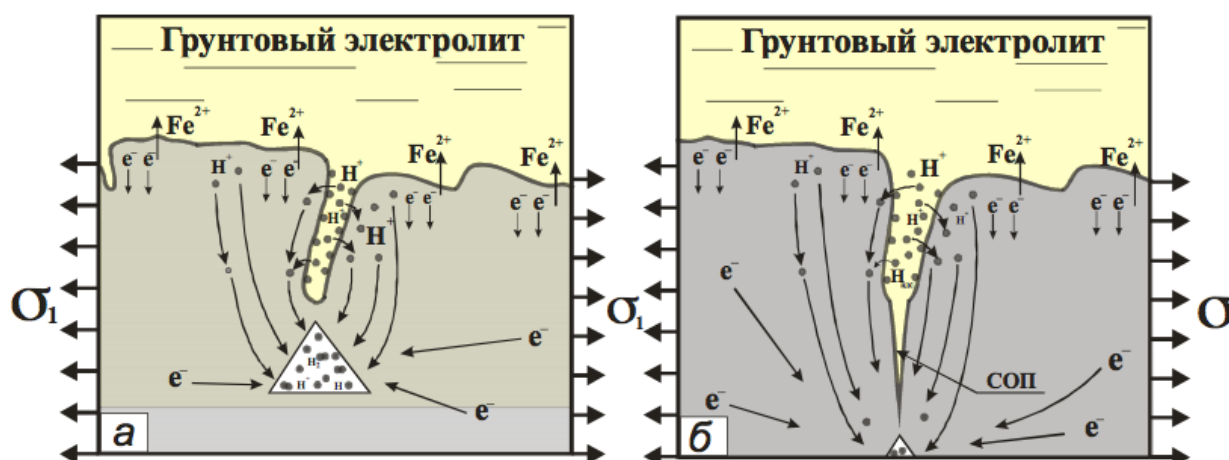


Рисунок 12.5 - Зарождение микротрещины

а – диффузия ионов водорода в зону максимальных напряжений

б – образование микротрещины.

Шестая и седьмая стадии. На шестой стадии совершается развитие зародившейся микротрещины по глубине и по поверхности металла.

На завершающей седьмой стадии в наиболее дефектной зоне последовательно расположенные трещины объединяются в одну магистральную (коалесценция трещин).

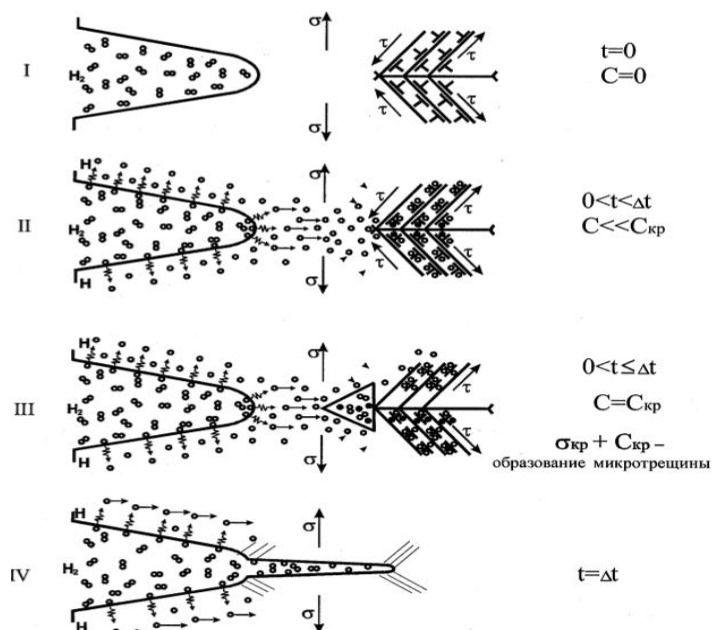


Рисунок 12.6 – Физико-механическая модель роста трещины.

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |
|------|------|----------|---------|-----|

Существующие механизмы разрушения МНГП, анализ разрушений

4 Лист



## 2. ПРОБЛЕМА ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Разнохарактерные результаты оценки влияния наводороживания на механические свойства трубных сталей, объясняют следующими причинами:

|           |      |                |         |     |  |               |      |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|---------------|------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |               |      |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |               |      |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Проблема водородного охрупчивания трубопроводов эксплуатируемых в водородсодержащих средах                                     | Лит.          | Лист |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |               | 50   |
| Консульт. |      |                |         |     |  |               | 51   |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  | ТПУ гр. 2БМ4Б |      |
|           |      |                |         |     |  |               |      |

1. Трудностью точного определения концентрации водорода в стали в требуемый момент времени;
2. Неравномерностью распределения водорода по сечению стенки трубы;
3. Весьма сложным характером влияния состава и структуры стали на склонность ее к водородному охрупчиванию;
4. Зависимостью ряда механических свойств от скорости деформации в процессе механической нагрузки.

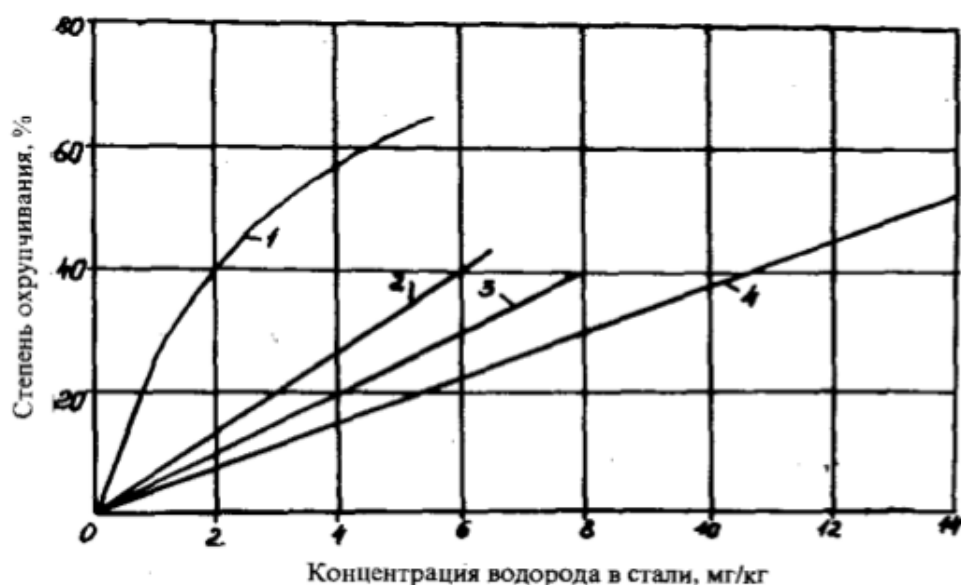


Рисунок 13 – Стойкость трубных сталей к охрупчиванию: 1 - НТ 80; 2 - НТ 70; 3 – НТ 60; 4 – SM 41

Диагностирование скорости трещинообразования трубной стали в

условиях наводороживания при стресс-коррозии осуществляют в ряде случаев по среднему времени до разрушения образцов. Исследования позволили установить соотношение между концентрацией водорода в стали и степенью ее охрупчивания (как показано на рис. 13). Увеличение относительной степени охрупчивания (относительно объема поглощенного сталью водорода) соответствует повышению склонности стали к растрескиванию. Аналогичная зависимость была установлена и в отношении снижения сопротивления стали разрыву.

Внешние условия, характеризующие электролитическую среду, не по всем показателям адекватно связаны со скоростью трещино- образования при стресс-коррозии. Так, величина pH в кислом диапазоне почти не влияет на эти показатели. В связи с таким положением безусловное предпочтение при диагностике скорости трещинообразования следует отдать комплексной оценке факторной значимости внешних условий протекания стресс-коррозии.

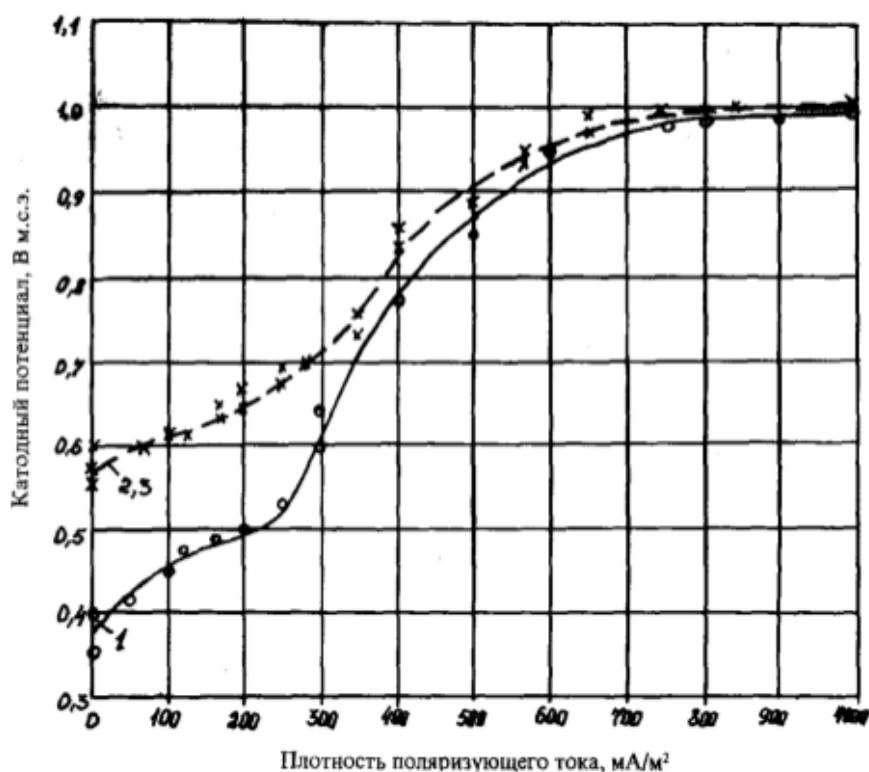


Рисунок 14 – Зависимость плотности поляризующего тока от потенциала на катоде

Стойкость трубных сталей к стресс-коррозионному растрескиванию при изменении pH среды показана на рис. 13, из которого видно, что pH-функция полностью повторяет характер поляризационной кривой, реализуемой на стальном электроде при катодной защите. Это является убедительным подтверждением контролирующей значимости процесса наводороживания по сравнению с коррозионным процессом в общем комплексе стресс-коррозионного влияния внешней среды, насыщенной промоторами водорода, активными в диапазоне действующих потенциалов.

### 3. МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ ТРУБНОГО СОРТАМЕНТА

#### 3.1 Механизм водородного охрупчивания стали

Принимая в качестве концептуальной основы определяющее влияние наводороживания трубной стали, вызывающее ее стресс-коррозионное растрескивание, был предложен следующий механизм проникновения водорода в сталь [15]:

1. Первая стадия – доставка доноров водород-ионов к поверхности трубы.
2. Разряд водород-ионов с образованием адсорбированных сталью атомов водорода.
3. Молизация атомов водорода путем каталитической рекомбинации или электрохимической десорбции с последующим переходом в газовую фазу.
4. Внедрение адсорбированных атомов водорода в кристаллическую решетку стали.

Отмечено, что диффузия молекул и атомов водорода в сталь невозможна из-за их слишком большого размера [19].

Растворимость водорода при 25 °С и  $P = 1 \text{ кг/см}^2$  не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  атомов на один атом железа [20], что соответствует примерно  $2,7 \cdot 10^{-7}$  атомов Н в элементарной ячейке кристаллической решетки стали. Однако при катодной поляризации она может увеличиваться многократно, достигая концентраций водорода, соответствующих давлениям в несколько тысяч атмосфер при высоких температурах (до несколько сотен градусов) [13].

Атомы водорода при переходе в кристаллическую решетку переходят в ионную форму, взаимодействуя с решеткой через электроны обобществленного электронного комплекса металла. Диффундируя в

|           |      |                |         |     |  |               |      |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|---------------|------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |               |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |               |      |        |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Механизм и кинетика водородного охрупчивания сталей трубного сортамента  | Лит.          | Лист | Листов |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |               | 54   | 55     |
| Консульт. |      |                |         |     |  | ТПУ гр. 2БМ4Б |      |        |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |               |      |        |
|           |      |                |         |     |  |               |      |        |

решетку с достаточно большой, благодаря своим чрезвычайно малым размерам, скоростью, ионы водорода попадают в какую-либо имеющуюся в ней дислокацию (или другой внутренний коллектор) и задерживаются в ней. При этом они вновь отбирают электроны из общего электронного облака металла и переходят в атомарную форму. В дальнейшем здесь же может происходить и молизация водорода. Такой процесс продолжается до наступления равновесия, когда парциальное давление атомарного водорода в дислокации (коллекторе) достигает величины, соответствующей концентрации протонов в решетке и адсорбированных атомов водорода на наружной поверхности металла [18].

Таким образом, диффузия водорода в сталь может продолжаться длительное время до момента локальной деструкции кристаллической решетки с образованием микротрещин. В дальнейшем такие трещины могут сливаться, пока общий размер суммарного повреждения решетки не превысит критического значения, приводящего к макроскопическому разрушению стальной конструкции. Обобщая современные представления об адсорбции водорода металлами, М.Смиаловский постулирует существование трех форм водорода в кристаллической решетке стали [7]:

- 1) Протоны, растворенные в междоузлиях (вакансиях) кристаллической решетки ( $\alpha$ -фаза);
- 2) Протоны, связанные электронами, перешедшими с атомов водорода на d-уровни атомов железа ( $\beta$ -фаза);
- 3) Газ во внутренних полостях (дислокациях) металла, представляющих собой равновесную смесь атомарного и молекулярного водорода под высоким давлением.



#### 4. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДА НА ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА НА ВНЕШНЕЙ КАТОДНОЗАЩИЩЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Полученные результаты при изучении степени электролитического наводороживания различно напряженных образцов из ферритно-перлитных сталей трубного сортамента при различных превышениях плотности тока катодной защиты над предельным током кислорода, позволили установить, что при значениях катодной поляризации 0,2...0,25 В, когда плотность тока катодной защиты практически совпадала с плотностью предельного тока по кислороду, избыточного водорода в образцах не обнаружено, независимо от внутренних напряжений. Заметное выделение избыточного водорода из стальных образцов начиналось когда плотность тока катодной защиты превышала плотность предельного тока по кислороду в 8 – 10 и более раз.

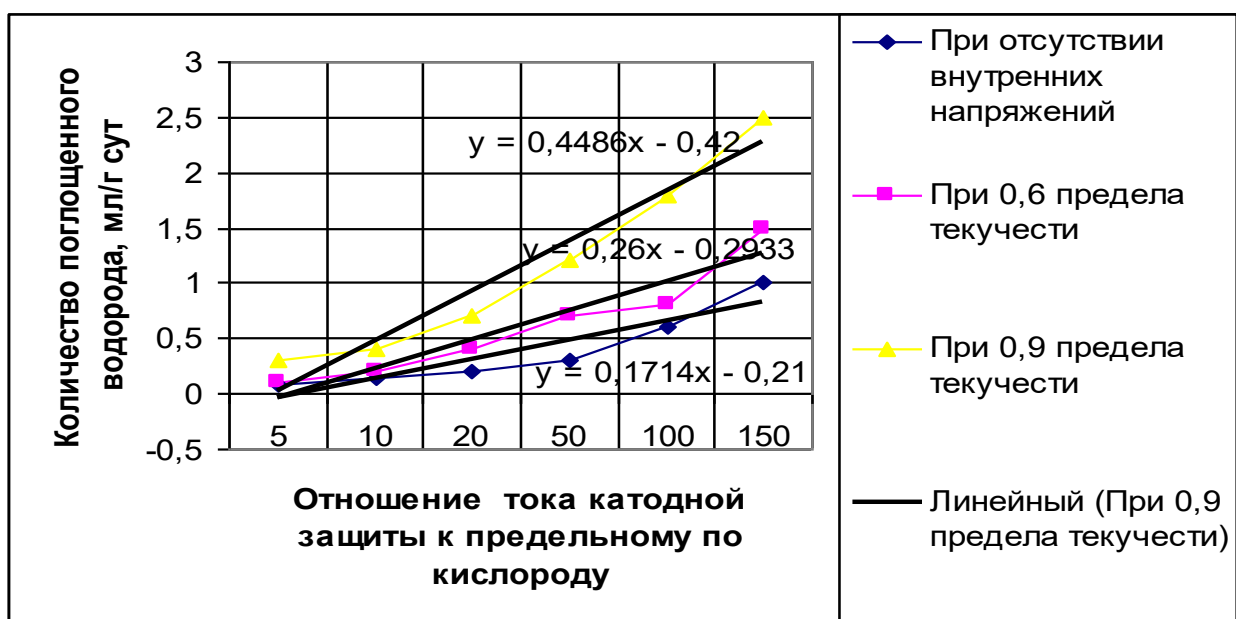


Рисунок 16 – Интенсивность наводороживания образцов из стали 17 ГС при различных внутренних напряжениях в зависимости от превышения тока катодной защиты над предельным по кислороду

При проведении исследований на одних и тех же образцах из трубной

|           |      |                |         |     |  |               |      |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|---------------|------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |               |      |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |               |      |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Влияние режимов катодной защиты трубопровода на выделение водорода на внешней катоднозащищенной поверхности                    | Лит.          | Лист |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |               | 56   |
| Консульт. |      |                |         |     |  |               | 57   |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  | ТПУ гр. 2БМ4Б |      |

стали влияние внутренних напряжений на катодное наводороживание при комнатной температуре неоднозначно, что свидетельствует о сложности изучаемого процесса.

