

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

**«Ухтинский государственный технический университет»**

На правах рукописи



ОНАЦКИЙ ВАДИМ ЛЕОНИДОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ  
РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ ПОД  
НАПРЯЖЕНИЕМ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ**

Специальность:

25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и  
хранилищ

Диссертация

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
профессор  
Агине́й Руслан Викторович

**Ухта – 2017**

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Аналитический обзор методов повышения работоспособности газопроводов, подверженных стресс-коррозии .....	11
1.1 Механизмы образования и развития КРН .....	11
1.2 Анализ факторов, инициирующих образование и развитие КРН.....	13
1.2.1 Влияние внешней среды.....	14
1.2.2 Механические напряжения .....	18
1.2.3 Металлургические факторы.....	20
1.3 Особенности распределения дефектов КРН магистральных газопроводов .....	22
1.4 Экспериментальные исследования процессов возникновения и развития дефектов КРН .....	24
1.5 Анализ методов предотвращения КРН магистральных газопроводов.....	24
1.5.1 Решения, направленные на предотвращение КРН .....	25
1.5.2 Решения, направленные на своевременное выявление и ремонт дефектов КРН .....	27
1.6 Выводы по главе 1. Постановка цели и задачи исследования.....	29
Глава 2. Анализ особенностей распределения дефектов крн на длительно эксплуатируемых участках газопровода.....	31
2.1 Общая характеристика объекта исследования.....	31
2.2 Особенности распределения стресс-коррозионных дефектов .....	31
2.2.1 Распределение дефектов КРН по окружности газопровода .....	31
2.2.2 Влияние расстояния до точки дренажа СКЗ на количество и размеры дефектов КРН .....	35
2.2.3 Влияние удельного электрического сопротивления грунта на количество дефектов КРН .....	39
2.2.4 Вероятность образования дефектов КРН в зависимости от толщины стенки трубы.....	42
2.2.5 Распределение дефектов КРН относительно сварного шва .....	43
2.3 Выводы по главе 2.....	45
Глава 3. Разработка методики стендовых испытаний.....	47
3.1 Сущность методов исследований.....	47
3.2 Исследование влияния катодной поляризации на ток проникновения водорода в поверхность стального образца .....	47
3.2.1 Математическое планирование эксперимента.....	47
3.2.2 Экспериментальная установка и оборудование для проведения испытаний.....	49
3.2.3 Порядок проведения эксперимента.....	58

3.3 Исследование влияния катодной поляризации, рН среды и тока проникновения водорода в образец на механические свойства.....	58
3.3.1 Математическое планирование эксперимента.....	59
3.3.2 Образцы для испытаний.....	59
3.3.4 Измерительная ячейка.....	61
3.3.5 Экспериментальная установка.....	61
3.3.6 Ультразвуковой твердомер.....	63
3.4 Порядок проведения эксперимента.....	64
3.4.1 Подготовка оборудования и образцов к проведению испытаний.....	64
3.4.2 Порядок проведения испытаний.....	65
3.4.3 Порядок анализа результатов испытаний.....	66
3.5 Выводы по главе 3.....	67
Глава 4. Анализ результатов лабораторных испытаний.....	68
4.1 Оценка влияния среды и потенциала катодной защиты на ток проникновения водорода.....	68
4.2 Оценка влияния коррозионно-активной среды, количества водорода катодной реакции и времени экспонирования на механические характеристики образцов труб.....	71
4.2.1 Оценка влияния среды на поврежденность образцов труб.....	71
4.2.2 Оценка влияния количества водорода катодной реакции на поврежденность образцов металла труб.....	73
4.2.3 Оценка влияния времени экспонирования на поврежденность труб.....	77
4.3 Обработка результатов испытаний методами математической статистики.....	82
4.4 Выводы по главе 4.....	85
Глава 5. Разработка практических рекомендаций по совершенствованию системы коррозионного мониторинга состояния магистральных газопроводов..	87
5.1 Определение места установки датчиков тока, инициируемого выделением водорода.....	87
5.2 Алгоритм обработки данных.....	91
5.3 Конструктивные решения по схеме подключения датчика.....	97
5.3.1 Порядок подключения датчика ДН-1 к магистральному газопроводу.....	100
5.3.2 Порядок определения эффективного потенциала «труба-земля».....	102
5.4 Выводы по главе 5.....	103
Основные выводы и рекомендации.....	104
Список использованных источников.....	106

## **Введение**

### **Актуальность темы**

Протяженность современной системы магистральных трубопроводов в Российской Федерации составляет более 257,8 тыс. км из которых на долю газопроводов приходится порядка 180,2 тыс. км, на долю нефтепроводов – 55,3 тыс. км. Магистральные нефтегазопроводы относятся к объектам повышенного риска и опасности, поэтому безаварийное функционирование этих систем является важнейшей задачей предприятий, осуществляющих транспорт нефти и газа [18,33]. По данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [47-58] минимум каждая третья авария на магистральных газопроводах происходит по причине коррозионного растрескивания под напряжением (стресс-коррозия, КРН). В частности, в период с 2000 года по настоящее время по причине КРН произошли порядка 67% всех аварий в ООО «Газпром трансгаз Ухта» и 61% всех аварий в ООО «Газпром трансгаз Югорск» [11, 21].

**Степень разработанности темы исследования.** При капитальном ремонте газопроводов обнаруживаются тысячи незначительных дефектов стресс-коррозии, предполагающих 100% замену ремонтируемых труб, что является неприемлемым и нерациональным в существующих технико-экономических условиях. Поэтому специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разрабатываются критерии дифференцированных подходов в отбраковке труб. Надежная эксплуатация труб с незначительными дефектами КРН должна обеспечиваться системой мер, предотвращающих их возможный дальнейший рост. Однако такие методы разработаны и апробированы недостаточно полно.

В ряде работ [5,89] показано, что сдерживать рост повреждений КРН возможно оптимальным регулированием работы средств противокоррозионной защиты, однако обеспечить заданные режимы работы на протяженном участке сложно, а принципы выбора участков трассы магистрального газопровода и

обеспечения такой защиты на протяженном участке линейной части магистрального газопровода не разработаны.

**Цель работы.** Выявление закономерностей развития коррозионного растрескивания под напряжением материала труб магистральных газопроводов в условиях функционирования средств противокоррозионной защиты для создания научно обоснованных технических и технологических решений по совершенствованию метода предупреждения развития стресс-коррозии, основанного на эффективном регулировании средств противокоррозионной защиты.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ особенностей расположения дефектов КРН на длительно эксплуатируемых участках магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии;

2. С учетом требований теории планирования экспериментов разработать методику проведения испытаний образцов труб в условиях одновременного имитационного воздействия механических напряжений, агрессивной коррозионной среды и катодной поляризации;

3. Обосновать критерий эффективности электрохимической защиты, обеспечивающий одновременно защиту от коррозии и предотвращение развития КРН. Доказать количественные значения потенциала эффективной защиты, не допускающие изменения механических свойств образцов.

4. Разработать систему контроля потенциала эффективной защиты и рекомендации по ее внедрению в существующую систему коррозионного мониторинга магистральных газопроводов.

**Соответствие паспорту специальности.** Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно области исследования: 6 «Разработка и совершенствование методов эксплуатации и

технической диагностики оборудования насосных и компрессорных станций, линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии» и 2 «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии».

### **Научная новизна:**

1. Выявлена связь между количеством, максимальной глубиной дефектов КРН на участке магистрального газопровода и расстоянием до точки дренажа ближайшей станции катодной защиты, характеризующаяся линейной обратно пропорциональной зависимостью.

2. Экспериментально доказано, что по точке излома кривой тока водорода, выделяющегося на катоде, можно определить эффективный для данных условий потенциал «труба-земля».

3. Обнаружен эффект разнонаправленного изменения дисперсии твердости образцов стали марки стали 17Г1С при их экспозиции в условиях действия механических напряжений, коррозионной среды и катодной поляризации: для образцов, имеющих начальную дисперсию твердости менее 550 - 600 НВ<sup>2</sup>, характерен первичный рост дисперсии твердости в процессе испытания, при начальных значениях дисперсии более 650-700 НВ<sup>2</sup> происходит первоначальное уменьшение дисперсии.

4. Экспериментально установлено, что при поддержании в процессе испытаний защитного потенциала, соответствующего окислительной реакции металла в диапазоне минус 0,8-0,9 В (по медносульфатному электроду) изменения механических свойств поверхности стали незначительны: дисперсия твердости изменяется от начальных значений на величину не более 500 единиц и не зависит от водородного показателя среды и времени экспонирования.

**Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:**

доказано, что в отличие от коррозионных процессов, КРН характеризуются прямой зависимостью между удельным электросопротивлением околотрубного грунта и вероятностью развития КРН;

изложены принципы определения эффективного для конкретных условий потенциала «труба-земля»;

раскрыты основные зависимости вероятности возникновения стресс-коррозионных дефектов от удельного электросопротивления грунта и расстояния до точки дренажа средств электрохимической защиты газопровода;

изучены характерные особенности распределения стресс-коррозионных дефектов на участке длительно эксплуатируемого магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км;

проведена модернизация метода предупреждения развития стресс-коррозии, что позволяет в комплексе с другими мероприятиями обеспечить безаварийную эксплуатацию газопроводов, имеющих трещины КРН глубиной до 5-8% от номинальной толщины стенки.

**Практическая значимость работы определяется тем, что:**

разработан ряд конструктивных решений, включая обеспечение автономной защиты мембраны датчика протекторной установкой;

представлена методика интеграции датчиков тока, инициируемого выделением водорода, в систему коррозионного мониторинга магистральных газопроводов;

создан алгоритм математической обработки данных, который можно использовать при разработке программного обеспечения для автоматического определения эффективного потенциала катодной поляризации системами коррозионного мониторинга;

определены критерии, вошедшие в систему балльной оценки ранжирования участков газопроводов, апробированную на участке газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км и позволяющую обосновать необходимость установки датчиков тока, инициируемого выделением водорода на трассе газопровода.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный метод, включающий научный анализ, экспериментальные исследования, абстрагирование, индукцию, методы статистической обработки результатов измерений.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается применением образцов, изготовленных из длительно эксплуатировавшегося газопровода и современного и поверенного оборудования при проведении экспериментов, а также использованием известных положений теории планирования эксперимента при разработке методики эксперимента.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что уточненные критерии, определяемые значениями, включающими удельное электросопротивление грунта, толщину стенки трубы, близость к точке дренажа ближайшей станции катодной защиты, позволяют с достаточной для практики эксплуатации достоверностью ранжировать участок магистрального газопровода по степени предрасположенности к образованию дефектов стресс-коррозии.

- Экспериментально установлено, что предложенный в работе критерий определения эффективного потенциала катодной защиты, применение которого на участке газопровода с дефектами стресс-коррозии, позволяет предупредить их дальнейшее развитие, при этом при поддержании потенциала металла относительно грунта в области значений ниже точки излома кривой Тафеля не происходит заметного изменения механических свойств металла в процессе экспозиции при заданных режимах испытаний, а по количеству выделяющегося



на катоде водорода в точке излома, можно определить эффективный для данных условий потенциал «труба-земля».

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследования, разработке методики экспериментальных работ, в написании основного содержания статей, а также в проведении экспериментальных работ и анализа результатов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт-2012» (УГНТУ, г. Уфа, 2012, 2015 г.);
- Международном семинаре «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2013-2017 г.);
- Международной молодежной научной конференции «Севергеозкотех» (УГТУ, г. Ухта, 2014, 2015 гг.);
- VI Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (ПГУ, Республика Беларусь, г. Новополоцк, 2014 г.);
- Научно-практическом семинаре «Повышение надежности магистральных газопроводов коррозионному растрескиванию под напряжением» (Газпром ВНИИГАЗ, Московская область, п. Развилка, 2015, 2016 г.);
- I Международной конференции «Трубопроводный транспорт. Теория и практика - 2016» (г. Москва, 2016 г.);
- Межрегиональном вебинаре «Актуальные вопросы транспорта нефти и газа» (УГТУ, г. Ухта, АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород, 2014-2016 гг.).

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 5 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Результаты диссертационного исследования **используются** в образовательном процессе бакалавров и магистров направления подготовки

«Нефтегазовое дело» в рамках изучения дисциплин «Противокоррозионная защита» и «Электрохимические методы защиты газонефтепроводов» на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» Ухтинского государственного технического университета.

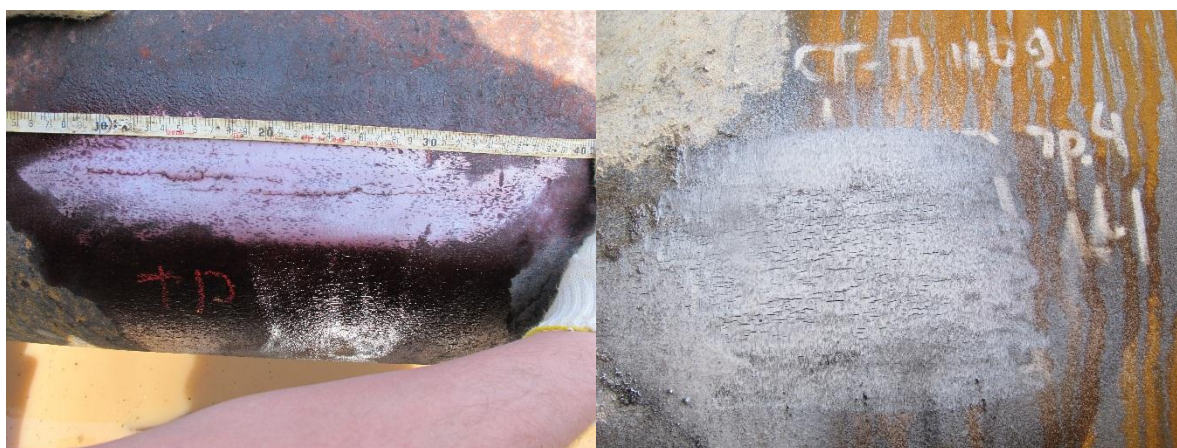
**Структура и объем работы:** диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 117 страниц текста, 58 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 100 наименований.

## **Глава 1. Аналитический обзор методов повышения работоспособности газопроводов, подверженных стресс-коррозии**

*Рассмотрены известные механизмы образования и развития стресс-коррозии, факторы их инициирующие. Проведен анализ методов предотвращения аварийных разрушений, спровоцированных стресс-коррозией. Произведена постановка цели и задач исследования.*

### **1.1 Механизмы образования и развития КРН**

Коррозионное растрескивание под напряжением (стресс-коррозия) – процесс образования и развития колоний поверхностных трещин (рис. 1.1) на изолированной и катодно-защищенной поверхности газопроводов под воздействием механических напряжений и агрессивных коррозионных сред. Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) приводит к локальному снижению механической прочности металла газопровода вплоть до его резкого разрушения под действием механической нагрузки.