Анализ результатов представленных на рисунке 16 свидетельствует о том, что, без учета разброса данных, максимальное количество поглощенного катодно защищаемой поверхностью водорода ( $C_{H_2}$ ) находится в пропорциональной зависимости от степени превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду:

$$C_{H_2} = A j_{кз} / j_{np_2} - B \quad (11)$$

Коэффициенты А и В в уравнении зависят от внутренних напряжений в образцах. Когда механические напряжения в образце не превышали  $0,5\sigma_m$ , их степень наводороживания на фоне разброса экспериментальных результатов практически не отличается от ненапряженных образцов. Степень наводороживания заметно увеличивается при режиме катодной защиты, когда  $j_{кз} / j_{np} \geq 10$  и при напряжениях в образцах более  $0,6\sigma_m$ . Прямые не проходят через начало координат и, практически, независимо от внутренних напряжений в образце, отсекают от оси абсцисс отрезок, когда плотность тока катодной защиты превышала плотность предельного тока кислорода в 5-7 раз. Это означает, что, независимо от внутренних напряжений, когда плотность тока катодной защиты превышает плотность предельного тока по кислороду не более, чем в 5-7 раз, количество выделившегося водорода из исследуемых образцов не превышает «родословного» содержания водорода в образцах, не подверженных катодной поляризации. Увеличение количества поглощенного водорода по мере роста растягивающих напряжений, при увеличении стрелы прогиба образца, связано, по-видимому, с появлением новых дислокаций вблизи внешней катодно защищаемой поверхности и уменьшением перенапряжения реакции выделения водорода на деформированной поверхности стальных образцов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, накоплению критической концентрации водорода вблизи катодно защищаемой поверхности, достаточной для образования микротрещины очага стресс-коррозионного предразрушения, способствуют множество факторов, среди которых важнейшими являются внутренние механические напряжения и степень превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду.

Поток диффузии водорода в сталь находится в прямой зависимости от степени заполнения катодно защищаемой поверхности ад- атомами водорода  $H_{ads}(\theta_H)$ , которая зависит от расположения дефекта изоляции по периметру трубопровода: у верхней образующей, боковой или нижней. При режиме катодной защиты, когда  $j_{к.з.} / j_{np} \approx 75$  в образцах, имитирующих положение дефектов у верхней образующей трубопровода, количество поглощенного водорода различалось в пределах 30-60% и практически, в пределах разброса результатов эксперимента, не превышало содержания «родословного» водорода. Когда катодную поляризацию образцов осуществляли в потолочном положении, соответствующему положению сквозных дефектов изоляции трубопровода у нижней образующей, количество выделившегося водорода после катодной поляризации возросло в 1,5-2 раза, что обусловлено зависимостью электролитического наводороживания от  $H_{ads}(\theta_H)$ , когда лимитирующей стадией становится электрохимическая десорбция. Для пузырька водорода, образовавшегося у нижней образующей трубопровода, в отличие от пузырька у верхней образующей, силы поверхностного натяжения  $F_\sigma$  и Архимеда  $F_A$  (кроме силы гравитации) действуют в одном направлении, что способствует повышению степени заполнения катодно защищаемой поверхности  $H_{ads}(\theta_H)$ . По мере уменьшения диаметра трубопровода кривизна трубы начинает оказывать влияние на величину краевого угла смачивания, увеличивая его, что облегчает отрыв пузырька от катодно защищаемой поверхности. Сила  $F_A$  (пропорциональная диаметру

пузырька в кубе) отрывающая пузырек и заставляющая его всплыть, при уменьшении диаметра трубы существенно превосходит силу  $F_{\sigma}$  удерживающую пузырек на катодно защищаемой поверхности (пропорциональную диаметру пузырька). Поэтому на трубопроводах малого диаметра под действием силы  $F_A$ , при прочих равных условиях, у нижней образующей возрастает скорость удаления атомов водорода, чего не наблюдается на трубопроводах диаметром более 720 мм.

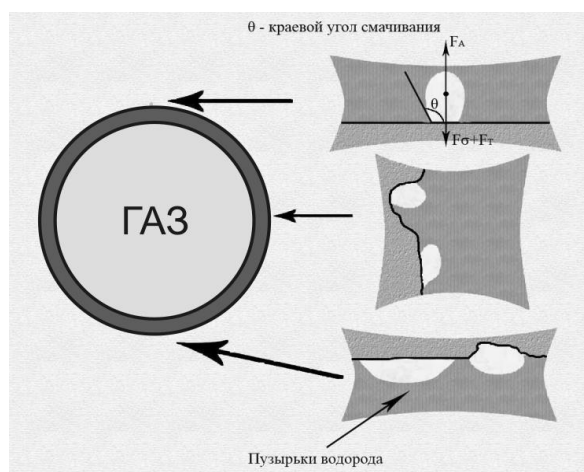


Рисунок 17 – Схема роста пузырьков газа у верхней боковой и нижней образующих трубопровода – А) и схема отделения пузырьков от катодно защищаемой поверхности в зависимости от диаметра трубопровода

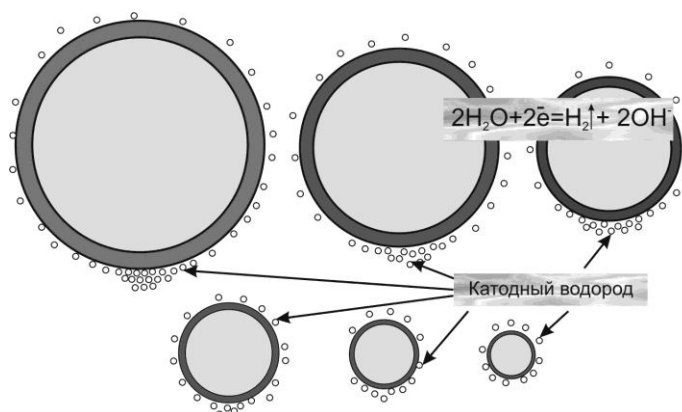


Рисунок 17 – Схема роста пузырьков газа у верхней боковой и нижней образующих трубопровода - Б) при режимах, когда  $j_{кз} \gg j_{пр}$

Прямым подтверждением сказанного является факт отсутствия стесс-коррозионных повреждений на трубопроводах малого диаметра, изготовленных из той же стали, что и трубопроводы большого диаметра.

Отказы по причине КРН трубных сталей происходят только на газопроводах диаметром 1420, 1220, 1020, 820 и 720 мм и никогда на трубопроводах малого диаметра, хотя трубы изготовлены из одинаковых сталей и эксплуатируются практически в одинаковых условиях.

#### **4.1 Анализ режимов катодной защиты на участках аварийных разрушений магистральных нефтегазопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением**

За максимальное время до разрушения вследствие коррозии под напряжением отвечает область поляризационных потенциалов 0,85-1,1 В по м.с.э., когда плотность тока катодной защиты достигает значений плотности предельного тока по кислороду или не более чем в 5-7 раз превышает ее. В области высоких потенциалов катодной защиты, когда  $j_{\text{к.з.}}/j_{\text{пр}} \geq 10$ , происходит интенсивное электролитическое насыщение стенки трубы катодным водородом, способствующим образованию стресс-коррозионных трещин. В таблице 1 приведены значения потенциалов катодной защиты, измеренные на участках аварийных разрушениях газопроводов ООО «Севергазпром» [10]. Данные таблицы 3 свидетельствуют о преимущественном стресс-коррозионном разрушении труб, изготовленных из более высокопрочных сталей. В настоящее время установлено усиление склонности сталей к водородному охрупчиванию под влиянием 0,01...0,001% фосфора, серы и их химических соединений, которые в сталях адсорбируются по границам зерен. Механизм такого воздействия до настоящего времени не ясен. Известно, что углерод в сталях обладает высокой склонностью к межкусталлитной внутренней адсорбции и «конкурирует» на границах зерен с фосфором и серой, ослабляя их охрупчивающее действие.

Межзеренная хрупкость сталей с фосфором и серой вызвана уменьшением внутренней адсорбции этих примесей, что сопровождается снижением когезионной прочности трубных сталей ферритно-перлитного класса.

|      |      |          |         |     |   |         |
|------|------|----------|---------|-----|---|---------|
|      |      |          |         |     | Влияние режимов катодной защиты трубопровода на выделение водорода на внешней катоднозащищенной поверхности | 61 Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |         |
|      |      |          |         |     |   | 60      |

Водородное охрупчивание напряженно-деформированных сталей при электролитическом наводороживании, по нашему мнению, также связано с понижением когезионной прочности, но под влиянием катодного водорода при перезащите, когда  $j_{к.з.}/j_{пр} \geq 10$ . Если фундаментальный механизм действия таков, то охрупчивающее воздействие водорода и примесей фосфора и серы должно суммироваться, по крайней мере, при межзеренном разрушении. Другой возможный механизм водородного охрупчивания сталей трубного сортамента состоит в облегчении пластического течения, снижении критической деформации и потере пластической устойчивости зоны с высокой концентрацией водорода перед вершиной трещины, в зоне предразрушения. В этом случае примеси трубной стали могут повлиять на водородное охрупчивание, воздействуя на предел текучести и деформационное упрочнение твердого раствора внедрения Fe – H, вне всякой связи с их воздействием на когезию. Исследование совместного действия фосфора, серы, углерода и катодного водорода на разрушение трубных сталей сталей ферритно-перлитного класса представляется важным для понимания микромеханизма водородного охрупчивания. Наибольшую информацию о механизме водородного охрупчивания дает изучение кинетики докритического роста трещин, хотя все эксперименты такого рода до настоящего времени проводились на сталях, сложные структуры и фазовый состав которых не могут обеспечить точное решение поставленной задачи определения влияния критерия  $j_{к.з.}/j_{пр}$  на образование стресс-коррозионных трещин в процессе длительной эксплуатации магистральных стальных трубопроводов. Полученный экспериментальный материал позволяет указать интервал значений критерия  $j_{к.з.}/j_{пр}$ , при котором остаточная скорость коррозии катоднозащищаемого трубопровода не превышает допустимых значений при практическом отсутствии электролитического наводороживания стенки трубы.

Потенциал коррозии подземных стальных трубопроводов по мере увеличения влажности различных грунтов (до полного влагонасыщения),

|      |      |          |         |     |   |            |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------|
|      |      |          |         |     | Влияние режимов катодной защиты трубопровода на <sup>62</sup><br>выделение водорода на внешней катоднозащищенной<br>поверхности | Лист<br>61 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |            |

изменяется в пределах от – 0,45 до – 0,68 В по м.с.э. Смещение потенциала коррозии в отрицательную сторону связано с уменьшением аэрируемости грунтов: чем плотнее грунт и чем выше его влажность, тем отрицательнее потенциал коррозии трубной стали. Примерно в этих же пределах изменялась величина потенциала коррозии стали 17ГС в 0,05%-ном растворе NaCl по мере увеличения внутренних напряжений. Смещение потенциала коррозии в отрицательную сторону, по мере возрастания внутренних напряжений, связано с возрастанием электрохимической активности стальных образцов. Следует отметить, что в условиях эксперимента потенциал коррозии стальных образцов после предварительного катодного наводороживания также смещается в отрицательную сторону и зависит как от величины безразмерного критерия  $j_{к.з.}/j_{пр}$ , так и от времени катодной поляризации. В условиях эксперимента, при  $j_{к.з.}/j_{пр}=50-70$ , после предварительной катодной поляризации в течение 72-х час потенциал коррозии сместился в отрицательную сторону на 40-70 мВ, а при  $j_{к.з.}/j_{пр}=100-125$  потенциал коррозии после предварительной катодной поляризации в течение этого же времени смещался практически на 100-120 мВ. Смещение потенциала коррозии стальных образцов после катодного наводороживания в отрицательную сторону по сравнению с потенциалом коррозии этих же образцов до катодного наводороживания связано, по нашему мнению, с возрастанием механических напряжений в структуре образцов, вызванных насыщением кристаллической решетки катодным водородом.

Результаты комплексного обследования коррозионного состояния подземных технологических трубопроводов нефтеперекачивающих и компрессорных станций, а также линейной части магистральных нефтегазопроводов, проложенных в различных грунтах, свидетельствуют о том, что потенциал коррозии, как правило, изменяется в пределах от –0,46 до –0,68 В по м.с.э. Полученная совокупность потенциалов коррозии стальных образцов в различных средах и потенциалов коррозии подземных стальных трубопроводов свидетельствует о том, что потенциал коррозии, в

|      |      |          |         |     |   |            |
|------|------|----------|---------|-----|---|------------|
|      |      |          |         |     | Влияние режимов катодной защиты трубопровода на <sup>63</sup><br>выделение водорода на внешней катоднозащищённой<br>поверхности | Лист<br>62 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |   |            |

исследованных средах, в том числе при различных внутренних напряжениях, практически повсеместно находится в интервале 0,46-0,68 В по м.с.э. Данные об интервале реализации потенциалов коррозии подземных стальных трубопроводов, позволят нам проанализировать режимы катодной защиты, при которых произошли аварии на действующих магистральных газопроводах по причине стресс-коррозионного разрушения, рассчитав величину катодной поляризации  $\Delta\phi$  как разницу между величиной защитного потенциала  $\phi_{защ}$  и минимально и максимально возможным значением потенциала коррозии  $\phi_{корр}$ :  $\Delta\phi = \phi_{защ} - \phi_{корр}$ . Затем, зная величину катодной поляризации, определим степень превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду. Результаты расчета представлены в таблицу 3 [12].

Таблица 3 – Значения защитных потенциалов и расположение СКЗ на участках аварийных разрушений газопроводов по причине стресс-коррозии

| Марка стали | Аварийное разрушение, км | Расстояние от ближайшей СКЗ до места аварии, км | Величина защитного потенциала, В, по м.с.э. |
|-------------|--------------------------|---|---|
| 17Г1С       | 1144                     | 2,5   | Нет данных                                  |
|             | 1120                     | 1   | -1,70                                       |
|             | 1125                     | 8   | -1,58                                       |
|             | 1154                     | 2   | -1,51                                       |
|             | 1133,7                   | 2,7   | -1,65                                       |
|             | 382,9                    | 1,9   | -1,39                                       |
|             | 1105                     | 0   | -1,70                                       |
|             | 912                      | 2   | -1,50                                       |
|             | 948                      | 3   | -1,30                                       |
|             | 1156                     | 4   | -1,35                                       |
|             | 1156,8                   | 3,2   | -1,44                                       |
|             | 1116                     | 2   | -1,48                                       |
| 14Г2САФ     | 1162,6                   | 0,6   | -1,80                                       |
|             | 1165                     | 3   | -1,50                                       |
|             | 1173                     | 2   | -1,55                                       |
|             | 966                      | 4   | -1,45                                       |
|             | 1162,5                   | 0,5   | -1,53                                       |
|             | 969                      | 7   | -1,35                                       |
|             | 1164                     | 2   | -1,50                                       |
| 17Г2СФ      | 465,5                    | 2,5   | -1,85                                       |
|             | 199,7                    | 2,3   | -1,54                                       |
|             | 348                      | 0,5   | -1,90                                       |
|             | 465,5                    | 2,5   | -1,90                                       |



Продолжение таблицы 3

|     |        |     |            |
|-----|--------|-----|------------|
| X70 | 586,35 | 2   | -2,80      |
|     | 1382   | 2   | Нет данных |
|     | 1120   | 1   | Нет данных |
|     | 586,28 | 2   | -2,81      |
|     | 1105   | 0,3 | -2,10      |
|     | 1116   | 3   | -1,72      |
|     | 1122   | 3   | -1,57      |
| X60 | 142    | 3   | -1,40      |
|     | 147    | 2   | -2,35      |
|     | 147    | 2   | -2,20      |

Результаты анализа, приведенные в таблице 3, свидетельствуют о том, что все аварии на действующих газопроводах по причине стресс-коррозионного разрушения произошли при превышении плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду в 12-30 раз и более, когда ранее было показано, что интенсивное выделение водорода на КЗП начинается, когда величина катодной поляризации превышает 250-350 мВ. Это означает, что катодная защита аварийных участков магистральных газопроводов осуществлялась в области значений катодной поляризации, превышающих максимально-допустимые значения в 3-6 раз, когда, как нам известно, на КЗП трубопроводов под воздействием катодного тока идет интенсивная высадка адатомов  $H_{адс}$  водорода. Посадка на КЗП адатомов  $H_{адс}$ , как было показано, приводит к электролитическому наводороживанию стенки трубопровода, что, по нашему мнению, является основной причиной стресс-коррозионного разрушения высоконапорных трубопроводов. Стресс-коррозионные трещины были обнаружены на заболоченных участках трассы, при давлении транспортируемого газа 4,5 МПа, при потенциале катодной защиты – 2,75 В по м.с.э., при значении безразмерного критерия  $j_{к.з}/j_{np}=37$ .