**Рисунок 1.1 – Колонии стресс-коррозионных трещин**

Современные отечественные и зарубежные исследователи выделяют два механизма возникновения КРН: стресс-коррозия, вызванная локальным анодным растворением («классическое КРН», карбонат-бикарбонатное КРН, КРН при высоком рН, интеркристаллитное) [13,14,16,32] и стресс-коррозия, протекающая по механизму водородного охрупчивания («неклассическое КРН», КРН при

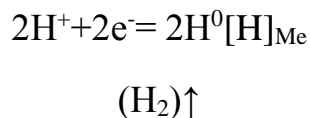
низком рН, КРН при рН близком к нейтральному, транскристаллитное КРН) [74,60,61,72].

Карбонат-бикарбонатное КРН [32,61,40,91] предполагает ускоренное локальное растворение металла в вершине трещины. Локализацию этого процесса связывают с электрохимической неоднородностью поверхности металла, вызванной снижением потенциала металла в условиях концентрации напряжений и/или разрушением защитной пленки и возникновения ювенильной (свежеобразованной) поверхности, и, как следствие, образованием гальванических пар и растворением анодных участков. Распространение трещины обеспечивается за счет максимальной локализации процесса анодного растворения. Для «классического» КРН характерны следующие особенности протекания процесса:

- присутствие карбонат-бикарбонатных электролитов высокой концентрации;
- щелочная реакция электролита,  $\text{pH} > 8,5$ ;
- потенциал коррозии, изменяющийся от минус 0,6 до минус 0,79 В м.с.э;
- экспоненциальное увеличение скорости роста трещины с увеличением температуры;
- высокая плотность трещин.

КРН, протекающее по механизму водородного охрупчивания [38,61,71,41,90] хоть и было выявлено позже карбонат-бикарбонатного и является «неклассическим» случаем КРН, также изучено в достаточной степени. Под термином «водородное охрупчивание», как правило, подразумевают ухудшение механических свойств конструкционных сплавов, вызванное влиянием наводороживания из газовой или жидкой среды. Присутствие водорода способствует возникновению хрупкого разрушения за счет деформации скола, межзеренного разделения, пластических деформаций, образования фаз,

вызывающих охрупчивание. Химическая реакция предполагает разряд ионов водорода на поверхности стали в результате катодной реакции:



Затем происходит проникновение и перенос (дислокационный или диффузионный) атомарного водорода в области повышенных концентраций напряжений (к вершине трещины) и облегченное продвижение трещины в результате обусловленного водородом снижения пластичности наводороженного металла.

На сегодняшний день известны следующие механизмы водородного охрупчивания низколегированных конструкционных сплавов:

- образование очагов высокого молекулярного давления – полостей, возникающих в зонах пересыщения и заполненных газофазным водородом в равновесии его с пересыщенным раствором;
- механизм декогезии – облегчение разрыва межатомных связей, вызывающее локальное понижение когезионной прочности металла;
- дислокационные механизмы – локальное изменение пластичности металла, вызванное снижением или увеличением подвижности и скорости размножения дислокации.

## **1.2 Анализ факторов, инициирующих образование и развитие КРН**

По мнению практически всех исследователей [71,90,32,1,73,74,75,60,40,41,95] стресс-коррозионных процессов, образование и развитие КРН активизируется при одновременном сочетании следующих групп факторов:

- комплексное влияние внешней среды;
- механические напряжения;

- металлургические факторы.

### **1.2.1 Влияние внешней среды**

Известно, что процессы КРН могут развиваться только при наличии прямого контакта внешней среды с поверхностью газопровода, что может быть обусловлено разрушением или отслоением защитного покрытия. В целом, выделяют несколько аспектов влияния внешней среды на возникновение и развитие КРН, зачастую являющихся направлениями самостоятельных исследований групп авторов:

- рН грунтового и подпленочного электролитов;
- химический состав грунтового электролита;
- влияние катодной защиты магистральных газопроводов;
- степень увлажненности и тип грунта;
- температура.

#### ***Влияние рН грунтового и подпленочного электролитов***

Водородный показатель среды является очень важным фактором при коррозионных процессах. В кислых средах, как правило, процесс коррозии протекает по механизму водородной деполяризации, в нейтральных и щелочных – происходит восстановление водорода в присутствии воды. Величина рН грунтового электролита обычно составляет 5-8 единиц, редко встречаются отклонения до 5 в болотных грунтах и свыше 9 в карбонатных породах. Анализ проб электролита, взятого из-под отслоившегося защитного покрытия, показывает, что в местах транскристаллитного КРН величина рН составляет от 5,5 до 7,5 единиц. [37,93]

#### ***Химический состав грунтового электролита***

Одной из характерных особенностей стресс-коррозии является тот факт, что отдельные металлы и сплавы предрасположены к ней только при наличии в составе электролита определенных специфических ионов. Один и тот же ион может замедлять растрескивание одного сплава и ускорять растрескивание

другого. Так, например, ион  $\text{NO}_3^-$  вызывает растрескивание углеродистых и тормозит растрескивание аустенитных сталей. В свою очередь, хлор-ионы, наоборот, вызывают растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей, но предотвращают КРН углеродистых в растворах нитратов.

Химический анализ многочисленных проб из-под отслоившегося защитного покрытия показывает наличие в нем карбонат и бикарбонат ионов. Также отмечено содержание в газовой фазе грунта  $\text{CO}_2$  с концентрацией, изменяющейся в пределах 4-23%. Исследования влияния концентрации  $\text{CO}_2$  на рост стресс-коррозионной трещины показывают, что увеличение  $\text{CO}_2$  с 0 до 15% ускоряет рост трещины в образцах из стали X65 в растворе  $\text{NS}_4$ . Увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в газе над раствором  $\text{NS}_4$  (от 0 до 100%) приводит к снижению трещиностойкости стали X70 и pH раствора с 9 до 5,8 единиц. Ускорение роста трещины при увеличении концентрации  $\text{CO}_2$  может быть связано с ростом концентрации ионов водорода в растворе или его буферной емкости [35,98,101].

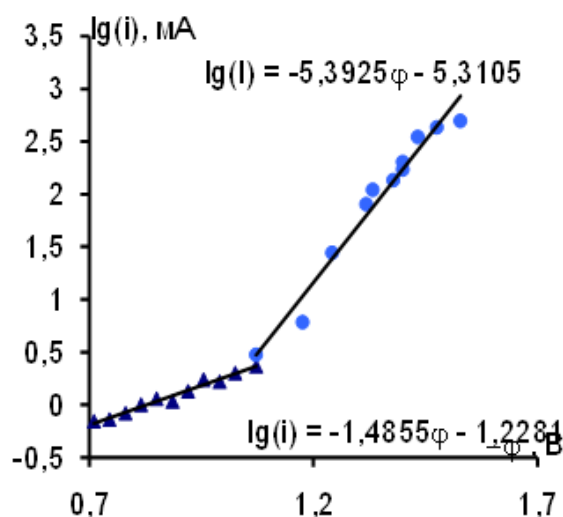
Кроме карбонат ионов в местах обнаружения КРН, как правило, присутствуют так же хлориды, нитраты и сульфаты. Эти анионы могут влиять на скорость активного растворения железа и величину потенциала питтингообразования, но целенаправленных исследований действия активаторов растворения и локальной коррозии на возникновение и развитие КРН трубных сталей проведено не было.

По сравнению с анионами, влияние катионов на скорость электрохимических реакций менее значительно. Выдвигаются предположения, что под действием катодной защиты присутствие в коррозионной среде ионов кальция приводит к тому, что pH околотрубного электролита остается близким к нейтральному, что, в свою очередь, может привести к КРН трубной стали. Однако, этот эффект нуждается в более доскональном исследовании.

### ***Влияние катодной защиты магистральных газопроводов***

Влиянию катодной защиты магистральных газопроводов на процессы возникновения и развития стресс-коррозионных процессов посвящено большое

количество работ, но единое мнение по данному вопросу до сих пор не сформировано [90,32,75,7,3]. В работах, посвященных анализу причин возникновения дефектов КРН, часто делается вывод, что влияние катодной поляризации на зарождение стресс-коррозионных процессов не очевидно. Однако, это может быть связано с тем, что, как правило, исследования проводились в рамках одного эксплуатационного участка и на газопроводах, не оборудованных средствами дистанционного коррозионного мониторинга, что может ставить под сомнение достоверность анализируемых данных. Авторы многих работ, посвященных КРН трубных сталей, делают вывод, что неклассическое КРН наблюдается при потенциале коррозии или на 0,05-0,1 В отрицательнее него. Этот факт связывают с возникновением водородного охрупчивания металла трубы. В работе [16] в ходе лабораторных испытаний образцов трубной стали в 3%-м растворе NaCl выявлено, что выделение водорода происходит при потенциалах ниже минус 1,06 В (м.с.э.) (рис. 1.2). Хотя эта величина находится в пределах, рекомендуемых ГОСТом [26], но, по мнению авторов, не следует создавать такие потенциалы.



**Рисунок 1.2 – Логарифмическая зависимость тока катодной защиты от величины потенциала [89]**



Тем не менее, вопрос влияния катодной поляризации на вероятность возникновения и развития стресс-коррозионных трещин требует более доскональной проработки.

### ***Степень увлажненности и тип грунта***

Статистика аварий и результаты исследований [70,74,82] показывают, что дефекты КРН могут возникать и развиваться в различных типах грунтов по разным механизмам в зависимости от коррозионной активности грунта. В большинстве случаев аварийные разрушения магистральных газопроводов по причине КРН происходят на участках, проложенных в тяжелых глинистых и суглинистых грунтах. В тоже время, тип грунта не является достаточным условием для образования дефектов КРН. Суглинистые и глинистые грунты достаточно распространены, но аварийные разрушения происходят не повсеместно.

Объем грунтовых вод представляет для исследователей интерес, поскольку непосредственно связан с коррозионной активностью среды. Данные статистики [77,81] показывают, что более половины стресс-коррозионных дефектов образовывались на участках с периодической смачиваемостью грунтовыми водами. Одно лишь наличие грунтовых вод не может быть определяющим фактором при развитии стресс-коррозионных процессов, так как это не объясняет отсутствие всплеска аварийных разрушений по причине КРН на заболоченных участках и при пересечении газопроводом естественных и искусственных водных преград.

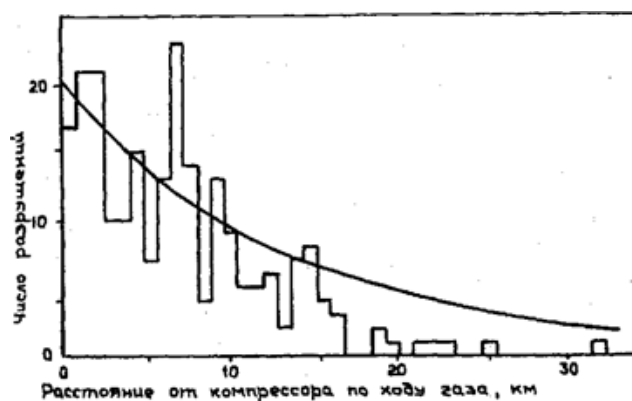
### ***Температура***

Температуры газа, отмеченные при авариях по причине КРН, в большинстве случаев, находятся в интервале 35-60°C. Результаты лабораторных испытаний показывают выраженную температурную зависимость склонности к «классическому» КРН, хорошо коррелирующую с распределением разрушений в зависимости от расстояния до компрессорной станции (рис. 1.3).

«Неклассическое» КРН, наоборот, чувствительности к температуре не показывает ни в лабораторных, ни в трассовых условиях. [16,32,33,75]

Температурное влияние на интеркристаллитное КРН обычно объясняют следующим:

- чем выше температура, тем выше вероятность повреждения и отслоения защитного покрытия;
- интенсивность формирования опасных концентраций карбонат-бикарбонатных соединений с повышением температуры возрастает;
- увеличение скорости роста трещин с повышением температуры.



**Рисунок 1.3 – Частота аварийных разрушений от КРН при высоком рН вдоль газопроводов в зависимости от расстояния от компрессорной станции [84]**

### 1.2.2 Механические напряжения

По своему происхождению механические напряжения магистральных газопроводов бывают внутренние, возникающие в результате деформации или термообработки металла труб и внешние, вызванные приложенными извне нагрузками, а по своему характеру – постоянными и временными. [74,39]

В зависимости от масштабов распространения, выделяют следующие виды механических нагрузок:

- макроскопические (напряжения первого рода) – уравнивающиеся в объемах, соизмеримых с размерами труб;

- микроскопические (напряжения второго рода) – уравнивающиеся в пределах отдельных элементов кристаллической структуры трубной стали;

- субмикроскопические (напряжения третьего рода) – уравнивающиеся в пределах кристаллической решетки стали.

Механические напряжения оказывают большое влияние на коррозионное поведение металла, а именно:

- нарушают сплошность защитных пленок на металлах;
- локализуясь, усиливают электрохимическую гетерогенность металла;
- понижают термодинамическую стойкость металла, наделяя его дополнительной энергией;
- могут вызвать пластическую деформацию и фазовые превращения.

Известны следующие виды нагрузок, действующих на магистральные газопроводы, и возникающие в следствие этого напряжения:

- нагрузки, обусловленные изменением температуры при эксплуатации и нестабильными грунтами (сезонное оттаивание грунтов, всплытие, обводнение, просадки и др.);
- остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления труб;
- сварочные напряжения (в области продольных и кольцевых швов);
- нагрузки, возникающие на стадии укладки газопровода и их изменение с появлением изгибающих напряжений на стадии эксплуатации;
- давление перекачиваемой среды. Напряженное состояние создается под действием внутреннего давления в стенке трубы. Самой большой составляющей такого напряженного состояния являются кольцевые напряжения. Наибольшее влияние на стресс-коррозионные процессы оказывают циклические нагрузки, обусловленные пульсацией давления перекачиваемого газа за счет особенностей технологического процесса перекачки и переключения потоков газа в многониточной системе газопроводов.

В условиях одновременного действия на металл газопровода механических напряжений и коррозионно-агрессивных сред выделяют, как правило, два вида влияния эксплуатационного механического фактора. Первый обуславливает образование и развитие КРН под действием квазистатических растягивающих напряжений, близких к пределу упругости. Необходимое для развития стресс-коррозионных процессов растягивающее напряжение может быть как приложенным, так и остаточным. Напряжения сжатия КРН не вызывают. Второй вид – разрушение металла под действием периодической знакопеременной динамической нагрузки (коррозионная усталость). Некоторые авторы [75,96] считают, что КРН можно рассматривать как специфическую модификацию статической усталости.