Таблица 4 – Анализ режимов катодной защиты на аварийных разрушениях магистральных газопроводах

| Км ава-<br>рийного<br>разру-<br>шения<br>газопро-<br>вода | Место<br>установки<br>СКЗ, км | Величина<br>защитного<br>потенциала,<br>В, по м.с.э. | Величина<br>катодной<br>поляриза-<br>ции, В | Отношение<br>плотности тока<br>катодной защи-<br>ты к плотности<br>предельного тока<br>по кислороду |
|---|-------------------------------|--|---|---|
| 1144  | 1142,5–1152,1                 | Нет данных   | –   | –   |
| 1120  | 1119–1131                     | 1,7  | <u>1,28–1,02</u><br>1,15                    | 19,17   |
| 1125  | 1119–1131                     | 1,58   | <u>1,16–0,9</u><br>1,03                     | 17,17   |
| 1154  | 1152–1162                     | 1,51   | <u>1,31–0,83</u><br>1,07                    | 17,83   |
| 133,7   | 1131–1142                     | 1,65   | <u>1,23–0,97</u><br>1,1                     | 18,33   |
| 382,9   | 381–387                       | 1,39   | <u>0,97–0,71</u><br>0,84                    | 14,0  |
| 1105  | 1105–1112                     | 1,7  | <u>1,28–1,02</u><br>1,15                    | 19,17   |
| 912   | 910–917                       | 1,5  | <u>1,08–0,82</u><br>0,95                    | 15,83   |
| 948   | 945–962                       | 1,3  | <u>0,88–0,62</u><br>0,75                    | 12,5  |
| 1156  | 1152–1162                     | 1,35   | <u>0,93–0,82</u><br>0,875                   | 14,58   |
| 1156,8  | 1152–1162                     | 1,44   | <u>1,05–0,76</u><br>0,905                   | 15,08   |
| 1116  | 1112–1118                     | 1,48   | <u>1,06–0,8</u><br>0,93                     | 15,5  |
| 1162,6  | 1162–1169                     | 1,8  | <u>1,38–1,12</u><br>1,25                    | 20,83   |
| 1165  | 1162–1169                     | 1,5  | <u>1,08–0,82</u><br>0,95                    | 15,83   |
| 1173  | 1169–1175                     | 1,55   | <u>1,13–0,87</u><br>1,0                     | 16,67   |
| 966   | 962–978                       | 1,45   | <u>1,03–0,77</u><br>0,9                     | 15,0  |

| Км ава-<br>рийного<br>разру-<br>шения<br>газопро-<br>вода | Место<br>установки<br>СКЗ, км | Величина<br>защитного<br>потенциала,<br>В, по м.с.э. | Величина<br>катодной<br>поляриза-<br>ции, В | Отношение<br>плотности тока<br>катодной защи-<br>ты к плотности<br>предельного тока<br>по кислороду |
|---|-------------------------------|--|---|---|
| 1162,5  | 1162–1169                     | 1,53   | <u>1,11–0,85</u><br>0,98                    | 16,33   |
| 969   | 962–978                       | 1,35   | <u>0,93–0,82</u><br>0,875                   | 14,58   |
| 1164  | 1162–1169                     | 1,5  | <u>1,08–0,82</u><br>0,95                    | 15,83   |
| 465,5   | 463–470                       | 1,85   | <u>1,43–1,17</u><br>1,3                     | 21,67   |
| 199,7   | 191–202                       | 1,54   | <u>1,12–0,86</u><br>0,98                    | 16,33   |
| 348   | 342–349                       | 1,9  | <u>1,48–1,22</u><br>1,35                    | 22,5  |
| 465,5   | 463–470                       | 1,9  | <u>1,48–1,22</u><br>1,35                    | 22,5  |
| 586,35  | 584–596                       | 1,8  | <u>1,38–1,12</u><br>1,25                    | 20,83   |
| 1382  | 1371,5–1384                   | Нет данных   | –   | –   |
| 1120  | 1119–1131                     | Нет данных   | –   | –   |
| 586,28  | 584–596                       | 2,81   | <u>2,39–2,13</u><br>2,26                    | 37,67   |
| 1105  | 1105–1113                     | 2,1  | <u>1,68–1,42</u><br>1,55                    | 25,83   |
| 1116  | 1112–1119                     | 1,72   | <u>1,3–1,04</u><br>1,17                     | 19,5  |
| 1122  | 1119–1131                     | 1,57   | <u>1,15–0,82</u><br>0,985                   | 16,47   |
| 142   | 129–145                       | 1,4  | <u>0,98–0,72</u><br>0,85                    | 14,17   |
| 147   | 145–156                       | 2,35   | <u>1,93–1,67</u><br>1,8                     | 30,0  |
| 147   | 145–156                       | 2,2  | <u>1,78–1,52</u><br>1,65                    | 27,5  |

## 5. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ КРИТЕРИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДА ИСКЛЮЧАЮЩИЙ ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА И НАВОДОРОЖИВАНИЕ

На рисунке 18 представлены потенциостатические катодные поляризационные кривые, снятые на рабочем электроде из трубной стали 17Г1С в торфяном грунте с влажностью 180%. Анализ хода кривых свидетельствует о том, что при возрастании потенциала катодной защиты от потенциала коррозии  $\varphi_{кор} = -0,52$  В по м.с.э. до величины защитного потенциала  $\varphi_{защ} = -0,67$  В по м.с.э. (при возрастании критерия  $j_{к.з.}/j_{np}$  от 0 до 1,0), на защищаемой поверхности протекают два процесса: электровосстановление кислорода и коррозия стального образца, причем скорость первой реакции соответственно возрастает, второй – уменьшается.

При достижении потенциала катодной защиты – 0,67 В по м.с.э. величина защитного тока стабилизируется и остается практически постоянной, несмотря на увеличение защитного потенциала до –0,85 В по м.с.э. В области этих защитных потенциалов плотность защитного тока достигает значений предельного тока кислорода, когда концентрация кислорода на поверхности потенциостатируемого стального катода в грунте равна нулю.

При увеличении потенциала катодной защиты отрицательнее – 0,85В по м.с. э. (при условии, когда  $j_{к.з.}/j_{np} \geq 10$ ), наблюдается резкое увеличение защитного тока, что связано с началом протекания реакции катодного разложения воды с посадкой на защищаемой поверхности  $H_{адс}$ , наводороживающих структуру стали, что подтверждается выводами работ. При этом наблюдается незначительный прирост защитного эффекта, менее 10-12%. Незначительный прирост защитного эффекта связан с тем, что

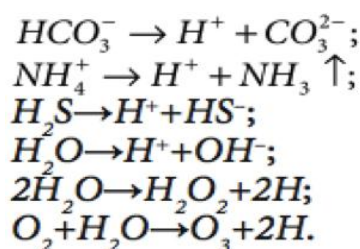
|           |      |                |         |     |  |                             |      |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|-----------------------------|------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |                             |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |                             |      |        |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Предлагаемый критерии катодной защиты трубопровода исключающий выделение водорода и наводороживания                            | Лит.                        | Лист | Листов |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |                             | 67   |        |
| Консульт. |      |                |         |     |  | ТПУ гр. 2БМ4Б <sup>68</sup> |      |        |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |                             |      |        |
|           |      |                |         |     |  |                             |      |        |

потенциал катодной защиты достиг потенциала разложения воды, и на фоне резкого возрастания плотности защитного тока на защищаемой поверхности идет совместное электровосстановление кислорода:  $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$  (менее 20%) и разложения воды:  $2H_2O + 2e \rightarrow 2H_{адс} \uparrow + 2OH^-$  (более 80%).

Результаты коррозионных испытаний свидетельствуют о том, что протекание второй реакции не оказывает влияния на подавление коррозионного процесса и на увеличение защитного эффекта, несмотря на существенный рост защитного тока (рисунки 19 и 20).

Увеличение защитного тока может быть связано и с восстановлением содержащихся в почвенном электролите свободных ионов водорода.

Свободные ионы водорода на защищаемой поверхности могут образовываться под влиянием поля катодной защиты за счет разложения различных химических соединений, содержащихся в почвенном электролите по реакциям:



т (12)

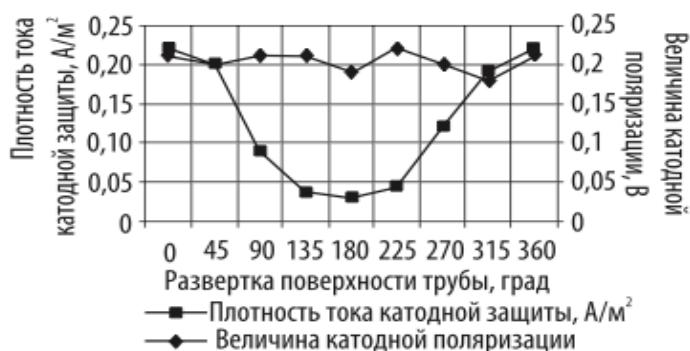


Рисунок 19 – Распределение плотности тока катодной защиты и величины катодной поляризации по окружности трубопровода Ду 1220 мм;



Рисунок 20 – Зависимость величины катодной поляризации от соотношения

$$j_{к.з.}/j_{пр}$$

Валентно-ненасыщенные частицы (радикалы), образовавшиеся по реакциям (12) обладают повышенной реакционной способностью. Кроме того, сам по себе ток катодной защиты ведет себя как сильнейший окислитель (на анодном заземлении) и сильнейший восстановитель на КЗП трубопровода, более сильный, чем, например, перекись водорода. Образовавшиеся ионы водорода, обладая большой подвижностью, восстанавливаются (происходит освобождение протонов от сольватных связей и присоединение к КЗП с одновременной их электронейтрализацией)  $H^{+} + e \rightarrow H_{адс}$  и частичной последующей рекомбинацией:  $H_{адс} + H_{адс} \rightarrow H_2$  на КЗП, в дефектах структуры трубной стали, на внутренней поверхности трубы.

Было установлено, что максимальная глубина проникновения коррозии на образцах из трубной стали  $K_{корр}$  находится в пропорциональной зависимости от плотности предельного тока кислорода, измеренной в толще грунта на уровне укладки образцов:

$$K_{корр} = A_{jnp} + B \dots \dots \dots (13)$$

Прямая, в зависимости от внутренних напряжений в образце, отсекает от оси ординат отрезки:  $B = (0,01 \dots 0,015)$ , что свидетельствует о том, что в

отсутствие кислорода скорость коррозии трубной стали, обусловленная действием других деполяризаторов, в исследуемых грунтах центральной части Западной Сибири не превышает  $K_{корр} \approx 0,01...0,015$  мм/год. Сопоставление плотности тока коррозии в язвах с максимальной глубиной с плотностью предельного тока по кислороду свидетельствует о том, что плотность тока коррозии на образцах при отсутствии внутренних напряжений составляет:  $= 0,37j_{пр}$ ; при внутреннем напряжении, равном  $0,6\sigma_{0,2}$  – соответственно  $=0,5125j_{пр}$ ; при внутреннем напряжении  $0,95\sigma_{0,2}$  –  $= 0,775j_{пр}$ . То есть по мере увеличения внутренних напряжений максимальная тока коррозии приближается к плотности предельного тока по кислороду, но не превышает ее.

Таблица 5 - Изменение коэффициентов А и В при возрастании напряжений в стальных образцах из стали 17ГС

| Коэффициенты | Внутренние механические напряжения в стальном образце |                   |                    |
|--------------|---|-------------------|--------------------|
|              | 0   | $0,6\sigma_{0,2}$ | $0,95\sigma_{0,2}$ |
| А            | 0,18  | 0,36              | 0,58               |
| В            | 0,01  | 0,013             | 0,015              |

Расчет режимов катодной защиты в зависимости от максимально возможной в данных условиях плотности тока коррозии, определяемой плотностью предельного тока по кислороду, измеряемой на уровне укладки подземного стального трубопровода, представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Плотность тока катодной защиты для стали в различных средах



| Состав среды, концентрация электролита, условия защиты | Плотность тока катодной защиты, А/м <sup>2</sup> | Плотность предельного тока по кислороду, А/м <sup>2</sup>           |
|--|--|---|
| Грунт различной влажности                              | 0,1  | В песке с влажностью 18% – 0,12;<br>в торфе с влажностью 90% – 0,08 |
| 0,0002...0,6% NaCl                                     | 0,106  | 0,095   |
| 3% NaCl  | 0,13   | 0,12  |
| Подтоварная вода                                       | 0,14   | Подтоварная вода<br>Самотлорского<br>НМ – 0,13                      |
| Морская вода   | 0,17   | –   |
| Речная вода, при 100°C                                 | 0,2...0,4  | 0,16  |
| Грунт 15%-ной влажности                                | 0,3...0,5  | –   |
| Грунт 15%-ной влажности + 0,5% NaCl                    | 0,4...0,5  | –   |

Для подавления коррозионного процесса подземных стальных трубопроводов до значений, не превышающих 0,01 мм/год, необходимо, чтобы отношение плотности тока катодной защиты к плотности предельного тока по кислороду составляло 2,3. Действительно,  $0,01 = 0,1 / (j_{к.з.} / j_{пр})$ , отсюда  $j_{к.з.} / j_{пр} = 2,3$ . При плотности предельного тока по кислороду 0,1 А/м<sup>2</sup> необходимая плотность тока катодной защиты, подавляющая скорость коррозии трубопровода от 0,1 мм/год до 0,01 мм/год, должна быть 0,23 А/м<sup>2</sup>. При этой плотности тока катодной защиты практически исключено электролитическое наводороживание стенки подземного стального трубопровода. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что во всех исследованных грунтах площадка предельного тока по кислороду реализуется при смещении потенциала коррозии в катодную область на 200-250 мВ.



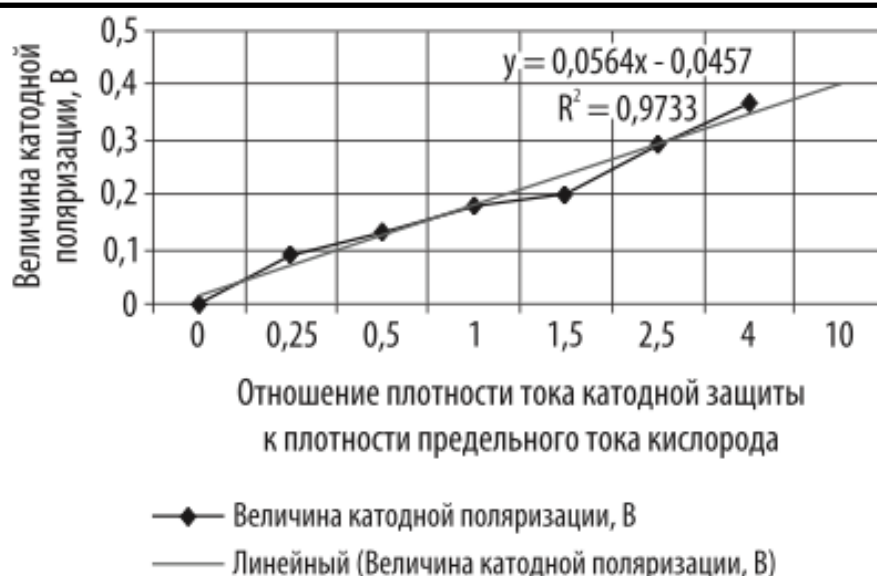


Рисунок 25 – Экспериментальная зависимость величины катодной поляризации  $\Delta\phi$  от соотношения  $j_{к.з.}/j_{пр}$

Экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных и полевых условиях, свидетельствуют о том, что в глинистых и торфяных грунтах величина катодной поляризации, в зависимости от значения безразмерного критерия  $K_{к.з.} = j_{защ}/j_{пр}$ , достаточно надежно описывается уравнением концентрационной поляризации в следующем виде:

$$\Delta\phi \approx \frac{RT}{4F} \cdot \frac{j_{к.з.}}{j_{пр}}. \quad (14)$$

При этом следует подчеркнуть, что в грунтах, в отличие от электролитов со свободной конвекцией, между величиной катодной поляризации до 0,35В и отношением  $j_{защ}/j_{пр}$  существует линейная зависимость, что подтверждается также и результатами лабораторных экспериментальных исследований представленных на рисунке 25.

Рассчитанные по уравнению (14), при коэффициенте пропорциональности, равном 0,059В, значения катодной поляризации при рекомендуемых отношениях плотности тока катодной защиты к плотности предельного тока по кислороду свидетельствуют о том, что величина катодной поляризации не превышает 250-300 мВ, когда плотность тока

катодной защиты превышает плотность предельного тока по кислороду в 3-5 раз. Как видно из таблицы 7, рассчитанные и экспериментальные величины катодной поляризации достаточно близки друг другу, что подтверждает природу катодной поляризации, вызванной диффузионными ограничениями доставки электрохимически активных компонентов почвенного электролита (преимущественно кислорода) к поверхности потенциостатируемых катодов (сквозных дефектов изоляции), находящихся на трубопроводе в различных условиях доставки кислорода. Когда безразмерный критерий ( $K_{к.з.} = j_{к.з.}/j_{пр}$ ) достигает значений 8-10, линейная зависимость (14) нарушается, так как на КЗП начинает интенсивно протекать следующая электродная реакция – реакция выделения водорода, не связанная с подавлением коррозионного процесса. Значение коэффициента пропорциональности в уравнении (14), определенное на основе экспериментальных результатов, составило 0,0593 В. Полученный результат свидетельствует о том, что относительная погрешность между экспериментальным и теоретическим значением не превышает 1,0%.

Таблица 7 - Значения величины катодной поляризации при различных соотношениях между плотностью тока катодной защиты и плотностью предельного тока по кислороду.

| Значение критерия $j_{к.з.}/j_{пр}$         | 3,4    | 4,4    | 5,0   | 5,7    | 6,2    |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|
| Рассчитанные значения $\Delta\phi$ , В      | 0,2006 | 0,2596 | 0,295 | 0,3363 | 0,3658 |
| Экспериментальные значения $\Delta\phi$ , В | 0,24   | 0,26   | 0,28  | 0,32   | 0,37   |

Когда плотность тока катодной защиты превышает плотность предельного тока по кислороду в 3 – 5 раз, величина катодной поляризации составляет 0,2 – 0,3В. В этом случае, как было показано выше, концентрация кислорода на защищаемой поверхности равна нулю и катодная защита подавляет течение коррозионного процесса до значений остаточной скорости коррозии, не превышающей 0,005 – 0,008 мм/год. С другой стороны, при этих значениях катодной поляризации, как и при соответствующих им соотношениях между плотностью тока катодной защиты и плотностью

предельного тока по кислороду, на КЗП не происходит заметного выделения водорода. Полученная совокупность экспериментальных результатов позволяет рекомендовать критерий  $K_{к.з.} = j_{к.з.}/j_{np}$  для практической реализации, позволяющей количественно контролировать образование коррозионных дефектов, когда  $j_{к.з.}/j_{np} < 1$ , и интенсивность электролитического наводороживания трубных сталей, когда  $j_{к.з.}/j_{np} > 7 \dots 10$ .

Сопоставляя необходимую плотность тока катодной защиты для подавления скорости коррозии трубной стали до значений, не превышающих 0,007 мм/год, с максимальной возможной плотностью коррозионного тока (плотностью предельного тока по кислороду), мы видим, что чем больше плотность коррозионного тока в отсутствии катодной защиты, тем большая плотность тока катодной защиты требуется для ее подавления.