### **1.2.3 Металлургические факторы**

Особое внимание изучению влияния металлургических факторов на зарождение и развитие трещин, вызванных КРН, уделяется в связи с тем, что данные статистики и результаты исследований и отечественных, и зарубежных авторов подтверждают предрасположенность к стресс-коррозии металла труб, изготовленных по определенным технологиям, в том числе, у определенных производителей. [10]

Для транскристаллитного КРН характерной закономерностью является повышенная чувствительность к растрескиванию при росте прочностных характеристик стали (пределов прочности и текучести). Для «классического» КРН такой связи не наблюдается. Добавки хрома, никеля и молибдена в количестве от 2 до 6% повышают стойкость сталей к интеркристаллитному растрескиванию. Большинство исследователей стресс-коррозии трубных сталей отмечают, что химический состав оказывает меньшее влияние на склонность сталей к растрескиванию, чем микроструктура.

Так, в работе [4] показано, что стали, получаемые в результате контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, наиболее благоприятны с

точки зрения сопротивления стресс-коррозионным процессам. Также получены данные о негативном влиянии высокого содержания углерода, особенно для сталей контролируемого проката.

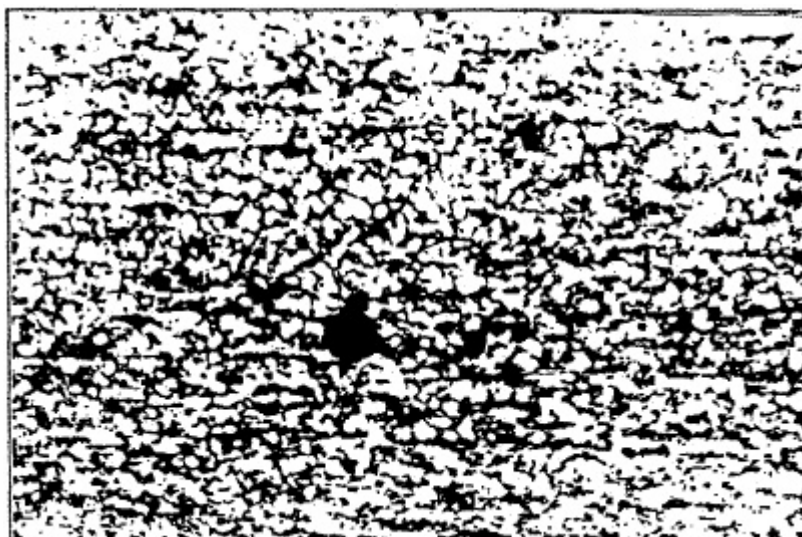
В работах Отта К.Ф. [43-47] в качестве основного фактора выделяется влияние содержания неметаллических включений на протекание КРН. Считая, что включения находятся на поверхности стали, автор утверждает, что при наличии внешней жидкой среды (грунтовый электролит) адсорбционный эффект понижения поверхностной энергии металла на границе "металл-включение" из всех прочих является определяющим. Также активизируется протекание химической адсорбции - каталитической реакции соединения на металлической матрице в окрестностях включений азота с водородом и выходом аммиака, и усиливается действие эффекта Ребиндера. Проявляется электрохимическая гетерогенность поверхности стали с неметаллическими включениями, увеличивающаяся при наличии внешних напряжений. Включения являются катодами по отношению к металлической матрице, что приводит к электрохимическому "растворению" металла вокруг включений при воздействии почвенного электролита.

Паркинс Р.Н. [94, 96, 97] в своих работах придерживается мнения, что склонность стали к циклическому разупрочнению является функцией микроструктуры стали. Его немногочисленные исследования приводят к заключению, что бейнитные стали имеют меньшую тенденцию к разупрочнению, чем феррито-перлитные, применяемые для газопроводов. Некоторыми исследователями предлагается повысить давление при гидроиспытаниях, однако это направление имеет много оппонентов.

Современные исследования [42, 87, 32] все чаще указывают на несовершенство структуры (рис. 1.4) и наличие дислокаций в качестве основного металлургического фактора при зарождении и развитии стресс-коррозионных процессов, отходя от исключительности «вины» неметаллических включений.



а)



б)

**Рисунок 1.4 – Неоднородность структуры в сталях, x120: а) 17Г1С;  
б) X70 [31]**

### **1.3 Особенности распределения дефектов КРН магистральных газопроводов**

Анализу особенностей распределения дефектов КРН магистральных газопроводов, а также факторов, влияющих на их образование, посвящены работы В.Н. Юшманова, Ю.В. Александрова, В.О. Соловья, Е.А. Спиридовича, М.А. Конаковой, Ю.А. Теплинского.

В частности, Юшманов В.Н. [89,88] в своих работах описывает преобладающее влияние типа грунта, уровня грунтовых вод, водородного показателя среды и потенциала катодной поляризации на образование и развитие стресс-коррозионных дефектов. Автором проведен широкий ряд экспериментов, направленных на выявление конкретных значений факторов, инициирующих КРН. Результаты проведенных исследований показывают, что воздействие одного выделенного фактора не вызывает образование стресс-коррозионных трещин. Существует необходимость в исследовании одновременного влияния факторов из всех трех групп.

Конакова М.А. [31,82] в своих трудах при анализе факторов, провоцирующих образование и развитие дефектов КРН, основное внимание уделяет группе металлургических факторов (состав и свойства трубной стали) и, частично, влиянию внешней среды (температура, состав и характеристики грунтового электролита). Среди причин аварийных отказов газопроводов по причине КРН автором выявлены следующие общие черты: дефектное состояние изоляции, тип грунта – глины и суглинки, близость к станции катодной защиты, уровень рН в пределах  $5 \div 7,5$ , переменная смачиваемость поверхности трубы. Одной из особенностей аварийных разрушений по причине КРН, по мнению автора, является связь линии разрыва с расположением сварных швов. Во всех рассмотренных авариях линия разрушения проходила вдоль сварного шва на расстоянии от 0,2 до 0,5 м. Также автором отмечается, что стресс-коррозионные процессы развиваются независимо от коррозионной активности грунтов – разрушения газопроводов зафиксированы даже при слабой активности грунтов. Коррозионно-механические испытания образцов из стали 14Г2САФ подтверждают теории о кислом и нейтральном рН, характерных для развития КРН по механизму водородного охрупчивания. Однако, методика проведения испытаний не включает в себя воздействия на образец катодной защиты и требует доработки.

#### **1.4 Экспериментальные исследования процессов возникновения и развития дефектов КРН**

С самого начала возникновения проблемы КРН магистральных газопроводов экспериментальным исследованиям, направленным на моделирование процессов зарождения и развития стресс-коррозионных трещин, посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов, Агинея Р.В., Александрова Ю.В., Богданова Р.И., Конаковой М.А., Кузьбожева А.С., Соловья В.О., Спиридовича Е.А., Теплинского Ю.А., Юшманова В.Н и других.

В работах Александрова Ю.В., Богданова Р.И., Юшманова В.Н. проводились испытания по определению степени влияния факторов, инициирующих зарождение стресс-коррозионных трещин. Авторами получено множество важных зависимостей, однако, не были определены параметры, характеризующие начало зарождения трещин. Это может быть связано с недостаточной продолжительностью испытаний или с тем, что внимание уделялось одному-двум факторам, тогда как для зарождения и развития стресс-коррозионной трещины необходимо одновременное влияние факторов из всех трех групп. Анализ испытаний также показывает, что на сегодняшний день не существует прибора, позволяющего фиксировать начало изменений в металле газопровода неразрушающим способом [5, 12].

#### **1.5 Анализ методов предотвращения КРН магистральных газопроводов**

Все существующие методы предотвращения аварийных разрушений магистральных газопроводов по причине КРН принято разделять на две большие группы (рис 1.5):

- методы, связанные с предотвращением образования и развития КРН;
- методы, связанные с своевременным выявлением и устранением дефектов КРН. [2, 9]





**Рисунок 1.5. Методы предотвращения КРН магистральных газопроводов [2]**

### 1.5.1 Решения, направленные на предотвращение КРН

В настоящее время известны следующие методы предотвращения образования и развития стресс-коррозионных дефектов:

- снижение напряженного состояния газопроводов. Выдвигались предложения о снижении рабочего давления в ходе эксплуатации магистральных газопроводов таким образом, чтобы напряжения в металле труб не превышали 0,5 от предела текучести. Однако данное решение экономически нецелесообразно в силу серьезного снижения пропускной способности;

- повышение качества изоляционных покрытий. Защитные покрытия высокого качества исключают влияние внешних факторов на газопровод. Кроме того, разрабатываются изоляционные покрытия, включающие в свой состав ингибиторы коррозии. В частности, сотрудниками Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук совместно с сотрудниками ЗАО «Делан» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ» разработано и испытано защитное покрытие (рис. 1.6) на основе термостойкого армированного

материала «ДЕКОМ-РАМ» с ингибирующими КРН композициями ИФХАН-ПЗ (на основе фосформолибденовой кислоты и алициклического амина) и ИФХАН-29 (на основе жирных и аминокислот) [69,35,63]. Однако применение современных заводских защитных покрытий или покрытий с ингибирующими композициями возможно только в рамках проектов по капитальному ремонту или реконструкции участков магистральных газопроводов, что сопровождается большими финансовыми затратами;



**Рисунок 1.6 – Нанесение защитного покрытия с ингибиторами КРН**

- повышение эффективности катодной защиты. На сегодняшний день суть большинства работ по повышению эффективности катодной защиты сводится к определению таких значений выходной мощности СКЗ, при которых энергозатраты были бы минимальными [92,41]. Повышение эффективности работы станции катодной защиты с учетом ее возможного влияния на образование и развитие стресс-коррозионных дефектов является активно развивающимся направлением, но также не позволяет свести вероятность к нулю;
- изменение свойств агрессивной коррозионной среды (грунта);
- применение коррозионностойких труб. Одним из важных направлений предотвращения КРН магистральных газопроводов является повышение коррозионной стойкости непосредственно самих труб. Данный эффект может достигаться как разработками, направленными на получение новых, более совершенных, марок сталей, так и увеличением толщины стенки трубы.

### **1.5.2 Решения, направленные на своевременное выявление и ремонт дефектов КРН**

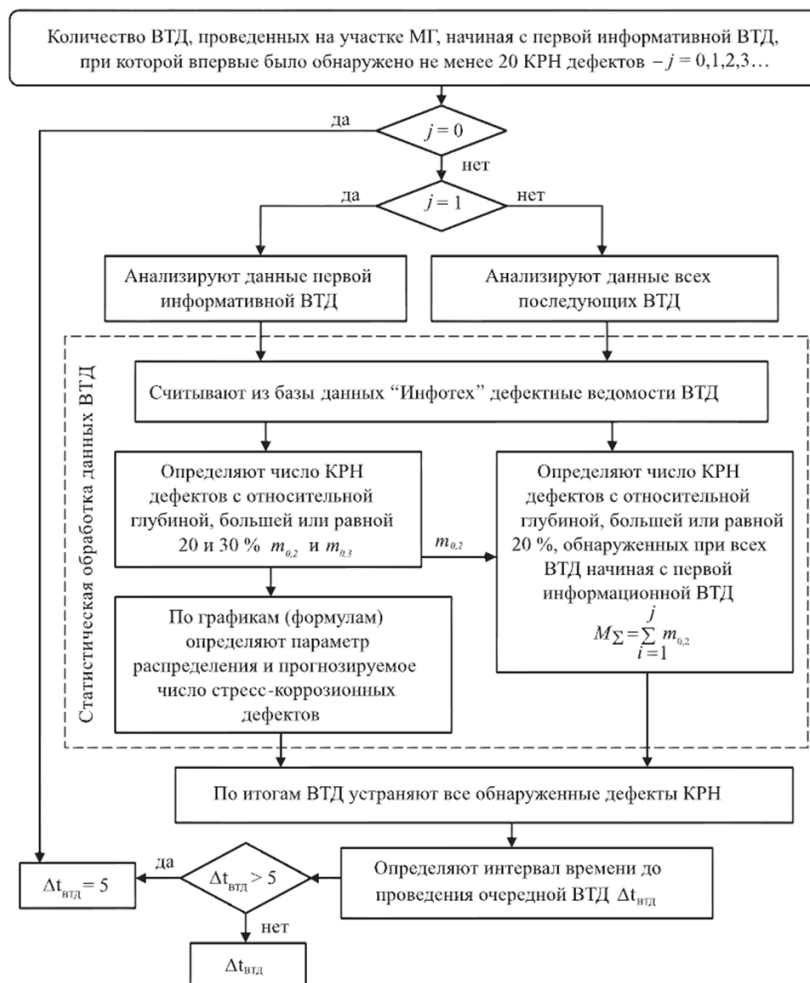
На сегодняшний день существует ряд нормативных документов, регламентирующих эксплуатацию газопроводов, потенциально подверженных стресс-коррозионному растрескиванию. В них в качестве базового используется алгоритм, основанный на определении периода внутритрубной диагностики (ВТД) (рис. 1.7) [76-79].

Однако данная методика, несмотря на детальную проработку, имеет на наш взгляд ряд существенных недостатков:

- наличие участков магистральных газопроводов, на которых применение ВТД невозможно. На сегодняшний день, более половины газопроводов ЕСГ недоступны для использования внутритрубной диагностики. Это связано с наличием большого количества «неравнопроходных» участков, сильно искривленных участков и участков, не оборудованных камерами приема и пуска очистных и диагностических устройств;
- индивидуальные особенности участков, потенциально предрасположенных к КРН (степень увлажненности, тип, pH грунта и т.д.) не учитываются базовым алгоритмом;
- высокая стоимость мероприятий по проведению ВТД;
- несмотря на высокий технологический уровень, современные средства внутритрубной диагностики способны выявить лишь дефекты размерами превышающие 15% от толщины стенки трубы, что делает возможным развитие стресс-коррозионных трещин до критических размеров в период между пропусками средств ВТД.

Кроме средств внутритрубной диагностики сегодня активно развиваются и другие методы контроля, способные выявлять дефекты КРН (наземная электрометрия, вихретоковый и акустический контроль). Известен также метод определения дефектных участков, основанный на измерении намагниченности

газопровода. Однако данный метод не позволяет идентифицировать дефект, а дает лишь интегральную оценку объекта, указывая на аномальные участки.



**Рисунок 1.7 – Порядок определения времени до очередного проведения внутритрубной диагностики для выявления КРН [75]**

Перечисленные здесь методы крайне трудоемки и нереализуемы без проведения шурфовки. Единственным эффективным методом на сегодняшний день остается использование внутритрубных диагностических снарядов с поперечным намагничиванием, но даже он не решает главной проблемы – устранение факторов, инициирующих образование и развитие стресс-коррозионных трещин. На практике были зафиксированы случаи повторных аварий по причине КРН на уже отремонтированных по результатам ВТД участках [75].

Еще одним перспективным направлением является поиск решений, направленных на эксплуатацию газопроводов с дефектами КРН. Так, например, сотрудниками ООО «Газпром ВНИИГАЗ» были проведены исследования [6], показывающие, что при механических нагрузках, не превышающих эксплуатационные, при условии исключения электрохимической составляющей процесса КРН (отсутствие доступа к грунтовому электролиту) установлено отсутствие развития трещин глубиной менее 10%. Данные исследования еще раз доказывают, что развитие стресс-коррозионных трещин возможно только в присутствии факторов из всех трех групп, указанных в разделе 1.2 настоящей работы.