Таблица 8 – Рекомендуемые значения безразмерного критерия катодной защиты, при которых остаточная скорость коррозии трубных сталей не превышает 0,007 мм/год

| Плотность предельного тока по кислороду, измеренная в толще грунта, А/м <sup>2</sup> | Величина безразмерного критерия $j_{заш}/j_{np}$ | Необходимая плотность тока катодной защиты, А/м <sup>2</sup> | Величина защитного эффекта, % | Коэффициент полезного использования тока катодной защиты, % |
|--|--|--|-------------------------------|---|
| 0,03   | 1,5  | 0,045  | 76,67                         | 66,7  |
| 0,05   | 2  | 0,1  | 86,0                          | 50,0  |
| 0,08   | 2,5  | 0,2  | 87,5                          | 40,0  |
| 0,1  | 2,7  | 0,27   | 90,0                          | 37,0  |
| 0,15   | 3,1  | 0,47   | 91,2                          | 32,0  |
| 0,2  | 3,4  | 0,68   | 96,5                          | 29,4  |
| 0,3  | 3,8  | 1,14   | 97,7                          | 26,3  |
| 0,5  | 4,2  | 2,15   | 98,6                          | 23,2  |
| 0,6  | 4,4  | 2,64   | 98,83                         | 22,7  |

Полученные данные свидетельствуют о том, что в условиях коррозии трубных сталей с кислородной деполяризацией для надежного подавления коррозионного процесса, когда остаточная скорость коррозии не превышает 0,007 мм/год, необходимо, чтобы плотность тока катодной защиты превышала плотность предельного тока по кислороду, в зависимости от начальной скорости коррозии трубной стали в отсутствии катодной защиты, в

1,5 – 3 раза.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в таблице 8, свидетельствуют о том, что по мере возрастания начальной скорости коррозии образцов из трубной стали от 0,03 мм/год до 0,6 мм/год, для надежного подавления коррозии (до значений остаточной скорости коррозии, не превышающей 0,007 мм/год) необходимо увеличивать плотность тока катодной защиты от 0,045 А/м<sup>2</sup> до 2,64 А/м<sup>2</sup> при одновременном увеличении защитного эффекта от 76,67% до 98,83%. По мере увеличения защитного эффекта коэффициент полезного использования тока катодной защиты снижается от 66,7% до 22,7%, что свидетельствует о начале выделения водорода на КЗП. Как было показано выше, дальнейшее увеличение плотности тока катодной защиты практически бесполезно, так как не приводит к дальнейшему уменьшению скорости коррозии (менее 0,007 мм/год), но приводит к увеличению степени заполнения КЗП атомами водорода Н<sub>адс</sub>. В связи с этим, на основе полученных экспериментальных результатов, к применению на практике могут быть рекомендованы режимы катодной защиты подземных стальных трубопроводов, с одной стороны подавляющее течение коррозионных процессов до значений, не превышающих 0,007 мм/год вне зависимости от начальной скорости коррозии, с другой – практически исключаящие электролитическое наводороживание приповерхностной зоны стенки подземных трубопроводов в процессе их длительной эксплуатации при транспорте нефти и газа.

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

Предлагаемый критерии катодной защиты  
трубопровода исключаящий выделение водорода и  
наводороживания

## 6. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### Расчет катодной защиты трубопровода.

Основным расчетным параметром является средняя плотность защитного тока  $j_{cp}$  – отношение силы тока катодной станции  $I$  к суммарной наружной поверхности трубопроводов, защищаемых данной станцией.

Если проектируемые трубопроводы будут иметь соединения с действующими сооружениями, оборудованными установками ЭХЗ, необходимо расчетным путем проверить возможность защиты проектируемых трубопроводов действующими установками ЭХЗ.

Исходными данными для расчета катодной защиты проектируемых трубопроводов являются их параметры и среднее удельное сопротивление грунта на территории вдоль трасс проектируемых трубопроводов.

Площадь поверхности  $S_r$  (м<sup>2</sup>) всех газопроводов, которые электрически контактируют между собой за счет технологических соединений или специальных перемычек, определяют по формуле:

$$S_r = \pi \sum d_{ir}^n I_{ir} \cdot 10^{-3}, \quad (16)$$

где  $d_{ir}$  - диаметр (мм);

$I_{ir}$  - длина (м) участка газопровода, имеющего диаметр  $d_{ir}$ ;

$n$  - общее число соответствующих участков газопровода.

Площадь поверхности всех водопроводов  $S_e$  (м<sup>2</sup>), которые электрически контактируют между собой за счет технологических соединений или специальных перемычек, определяют по формуле:

$$S_e = \pi \sum d_{iB}^n I_{iB} \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где  $d_{iB}$  - диаметр (мм);

$I_{iB}$  - длина (м) участка водопровода, имеющего диаметр  $d_{iB}$ ;

$m$  - общее число соответствующих участков водопровода.

Суммарная площадь поверхности  $S$  (м<sup>2</sup>) всех электрически связанных газопроводов и водопроводов равна:

$$S = S_r + S_e, \quad (18)$$

Среднее удельное сопротивление грунта  $r$  (Ом·м) вдоль трасс проектируемых трубопроводов определяется по формуле:

$$\rho = (\sum_{i=1}^n \rho_{ir} I_{ir} + \sum_{i=1}^m \rho_{iB} I_{iB}) / (L_r + L_B), \quad (19)$$

где:  $r_{i2}$  и  $r_{i6}$  - средние удельные сопротивления грунта (Ом·м) вдоль длины соответственно  $I_{i2}$  - каждого  $i$ -го участка газопровода и  $I_{i6}$  - каждого  $i$ -го участка водопровода;

$L_2$  и  $L_6$  - суммарные длины газопроводов и водопроводов на данной территории.

Вычисляется доля (%) площади поверхности газопроводов  $a_2$  и водопроводов  $a_6$  в суммарной площади их поверхностей:

$$a_2 = (S_2/S) \cdot 100 \quad (20)$$

$$a_6 = (S_6/S) \cdot 100 \quad (21)$$

Вычисляется площадь поверхности (м<sup>2</sup>/га) газопроводов  $b_2$  и водопроводов  $b_6$ , приходящаяся на единицу площади территории  $S_{тер}$  (га), где размещены проектируемые трубопроводы:

$$b_2 = (S_2/S_{тер}) \quad (22)$$

$$b_6 = (S_6/S_{тер}) \quad (23)$$

Средняя плотность защитного тока для всех трубопроводов  $j$  (мА/м<sup>2</sup>) вычисляется по уравнению:

$$j = 30 - 10^{-3} (100 + 3,0 b_6 + 34b_2 + 5r) \quad (24)$$

При отсутствии водопроводов средняя защитная плотность тока газопроводов вычисляется по уравнению:

$$j_2 = 20 + 10^{-3} (100 - 34b_2 + 5r) \quad (25)$$

Если расчетное значение  $j$  или  $j_2$  меньше 6 мА/м<sup>2</sup>, принимается  $j = 6$  мА/м<sup>2</sup>.

Суммарная сила тока (А), необходимого для катодной защиты проектируемых газо- и водопроводов, определяется по формуле:

$$J = 1,3 \cdot 10^{-3} jS, \quad (26)$$

Для защиты только сети газопроводов – по формуле:

$$J_2 = 1,3 \cdot 10^{-3} j_2 S_2, \quad (27)$$

Число катодных станций определяют из условий оптимального размещения анодных заземлителей, наличия источников питания и т.д. При этом значение тока одной катодной станции можно ориентировочно принять равным 25 А. Поэтому число катодных станций приближенно равно  $n = J/25$ , где  $J = J$  или  $J_z$ .

После размещения катодных станций на совмещенном плане необходимо рассчитать зону действия каждой из них. Для этой цели определяют радиус действия  $R_i$  (м) каждой катодной станции

$$R_i = 60\sqrt{J/jK}, \quad (28)$$

где:  $j$  – катодная плотность тока (А/м<sup>2</sup>), определенная по формуле (24) или (25),

$K$  (м<sup>2</sup>/га) - площадь поверхности всех трубопроводов на единицу площади поверхности территории:

$$K = S \text{ (м}^2\text{)} / S_{тер} \text{ (га)} \quad (29)$$

Если площади кругов, радиусы действия каждого из которых равны  $R_i$ , а центры находятся в точках размещения анодных заземлителей, не охватывают всей территории  $S_{тер}$ , необходимо изменить или места расположения катодных станций, или их токи и вновь выполнить проверку.

Тип преобразователя катодной станции выбирается так, чтобы допустимое напряжение было на 30% выше расчетного с учетом старения изоляционных покрытий и анодных заземлителей, а также возможного развития сети трубопроводов.

#### *Расчет катодной защиты.*

1. Пусть на территории площадью 5 га после завершения строительства будут размещен трубопровод диаметром и длиной соответственно  $d=108$  мм  $l=1200$ м

2. Определяем площадь поверхности трубопровода:

$$S_z = 3,14 \cdot 10^{-3} (108 \cdot 1200) = 407 \text{ м}^2,$$

3. Принимаем среднее удельное сопротивление грунта 42 Ом·м

4. Вычисляем доли площади поверхности трубопроводов:

$$a = (407/407) \cdot 100 = 100 \%$$

5. Вычисляем коэффициенты  $b$ :

$$b = 407 / 5 = 81,4 \text{ м}^2/\text{га}$$

6. Вычисляем среднюю плотность защитного тока:

$$j_z = 20 + 10^{-3} (100 - 34 \cdot 81,4 + 5 \cdot 42) = 17,54 \text{ мА/м}^2$$

7. Вычисляем суммарную силу защитного тока:

$$J = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 17,54 \cdot 407 = 9,28 \text{ А}$$

8. Принимаем катодную станцию марки МКЗ-М12 со следующими характеристиками:

- Номинальный ток: 15 А.
- Номинальное выходное напряжение: 24 В.
- Технический ресурс: 100 тыс.ч.
- Срок службы: не менее 20 лет.
- КПД: не менее 0,85.
- Масса: 38 кг.

9. Вычисляем коэффициент  $K$  по формуле:

$$K = (407/5) = 81,4 \text{ м}^2/\text{га}$$

10. Радиус действия катодной станции:

$$R = 60 \cdot \sqrt{(9,28 / (17,54 \cdot 81,5 \cdot 0,001))} = 152 \text{ м}$$

Катодная станция охватывает всю территорию размещения проектируемых трубопроводов (7,25 га). Следовательно, изменять число катодных станций и их расположение не нужно.

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

Расчетная часть.



## 7. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 7.1. Потребители результатов исследования

Продукт (результат НИР) – Разработка более эффективного метода обнаружения возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации трубопроводов на примере ОАО «Томскнефть» ВНК с экономическим обоснованием.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. Для данного проекта целевым рынком являются нефтегазодобывающие предприятия.

### 7.2. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 9 – Матрица SWOT

|   |   |  |
|---|---|--|
|   | <b>Сильные стороны проекта:</b><br>С1. Экологическая целесообразность метода<br>С2. Более эффективен по сравнению с другими методами<br>С3. Наличие бюджетного финансирования<br>С4. Квалифицированный персонал   | <b>Слабые стороны проекта:</b><br>Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки<br>Сл2. Нет некоторых данных для достоверности методики |
| <b>Возможности:</b><br>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ<br>В2. Появление спроса на реализованный проект | 1. Разработка нового, более эффективного метода обнаружения возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации трубопроводов<br>2. Продолжение научных исследований с целью | 1. Разработка научного исследования<br>2. Приобретение необходимого программного продукта  |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | внедрения и<br>усовершенствования<br>метода  |   |
| <b>Угрозы:</b><br>У1. Введение<br>дополнительных<br>технических<br>требований заказчика к<br>модели метода<br>У2. Введение<br>дополнительных<br>государственных<br>требований к<br>сертификации<br>продукции | 1.Продвижение новой<br>технологии с целью<br>появления спроса<br>2.Сертификация<br>продукции | 1.Разработка научного<br>исследования<br>2.Приобретение необходимого<br>программного продукта<br>3.Продвижение новой методики<br>с целью появления спроса |

### 7.3. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Результаты анализа степени готовности приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

| №<br>п/п | Наименование   | Степень<br>проработанности<br>научного проекта | Уровень имеющихся<br>знаний у<br>разработчика |
|----------|--|--|---|
| 1        | Определен имеющийся научно-технический задел                                     | 4  | 3   |
| 2        | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела | 4  | 3   |
| 3        | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке        | 5  | 4   |
| 4        | Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок  | 4  | 3   |
| 5        | Определены авторы и осуществлена охрана их прав                                  | 3  | 3   |
| 6        | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности                        | 2  | 4   |

|    |   |           |           |
|----|---|-----------|-----------|
| 7  | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта                                 | 2         | 2         |
| 8  | Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки                        | 3         | 4         |
| 9  | Определены пути продвижения научной разработки на рынок                           | 3         | 3         |
| 10 | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки                       | 3         | 3         |
| 11 | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок    | 1         | 2         |
| 12 | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 2         | 2         |
| 13 | Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки            | 2         | 3         |
| 14 | Имеется команда для коммерциализации научной разработки                           | 2         | 3         |
| 15 | Проработан механизм реализации научного проекта                                   | 2         | 4         |
|    | <b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>   | <b>42</b> | <b>46</b> |

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i \quad (30)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;  $B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Значение степени проработанности научного проекта составило 42, что говорит о средней перспективности, а знания разработчика достаточны для успешной ее коммерциализации. Значение уровня имеющихся знаний у разработчика составило 46 – перспективность выше среднего.

По результатам оценки можно сказать, что в первую очередь необходимо проработать вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот. Следующими задачами будет проработка вопросов финансирования коммерциализации научной разработки и поиск команды для коммерциализации научной разработки. Что касается вопросов

международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок: такие задачи на данный момент не ставятся.

#### 7.4. Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Информация об организационной структуре представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Рабочая группа проекта

| № п/п | ФИО, основное место работы, должность                     | Роль в проекте (функции)                     | Трудозатраты, дни |
|-------|---|--|-------------------|
| 1     | Веревкин А.В., к.т.н. доцент, руководитель проекта        | Координирует деятельность участников проекта | 70                |
| 2     | Гончаров Евгений Андреевич, НИ ТПУ, кафедра ТХНГ, Магистр | Выполняет отдельные работы по проекту        | 100               |
| ИТОГО |   |  | 170               |

- *Руководитель проекта* – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.

- *Исполнитель по проекту* – исполнителем проекта является магистрант. В случае, если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

##### 1.4.1. План проекта






В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевые графики проекта. Линейный график представлен в виде таблицы 12.

Таблица 12 – Календарный план проекта

| Код работы    | Название  | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей) |
|---------------|---|-------------------|-------------------|----------------------|--|
| 1             | Введение  | 5                 | 03.02.2015        | 07.02.16             | Гончаров Е.А.<br>Веревкин А.В.                     |
| 2             | Постановка задачи и целей исследования, актуальность, научная новизна | 10                | 08.02.2015        | 17.02.16             | Гончаров Е.А.<br>Веревкин А.В.                     |
| 3             | Литературный обзор  | 15                | 18.02.2015        | 05.03.16             | Гончаров Е.А..                                     |
| 4             | Экспериментальная часть   | 35                | 06.03.2015        | 10.04.16             | Гончаров Е.А.<br>Веревкин А.В.                     |
| 5             | Результаты и обсуждения   | 20                | 11.04.2015        | 1.05.16              | Гончаров Е.А.<br>Веревкин А.В.                     |
| 6             | Оформление пояснительной записки                                      | 15                | 02.05.2015        | 16.05.16             | Гончаров Е.А.                                      |
| <b>Итого:</b> |   | <b>100</b>        |                   |                      |  |

Для иллюстрации календарного плана проекта приведена диаграмма Ганта, на которой работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства отображения каждый месяц разделен на декады.

Таблица 13 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

| Вид работ   | Исполнители          | Т <sub>к</sub> , р. дн. | Продолжительность выполнения работ  |   |  |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
|---|----------------------|-------------------------|---|---|--|------|---|---|--------|---|---|-----|---|---|
|   |                      |                         | февраль   |   |  | март |   |   | апрель |   |   | май |   |   |
|   |                      |                         | 1   | 2   | 3  | 1    | 2 | 3 | 1      | 2 | 3 | 1   | 2 | 3 |
| Введение  | Магистр Руководитель | 5                       |  |  |  |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| Постановка задачи и целей исследования, актуальность, научная новизна | Магистр Руководитель | 10                      |   |  |   |      |   |   |        |   |   |     |   |   |
| Литературный обзор  | Магистр              | 15                      |   |   |  |      |   |   |        |   |   |     |   |   |

|  |                                   |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|-----------------------------------|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Эксперименталь-<br>ная часть           | Магистр<br>Мастер<br>Руководитель | 35 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Результаты и<br>обсуждения             | Магистр                           | 20 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Оформление<br>пояснительной<br>записки | Магистр                           | 15 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

#### 7.4.2. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. Многие из материалов уже находились в лаборатории, поэтому в статьях отражены малые расходы. Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам.

Таблица 14 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| №<br>п/п            | Наименование затрат                                | Единица<br>измерений | Расход | Цена за<br>единицу с<br>учетом НДС,<br>руб | Сумма, руб   |
|---------------------|--|----------------------|--------|--|--------------|
| 1                   | Индикатор (датчик)<br>наводороживания ДН-1         | шт                   | 1      | 6952                                       | 6952         |
| 2                   | Индикатор<br>коррозионных<br>процессов ИКП 10-012М | шт                   | 1      | 9440                                       | 9440         |
| 3                   | Блок пластин-<br>индикаторов БПИ-2                 | шт                   | 5      | 944  | 4720         |
| Всего за материалы: |  |                      |        |  | <b>21112</b> |

Итого затраты на сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты составили 21 112 руб.

Далее представлена таблица, в которой представлены затраты на спецоборудование для научных работ.

Таблица 15 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

| Наименование оборудования | Кол-во единиц<br>оборудования | Цена единицы оборудования, руб. |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Ноутбук HP                | 1                             | 32000                           |
| Толщиномер ультразвуковой | 1                             | 26500                           |
| микроамперметр            |                               | 810                             |

ИТОГО:

59310

Следующей статьей расходов является плата за электроэнергию. Для этого сначала определяется количество потребляемой энергии для всего оборудования.

Таблица 16 – Количество потребляемой электроэнергии оборудованием

| Наименование оборудования | Количество единиц оборудования | Потребляемая мощность, кВт/ч | Количество часов работы в сутки | Количество потребляемой энергии за сутки, кВт |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| Ноутбук                   | 1                              | 0,09                         | 8                               | 0,72  |

Затем необходимо определить стоимость электроэнергии за рабочий период (при стоимости 2,05 руб. за кВт/час).

Таблица 17 – Расчет стоимости электроэнергии с февраля по май

| Месяц         | Количество дней | Количество рабочих дней | Количество потребляемой энергии за месяц, кВт | Стоимость электроэнергии за месяц, руб (при 2,05 руб. за кВт/час) |
|---------------|-----------------|-------------------------|---|---|
| Февраль       | 28              | 20                      | 14,4  | 29,52   |
| Март          | 31              | 22                      | 15,84   | 32,47   |
| Апрель        | 30              | 22                      | 15,84   | 32,47   |
| Май           | 15              | 8                       | 5,76  | 11,8  |
| <b>ИТОГО:</b> |                 |                         |   | <b>106,26</b>   |

Затраты на электроэнергию за четыре месяца, а именно, с февраля по май составили 106,26 рублей.

Далее представлен расчет основной заработной платы. В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в таблице 20.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) находится по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{м}} \cdot T_{\text{раб}} \quad (31)$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, месяцев;

$З_{\text{м}}$  – месячный оклад работника, руб.

Таблица 18 – Баланс рабочего времени за 2015 год

| Показатели рабочего времени                  | Руководитель | Магистр | Мастер |
|--|--------------|---------|--------|
| Календарное число дней                       | 365          | 365     | 365    |
| Количество нерабочих дней                    |              |         |        |
| - выходные дни                               | 118          | 118     | 118    |
| - праздничные дни                            |              |         |        |
| Потери рабочего времени                      |              |         |        |
| - отпуск                                     | 24           | 24      | 24     |
| - невыходы по болезни                        |              |         |        |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 223          | 223     | 223    |

Таблица 19 – Расчет командировочных расходов

| Направление | Количество человек | Количество средств за поездку, руб |
|-------------|--------------------|------------------------------------|
| Туда        | 1                  | 7500                               |
| Обратно     | 1                  | 7500                               |
|             |                    | <b>ИТОГО: 15000</b>                |

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}} \quad (32)$$

где  $З_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,7 (для п. Лугинецкое).

Основная заработная плата руководителя (от НИ ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в НИ ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) Оклад – определяется предприятием. В НИ ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями. Базовый оклад  $З_{\text{б}}$  определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.



2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) Иные выплаты; районный коэффициент.

Найдем основную заработную плату за период с февраля по май 2015 года для руководителя:

$$З_{\text{м}} = 30156,79 \cdot 1,3 = 39\,203,82 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{осн}} = 39\,203,82 \cdot 4 = 156\,815,30 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Расчёт основной заработной платы с февраля по май

| Исполнители             | $З_{\text{б}},$<br>руб. | $k_{\text{р}}$ | $З_{\text{м}},$<br>руб | $З_{\text{осн}},$<br>руб. |
|-------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|---------------------------|
| Руководитель            | 30156,79                | 1,3            | 39203,82               | 156815,30                 |
| Магистр                 | 12110,1                 | 1,7            | 20587,17               | 82348,68                  |
| Мастер                  | 33128,72                | 1,7            | 56318,82               | 225275,29                 |
| <b>Итого: 464439,27</b> |                         |                |                        |                           |

Отчисления на социальные нужды включают в себя страховые взносы во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (33)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), равный 30,5%.

Таблица 21 – Страховые взносы

|                         | Руководитель | Магистр  | Мастер    |
|-------------------------|--------------|----------|-----------|
| Зарплата                | 156815,30    | 82348,68 | 225275,29 |
| Страховые взносы        | 47828,66     | 25116,34 | 68708,96  |
| <b>Итого: 141653,96</b> |              |          |           |

В процессе расчета бюджета научного исследования, планируемые затраты следует сгруппировать по статьям, представленным в таблице 22.

Таблица 22 – Группировка затрат по статьям

|  |          |
|--|----------|
| Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты | 21112,00 |
| Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ   | 59310,00 |
| Стоимость электроэнергии   | 106,26   |

89

|                                |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| Дорожные расходы               | 15000,00          |
| Основная заработная плата      | 464439,27         |
| Отчисления на социальные нужды | 141653,96         |
| Итого плановая себестоимость   | <b>701 621,49</b> |

Итого планируемые затраты для расчета бюджетного научного исследования составили 701 621,49 рублей.

### 7.4.3. Риски проекта

Из нескольких базовых вариантов организационных структур, использующихся в практике, была выбрана проектная, которую можно изобразить следующим образом:



Рисунок 27 – Организационная структура проекта

На пути реализации проекта могут возникнуть разного рода риски, представляющие опасность того, что поставленные цели проекта могут быть не достигнуты полностью или частично. Полностью избежать риска практически невозможно, но снизить их угрозу можно, уменьшая действие неблагоприятных факторов. Возможные риски представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Реестр рисков

| №                        | Риск                                | Вероятность наступления (1-5) | Влияние риска (1-5) | Уровень риска | Способы смягчения риска  |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------|--|
| <b>Технические риски</b> |                                     |                               |                     |               |  |
| 1                        | Требования                          | 1                             | 4                   | средний       | Отслеживание изменений требований к материалам, с помощью которых проводится исследование. |
| 2                        | Технология                          | 1                             | 4                   | средний       |  |
| 3                        | Использование ненадежных источников | 2                             | 4                   | средний       |  |

90

|      |      |          |         |      |   |      |
|------|------|----------|---------|------|---|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Лист |
|      |      |          |         |      |   | 89   |

|                           |  |   |   |         |  |
|---------------------------|--|---|---|---------|--|
| 4                         | Качество                                     | 1 | 4 | средний | Постоянный поиск путей оптимизации производства.   |
| Внешние риски             |  |   |   |         |  |
| 5                         | Качество предоставляемых материалов          | 2 | 4 | низкий  | Изучение конъюнктуры рынка.<br>Изучение изменений в российском законодательстве.<br>Определение мер поощрений и наказаний по отношению к рабочим.                            |
| 6                         | Предписания контролирующих органов           | 3 | 3 | средний |  |
| 7                         | Рынок  | 3 | 4 | средний |  |
| 8                         | Непредвиденные обстоятельства                | 1 | 4 | средний |  |
| 9                         | Изменения российского законодательства       | 4 | 3 | высокий |  |
| 10                        | Небрежность и недобросовестность сотрудников | 3 | 3 | низкий  |  |
| Организационные риски     |  |   |   |         |  |
| 11                        | Организации, от которых зависит проект       | 2 | 3 | низкий  | Строгий контроль за работой всех вспомогательных служб.<br>Поиск альтернативных поставщиков и инвесторов.<br>Возможность проведения исследования на новых научных платформах |
| 12                        | Ресурсы                                      | 1 | 5 | средний |  |
| 13                        | Финансирование                               | 4 | 5 | высокий |  |
| 14                        | Расстановка приоритетов                      | 3 | 3 | низкий  |  |
| Риски управления проектом |  |   |   |         |  |
| 15                        | Оценка                                       | 2 | 4 | средний | Ответственный подход к разработке и управлению проектом.<br>Повышение квалификации лиц, ответственных за управление проектом.  |
| 16                        | Планирование                                 | 2 | 3 | низкий  |  |
| 17                        | Контроль                                     | 3 | 4 | средний |  |
| 18                        | Коммуникации                                 | 1 | 3 | средний |  |

## 8. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ПРИ ВНУТРЕННЕЙ И ВНЕШНЕЙ ДИАГНОСТИКЕ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ПРОЛОЖЕННЫХ НА УЧАСТКАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

При проведении работ на линейной части магистральных трубопроводов, организации выполняющей работы, необходимо большое внимание уделять производственной и экологической безопасности работников и окружающей среды.

Социальная ответственность – ответственность за данные людям обещания, и непосредственно перед самими людьми. Ответственность организации, учитывающая все интересы и занятия коллектива и работников[37]. Предприятие самостоятельно принимает решение по дополнительным мерам по улучшению условий жизни и работы своих подчиненных и их родственников.

Магистральный трубопровод, проложенный на участках с многолетнемерзлыми грунтами подвержен дополнительным физическим и механическим нагрузкам, вследствие оттаивания грунта. Этот фактор повышает степень возникновения аварий и дополнительных разрушений (например, коррозия) на трубопроводе.

Трубопроводы, контактирующие с многолетнемерзлыми грунтами, расположены в основном в северных районах Российской Федерации, в которых температура окружающей среды в зимнее время может опускаться до – 40 градусов, а летом не превышать + 20 градусов. При большой влажности и порывистых ветрах, работа на открытом воздухе в зимнее время становится очень трудна.

|           |                |   |         |      |  |  |                               |        |
|-----------|----------------|---|---------|------|--|--|-------------------------------|--------|
|           |                |   |         |      | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |  |                               |        |
| Изм.      | Лист 1         | № | Подпись | Дата |  |  |                               |        |
| Разраб.   | Гончаров Е.А.  |   |         |      | Социальная ответственность   |  | Лист                          | Листов |
| Руковод.  | Вережкин А.В.  |   |         |      |  |  | 91                            |        |
| Консульт. | Рудаченко А.В. |   |         |      |  |  |                               |        |
| Зав. Каф. |                |   |         |      |  |  |                               |        |
|           |                |   |         |      |  |  | НИ ТПУ гр.2БМ4Б <sup>92</sup> |        |

## 8.1 Профессиональная социальная безопасность

Для анализа опасных и вредных факторов при выполнении работ при диагностировании трубопровода на участках контакта с многолетнемерзлыми грунтами составим таблицу. С ее помощью появится целостное представление обо всех выявленных факторах (опасных и вредных) на рабочем месте.

Опасные и вредные факторы при сооружении нефтепровода на участках контакта с многолетнемерзлыми грунтами, а так же их систематизации в нормативной документации представлена в таблице 24.

Таблица 24 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при выполнении работ при диагностировании трубопровода на открытом воздухе

| Наименование видов работ   | Факторы (ГОСТ 12.0.003 – 74 ССБТ с измен. 1999 г.)  |   | Нормативные документы   |
|--|---|---|---|
|  | Вредные   | Опасные   |   |
| 1  | 2   | 3   | 4   |
| Земляные работы;<br>Изоляционно-укладочные работы;<br>Акустико-эмиссионная диагностика участков трубопроводов;<br>Исследование химического состава, механических свойств металлов и сварных соединений и их структуры (при необходимости); | 1.Отклонение показателей климата на открытом воздухе;<br>2.Превышение уровней шума и вибрации;<br>3.Тяжесть и напряженность физического труда;<br>4. Загазованность | 1. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования (в т.ч. грузоподъемные<br>2. Электрический ток;<br>3. Пожаро- и взрывоопасность | ГОСТ 12.0.003-74[1]<br>ГОСТ 12.1.010-76[2]<br>ГОСТ 12.1.011-78[3]<br>ГОСТ 12.1.019-79[4].<br>ГОСТ 12.1.003-83[5]<br>ГОСТ 12.1.005-88[6]<br>ГОСТ 12.4.011-89[7]<br>ГОСТ 12.1.004-91[8] |

### 8.1.1 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

#### 1. Отклонение показателей климата на открытом воздухе

Работы при диагностике трубопровода и его ремонту на участках контакта с многолетнемерзлыми грунтами производят в зимнее время года, когда грунт находится в мерзлом состоянии. Производство работ в летнее время, из-за оттаивания грунта, делает проезд и движение техники невозможным.

Так как география распространения многолетнемерзлых грунтов достаточно широкая (Западная Сибирь, Дальний Восток), то и температурный режим будет везде разнообразным. Можно отметить лишь то, что температура окружающего воздуха зимой может опускаться местами и до  $-40^{\circ}$ .

Резкие изменения температуры окружающей среды, да и просто работа в условиях пониженных температур несет отрицательное влияние на здоровье человека. Двигательная активность работника обеспечивается всеми жизненными процессами в теле человека. Энергии на преобразование теплообмена используется больше, чем на выполнение самой работы. Нарушение баланса тепла может привести к перегреву либо, наоборот, к переохлаждению человека. Это приводит к нарушению в работе, снижению активности и т.д.

Организации, работники которых трудятся на открытом воздухе, обязаны придерживаться ряда ограничений по температурным режимам. Температурные режимы, при которых приостанавливаются работы на открытом воздухе показаны в таблице 25.

Таблица 25 – температурный режим, при котором приостанавливаются работы на открытом воздухе [38]

| Скорость ветра, м/с     | Температура воздуха $^{\circ}\text{C}$ |
|-------------------------|--|
| При безветренной погоде | $-40$                                  |
| Не более 5,0            | $-35$                                  |
| 5,1–10,0                | $-25$                                  |

94

|      |      |          |         |      |                            |      |
|------|------|----------|---------|------|----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | Социальная ответственность | Лист |
|      |      |          |         |      |                            | 93   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                            |      |

|            |     |
|------------|-----|
| 10,0–15    | –15 |
| 15,1–20,0  | –5  |
| Более 20,0 | 0   |

Работники, которые трудятся на открытом воздухе при низких температурах рискуют получить следующие травмы:

- переохлаждение организма (гипотермии);
- обморожение (руки, пальцы, нос).

Для профилактики обморожений работники должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты, в которые входит комплект утепленной одежды. Комплект одежды включает: куртку (телогрейку); ватные штаны; свитер; головной убор (шапка); перчатки; обувь.

Одежда должна соответствовать всем требованиям, подходить по размеру и не сковывать движения. Современная спецодежда изготавливается из качественных утеплителей: тинуслейт, синтепон, холофайбер. Для удобства работника, одежда оснащается дополнительными эргономичными деталями: капюшон, функциональные карманы. В ветряную погоду работники должны быть обеспечены средствами защиты лица (специальными масками) [39].

Помимо одежды к работам должны допускаться работники с хорошей физической формой, и годные по здоровью. Доставка людей к рабочему месту осуществляется в специальных автомобилях, с системой отопления салона.

## 2. Превышение уровней шума и вибрации

При диагностике трубопроводов используются машины и оборудование: экскаваторы, бульдозеры, и т.д. Они сопровождаются огромным количеством звуков, которые, при долгосрочном воздействии на человека, могут принести вред слуху и дискомфорт. Следствием продолжительного воздействия шума на человека являются развитие такие заболевания как шумовая болезнь, снижение слуховой чувствительности, изменение функций пищеварения, сердечно-сосудистая недостаточность.

Допустимый уровень звука при работе на производстве зависят от тяжести труда. Максимальный уровень шума при работе с инструментом согласно Федеральному закону от 30.03.1999 N 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» не должен превышать 80 дБА[41].

Для снижения воздействия шума на человека работники оснащаются специальными средствами защиты – наушниками или вкладышами. Все инструменты, которыми производятся работы, проходят тестирование на уровень шума, и допускаются к работе с виброзащитой или глушителем. Работа должна проходить с небольшими перерывами для снижения воздействия вибрации и шума на человека.

### 3. Тяжесть и напряженность физического труда

Сооружение нефтепроводов требует от работника огромных трудовых затрат. Трубопроводы очень часто расположены далеко от населенных пунктов и работникам приходится ездить в командировки. Нахождение вне дома, плюс тяжелый труд сказываются на эмоциональном состоянии работника и может привести к заболеваниям.

Для недопущения заболеваний людей при напряженном труде, организации должны придерживаться ряда требований:

- обеспечить людям 8-ми часовой рабочий день;
- обеденный перерыв;
- комфортные условия проживания;
- небольшие перерывы между рабочим процессом;
- своевременная заработная плата.

При соблюдении этих правил, риск возникновения недомоганий из-за тяжести труда минимален.

### 4. Загазованность

Загазованность воздуха, вызванная утечкой газа в рабочих помещениях, может вызвать отравление людей. Образование газовой смеси в газопроводах может быть причиной сильных взрывов.

|      |      |          |         |      |                            |    |      |
|------|------|----------|---------|------|----------------------------|----|------|
|      |      |          |         |      |                            | 96 | Лист |
|      |      |          |         |      |                            |    |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата | Социальная ответственность |    | 95   |



Загазованность воздуха проверяют с помощью переносных приборов – газоиндикаторов, называемых также газоопределителями. Обычно они предназначены для определения содержания в воздухе одного-двух газов. В основу действия переносных газоиндикаторов положены различные физические явления или химические реакции, возникающие при появлении газа в контролируемом воздухе.

Для контроля загазованности воздушной среды в производственных помещениях, рабочей зоне открытых площадочных сооружений должны быть предусмотрены средства автоматического непрерывного газового контроля с сигнализацией, срабатывающей при достижении предельно допустимых величин и с выдачей сигналов в систему управления технологическим процессом и противоаварийной защиты. При этом все случаи загазованности должны регистрировать приборы с автоматической записью и должны быть задокументированы.

Места установки и количество датчиков или пробоотборных устройств анализаторов необходимо определять в проектной документации/документации с учетом требований нормативных технических документов по размещению датчиков контроля загазованности.

### **8.1.2 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению**

Опасные производственные факторы – это факторы, которые могут привести к различным травмам работника[42].

#### *1. Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования (в т.ч. грузоподъемные)*

Диагностирование трубопровода связано с работой тяжелой техники: экскаваторов, бульдозеров. Движущиеся части этой техники (ковш экскаватора, отвал бульдозера) при невнимательном отношении могут привести к травмам. Отсутствие защитных средств приводит к ушибам, переломам и вывихам различных частей тела человека.

Работник, при движении техники в зоне проведения работ, обязан носить головной убор (каску). Находиться в зоне работы техники недопустимо. По полосе движения техники и подвижного оборудования должны находиться предупреждающие таблички, которые информируют об опасности.

## 2. Электрический ток

Один из опасных факторов производства, который не предупреждает о своем наличии (нет явных признаков таких как: запах, свечение и т.д.) – это электрический ток. Источником электрического тока при ремонте или монтаже нефтепровода является передвижная электростанция, или подключение к трансформаторным станциям.

Опасность электрического тока возникает при ряде нарушений [43]:

- нарушение изоляции проводов;
- неправильное или отсутствие заземления;
- обрыв проводки.

Для человека травмоопасным значением силы электрического тока является 0,15 Ампер, или переменное и постоянное напряжение больше 36 Вольт. Поражения от действия электрического тока могут быть разными: от мелких и крупных ожогов кожного покрова, до сокращения мышц сердца, что приводит к его остановке. Различают несколько видов электрических ожогов:

- покраснение кожи;
- образование на поверхности кожи пузырей и волдырей;
- обугливание кожи.