## **1.6 Выводы по главе 1. Постановка цели и задачи исследования**

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- факторы, влияющие на образование и развитие стресс-коррозионных процессов, исследованы неравномерно. Влиянию некоторых из них (химический состав среды, состав и структура трубной стали) посвящено множество трудов, тогда как другим (катодная поляризация) - незаслуженно мало;
- существующие работы по анализу особенностей распределения дефектов КРН на магистральных газопроводах показывают противоречивые результаты. Существует необходимость подробного анализа на длительно эксплуатируемом участке газопровода с учетом широкого спектра факторов, инициирующих процессы образования и развития стресс-коррозионных трещин;
- лабораторные исследования, охватывающие все группы факторов, инициирующих образование и развитие трещин КРН, не проводились. Большинство исследователей в своих работах концентрировались на выделении одного конкретного фактора. Необходимы испытания образцов труб в условиях имитации воздействия всех групп факторов.

Сделанные выводы позволяют сформулировать цель и задачи настоящего исследования.

**Целью работы** является совершенствование методов предупреждения разрушения магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии.

Поставленная цель достигается путем решения следующих **задач**:

- выполнить анализ особенностей расположения дефектов КРН на длительно эксплуатируемых участках газопроводов;
- разработать с учетом требований теории планирования экспериментов методику проведения испытаний образцов труб в условиях одновременного имитационного воздействия механических напряжений, агрессивной коррозионной среды и катодной поляризации;
- определить по результатам исследований эффективный потенциал катодной защиты участка газопровода, предрасположенные к КРН;
- разработать рекомендации по внедрению методов предупреждения разрушения магистральных газопроводов по причине КРН на действующих участках.

## **Глава 2. Анализ особенностей распределения дефектов КРН на длительно эксплуатируемых участках газопровода**

*Рассмотрены параметры стресс-коррозионных дефектов магистральных газопроводов. Установлены взаимосвязи между дефектообразованием и факторами, инициирующими образование и развитие стресс-коррозионных трещин.*

### **2.1 Общая характеристика объекта исследования**

В ходе исследования выполнен анализ результатов диагностических обследований участка магистрального газопровода «Ухта-Торжок III», протяженностью 65,5 км в 2004, 2010 и 2014 годах, общее количество дефектов - 247. Участок введен в эксплуатацию в 1982 году. Наружный диаметр труб - 1420 мм. Толщина стенки – от 15,7 до 23,2 мм. Трубы стальные прямошовные, марка стали 17Г1С. Пассивная защита от коррозии реализуется полимерным покрытием на основе липких лент.

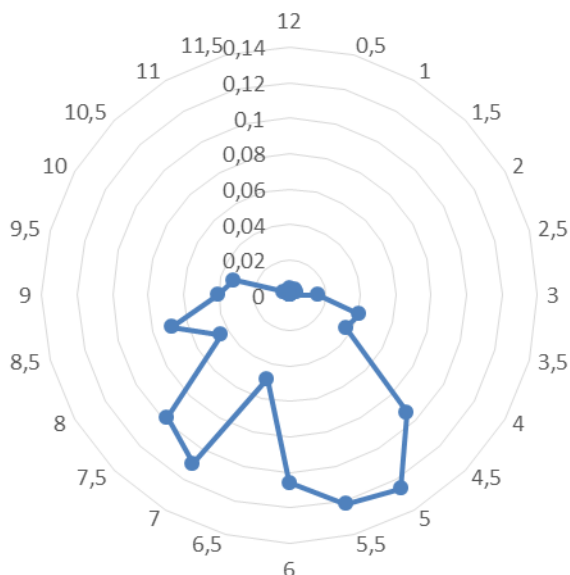
### **2.2 Особенности распределения стресс-коррозионных дефектов**

Ниже приведены результаты исследования распределения дефектов КРН, позволяющие определить зоны локализации и выявить потенциальные группы и количественные значения факторов, спровоцировавших возникновение и развитие стресс-коррозионных дефектов.

#### **2.2.1 Распределение дефектов КРН по окружности газопровода**

В ходе работы проведено исследование распределения стресс-коррозионных дефектов по окружности газопровода, обнаруженных в результате ВТД, построена лепестковая диаграмма распределения долей общего числа дефектов в часовой ориентации (рис. 2.1).

Анализ диаграммы показывает, что подавляющее большинство (91%) дефектов находится в диапазоне от 3 до 9 часов в угловой ориентации, т.е. ниже горизонтальной оси газопровода. Также отмечается более высокая (52%) концентрация дефектов в правой части условного циферблата, т.е. с правой стороны относительно вертикальной оси газопровода.

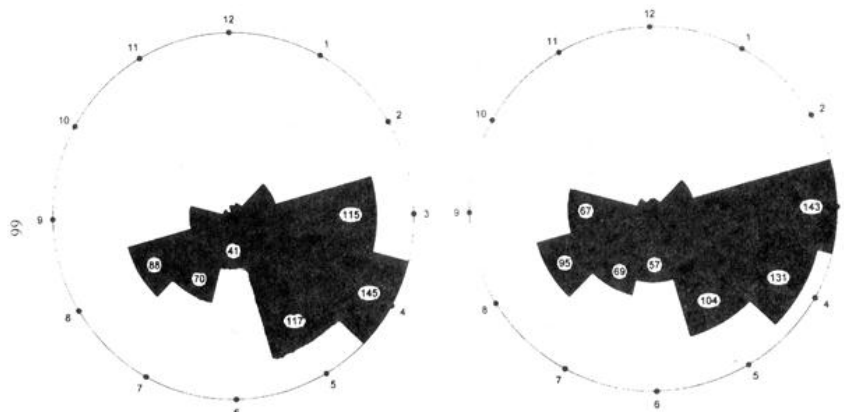


**Рисунок 2.1 – Распределение дефектов КРН в угловой ориентации на МГ «Ухта-Торжок III»**

Полученные закономерности и специфика распределения стресс-коррозионных дефектов перекликаются с результатами, выделенными в ходе исследований распределения дефектов КРН на других участках. Так, например, имеются сведения о специфических распределениях и максимальной концентрации коррозионных дефектов, выявленных ВТД на участке 750 - 805 км МГ «Уренгой - Петровск» и «Уренгой – Новопсков». Авторы отмечают, что подобного скопления коррозионных дефектов из объема ВТД 4 тыс. км больше нигде не выявлено. Там же приводится пространственное распределение выявленных дефектов по окружности газопровода (рис. 2.2). Авторы никак не интерпретируют полученные результаты, однако, мы можем сказать, что они в целом совпадают с результатами настоящего исследования.

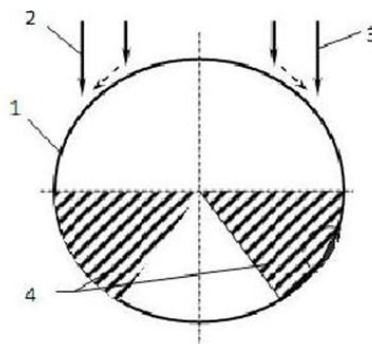


Отмеченные выше закономерности распределения дефектов могут быть обусловлены двумя факторами: образование продольно ориентированных гофр полимерных лент и негативное влияние средств ЭХЗ.



**Рисунок 2.2 – Распределение дефектов КРН в угловой ориентации на МГ «Уренгой – Петровск» и «Уренгой – Новопсков» [17]**

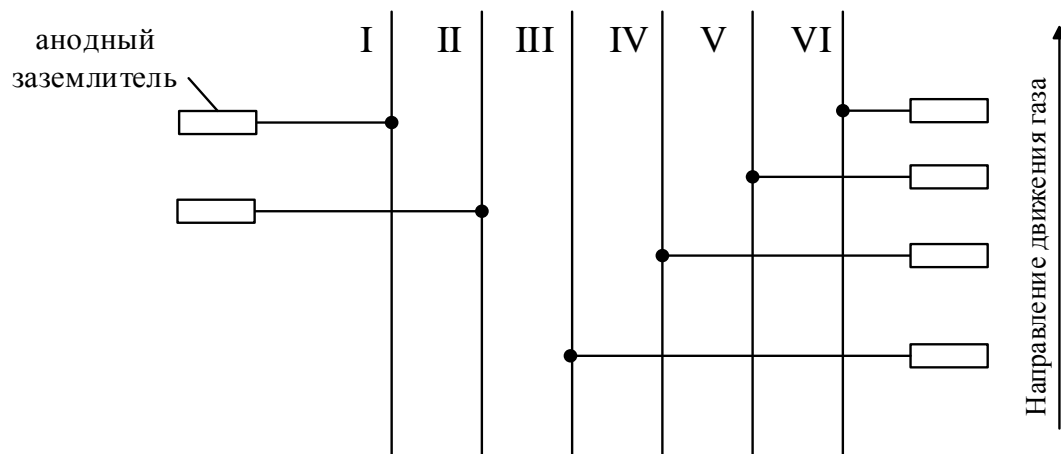
Продольно ориентированные гофры полимерных лент образуются, как правило, за счет сдвига и деформации покрытия по окружности трубы [35]. В течение длительного времени после засыпки газопровода происходит оседание, стабилизация и уплотнение грунта. При этом увлажненный грунт, прилипая к покрытию, инициирует сдвиг покрытия в вертикальном направлении. Сдвиг покрытия происходит в течение длительного времени при эксплуатации газопровода, в результате чего образуется доступ для проникновения грунтового электролита (рис. 2.3).



1 – газопровод, 2 – направление давления грунта, 4 – потенциальные зоны образования гофров

**Рис. 2.3 – Схема формирования гофра ленточного покрытия [17]**

Расположению средств ЭХЗ магистральных газопроводов и, в частности, месту установки анодного заземления при исследовании факторов, влияющих на распределение стресс-коррозионных дефектов, как правило, не уделяется внимания. Однако, если проанализировать схемы установки средств ЭХЗ и распределение дефектов КРН в угловой ориентации, то можно отметить, что соотношение количества дефектов «левой» и «правой» половины относительно вертикальной оси газопровода, как правило, складывается «в пользу» той стороны, с которой размещены анодные заземления. В частности, известно, что в шестиниточном коридоре, обслуживаемом ООО «Газпром трансгаз Ухта», состоящем из газопроводов «Ухта-Торжок I», «Ухта-Торжок II», «Ухта-Торжок III», «Пунга-Ухта-Грязовец IV», «СРТО-Торжок» и «Ухта-Торжок 1» для первых двух ниток анодные заземления расположены с левой стороны по ходу газа, для остальных четырех – с правой (рис. 2.4). Таким образом, несимметричность распределения дефектов в угловой ориентации, представленная на рисунке 2.1, может быть обусловлена именно действием средств ЭХЗ.



I, II, III – газопроводы «Ухта-Торжок» I, II и III нитки; IV – газопровод «Пунга-Ухта-Грязовец IV»; V – газопровод «СРТО-Торжок»; VI – газопровод «Ухта-Торжок 1»

**Рисунок 2.4 – Схема расположения анодных заземлений**

### **2.2.2 Влияние расстояния до точки дренажа СКЗ на количество и размеры дефектов КРН**

В настоящем исследовании проведен анализ зависимости возникновения стресс-коррозионных дефектов от расстояния до точки дренажа средств электрохимической защиты.

Для анализа количества дефектов КРН от расстояния между местом образования дефекта и точкой дренажа СКЗ сначала необходимо произвести совместную привязку координат результатов ВТД и интенсивных электрометрических измерений.

Интенсивные электрометрические измерения, проводимые на трассе магистральных газопроводов, позволяют получить данные об эффективности работы установленных средств электрохимзащиты и состоянии изоляционного покрытия. Измерения выполняют с определенным шагом (2-5 м) вдоль трассы газопровода. В каждой точке выполняют измерения потенциалов включения, потенциалов отключения и градиенты (выявление «воронок» напряжения) при фиксированных режимах работы установок катодной защиты, влияющих на защиту обследуемого участка газопровода с последующей математической обработкой результатов измерений [81].

За основу в настоящем исследовании взята методика проведения взаимной «привязки» координат интенсивной электрометрии к координатам геолого-литологического разреза, описанная в работе Меркурьевой И. А. [36].

Для анализа выбран уже упоминавшийся выше участок магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» км 1,5-67.

Катодная поляризация участка газопровода «Ухта-Торжок III» осуществляется установками катодной защиты (УКЗ) с использованием преобразователей В-ОПЕ-ТМ-1-42-48-У1 и глубинных анодных заземлителей.

В состав станций катодной защиты исследуемого участка 3 нитки УКЗ №58Б; 59; 60; 60А; 61; 62; 62А; 62Б; 63; 64; 65 входят:

- два преобразователя катодной защиты В-ОПЕ-ТМ-1-42-48-У1 (основной и резервный);
- блок аварийного включения резерва (БАВР);
- анодные заземлители.

Количество СКЗ, координаты точек дренажа и наименование УКЗ представлены в таблицах 2.1, 2.2.

**Таблица 2.1 Количество СКЗ обследуемого участка.**

п.п.	Тип СКЗ	Количество, шт.	
		Проект	Факт
	В-ОПЕ-ТМ-1-42-48-У1	22	22

**Таблица 2.2 Координаты точек дренажа и наименование УКЗ**

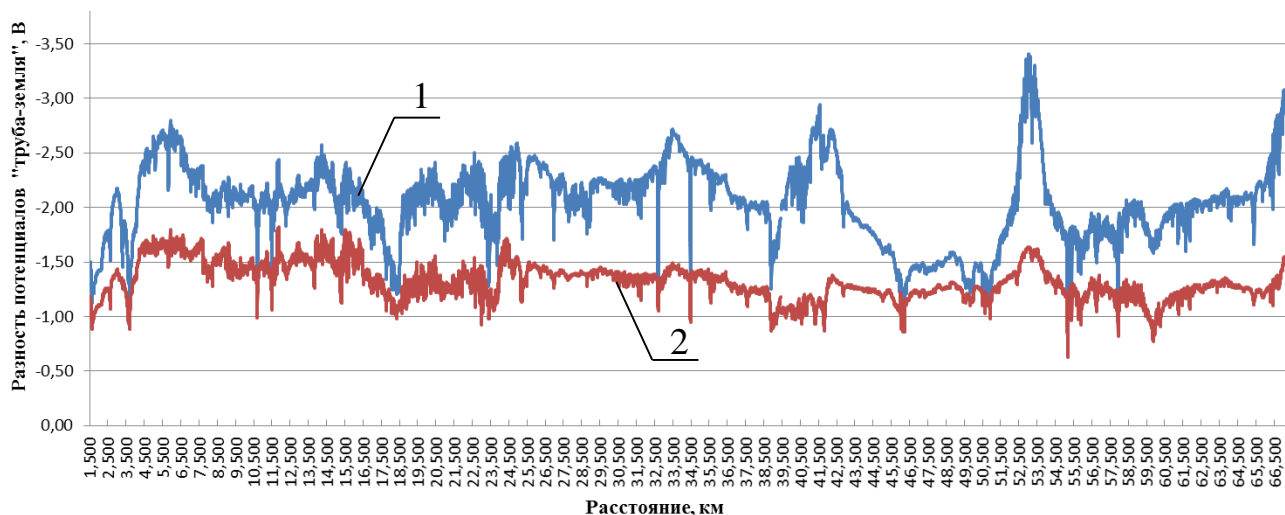
Координата точки дренажа, км	Наименование УКЗ
3,240	Точка дренажа УКЗ(№58Б)
6,240	Точка дренажа УКЗ(№59)
14,340	Точка дренажа УКЗ(№60)
18,635	Точка дренажа УКЗ(№60А)
24,575	Точка дренажа УКЗ(№61)
33,420	Точка дренажа УКЗ(№62)
39,130	Точка дренажа УКЗ(№62А)
39,715	Точка дренажа УКЗ(№62Б)
42,110	Точка дренажа УКЗ(№63)
53,130	Точка дренажа УКЗ(№64)
67,010	Точка дренажа УКЗ(№65)

УКЗ №60, 61, 62а, 62б, 63 выведены в резерв.