Ожоговые раны очень долго затягиваются, а поражение 2/3 поверхности кожи всего тела, практически в 85% случаев приводит к летальному исходу.

Для предотвращения поражения человека от электрического тока при ремонте и монтаже нефтепроводов используют следующие средства защиты:

|      |      |          |         |      |                            |    |      |
|------|------|----------|---------|------|----------------------------|----|------|
|      |      |          |         |      | Социальная ответственность | 98 | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                            |    | 97   |

— коллективные средства электрозащиты, в которые входят: оснащение всех опасных электроприборов специальными предупредительными табличками; оборудование электронными системами защиты; изоляция основных электроопасных узлов; контроль за состоянием электрических цепей, заземление и зануление приборов, работающих от электричества;

— индивидуальные средства защиты, в которые входят: резиновые перчатки (электропоглощающие); диэлектрическая обувь; изолированные подставки под оборудование и т.д.

Для работы с электроприборами допускаются люди специально обученные и имеющие удостоверение по электробезопасности.

### *3. Пожаро- и взрывоопасность*

Источником пожара на трассе трубопровода может быть: электрическое оборудование, которое работает неправильно и в следствии нагрева происходит воспламенение; неправильное отношение к продуктам отходов (бутылкам и окуркам); искры от сварки и т.д. Взорваться в свою очередь может баллон с газом или кислородом, канистра с горючим материалом и т.д.

Последствия взаимодействия открытого огня и человека приводит к ожогам различных степеней у последнего, не исключение и летальный исход. Взрыв же для человека опасен, если он находится в эпицентре, но взрыв, как правило, сопровождается пожаром, поэтому опасность нельзя недооценивать.

Тушение пожара на трубопроводе производится специальными средствами пожаротушения: огнетушителями пеногонными типа ОП-10 или ОУ-10, стволы с водой, сухой песок. При возгорании газа применение пенных огнетушителей малоэффективно, поэтому рекомендуется применять углекислотные огнетушители типа ОУ-1, ОУ-3. Для постоянного контроля, на пожароопасных работах дежурит пожарный экипаж. Для предотвращения небольшого очага возгорания подойдут подручные средства: асбестовые одеяла, вода[44].

Постоянный мониторинг и внимательное отношение к работе в пожароопасной зоне позволяет избегать возгораний и взрывов.

## 8.2 Экологическая безопасность

Трубопроводы, проложенные на участках многолетнемерзлых грунтов, как и другие сооружения, создаваемые человеком, оказывают определенное влияние на окружающую среду в течение всего их жизненного цикла. Все вредные воздействия и методы по борьбе с ними можно свести в одну обобщающую таблицу.

Таблица 26 – Вредные воздействия на окружающую среду и природоохранные мероприятия

| Природные ресурсы и компоненты ОС | Вредные воздействия   | Природоохранные мероприятия  |
|-----------------------------------|---|--|
| Земля и земельные ресурсы         | Повреждение почвенного слоя, сельхозугодий и других земель, нарушение первоначального состояния многолетнемерзлого грунта | Рациональное планирование мест и сроков проведения работ. Рекультивация земель. Использование термостабилизирующих средств грунта. Отсыпка площадок для стоянки техники. |
|                                   | Засорение почвы производственными отходами  | Вывоз и захоронение производственных отходов.  |
|                                   | Уничтожение растительности, повреждение и загрязнение почвенного покрова  | Мероприятия по охране почв, посадка деревьев по краю трассы нефтепровода.  |

|                          |  |  |
|--------------------------|--|--|
| Многолетнемерзлые породы | В результате механического и термического воздействия на ММП и последующего оттаивания многолетнемерзлых пород соответственно техногенному загрязнению подвергаются: атмосфера, снег, поверхностные и грунтовые воды. Загрязнение, и прежде всего ядохимикатами, прекращает органическую жизнь и ведет к гибели почв и растительности. | Для районов крайнего севера требуется специальный транспорт, который не нарушал бы растительный покров (машины на воздушной подушке)<br>Мероприятия должны быть заложены для начала в проектную документацию при строительстве и эксплуатации трубопроводов. В проектной документации должна быть описана точная последовательность действий. Для этого необходимо отследить с помощью геофизических исследований точную мощность ММП.<br>Использование термокейсов. |
| Лес и лесные ресурсы     | Порубка древостоя при строительстве трассы нефтепровода, коммуникаций.   | Соблюдение нормативов отвода земель в залесенных территориях   |
|                          | Загрязнение строительным мусором   | Уничтожение мусора; вывоз мусора.  |
| Недра                    | Нарушение состояния геологической среды (температурного состояния грунтов)   | Мониторинг за состояние грунтов в зоне контакта с нефтепроводом.   |
|                          | Не комплексное изучение недр   | Научные исследования по повышению комплексности изучения недр  |
| Вода и водные ресурсы    | Изъятие из природных источников водных ресурсов;   | Мероприятия по охране водных ресурсов.   |
|                          | Химическое загрязнение поверхностных и грунтовых вод   | Установка фильтрующих средств, для очистки воды  |

|                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| Воздушный бассейн | Загрязнение воздуха выхлопными газами от работающей техники | Глушить транспорт при отсутствии работы.  |
| Животный мир      | Распугивание, нарушение мест обитания животных, рыб.        | Проведение комплекса природоохранных мероприятий, планирование работ с учетом охраны животных |

Деградиционные воздействия на окружающую среду могут проявляться на стадиях разведки, строительства и эксплуатации нефтепроводов, что ухудшает условия жизни и работы человека и состояние окружающей среды.

Диагностирование трубопроводов является как поверхностным, так и глубинным источником воздействия на геологическую среду. В горных породах нарушается природное равновесие, что приводит к изменению напряженного состояния массива пород и может вызвать деформацию свай, опор, коррозию трубопровода. Существенным аспектом является влияние физико-механических свойств пород, при изменении его температуры вплоть до частичного оттаивания на устойчивость надземного нефтепровода.

В период диагностирования развития стресс-коррозионных дефектов основными факторами, негативно влияющими на состояние окружающей среды являются:

- изъятие земель из хозяйственного использования в краткосрочное и долгосрочное использование;
- механическое нарушение целостности почвенного и растительного покровов;
- изъятие из природных источников водных ресурсов;
- нарушение температурного режима грунтов;
- загрязнение атмосферного воздуха оборудованием, являющимся источником выбросов загрязняющих веществ;
- образование различных отходов, требующих захоронения или утилизации.

Основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и образования отходов при диагностировании трубопроводов являются машины и механизмы, имеющие в качестве привода двигатели внутреннего сгорания, дизельные электростанции, котельные установки. Механическое нарушение почв происходит при планировке площадки и при осуществлении непосредственно строительных или ремонтных работ. Последствия этих нарушений ликвидируются в обязательном порядке при рекультивации строительной площадки.

Для снижения техногенного воздействия на многолетнемерзлые грунты необходимо обеспечить максимальное сохранение их естественных мерзлотно-геологических условий. Выполнение данного требования предотвращает необратимые изменения геологической среды и связанного с этим прогрессирующего развития негативных криогенных процессов. Для снижения техногенной нагрузки при диагностировании следует выполнять определенные правила.

Основными принципами этих правил являются:

- снижение тепловых нагрузок на приповерхностный слой грунтов естественного залегания;
- минимизация площадей осваиваемой территории;
- недопущение нарушений естественных природных условий вне границ застроенной территории;
- соблюдение природоохранных норм и правил, технологии рекультивации нарушенных земель.

Реализация вышеперечисленных принципов достигается за счет проведения следующих мероприятий:

- возведение всех проектируемых сооружений и газо- и нефтепроводов по первому принципу строительства, т.е. с сохранением грунтов в их естественном мерзлом состоянии;

- диагностирование трубопроводов производить только на предварительно подготовленной территории;
- движение автотранспорта и другой техники осуществлять только по дорогам и зимникам.

Для обеспечения экологической безопасности в зоне возможного оттаивания многолетнемерзлых грунтов на всех этапах его существования должен осуществляться производственный экологический мониторинг, что позволит контролировать поведение мерзлого грунта и на этой основе осуществлять природно-охранные мероприятия.

Общими требованиями к организации экологического мониторинга являются:

- выполнение наблюдений в зоне расположения трубопровода на участках с многолетнемерзлым грунтом;
- ведение мониторинга в зависимости от условий природной среды и особенностей объекта;
- выполнение инженерно-экологических исследований и наблюдений;
- обработка полученной при мониторинге информации путем проведения исследований, анализов;
- исследование химического состава, механических свойств металлов и сварных соединений и их структуры (при необходимости)
- ведение единой базы данных по наблюдаемым объектам.

Результаты мониторинга используются в целях контроля соответствия состояния окружающей среды по экологическим нормативам.

### 8.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Причины возникновения чрезвычайных ситуаций на трассе трубопровода могут быть разнообразны: лесные пожары, аварии, ошибки персонала, старение оборудования, удар молнии, а так же природные процессы, связанные с изменением свойств и структуры грунта.

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |



Наиболее опасной чрезвычайной ситуацией на трубопроводе, проложенном на Крайнем Севере, является нарушение целостности мерзлого грунта и изменение его свойств. В грунте могут образоваться такие опасные природные процессы, как солифлюкция, протаивание, термокарст. Эти явления приводят к сильному изменению состояния грунта, его оттаиванию и, как следствие, породы становятся не устойчивыми и не способными выдерживать какие либо нагрузки, а так же приводит к сильной коррозии металла.

При разрушении трубопровода коррозией или водородом работники обязаны обеспечить все необходимые мероприятия для снижения последствий разрушения. В перечень мероприятий входит [52]:

- диагностика и анализ разрушения и его опасности;
- применение электрозащиты подземных металлических сооружений;
- воздействие на окружающую среду с целью снижения ее агрессивности;
- использование коррозионно-стойких материалов;
- изоляция поверхности сооружения от контакта с внешней агрессивной средой.

#### **8.4 Законодательное регулирование проектных решений**

Компании, которые занимаются транспортировкой нефти и газа по магистральным трубопроводам обязаны обеспечивать своих работников всеми материальными и социальными благами в соответствии с «Трудовым кодексом Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ»[45].

В соответствии со статьей «Право работника на труд в условиях, отвечающих требованиям охраны труда» работник имеет право на:

- рабочее место;
- своевременную оплату;

- социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя об условиях и охране труда;
- отказ от выполнения работ в случае опасности для жизни;
- обеспечение средствами индивидуальной защиты;
- обучение за счет работодателя;
- медицинский осмотр и т.д;

Северянам также должна выплачиваться процентная надбавка к заработной плате. В отличие от районного коэффициента при выплате надбавок необходимо учитывать стаж работы в данных районах или местностях. Размер процентной надбавки и порядок ее выплаты (как и районный коэффициент) устанавливаются Правительством РФ (ст. 317 ТК РФ, ст. 11 Закона N 4520-1)[49].

Статья 116 ТК РФ устанавливает северянам ежегодные дополнительные оплачиваемые отпуска. При этом работодатели с учетом своих производственных и финансовых возможностей могут самостоятельно устанавливать для работников дополнительные отпуска, порядок и условия предоставления которых, определяются коллективными договорами или локальными нормативными актами, которые принимаются с учетом мнения выборного органа первичной профсоюзной организации.

Кроме своих работников, нефтеперекачивающие организации точно так же, обязаны следить за негативным влиянием их деятельности на окружающую среду, и защищать население от чрезвычайных ситуаций. В основу управления положен закон РФ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»[50].

Согласно [22] комплекс мероприятий по защите населения включает:

- оповещение населения об опасности, его информирование о порядке действий в сложившихся чрезвычайных условиях;

- эвакуационные мероприятия;
- меры по инженерной защите населения;
- меры радиационной и химической защиты;
- медицинские мероприятия;
- подготовку населения в области защиты от чрезвычайных ситуаций.

Трубопроводы относятся к опасным производственным объектам, поэтому организации, занимающиеся их эксплуатацией, подчиняются [51].

|      |      |          |         |      |                            |      |
|------|------|----------|---------|------|----------------------------|------|
|      |      |          |         |      | Социальная ответственность | 107  |
|      |      |          |         |      |                            | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                            | 106  |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе изучены основные теоретические и экспериментальные положения, являющиеся основой для технических решений при разработке новых методов технической диагностики систем электрохимической защиты подземных стальных трубопроводов, проложенных в нейтральных и слабощелочных грунтах. Внедрение новых методов в практику эксплуатации подземных катодно защищаемых трубопроводов внесет значительный вклад в повышение надежности трубопроводного парка страны. Предлагаемый критерий контроля режимов катодной защиты впервые позволяет с достаточной для практики точностью количественно определять остаточную скорость коррозии и время до появления стресс-коррозионных трещин при заданном режиме катодной защиты в диапазоне допустимых рабочих давлений транспортируемого продукта, что является решением крупной научной проблемы, имеющей важное практическое значение для повышения надежности эксплуатации трубопроводных систем транспорта нефти и газа.

Изучен процесс коррозионного разрушения трубной стали при различных внутренних напряжениях в зависимости от условий доставки кислорода к корродирующей поверхности, характеризуемой плотностью предельного тока по кислороду. Установлено, что плотность коррозионного тока в язвах с максимальной глубиной при внутренних напряжениях 0,95 предела текучести практически достигает плотности предельного тока кислорода (63-86%). В отсутствии внутренних напряжений плотность коррозионного тока в язвах с максимальной глубиной проникновения составляет 32 – 46% от плотности предельного тока по кислороду.

|           |      |                |         |     |  |                      |      |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|----------------------|------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |                      |      |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |                      |      |        |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Заключение   | Лит.                 | Лист | Листов |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |                      | 107  | 108    |
| Консульт. |      |                |         |     |  | <b>ТПУ гр. 2БМ4Б</b> |      |        |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |                      |      |        |
|           |      |                |         |     |  |                      |      |        |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5272-50, Коррозия металлов, Терминология.
2. Томашев Н. Д., Теория коррозии металлов, Металлугиздат, 1952.
3. Акимов Г. В., Теория и методы исследования коррозии металлов, Изд. АН СССР, 1945.
4. Акимов Г. В., Основы учения о коррозии и защите металлов, Металлургиздат, 1946.
5. Клинов И. Я., Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы, Машгиз, 1954.
6. Бахвалов Г. Т. и Турковская А. В., Коррозия и защита металлов, Металлургиздат, 1947.
7. Притула В. А., Защита подземных трубопроводов от внешней коррозии, Гостоптехиздат, 1948.
8. Притула В. А., Катодная защита трубопроводов и резервуаров, Гостоптехиздат, 1950.
9. Спирин А. А., Кальман В. С., Салам-Заде М. М., Цекун Н. А., Методика электрических исследований коррозионного состояния трубопроводов и кабелей, Азнефтеиздат, 1954.
10. Спирин А. А., Цекун Н. А., Салам-Заде М. М., Электрическая защита подземных металлических сооружений от коррозии, Азнефтеиздат, 1954.
11. Защита подземных металлических трубопроводов и кабелей от коррозии, Сборник под ред. В. Н. Милытейна, Изд. Мин. ком. хоз. РСФСР, 1954.
12. Хижняков В.И. Коррозия трубной стали в дефектах изоляционного покрытия нефтепроводов центральной части Западной Сибири, Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности, М., ВНИИОЭНГ, 1982.

№

10.

|           |      |                |         |     |  |  |               |        |
|-----------|------|----------------|---------|-----|--|--|---------------|--------|
|           |      |                |         |     | Анализ причин возникновения и развития стресс-коррозионных дефектов в процессе длительной эксплуатации подземных трубопроводов |  |               |        |
| Изм.      | Лист | № докум.       | Подпись | Дат |  |  |               |        |
| Разраб.   |      | Гончаров Е.А.  |         |     | Список литературы  |  | Лит.          | Лист   |
| Руковод.  |      | Веревкин А.В.  |         |     |  |  |               | Листов |
| Консульт. |      |                |         |     |  |  |               | 108    |
| Зав. Каф. |      | Рудаченко А.В. |         |     |  |  |               | 109    |
|           |      |                |         |     |  |  | ТПУ гр. 2БМ4Б |        |

13. Гост 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
14. Гост 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность.
15. Гост 12.1.011-78 Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний
16. Гост 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
17. Гост 12.1.003-83 Шум общие требования безопасности
18. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
19. ГОСТ 12.4.011-89 Система стандартов безопасности труда средства защиты работающих
20. Гост 12.1.004-91 Пожарная безопасность
21. Электронный ресурс,  
[http://www.psychologos.ru/articles/view/socialnaya\\_otvetstvennost](http://www.psychologos.ru/articles/view/socialnaya_otvetstvennost);
22. Электронный ресурс, Соблюдение работодателями режима труда и отдыха работников, работающих в холодное время,  
<http://gitl1.rostrud.ru/razyasneniya-i-konsultatsii/soblyudenie-rabotodatelayami-rezhima-truda-i-otdykha-rabotnikov-rabotayushchikh-v-kholodnoe-vremya/14694.html>;
23. Методические рекомендации МР 2.2.7.2129-06 Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях;
24. Электронный ресурс, <http://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/proizvodstvennaya-vibraciya.html>;
25. Федеральный закон от 30.03.1999 N 52-ФЗ (ред. от 28.11.2015) «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»
26. Электронный ресурс, <http://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/opasnye-proizvodstvennye-factory.html>;

|      |      |          |         |     |
|------|------|----------|---------|-----|
|      |      |          |         |     |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дат |

27. Электронный ресурс, Охрана труда и БЖД, Действие электрического тока на человека, [http://ohrana-bgd.narod.ru/prokat\\_32.html](http://ohrana-bgd.narod.ru/prokat_32.html);

28. Электронный ресурс, Первичные средства и стационарные установки для тушения пожаров, <http://www.0-1.ru/law/showdoc.asp?dp=ppbo-103-79&chp=17>;

29. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.12.2015);

30. Закон РФ от 19.02.1993 N 4520-1 (ред. от 31.12.2014) «О государственных гарантиях и компенсациях для лиц, работающих и проживающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях»;

31. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.12.2015) Статья 315. Оплата труда;

32. Электронный ресурс, Районный коэффициент и надбавка к заработной плате работников крайнего севера, [http://www.profiz.ru/kr/8\\_2012/zarplata\\_sever/](http://www.profiz.ru/kr/8_2012/zarplata_sever/);

33. Закон РФ от 19.02.1993 N 4520-1 (ред. от 31.12.2014) «О государственных гарантиях и компенсациях для лиц, работающих и проживающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях»;

34. Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ (ред. от 15.02.2016) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;

35. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»

36. Статейные данные. Обзор методов защиты трубопроводов от коррозии изоляционными покрытиями;

### **Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking**

Stress-corrosion cracking (SCC) is a term used to describe service failures in engineering materials that occur by slow, environmentally induced crack propagation. The observed crack propagation is the result of the combined and synergistic interaction of mechanical stress and corrosion reactions. Before SCC can be discussed in detail, we must clearly define the type of loading involved, the types of materials involved, the types of environments that cause SCC, and the nature of the interactions that result in this phenomenon. The term "stress-corrosion cracking" is frequently used to describe any type of environmentally induced or assisted crack propagation. However, this discussion will focus on the normal usage of the term as defined below.