Электроснабжение УКЗ №58Б; 59; 60; 60А; 61; 62; 62А; 62Б; 63; 64; 65 осуществляется по вдольтрассовой линии ВЛ-10 кВ.

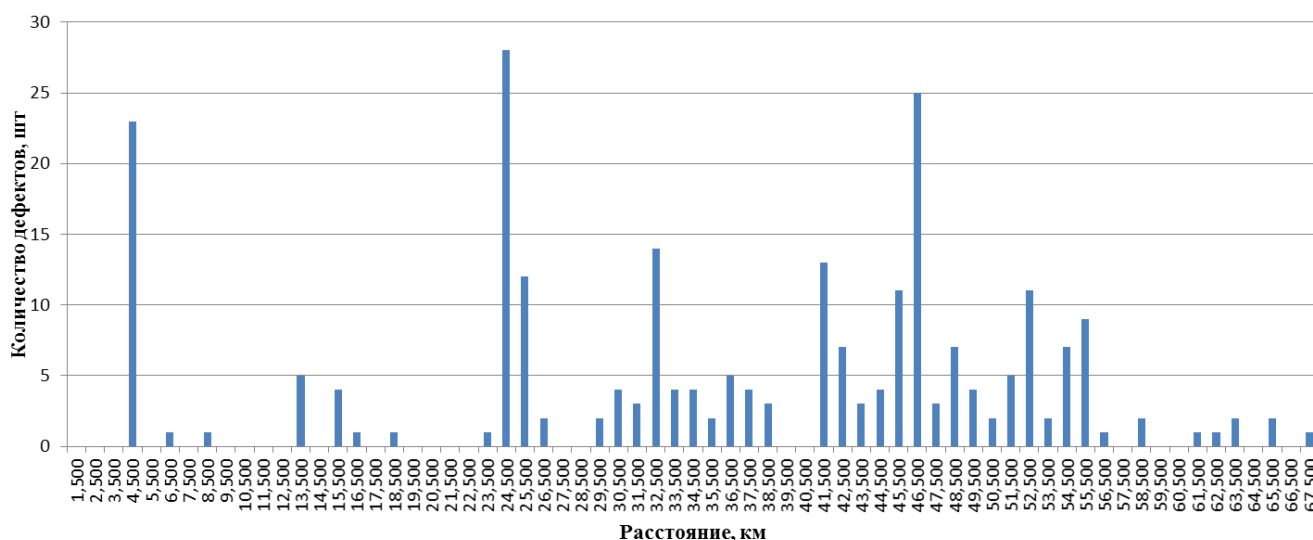
Графики распределения потенциалов включения и отключения, количества дефектов на каждом километре участка магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» представлены на рисунках 2.5 и 2.6.

Сопоставив сведения о распределении дефектов по длине участка с данными о расположении точек дренажа, получаем зависимость количества дефектов КРН от расстояния между местом образования дефекта и точкой дренажа СКЗ МГ «Ухта-Торжок III», которая приведена на рисунке 2.7.

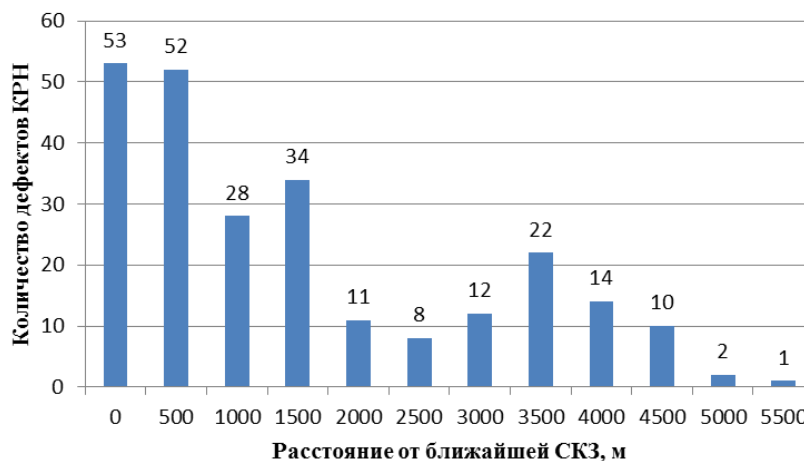


1 – потенциал включения; 2 – потенциал отключения

**Рисунок 2.5 – График распределения потенциалов включения и отключения на участке магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км**



**Рисунок 2.6 – График распределения дефектов на участке магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км**

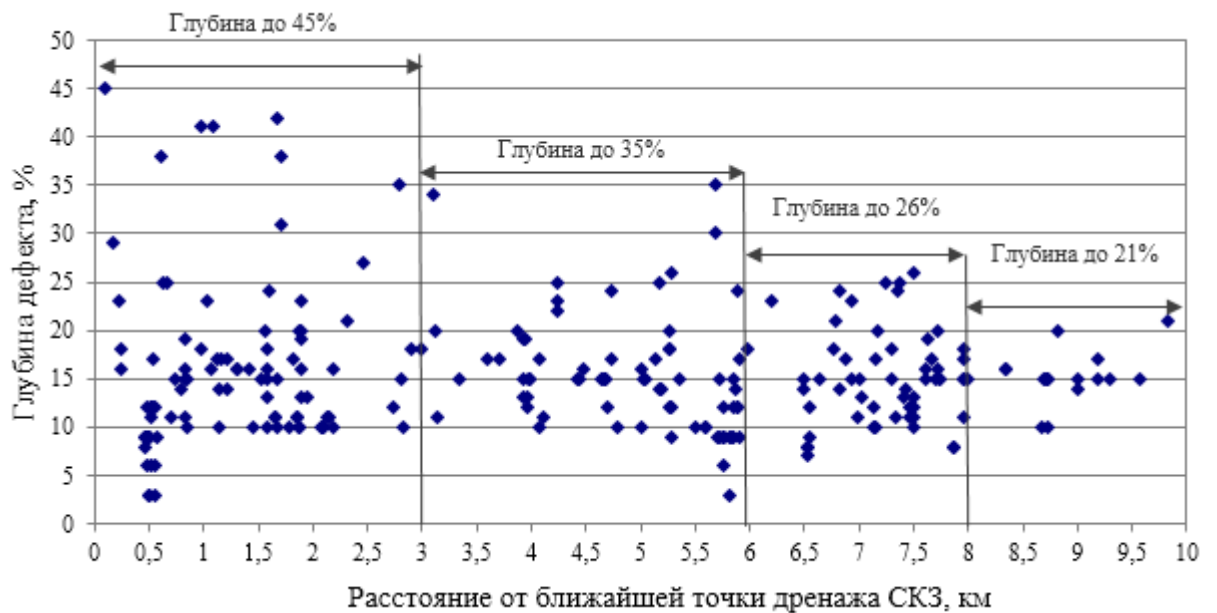


**Рисунок 2.7 – Расстояние от дефектов КРН до ближайшей точки дренажа СКЗ**

Как видно на гистограмме, более 50 % всех дефектов КРН обнаружены на расстоянии менее 1500 м от ближайшей СКЗ. На удалении от СКЗ более 5 км встречаются только единичные дефекты. При анализе принимался во внимание тот факт, что участков, расположенных от ближайшей СКЗ на расстоянии более  $L/2$ , где  $L$  – максимальное расстояние между соседними СКЗ, быть не может, поэтому если среднее расстояние между СКЗ 6-8 км, то количество точек, которые находятся на расстоянии более 4 км резко снижается, соответственно, снижается и количество участков, имеющих повреждения КРН.

Также вызывает интерес анализ распределения не только количества дефектов КРН, но и их геометрических размеров, например, зависимости глубины от расстояния до ближайшей точки дренажа средств ЭХЗ. Диаграмма распределения максимальной глубины дефекта, отнесенной к толщине стенки трубы в зависимости от расстояния до ближайшей точки дренажа СКЗ, представлена на рисунке 2.13.

Из представленной диаграммы видно, что наиболее глубокие дефекты (от 35 до 45% от толщины стенки трубы) расположены, за редким исключением, только на расстоянии, не превышающем 3 км до ближайшей точки дренажа СКЗ. С удалением же от точки дренажа максимальная глубина дефекта имеет тенденцию к снижению – на расстоянии от 6 км и более глубина не превышает 26% от толщины стенки трубы.



**Рисунок 2.13 – Зависимость глубины выявленных дефектов КРН от расстояния до ближайшей точки дренажа СКЗ**

### 2.2.3 Влияние удельного электрического сопротивления грунта на количество дефектов КРН

Удельное электрическое сопротивление – один из основных параметров, характеризующих коррозионную агрессивность грунта. Согласно [25], чем меньше удельное электрическое сопротивление, тем коррозионная активность выше (табл. 2.5)

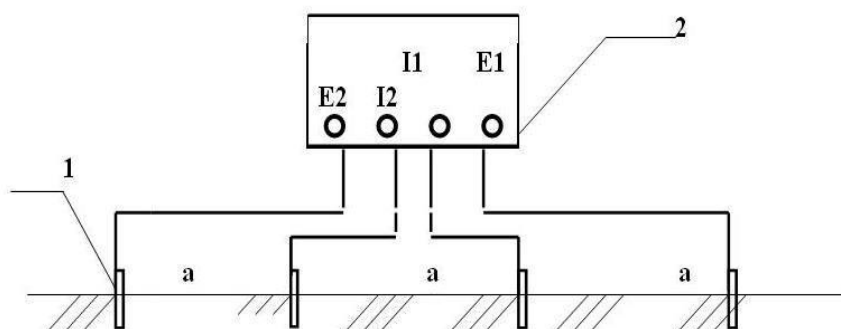
**Таблица 2.5. Коррозионная агрессивность грунта по отношению к углеродистой и низколегированной стали**

Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м	Коррозионная активность грунта
До 20	Высокая
От 20 до 50	Средняя
Свыше 50	Низкая

При обследовании участка газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км измерение удельного электрического сопротивления грунта проводилось

симметричным четырехэлектродным методом Веннера с шагом в 100 м с помощью прибора «М-416».

При замерах использовались стальные электроды длиной 250 – 350 мм и диаметром 15 – 20 мм. Электроды размещались по одной линии, которая проходит перпендикулярно или параллельно сооружению на расстоянии 2 – 4 м от оси сооружения (рис. 2.14). Глубина забивки электродов в грунт составляет  $1/20$  расстояния между электродами.



1 – электрод; 2 – прибор

**Рисунок 2.14 – Схема определения удельного электрического сопротивления грунта**

Величину удельного электрического сопротивления грунта  $\rho_{гр}$  (Ом·м) определяют по формуле:

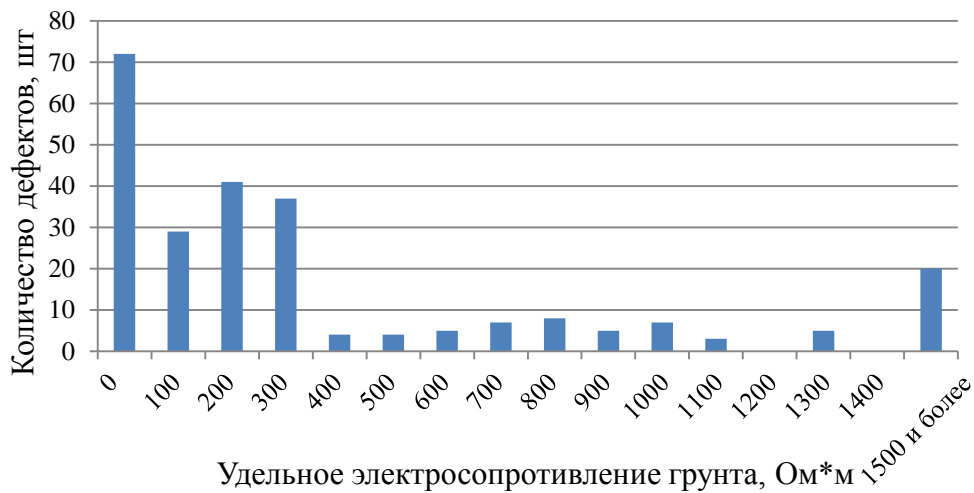
$$\rho_{гр} = 2\pi\alpha R, \quad (2.42)$$

где  $R$  – измеренное прибором сопротивление, Ом;

$\alpha$  - расстояние между электродами, принимаемое одинаковым и равным глубине прокладки подземного сооружения, м.

Количественное распределение дефектов КРН от удельного электросопротивления грунта отражает гистограмма (рис. 2.15), для которой характерны две моды: 0-400 Ом·м и более 1500 Ом·м.





**Рисунок 2.15 – Гистограмма распределение количества дефектов КРН от удельного электросопротивления грунта**

В связи с тем, что количество участков газопровода, которые соответствуют определенному электросопротивлению неодинаково, введено понятие относительной вероятности возникновения дефектов от удельного электросопротивления грунта, рассчитываемой по формуле:

$$P = \frac{n_{\text{дефект}}}{n_{\text{общ}}} \quad (2.43)$$

где  $n_{\text{дефект}}$  – количество участков газопровода с дефектами КРН для выбранного значения электросопротивления грунта, шт.;

$n_{\text{общ}}$  - общее количество участков с выбранным значением электросопротивления грунта, шт.

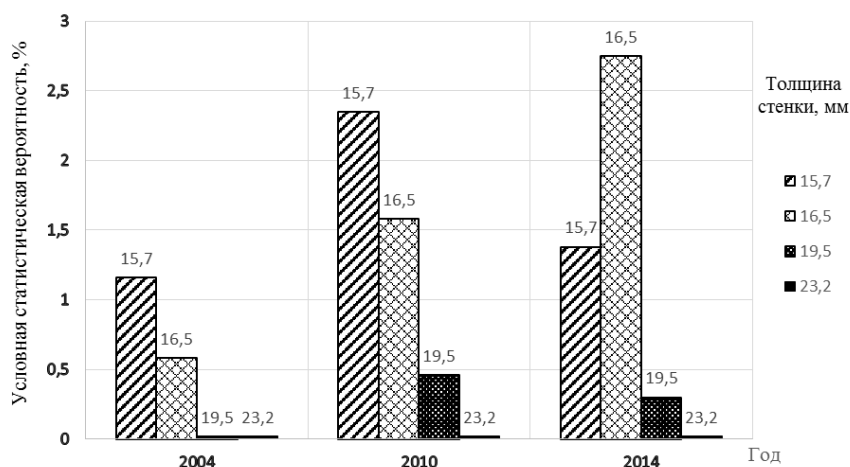
На гистограмме (рис. 2.16) просматривается тенденция увеличения вероятности образования дефектов КРН с ростом электросопротивления грунта, то есть чем выше электросопротивление, тем больше вероятность возникновения дефектов КРН. Авторы работы [1] получили схожие результаты для других участков газопроводов. Полученная закономерность подтверждает предположения о том, что развитие дефектов КРН не вписывается в классическую коррозионную теорию, согласно которой грунт с низкой электропроводностью менее агрессивен, чем с высокой.



**Рисунок 2.16 – Гистограмма распределения условной вероятности возникновения дефектов КРН от удельного электросопротивления грунта**

#### **2.2.4 Вероятность образования дефектов КРН в зависимости от толщины стенки трубы**

Из анализа результатов диагностики исследуемого участка газопровода установлено, что большинство дефектов КРН образовалось на трубах с наименьшей толщиной стенки (15,7 мм), что подтверждает выводы о значительном влиянии механических напряжений металла труб на процесс развития дефектов (рис. 2.17).

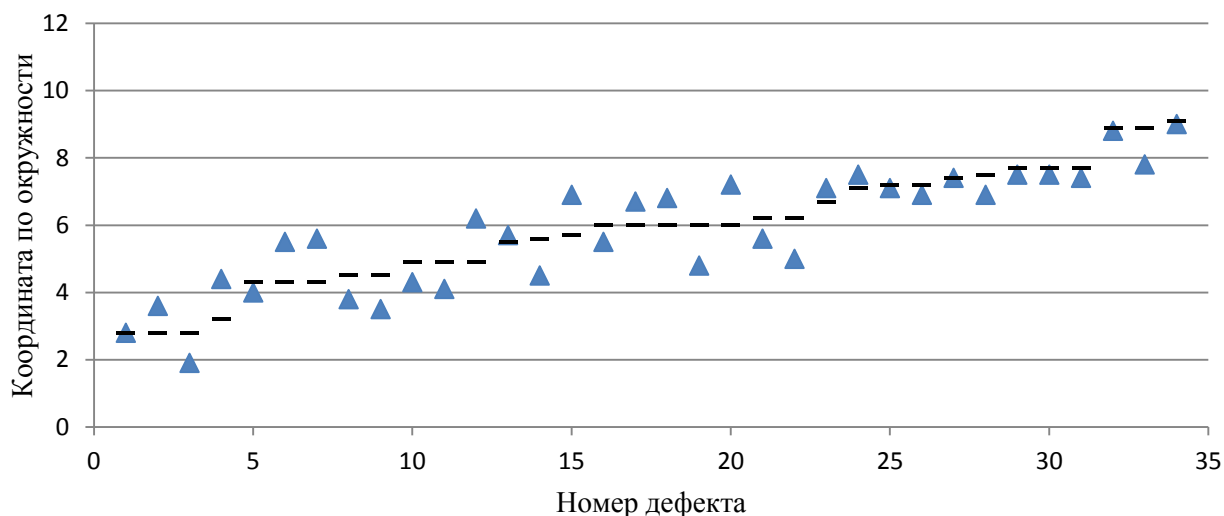


**Рисунок 2.17 – Распределение условной статистической вероятности образования дефектов КРН в зависимости от толщины стенки трубы**

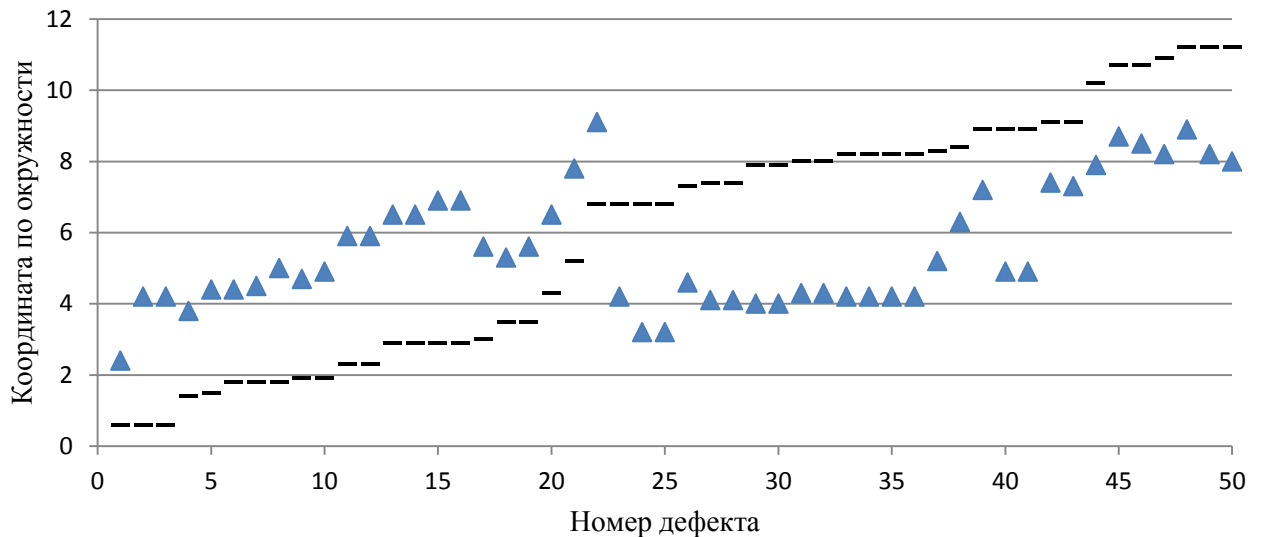
Из представленной гистограммы следует, что по всему участку газопровода дефектность КРН тонкостенных труб значительно выше, чем дефектность толстостенных труб. Таким образом, существует зависимость количества выявленных дефектов КРН от толщины стенки газопровода. Аналогичные результаты получены О.И. Стекловым [20].

### 2.2.5 Распределение дефектов КРН относительно сварного шва

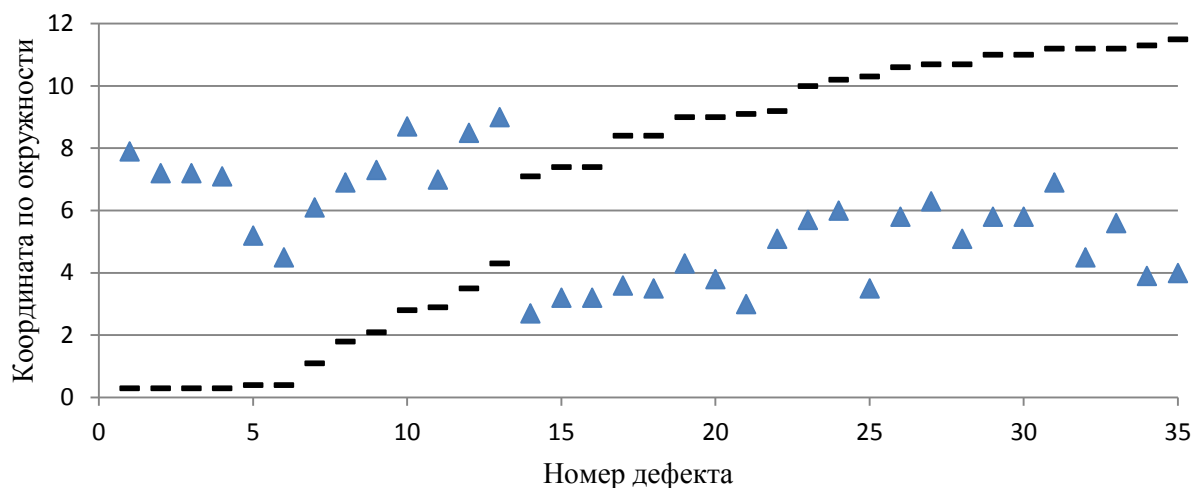
Ряд исследователей [20, 62, 7] отмечают, что сварной продольный шов играет ключевую роль в развитии КРН за счет инициации дефектов изоляции посредством т.н. «палаточного» эффекта и изменению свойств металла вблизи шва. Рассмотрим распределение дефектов КРН по данным ВТД за 2014 год относительно продольного сварного шва. Для наглядности разделим выявленные дефекты по расстоянию между дефектом и швом на три группы: до 500мм, 500-1500 мм и свыше 1500 мм (рис. 2.18-2.20).



**Рисунок 2.18 – Распределение дефектов КРН по окружности газопровода (расстояние между дефектом и швом менее 500мм)**



**Рисунок 2.19 – Распределение дефектов КРН по окружности газопровода (расстояние между дефектом и швом 500-1500 мм)**



**Рисунок 2.20 – Распределение дефектов КРН по окружности (расстояние между дефектом и швом 1500-2206 мм)**

Нетрудно заметить высокую вероятность образования дефектов КРН вблизи шва, расположенного в окружной ориентации от 3,0 до 9,0 часов.

При этом вблизи второго сварного шва, расположенного в диапазоне 0–3 ч не выявлено ни одного дефекта. Такая закономерность связывается с тем, что рассмотренные дефекты КРН были образованы в гофрах покрытия, местоположение которых на окружности трубы обусловлено местоположением продольного сварного шва.

Из представленных диаграмм (рис. 6-8) следует, что большинство дефектов КРН образовано в ближней зоне продольного сварного шва.

При этом в случае расположения продольного сварного шва трубы в потенциальных зонах образования гофр (3-5 и 7-9 часов) образование дефектов КРН в большинстве случаев происходит в непосредственной близости к сварному шву.

При расположении продольного сварного шва в верхней полуокружности газопровода 0 – 3 и 9 – 12 ч дефекты КРН располагаются на большем расстоянии от зоны сварного шва в нижней полуокружности трубы.

### **2.3 Выводы по главе 2.**

1. Установлена взаимосвязь между дефектообразованием КРН и расстоянием от рассматриваемого участка до точки дренажа ближайшей станции катодной защиты: с приближением к точке дренажа количество дефектов и их максимальная глубина увеличиваются.

2. Определена зависимость вероятности развития дефектов КРН от электропроводящих свойств грунта: с увеличением электросопротивления увеличивается вероятность развития дефектов, что не согласуется с классическими представлениями о коррозии магистральных газопроводов.

3. Установлены зависимости вероятности возникновения дефектов КРН от поляризации металла средствами ЭХЗ. Показано, что при поддержании поляризационного потенциала в интервале значений минус 0,95 – минус 1,05 В, несмотря на предрасположенность участка газопровода к возникновению КРН, вероятность появления дефектов КРН может быть сведена к минимуму.

4. Выявленные дефекты КРН расположены преимущественно в нижней части газопровода с максимумами в районе 4,2-5,8 и 6,6-8,2 часов. Такое распределение дефектов может говорить о наличии на исследуемом участке значительного количества отслаиваний изоляционного покрытия.

5. Установлена зависимость вероятности образования дефектов КРН от толщины стенки газопровода, что подтверждает весомость вклада механических напряжений в процесс развития стресс-коррозионных трещин.

6. Установлено, что 60% дефектов расположено на расстоянии до 1000 мм от сварного шва. В случае расположения продольного шва трубы в потенциальных зонах образования гофр (3-9 часов) образование дефектов КРН происходит в непосредственной близости к продольному сварному шву (менее 500 мм).

### **Глава 3. Разработка методики стендовых испытаний**

*Разработаны конструкция экспериментальной установки и методика проведения эксперимента.*

#### **3.1 Сущность методов исследований**

Методика разработана для проведения лабораторных испытаний стальных образцов катодной поляризацией, механической нагрузкой и агрессивной средой. Методика позволяет установить зависимости между защитным потенциалом и механическими характеристиками образца и скоростью проникновения водорода в поверхность образца в средах с различным водородным показателем.

Методика включает две серии экспериментов:

1. Определение зависимости тока проникновения водорода в поверхность стального образца от катодной поляризации в средах с различным водородным показателем;
2. Определение зависимости механических характеристик стального образца (твердость с малой нагрузкой) от величины тока проникновения водорода в поверхность образца в условиях катодной поляризации в средах с различным водородным показателем и временем экспонирования.

#### **3.2 Исследование влияния катодной поляризации на ток проникновения водорода в поверхность стального образца**

В рамках первого этапа лабораторных исследований был проведен ряд экспериментов с использованием образцов металла. Наблюдалось изменение скорости проникновения водорода в стальной стержень в условиях катодной поляризации.

##### **3.2.1 Математическое планирование эксперимента**

Одной из основных задач планирования эксперимента является определение числа опытов, необходимых для установления зависимости между исследуемыми

переменными величинами. Использование элементов теории планирования эксперимента позволяет минимизировать трудоемкость и временные затраты на проведение исследований.

В настоящей работе для первой серии испытаний спланирован ряд полностью рандомизированных однофакторных многоуровневых экспериментов. В качестве отклика системы принята величина тока проникновения водорода через мембрану датчика, в качестве исследуемого фактора – величина разности потенциалов «металлический стержень - среда».

Минимальный порог исследуемого фактора принят равным естественной разности потенциалов «металлический стержень - среда» - минус 0,6 В м.с.э, максимальный – минус 1,5 В м.с.э, интервал варьирования – 0,03 ед. Весь массив данных в таком случае удобно сформировать в виде (табл. 1.1) массива матрицы результата эксперимента:

$$Y = \{y_{ij}\}, \quad (3.1)$$

где  $j=1, 2, \dots, m$  – номер значения (уровня) исследуемого фактора (разность потенциалов «металлический стержень - среда»);  $i=1, 2, \dots, n$  – порядковый номер замера  $y$  (величина тока проникновения водорода через мембрану датчика). [33,85]

**Таблица 3.1 Матрица результатов эксперимента**

№ замера ( i )	Значения фактора – уровни ( j )			
	1	2	...	m
1	$y_{11}$	$y_{21}$	...	$y_{m1}$
2	$y_{12}$	$y_{22}$	...	$y_{m2}$
...	...	...	...	...
n	$y_{1n}$	$y_{2n}$	...	$y_{mn}$
Средние по уровням	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$	...	$\bar{y}_m$



В унифицированном виде, принятом в планировании эксперимента, матрица рандомизированного однофакторного многоуровневого плана (табл. 3.2) содержит  $n \times m$  строк, соответствующих единичным опытам.