One common misconception is that SCC is the result of stress concentration at corrosion-generated surface flaws (as quantified by the stress-intensity factor,  $K$ ); when a critical value of stress concentration,  $K_{Ic}$ , is reached, mechanical fracture results. Although stress concentration does occur at such flaws, it does not exceed the critical value required to cause mechanical fracture of the material in an inert environment. Precorrosion followed by loading in an inert environment will not result in any significant crack propagation, while simultaneous environmental exposure and application of stress will cause time-dependent subcritical crack propagation. The term "synergy" is used to describe this process because the combined simultaneous interaction of mechanical and chemical forces results in crack propagation, whereas neither factor acting independently or alternately would result in the same effect. The exact nature of this interaction is the subject of numerous scientific investigations and will be covered in the section "Crack-Propagation Mechanisms" in this chapter.

The stresses required to cause SCC are small, usually below the macroscopic yield stress, and are tensile in nature. The stresses can be externally applied, but residual stresses often cause SCC failures. However, compressive



residual stresses can be used to prevent this phenomenon. Static loading is usually considered to be responsible for SCC, while environmentally induced crack propagation due to cyclic loading is defined as corrosion fatigue. The boundary between these two classes of phenomena is vague, and corrosion fatigue is often considered to be a subset of SCC. However, because the environments that cause corrosion fatigue and SCC are not always the same, these two should be considered separate phenomena. The term "stress-corrosion cracking" is usually used to describe failures in metallic alloys. However, other classes of materials also exhibit delayed failure by environmentally induced crack propagation. Ceramics exhibit environmentally induced crack propagation and polymeric materials frequently exhibit craze cracking as a result of the interaction of applied stress and environmental reactions.

**Table 1 Alloy/Environment Systems Exhibiting SCC**

| <b>Alloy</b>                      | <b>Environment</b>   |
|-----------------------------------|--|
| Carbon steel .....                | Hot nitrate, hydroxide, and carbonate/bicarbonate solutions  |
| High-strength steels .....        | Aqueous electrolytes, particularly when containing H <sub>2</sub> S  |
| Austenitic stainless steels ..... | Hot, concentrated chloride solutions; chloride-contaminated steam  |
| High-nickel alloys.....           | High-purity steam  |
| α-brass .....                     | Ammoniacal solutions   |
| Aluminum alloys .....             | Aqueous Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , and I <sup>-</sup> solutions   |
| Titanium alloys .....             | Aqueous Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , and I <sup>-</sup> solutions; organic liquids; N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> |
| Magnesium alloys.....             | Aqueous Cl <sup>-</sup> solutions  |
| Zirconium alloys.....             | Aqueous Cl <sup>-</sup> solutions; organic liquids; I <sub>2</sub> at 350 °C (660 °F)                                    |

**Table 2 Alloy/Environment Combinations and the Resulting Films That Form at the Crack Tip**

| <b>Metal or alloy</b>          | <b>Environment</b>                   | <b>Initiating layer</b>  |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| α-brass, copper-aluminum ..... | Ammonia                              | Dealloyed layer (Cu)     |
| Gold-copper .....              | FeCl <sub>3</sub>                    | Dealloyed layer (Au)     |
|                                | Acid sulfate                         | Dealloyed layer (Au)     |
| Iron-chromium nickel .....     | Chloride                             | Dealloyed layer (Au)     |
|                                | Hydroxide                            | Dealloyed layer or oxide |
|                                | High-temperature water               | Dealloyed layer or oxide |
| α-brass .....                  | Nitrite                              | Oxide                    |
| Copper.....                    | Nitrite                              | Oxide                    |
|                                | Ammonia (cupric)                     | Porous dissolution zone  |
| Ferritic steel .....           | High-temperature water               | Oxide                    |
|                                | Phosphate                            | Oxide (?)                |
|                                | Anhydrated ammonia                   | Nitride                  |
|                                | CO/CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O | Carbide                  |
|                                | CS <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O    | Carbide                  |
| Titanium alloys .....          | Chloride                             | Hydride                  |
| Aluminum alloys, steels .....  | Various media                        | Near-surface hydrogen    |

The mechanical properties of composites will degrade if exposure to the environment attacks the matrix, the reinforcing phase, or the matrix-to-reinforcement interface; if crack propagation results during static loading, this degradation is SCC. Until recently, it was thought that pure metals were immune to SCC, but it is now known that this is not true. Because considerably more research has been conducted on the SCC behavior of metallic alloys, the discussion in this chapter will focus on SCC of metals and their alloys. Environments that cause SCC are usually aqueous and can be either condensed layers of moisture or bulk solutions. SCC is alloy/environment specific; that is, it is frequently the result of a specific chemical species in the environment. For example, the SCC of copper alloys, traditionally referred to as season cracking, is usually due to the presence of ammonia in the environment, and chloride ions cause or exacerbate cracking in stainless steels and aluminum alloys. Also, an environment that causes SCC in one alloy may not cause it in another. Changing the temperature, the degree of aeration, and/or the concentration of ionic species may change an innocuous environment into one that causes SCC failure. Also, different heat treatments may make the same alloy either immune or susceptible. As a result, the list of all possible alloy/environment combinations that cause SCC is continually expanding, and the possibilities are virtually infinite. Some of the more commonly observed alloy/environment combinations that result in SCC are listed in Table 1.

In general, SCC is observed in alloy/environment combinations that result in the formation of a film on the metal surface. These films may be passivating layers, tarnish films, or dealloyed layers. In many cases, these films reduce the rate of general or uniform corrosion, making the alloy desirable for resistance to uniform corrosion in the environment. As a result, SCC is of greatest concern in corrosion-resistant alloys exposed to aggressive aqueous environments. Table 2 lists several alloy/environment combinations and the films that may form at the crack tip.

The mechanical properties of composites will degrade if exposure to the environment attacks the matrix, the reinforcing phase, or the matrix-to-reinforcement interface; if crack propagation results during static loading, this degradation is SCC. Until recently, it was thought that pure metals were immune to SCC, but it is now known that this is not true. Because considerably more research has been conducted on the SCC behavior of metallic alloys, the discussion in this chapter will focus on SCC of metals and their alloys. Environments that cause SCC are usually aqueous and can be either condensed layers of moisture or bulk solutions. SCC is alloy/environment specific; that is, it is frequently the result of a specific chemical species in the environment. For example, the SCC of copper alloys, traditionally referred to as season cracking, is usually due to the presence of ammonia in the environment, and chloride ions cause or exacerbate cracking in stainless steels and aluminum alloys. Also, an environment that causes SCC in one alloy may not cause it in another. Changing the temperature, the degree of aeration, and/or the concentration of ionic species may change an innocuous environment into one that causes SCC failure. Also, different heat treatments may make the same alloy either immune or susceptible. As a result, the list of all possible alloy/environment combinations that cause SCC is continually expanding, and the possibilities are virtually infinite. Some of the more commonly observed alloy/environment combinations that result in SCC are listed in Table 1.

In general, SCC is observed in alloy/environment combinations that result in the formation of a film on the metal surface. These films may be passivating layers, tarnish films, or dealloyed layers. In many cases, these films reduce the rate of general or uniform corrosion, making the alloy desirable for resistance to uniform corrosion in the environment. As a result, SCC is of greatest concern in corrosion-resistant alloys exposed to aggressive aqueous environments. Table 2 lists several alloy/environment combinations and the films that may form at the crack tip.

## **The Phenomenon of SCC**

Stress-corrosion cracking is a delayed failure process. That is, cracks initiate and propagate at a slow rate (for example,  $10^{-9}$  to  $10^{-6}$  m/s) until the stresses in the remaining ligament of metal exceed the fracture strength. The sequence of events involved in the SCC process is usually divided into three stages:

- Crack initiation and stage 1 propagation
- Stage 2 or steady-state crack propagation
- Stage 3 crack propagation or final failure

The characteristics of each of these stages will be discussed in greater detail below. First, however, the techniques used to measure SCC will be reviewed briefly. Stress-corrosion cracking experiments can be categorized as:

- Tests on statically loaded smooth samples
- Tests on statically loaded precracked samples
- Tests using slowly straining samples

Tests on statically loaded smooth samples are usually conducted at various fixed stress levels, and the time to failure of the sample in the environment is measured. Figure 1 illustrates the typical results obtained from this type of test. In Fig. 1, the logarithm of the measured time to failure,  $t_f$ , is plotted against the applied stress,  $\sigma$ , and the time to failure can be seen to increase rapidly with decreasing stress; a threshold stress,  $\sigma_t$ , is determined where the time to failure approaches infinity. The total time to failure at a given stress consists of the time required for the formation of a crack (the incubation or initiation time,  $t_{in}$ , and the time of crack propagation,  $t_{cp}$ ). These experiments can be used to determine the maximum stress that can be applied in service without SCC failure, to determine an inspection interval to confirm the absence of SCC crack propagation, or to evaluate the influence of metallurgical and environmental changes on SCC.

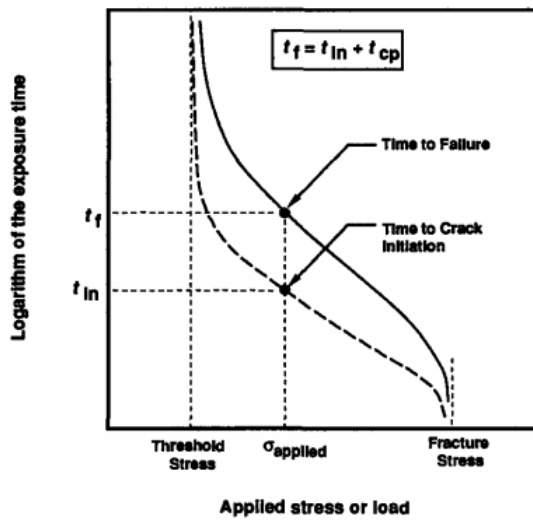


Fig. 1 Schematic of a typical time to failure as a function of initially applied stress for smooth-sample SCC tests

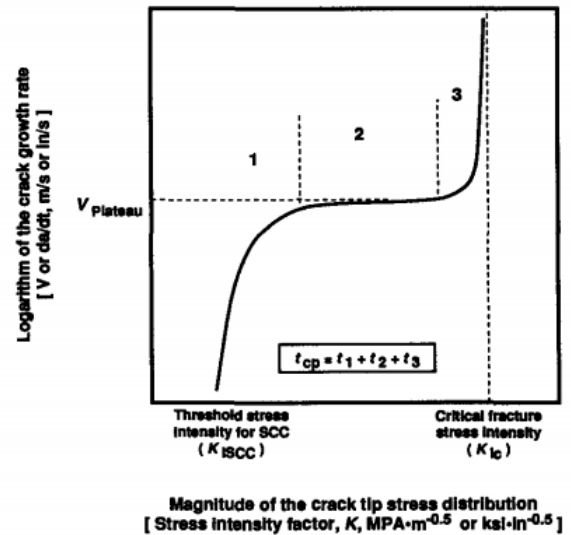


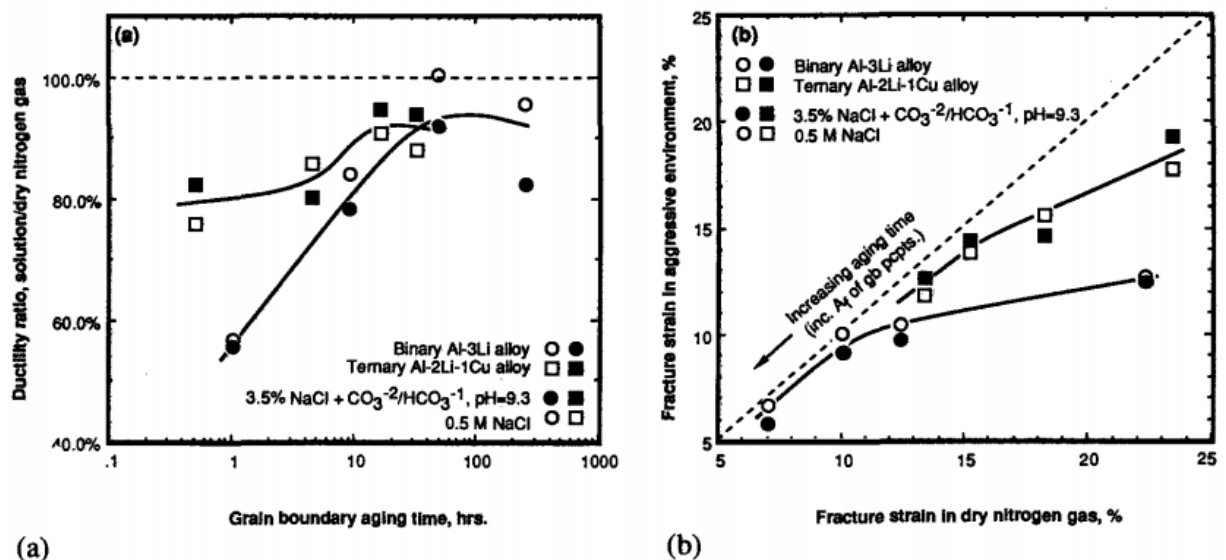
Fig. 2 Schematic diagram of typical crack-propagation rate as a function of crack-tip stress-intensity behavior illustrating the regions of stage 1, 2, and 3 crack propagation as well as identifying the plateau velocity and the threshold stress intensity

However, the time required for crack initiation is strongly dependent on a wide variety of parameters, such as surface finish. The presence of flaws that concentrate stress or crevices that alter the environment may dramatically change the threshold stress or the crack-initiation time. The entire crack-initiation process is presently not well understood. Tests on statically loaded precracked samples are usually conducted with either a constant applied load or with a fixed crack opening displacement, and the actual rate or velocity of crack propagation,  $da/dt$ , is measured. The magnitude of the stress distribution at the crack tip (the mechanical driving force for crack propagation) is quantified by the stress-intensity factor,  $K$ , for the specific crack and loading geometry.

As a result, the crack-propagation rate,  $da/dt$ , is plotted versus  $K$ , as illustrated in Fig. 2. These tests can be configured such that  $K$  increases with crack length (constant applied load), decreases with increasing crack length (constant crack mouth opening displacement), or is approximately constant as the crack length changes (special tapered samples). Each type of test has its advantages and disadvantages. However, in service, most SCC failures occur under constant-load conditions, so that the stress intensity increases as the crack propagates. As a

result, it is usually assumed in SCC discussions that the stress intensity is increasing with increasing crack length.

Typically, three regions of crack-propagation rate versus stress-intensity level are found during crack-propagation experiments. These are identified according to increasing stress-intensity factor as stage 1, 2, or 3 crack propagation (Fig. 2). No crack propagation is observed below some threshold stress-intensity level,  $K_{ISCC}$ . This threshold stress level is determined not only by the alloy but also by the environment and metallurgical condition of the alloy, and, presumably, this level corresponds to the minimum required stress level for synergistic interaction with the environment. At low stress-intensity levels (stage 1), the crack-propagation rate increases rapidly with the stress-intensity factor. At intermediate stress-intensity levels (stage 2), the crack-propagation rate approaches some constant velocity that is virtually independent of the mechanical driving force. This plateau velocity is characteristic of the alloy/environment combination and is the result of rate-limiting environmental processes such as mass transport of environmental species up the crack to the crack tip. In stage 3, the rate of crack propagation exceeds the plateau velocity as the stress-intensity level approaches the critical stress-intensity level for mechanical fracture in an inert environment,  $K_{IC}$ .



(a) (b)  
Fig. 4 Comparison of (a) slow-strain-rate data plotted as a ductility ratio to (b) the same data plotted as an environment-dependent property versus the environment-independent value of the same property. Source: Ref 13

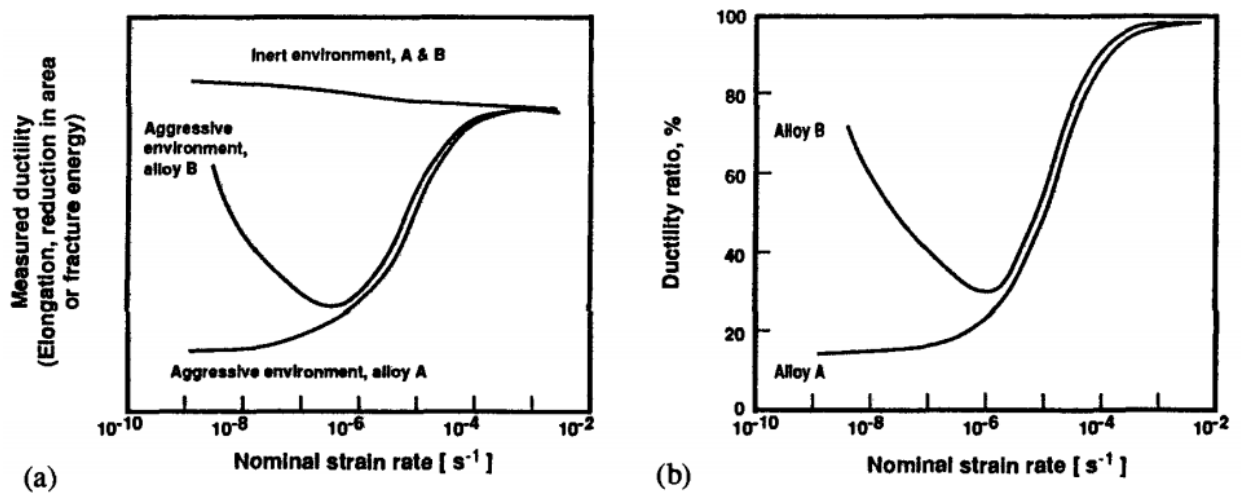


Fig. 3 Strain-to-failure plots resulting from slow-strain-rate testing. (a) Schematic of typical ductility versus strain-rate behavior of two different types of alloys tested by the slow-strain-rate technique. (b) Schematic of the ductility ratio versus strain-rate behavior of two different types of alloys. The ductility ratio is the ratio of a ductility measurement such as elongation, reduction in area, or fracture energy measured in the aggressive environment to that obtained in the inert reference environment.