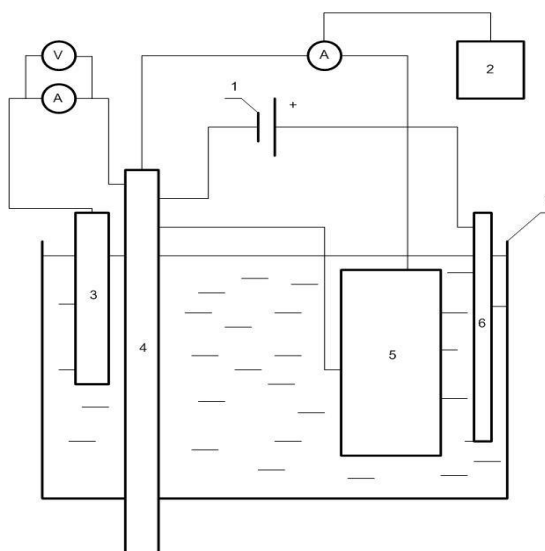
**Таблица 3.2 Матрица плана эксперимента**

№ опыта	Уровни фактора	Результат замера
1	<b>1</b>	$Y_{11}$
2	<b>1</b>	$Y_{12}$
...	...	...
n	<b>1</b>	$Y_{1n}$
n + 1	<b>2</b>	$Y_{21}$
...	...	...
$m \times n$	<b>m</b>	$Y_{mn}$

### **3.2.2 Экспериментальная установка и оборудование для проведения испытаний**

Для проведения серии испытаний была собрана установка, позволяющая контролировать отклик системы (ток проникновения водорода через стальную мембрану датчика) и регулировать исследуемый фактор (величина разности потенциалов «металлический стержень - среда»).

Экспериментальная установка (рис 3.1) представляет собой электрохимическую ячейку, наполненную средой с известным водородным показателем и помещенными внутрь стальным стержнем, вспомогательным электродом, электродом сравнения и датчиком наводороживания. Необходимая разность потенциалов «стержень-среда» создается с помощью источника постоянного тока, имитирующего работу станции катодной защиты. Контроль электрических величин осуществляется с помощью универсального вольтметра и мультиметров.



1 – источник постоянного тока (станция катодной защиты); 2 – персональный компьютер; 3 – электрод сравнения; 4 – испытуемый образец; 5 – датчик водорода ДН1; 6 – вспомогательный анод; 7 – пластиковая емкость.

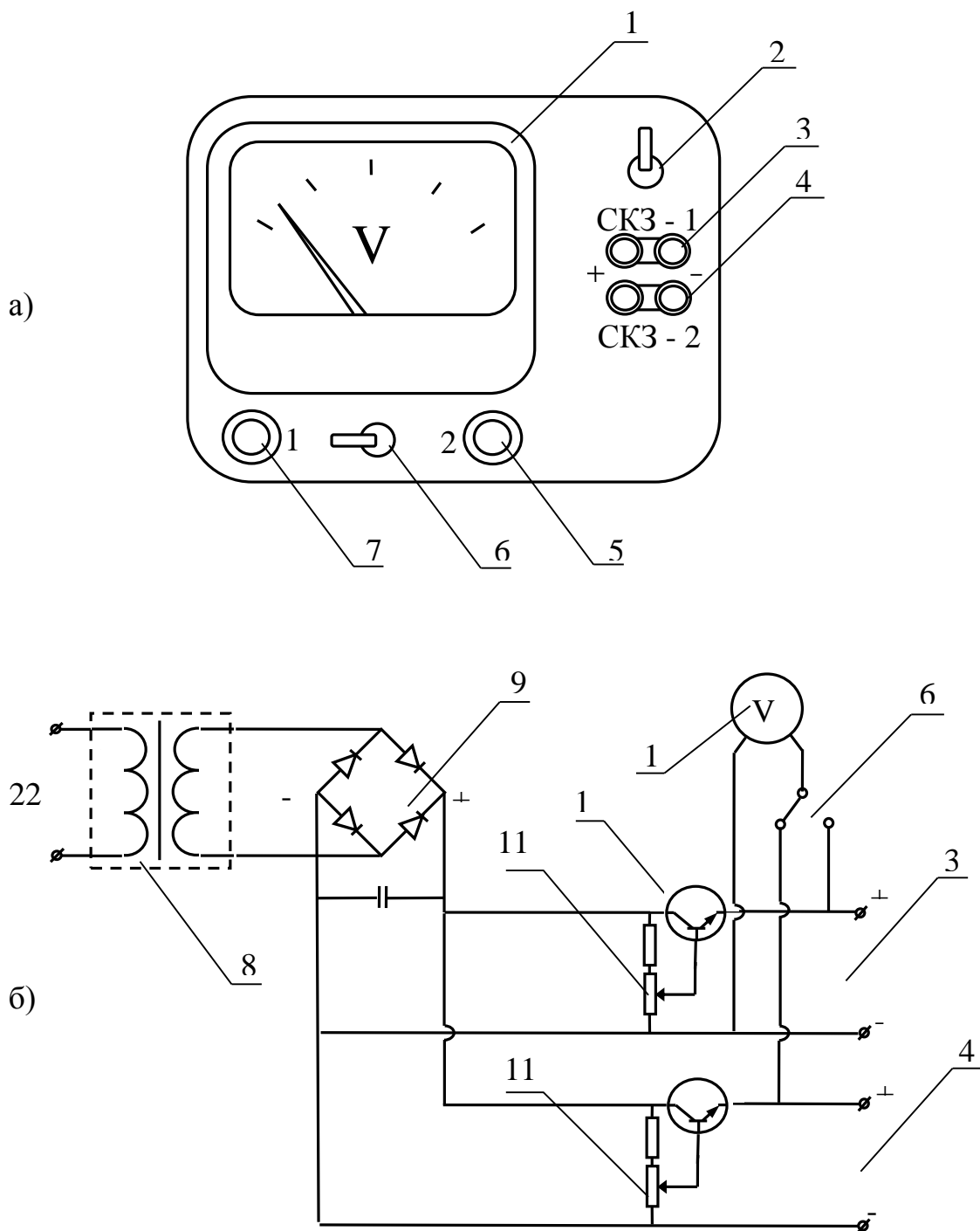
**Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки для определения скорости проникновения водорода в сталь**

### *Модель станции катодной защиты*

Источник тока имитирует работу станции катодной защиты, внешний вид и принципиальная схема приведены на рисунке 3.2. Прибор предназначен для понижения промышленного напряжения при помощи трансформатора 8 и выпрямления последнего при помощи двухполупериодного выпрямителя (диодного моста). Регулирование выходных параметров осуществляется с помощью транзисторов 10, управляемых переменными сопротивлениями 11, для подключения вспомогательных электродов и контактных проводов используются клеммы 3 и 4. [23]

Основные технические характеристики модели станции катодной защиты:

- Количество независимых регулируемых источников постоянного тока – два;
- Диапазон выходного напряжения – 0 – 30 В;
- Максимальная сила тока на выходе – 1,0 А;
- Величина пульсаций переменного тока на выходе – не более 10 мВ;
- Напряжение питания – 220 В±10%, 50 Гц.



1 – вольтметр; 2 – тумблер «сеть»; 3 – выходные клеммы станции №1; 4 – выходные клеммы станции №2; 5 – ручка регулятор выходного напряжения станции № 2; 6 – переключатель вольтметра; 7 - – ручка регулятор выходного напряжения станции № 1; 8 – понижающий трансформатор; 9 – диодный мост; 10 – выходной транзистор; 11 – регулировочные резисторы

**Рисунок 3.2 – Расположение органов управления а) и принципиальная схема имитатора СКЗ б)**

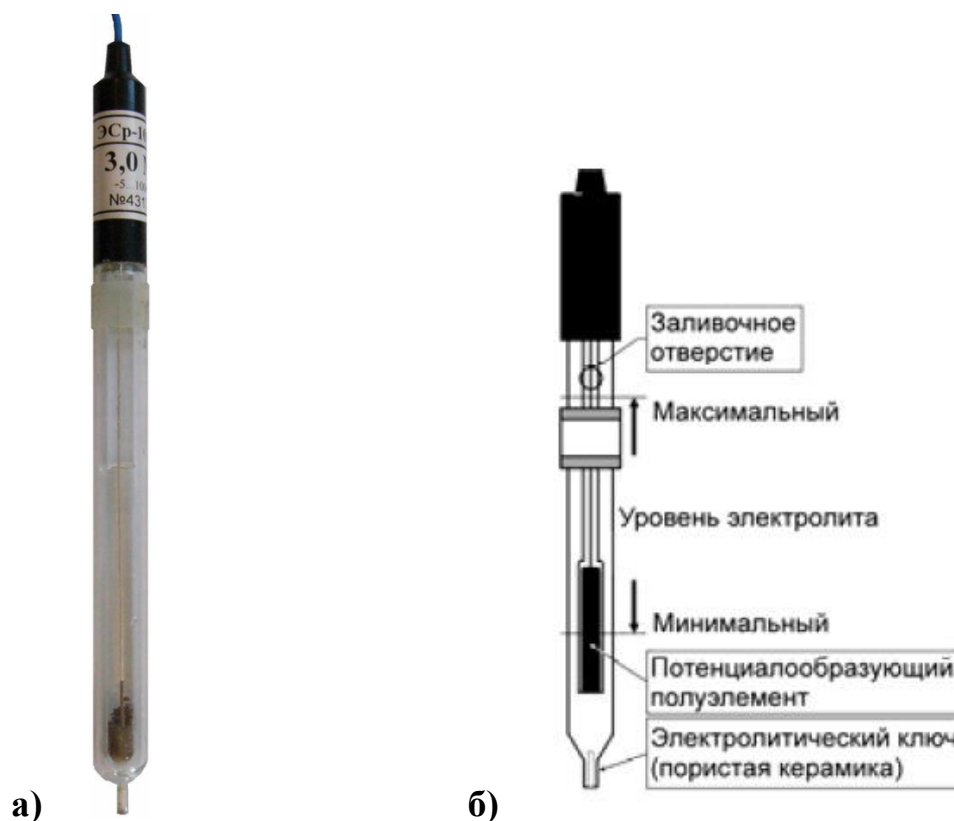
### *Вспомогательные электроды и электроды сравнения*

В промышленных условиях при измерении поляризационного потенциала, согласно ГОСТ 9.602-2005, применяют насыщенные медно-сульфатные электроды сравнения. Принцип медно-сульфатного электрода сравнения основан на окислительно-восстановительной реакции с участием меди и ее солей (сульфата меди). Медно-сульфатный электрод не подвержен поляризации, если пропустить через электрод ток, его потенциал не изменится. Собственный потенциал медно-сульфатного электрода по отношению к стандартному водородному электроду равен 0,314 В.

В связи с малым размером испытуемого образца в настоящей работе целесообразно применять электроды сравнения с малой площадью сечения, например, лабораторные хлорсеребряные электроды сравнения типа ЭСр-10103. При измерении уровня поляризации хлорсеребряным электродом необходимо учитывать, что величина разности потенциалов для медно-сульфатного и хлорсеребряного электродов составляет 120 мВ, т.е. к показаниям измеренным хлорсеребряным электродом необходимо прибавить 120 мВ.

Хлоридсеребряный электрод состоит из серебряной проволоки, покрытой слоем хлорида серебра электролитическим способом и погруженной в раствор хлорида калия известной концентрации (3,0 моль/дм<sup>3</sup>, 3,3 моль/дм<sup>3</sup> или насыщенный 4,2 моль/дм<sup>3</sup>) (рис 3.3). Собственный потенциал электрода при 25<sup>0</sup>С равен ±0,2 мВ. Нестабильность потенциала электрода за 8 часов работы не превышает ±0,5 мВ [24].

В качестве вспомогательного электрода (анодного заземлителя) для замыкания цепи установки катодной защиты в лабораторных испытаниях, как правило, используют металлические стержни. Учитывая специфику планируемых серий испытаний (широкий интервал задаваемых значений потенциалов катодной поляризации, длительное время экспонирования) принято решение в качестве вспомогательных электродов использовать цилиндрический стержень из чешуйчатого графита.

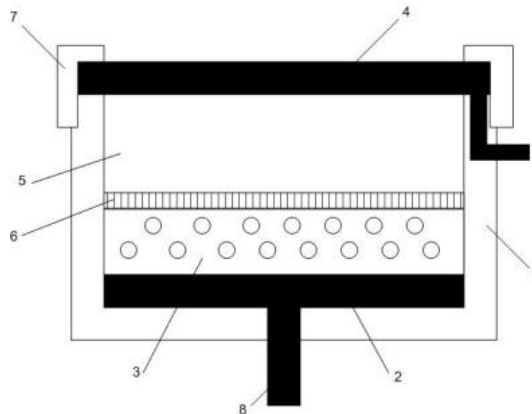


**Рисунок 3.3 – Общий вид хлорсеребряного электрода сравнения а) и принципиальная схема электрода б)**

### *Датчик тока, иницируемого выделением водорода*

Для измерения концентрации водорода в стали использовались датчики тока водорода ДН1 [29,37]. Датчик представляет собой модификацию известной ячейки Девантхана-Стахурского (рис. 2.6), генерирует внутреннюю ЭДС и способен работать в автономных условиях. В цилиндрический корпус ячейки, изготовленный из диэлектрика 1, помещены два электрода; катод графитовый с засыпкой  $MnO_2$  и анодная мембрана толщиной 0,1 мм и диаметром 5 см. Внутренняя сторона мембраны палладирована. Ячейка заполнена раствором NaOH. Катодное и анодное пространства разделены сепаратором. Со стороны мембраны ячейка герметизирован пластиком. Контакты 8 замыкают на измерительный прибор. Внутренняя ЭДС составляет около 0,6В. Ток, протекающий в таком элементе, эквивалентен потоку водорода через стальную мембрану. Если мембрана соединена с металлической конструкцией и в плотную к ней погружена в тот же электролит, т.е. приобретает ее электродный потенциал,

то можно считать, что ток ячейки меняется симбатно с потоком водорода в конструкцию.



1 – цилиндрический корпус; 2 – катод графитовый; 3 – засыпка  $MnO_2$ ; 4 – анодная мембрана; 5 – 0.1 н. раствор  $NaOH$ ; 6 – сепаратор; 7 – пластик для герметизации; 8 – измерительные контакты.

### Рисунок 3.4 – Конструкция ячейки датчика ДН-1

Датчик помещается в измерительную емкость и устанавливается на расстоянии  $5 \div 20$  см от образца, стальная мембрана толщиной 100 мкм присоединяется электрическим контактом к образцу и ее внешняя поверхность имеет потенциал образца. Образующийся на внешней поверхности мембраны водород частично внедряется в металл и диффундирует к внутренней поверхности мембраны. Мембрана датчика электрически соединена с образцом, то есть катодная сторона мембраны имеет такой же электродный потенциал, как и металл образца. Следовательно, величина потока водорода и концентрация в мембране эквивалентна этим величинам в трубной стал. На внутренней поверхности мембраны поддерживается потенциал, при котором атомарный водород окисляется.