Slow-Strain-Rate Testing. Stress-corrosion tests can also be conducted by slowly increasing the load or strain on either precracked or smooth samples. These tests are called constant-extension-rate tests, slow-strain-rate tests, or straining electrode tests. Usually, a tensile machine pulls a smooth sample that is exposed to the corrosive environment at a low crosshead speed ( $10^{-5}$  to  $10^{-9}$  m/s). The strain to failure in the corrosive environment and the strain to failure in an inert environment can then be plotted against the strain rate, as shown in Fig. 3(a), or the ratio of these measurements can be plotted as shown in Fig. 3(b). The ratio of other tensile-property measurements, such as reduction in area and ultimate tensile strength, may be plotted. Frequently, this type of test is used to evaluate the influence of metallurgical variables, such as heat treatment, on SCC resistance. This type of experiment yields rapid comparisons. However, since the mechanical properties of the samples also vary with the metallurgical condition, such evaluations can become difficult.

As a result, it was proposed (Ref 13) that the environment-dependent property be plotted versus the inert-environment or environment-independent value of this property, as shown in Fig. 4. In this manner, the strength of the material in the environment, or the "situation-dependent strength", and the extent of any environmental effect can be visualized simultaneously. However, the application

of these data to the prediction of actual inservice lifetimes is difficult and unreliable.

### **Overview of SCC Mechanisms**

Many different mechanisms have been proposed to explain the synergistic stress-corrosion interactions that occur at the crack tip, and there may be more than one process that causes SCC. The proposed mechanisms can be classed into two basic categories: anodic mechanisms and cathodic mechanisms. That is, during corrosion, both anodic and cathodic reactions must occur, and the phenomena that result in crack propagation may be associated with either type. The most obvious anodic mechanism is that of simple active dissolution and removal of material from the crack tip. The most obvious cathodic mechanism is hydrogen evolution, absorption, diffusion, and embrittlement. However, a specific mechanism must be able to explain the actual crack-propagation rates, the fractographic evidence, and the mechanism of formation or nucleation of cracks.

Mechanical fracture includes normal fracture processes that are assumed to be stimulated or induced by one of the following interactions between the material and the environment:

- Adsorption of environmental species
- Surface reactions
- Reactions in the metal ahead of the crack tip
- Surface films

All of the proposed mechanical fracture mechanisms contain one or more of these processes as an essential step in the SCC process. Specific mechanisms differ in the processes assumed to be responsible for crack propagation and the way that environmental reactions combine to result in the actual fracture process, different mechanisms have been proposed to explain the synergistic stress-corrosion interactions that occur at the crack tip, and there may be more than one process that causes SCC. The proposed mechanisms can be classed into two basic categories: anodic mechanisms and cathodic mechanisms. That is, during corrosion, both anodic and cathodic reactions must occur, and the phenomena that



result in crack propagation may be associated with either type. The most obvious anodic mechanism is that of simple active dissolution and removal of material from the crack tip. The most obvious cathodic mechanism is hydrogen evolution, absorption, diffusion, and embrittlement. However, a specific mechanism must be able to explain the actual crack-propagation rates, the fractographic evidence, and the mechanism of formation or nucleation of cracks.

### **Controlling Parameters**

The mechanisms that have been proposed for SCC require that certain processes or events occur in sequence for sustained crack propagation to be possible. These requirements explain the plateau region in which the rate of crack propagation is independent of the applied mechanical stress. That is, a sequence of chemical reactions and processes is required, and the rate-limiting step in this sequence of events determines the limiting rate or plateau velocity of crack propagation (until mechanical overload fracture starts contributing to the fracture process in stage 3). Figure 5 illustrates a crack tip in which crack propagation results from reactions in metal ahead of the propagating crack. That is, a sequence of chemical reactions and processes is required, and the rate-limiting step in this sequence of events determines the limiting rate or plateau velocity of crack propagation (until mechanical overload fracture starts contributing to the fracture process in stage 3). Figure 5 illustrates a crack tip in which crack propagation results from reactions in metal ahead of the propagating crack. This example was chosen because it maximizes the number of possible rate-limiting steps. Close examination of Fig. 5 reveals that potential rate-determining steps include:

- Mass transport along the crack to or away from the crack tip
- Reactions in the solution near the crack
- Surface adsorption at or near the crack tip
- Surface diffusion
- Surface reactions
- Absorption into the bulk

- Bulk diffusion to the plastic zone ahead of the advancing crack
- Chemical reactions in the bulk
- The rate of interatomic bond rupture

Changes in the environment that modify the rate-determining step will have a dramatic influence on the rate of crack propagation, while alterations to factors not involved in the rate-determining step or steps will have little influence, if any. However, significantly retarding the rate of any one of the required steps in the sequence could make that step the rate-determining one. In aqueous solutions, the rate of adsorption and surface reactions is usually very fast compared to the rate of mass transport along the crack to the crack tip. As a result, bulk transport into this region or reactions in this region are frequently believed to be responsible for determining the steady-state crack-propagation rate or plateau velocity. In gaseous environments, surface reactions, surface diffusion, and adsorption may be rate limiting, as well as the rate of bulk transport to the crack tip. Several different environmental parameters are known to influence the rate of crack growth in aqueous solutions. These include, but are not limited to:

- Temperature
- Pressure
- Solute species
- Solute concentration and activity . pH
- Electrochemical potential
- Solution viscosity
- Stirring or mixing

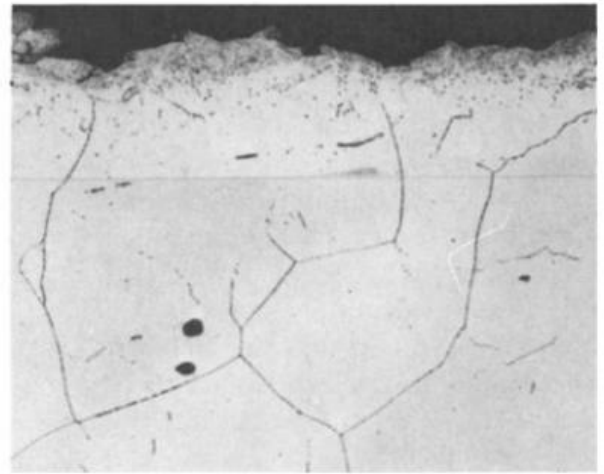
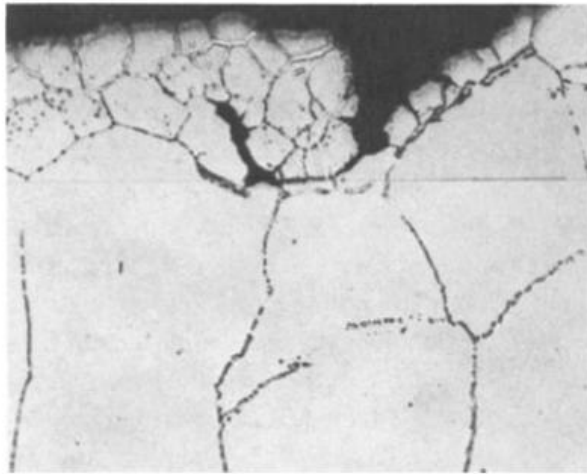
Altering any of these parameters may affect the rate of the rate-controlling steps, either accelerating or reducing the rate of crack propagation. Also, it may be possible to arrest or stimulate crack propagation by altering the rate of an environmental reaction. It is well known and generally accepted that the environment at occluded sites, such as crack tips, can differ significantly from the bulk solution. If an alteration to the bulk environment allows the formation of a

critical SCC environment at crack nuclei, then crack propagation will result. If the bulk environment cannot maintain this local crack-tip environment, then crack propagation will stop. As a result, slight changes to the environment may have a dramatic influence on crack propagation, while dramatic changes may have only a slight influence. In addition to the environmental parameters listed above, stress-corrosion crack-propagation rates are influenced by:

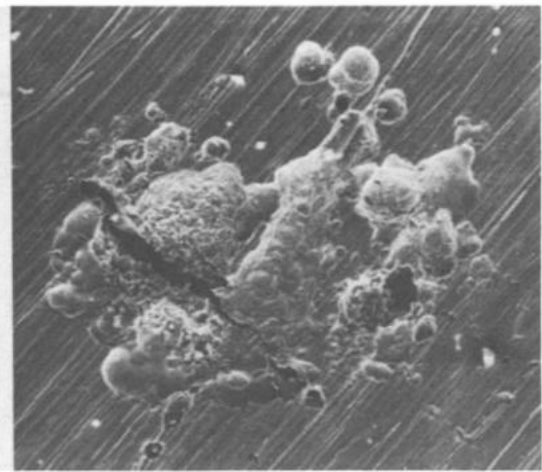
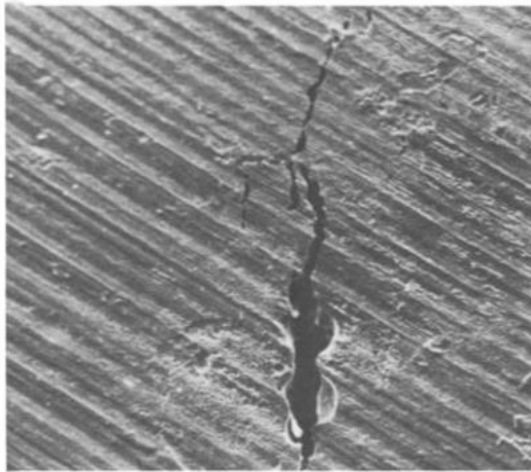
- The magnitude of the applied stress or the stress-intensity factor
- The stress state, which includes (1) plane stress and (2) plane strain •
- The loading mode at the crack tip (tension or torsion, for example)
- Alloy composition, which includes (1) nominal composition, (2) exact composition (all constituents), and (3) impurity or tramp element composition
- Metallurgical condition, which includes (1) strength level, (2) second phases present in the matrix and at the grain boundaries, (3) composition of phases, (4) grain size, (5) grain-boundary segregation, and (6) residual stresses
- Crack geometry, which includes (1) length, width, and aspect ratio, and (2) crack opening and crack-tip closure

### **Important Fracture Features**

Stress-corrosion cracks can initiate and propagate with little outside evidence of corrosion and with no warning as catastrophic failure approaches. The cracks frequently initiate at surface flaws that either preexist or are formed during service by corrosion, wear, or other processes. The cracks then grow with little macroscopic evidence of mechanical deformation in metals and alloys that are normally quite ductile. Crack propagation can be either intergranular or transgranular; sometimes, both types are observed on the same fracture surface.



(a) (b)  
*Fig. 6 Optical micrographs showing defects on the inner surface of type 304 stainless steel pipe near weld root (a) and near through-crack (b). Both 1000×*



(a) (b)  
*Fig. 7 Stress-corrosion crack initiating from a corrosion pit in a quenched-and-tempered high-strength turbine disk steel (3.39Ni-1.56Cr-0.63Mo-0.11V) test coupon exposed to oxygenated, demineralized water for 800 h under a bending stress of 90% of the yield stress. (a) 275 $\times$ . (b) 370 $\times$ .*

Crack openings and the deformation associated with crack propagation may be so small that the cracks are virtually invisible except in special nondestructive examinations. As the stress intensity increases, the plastic deformation associated with crack propagation increases and the crack opening increases. When the final fracture region is approached, plastic deformation can be appreciable, because corrosion-resistant alloys are frequently quite ductile.

### **Phenomenology of Crack-Initiation Processes**

#### *Crack Initiation at Surface Discontinuities*

Stress-corrosion cracking frequently initiates at preexisting or corrosion-induced surface features. These features may include grooves, laps, or burrs caused

by fabrication processes. Examples of such features are shown in Fig. 6; these were produced during grinding in the preparation of a joint for welding. The feature shown in Fig. 6(a) is a lap, which is subsequently recrystallized during welding and could then act as a crevice at which deleterious anions or cations concentrate. The highly sensitized recrystallized material could also more readily become the site of crack initiation by intergranular corrosion. A coldworked layer and surface burrs, shown in Fig. 6(b), can also assist crack initiation.

*Crack Initiation at Corrosion Pits.* Stresscorrosion cracks can also initiate at pits that form during exposure to the service environment (Fig. 7) or during cleaning operations, such as pickling of type 304 stainless steel before fabrication. Pits can form at inclusions that intersect the free surface or by a breakdown in the protective film. In electrochemical terms, pits form when the potential exceeds the pitting potential. It has been shown that the SCC potential and pitting potential were identical for steel in nitrite solutions.

The transition between pitting and cracking depends on the same parameters that control SCC, that is, the electrochemistry at the base of the pit, pit geometry, chemistry of the material, and stress or strain rate at the base of the pit. A detailed description of the relationship between these parameters and crack initiation has not been developed because of the difficulty in measuring crack initiation. Methods for measuring short surface cracks are under development, but are limited to detecting cracks that are beyond the initiation stage. The geometry of a pit is important in determining the stress and strain rate at its base. Generally, the aspect ratio between the penetration and the lateral corrosion of a pit must be greater than about 10 before a pit acts as a crack initiation site. A penetration to lateral corrosion ratio of 1 corresponds to uniform corrosion, and a ratio of about 1000 is generally observed for a growing stress-corrosion crack. As in the case of a growing crack, the pit walls must exhibit some passive-film-forming capability in order for the corrosion ratio to exceed 1. A change in the corrosive environment and potential within a pit may also be necessary for the pit to act as a crack initiator. Pits can act as occluded cells similar to cracks and crevices, although in

general their volume is not as restricted. There are a number of examples in which stresscorrosion cracks initiated at the base of a pit by intergranular corrosion. In these circumstances, the grain-boundary chemistry and the pit chemistry were such that intergranular corrosion was favored. Crack propagation was also by intergranular SCC in these cases. Although the local stresses and strain rates at the base of the pit play a role in SCC initiation, there are examples of preexisting pits that did not initiate stress-corrosion cracks. The geometry of a pit is important in determining the stress and strain rate at its base. Generally, the aspect ratio between the penetration and the lateral corrosion of a pit must be greater than about 10 before a pit acts as a crack initiation site. A penetration to lateral corrosion ratio of 1 corresponds to uniform corrosion, and a ratio of about 1000 is generally observed for a growing stress-corrosion crack. As in the case of a growing crack, the pit walls must exhibit some passive-film-forming capability in order for the corrosion ratio to exceed 1. A change in the corrosive environment and potential within a pit may also be necessary for the pit to act as a crack initiator. Pits can act as occluded cells similar to cracks and crevices, although in general their volume is not as restricted. There are a number of examples in which stresscorrosion cracks initiated at the base of a pit by intergranular corrosion. In these circumstances, the grain-boundary chemistry and the pit chemistry were such that intergranular corrosion was favored. Crack propagation was also by intergranular SCC in these cases. Although the local stresses and strain rates at the base of the pit play a role in SCC initiation, there are examples of preexisting pits that did not initiate stress-corrosion cracks.

This observation has led to the conclusion that the electrochemistry of the pit is more important than the local stress or strain rate. A preexisting pit may not develop the same local electrochemistry as one grown during service, because the development of a concentration cell depends on the presence of an actively corroding tip that establishes the anion and cation current flows. Similarly, an inability to reinitiate crack growth in samples in which active growth was occurring before the samples were removed from solution, rinsed, dried, and

reinserted into solution also suggests that the local chemistry is very important. *Crack Initiation by Intergranular Corrosion or Slip Dissolution.*

Stress-corrosion crack initiation can also occur in the absence of pitting by intergranular or slip-dissolution processes. Intergranular corrosion-initiated SCC requires that the local grain-boundary chemistry differ from the bulk chemistry. This condition occurs in sensitized austenitic stainless steels or with the segregation of impurities such as phosphorus, sulfur, or silicon in a variety of materials. Slip-dissolution-initiated SCC results from local corrosion at emerging slip planes and occurs primarily in low stacking-fault materials.

The processes of crack initiation and propagation by the slip-dissolution process are in fact very similar. Crack initiation can be thought of as occurring in several stages, including the first few atomic layers that fail due to the transition from shortcrack to long-crack behavior. Evidence obtained by electrochemical and acoustic-emission monitoring of crack initiation in austenitic stainless steel suggests that the process occurs by the initiation of multiple short cracks prior to the propagation of a single dominant crack.

Retardation of the initiated cracks occurs because of variations in grain-boundary sensitization, crack angle, electrochemistry, and so on, with cracks being arrested after they grow about one grain diameter. Details of the conditions required for a single dominant crack to propagate have not been fully evaluated, but most likely it is a statistical process where there is a finite probability for a crack to find a path that does not retard its growth. Another concept suggested by Parkins for gas pipeline SCC initiation involves crack coalescence. It has been suggested that crack initiation in gas pipeline steels occurs by the following steps:

- Penetration of ground water to the pipeline surface and generation of a critical SCC environment
- Initially rapid formation of multiple cracks, the velocity decreasing with time to a constant value
- A period of constant crack-growth velocity

- Conventional stages 1,2, and 3 as described by single-crack behavior, during which time crack coalescence leads to final fracture