В стационарных условиях  $C_H$  можно рассчитать из величины плотности тока проникновения водорода через стальную мембрану -  $i_p$ :

$$C_H = i_p LM / F \rho D \quad (3.2)$$

где  $L$  - толщина мембраны,  $M$  - атомный вес водорода,  $F$  - число Фарадея,  $\rho$  - плотность стали,  $D$  - коэффициент диффузии водорода в стали.

### ***Стандартное оборудование и приборы***

Из стандартного оборудования используются цифровой мультиметр АРРА 80(Н), универсальный вольтметр В7-78/1, рН-метр HANNA HI 98127 рНер 4, переменные резисторы 24s1.

Характеристики прибора, используемого для измерения поляризационного потенциала, приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3. Характеристики мультиметра типа АРРА 80(Н)**

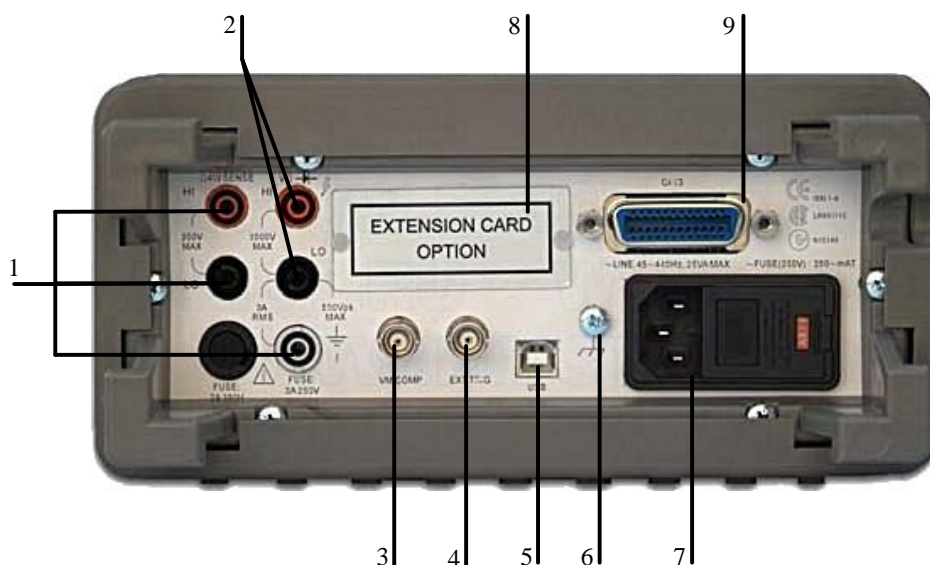
Параметр	Максимальное значение	Разрешающая способность	Основная погрешность измерения, %+ед. разрешающей способности
Постоянное напряжение	1000 В	0,1 мВ	$\pm(0,5\%+2)$
Переменное напряжение	750 В	1 мВ	$\pm(1,5\%+5)$
Сила постоянного тока	10 А	0,1 мкА	$\pm(1,7\%+2)$
Сила переменного тока	10 А	0,1 мкА	$\pm(2,2\%+5)$
Электрическое сопротивление	30 МОм	0,1 Ом	$\pm(0,75\%+3)$

Для измерения тока проникновения водорода через мембрану датчика ДН-1 в режиме реального времени используется универсальный вольтметр В7-78/1 (рис. 3.5, 3.6), его характеристики приведены в таблице 3.4. Прибор оборудован интерфейсными шинами GPIB и USB для подключения к ЭВМ и математической

и логической обработки результатов измерений с помощью пакета программного обеспечения.



**Рисунок 3.5 – Общий вид универсального вольтметра В7-78/1**



1 – «HI, LO» клеммы для всех измерений, исключая измерения тока и температуры; 2 – «LO, I» клеммы для токовых измерений; 3 – выход синхронизации; 4 – вход внешней синхронизации; 5 – USB интерфейс; 6 – клемма подключения заземления; 7 – разъем для подключения питания; 8 – слот для установки 10/20 канального сканнера; 9 – GPIB интерфейс

**Рисунок 3.6 – Задняя панель универсального вольтметра В7-78/1**



**Таблица 3.4. Характеристики универсального вольтметра В7-78/1**

Параметр	Максимальное значение	Разрешающая способность	Основная погрешность измерения
Постоянное напряжение	1000 В	1 мВ	$\pm(0,004\dots0,008)\%$
Переменное напряжение	750 В	1 мВ	$\pm(0,09)\%$
Сила постоянного тока	3 А	10 мкА	$\pm(0,05\dots0,14)\%$
Сила переменного тока	3 А	10 мкА	$\pm(0,05\dots1,16)\%$
Электрическое сопротивление	100 МОм	100 Ом	$\pm(0,01\dots0,4)\%$

Для контроля водородного показателя среды используется рН-метр HANNA HI 98127 рНер 4. Измерение рН осуществляется в цифровой форме с помощью измерительного преобразователя и съемной комбинированной электродной системы, состоящей из измерительного электрода, электрода сравнения и температурного датчика. Измерения автоматически термокомпенсируются. Технические характеристики приведены в таблице 3.5.

**Таблица 3.5. Характеристики рН-метра типа HANNA HI 98127 рНер 4**

Параметр	Диапазон	Разрешающая способность	Основная погрешность измерения
Водородный показатель	-2,0...16,0 рН	0,1 рН	$\pm 0,1$ рН
Температура	-5,0...60 °С	0,1 °С	$\pm 0,5$ °С

### 3.2.3 Порядок проведения эксперимента

Перед началом проведения эксперимента необходимо приготовить необходимое количество среды с известной концентрацией ионов водорода для заполнения электрохимической ячейки.

Проводят подготовку к работе водородного датчика. Измерительные провода датчика замыкаются накоротко и датчик выдерживается в неподвижном состоянии в течении не менее 2 часов, при этом поверхность мембраны датчика должна быть сухой. Измерения фонового тока датчика проводятся универсальным вольтметром с фиксацией на персональном компьютере в режиме реального времени. Время измерения (от 15 до 60 минут) определяется временем стабилизации тока датчика. Датчик считается пригодным для установки, если величина фонового тока не превышает 10 мкА (рис. 2.8).

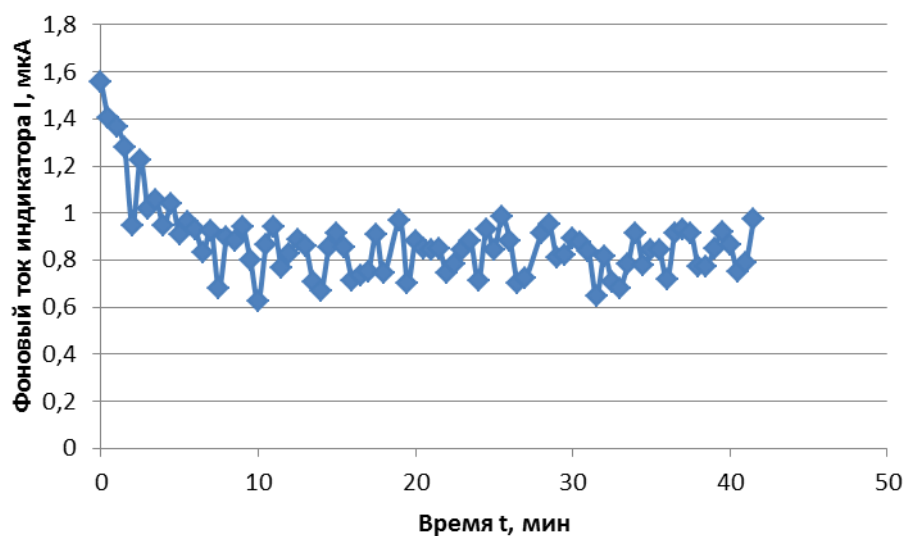


Рисунок 3.6 – Измерение фонового тока датчика ДН-1

### 3.3 Исследование влияния катодной поляризации, рН среды и тока проникновения водорода в образец на механические свойства

В рамках второго этапа лабораторных исследований был проведен ряд экспериментов с использованием образцов металла. Наблюдалось изменение механических характеристик образцов, находившихся под воздействием катодной

поляризации, механической нагрузки и коррозионной среды. Контроль состояния механических характеристик образцов осуществлялся по методике, предложенной в работах Смирнова О.В., Михалева А.Ю., заключающейся в многократном (не менее 100 раз) измерении твердости с малой нагрузкой (ТМН) и определении дисперсии полученной выборки [69].

### 3.3.1 Математическое планирование эксперимента

Для второй серии испытаний спланирован ряд активных количественных экспериментов с одним откликом (дисперсия твердости с малой нагрузкой), одним контролируемым фактором (величина тока проникновения водорода через стальную мембрану) и тремя управляемыми факторами (водородный показатель среды, разность потенциалов «образец-среда», время экспонирования).

### 3.3.2 Образцы для испытаний

Образец представляет собой стальной брус, закрепленный болтами на жестком неметаллическом основании. Брус изготовлен из фрагмента основного металла газопровода, находившегося в эксплуатации не менее 30 лет. Ширина и толщина образца составляет 4 мм, длина 105 мм, марка стали 17Г1С, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 360$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 520$  МПа.

Напряжения в бруске создаются под действием изгибающих усилий, возникающих при затяжке прижимных болтов, фиксирующих брус на жестком основании. Для изгиба, под центральной частью образца устанавливается опорная стальная полоса шириной 10 мм и длиной 20 мм (рис 3.7).

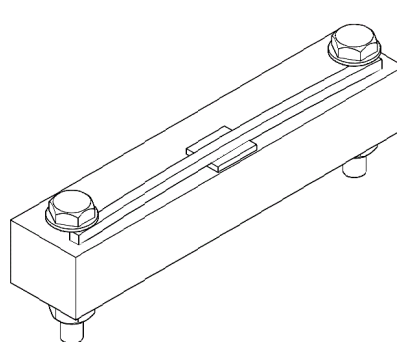


Рисунок 3.7 – Эскиз образца, установленного в изгибающем устройстве

Толщина опорной полосы определяется из выражения:

$$h = \frac{p \cdot \ell^3}{48 \cdot E \cdot J_x}; \quad (3.3)$$

где  $p$  – усилие, действующее на центральную часть образца, Н;  $\ell$  – длина пластины, м;  $E$  – модуль упругости материала образца,  $2,1 \times 10^{11}$  Па;  $J_x$  – осевой момент инерции поперечного сечения образца,  $\text{м}^4$ .

Осевой момент инерции поперечного сечения стального бруса определяется из выражения:

$$J_x = \frac{a \cdot b^3}{12}; \quad (3.4)$$

где  $a$  и  $b$  – ширина и толщина стального бруса, м.

Усилие действующее на центральную часть образца, при условии что концы образца располагаются на опорах, создаёт изгибающий момент, который определяется из выражения:

$$M_x = \frac{p \cdot \ell}{4}; \quad (3.5)$$

Напряжения в образце, возникающие под действием изгибающего момента  $M_x$  составят:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x}; \quad (3.6)$$

где  $W_x$  – момент сопротивления поперечного сечения стального бруса, который определяется из выражения:

$$W_x = \frac{a \cdot b^2}{6}. \quad (3.7)$$

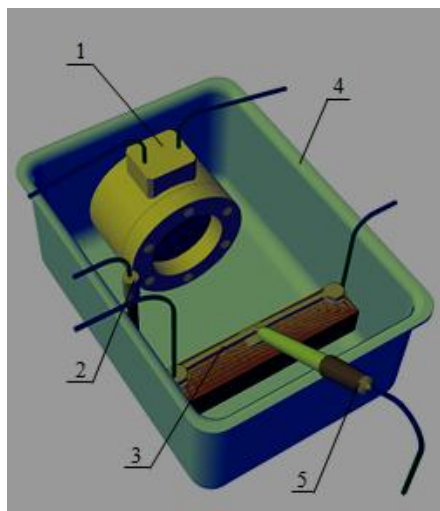
Расчетная толщина опорной полосы для изгибающей нагрузки  $0,7 \div 0,8 \sigma_{0,2}$  составляет 6 мм [8].

Для контроля толщины опорной полосы используют штангенциркули с пределами допускаемой погрешности до  $\pm 0,1$  мм. Опорная полоса толщиной 5,9-

6,1 мм позволяет создавать изгибающую нагрузку на образце в 252-288 МПа ( $0,7 \div 0,8 \sigma_{0,2}$ ).

### 3.3.4 Измерительная ячейка

Измерительная ячейка представляет собой ёмкость длиной 19 см, шириной 13,5 см и глубиной 11 см, заполненную n-раствором  $\text{NaCO}_2$  (рис. 3.10). Внутри ячейки помещают образец, закрепленный в изгибающем устройстве, вспомогательный электрод, электрод сравнения, датчик тока, инициируемого выделением водорода. Контактный вывод образца соединяют через переменный резистор с «минусовой» клеммой на выходе модели станции катодной защиты (регулируемый источник постоянного тока). Измерительный вывод соединяют с «плюсовой» клеммой вольтметра. Плюсовой вывод модели станции защиты соединяют с графитовым стержнем, выполняющим роль вспомогательного электрода.



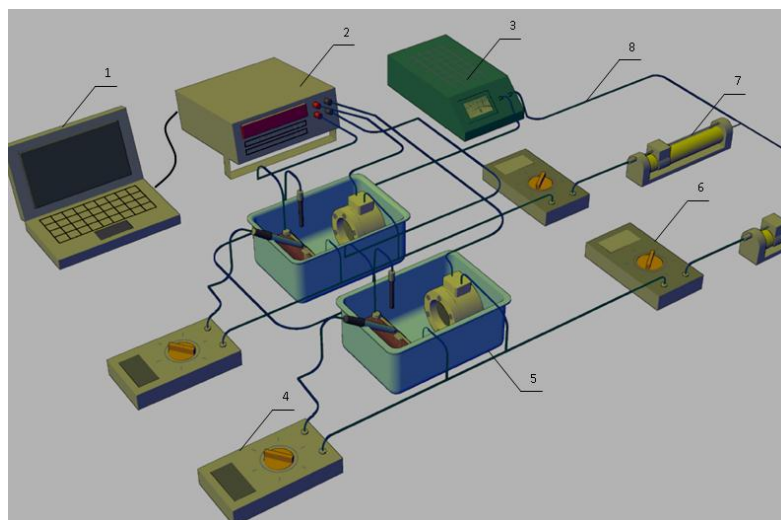
1 – водородный датчик ДН-1; 2 – анодный заземлитель; 3 – образец, установленный в изгибающем устройстве; 4 – пластиковая емкость; 5 – электрод сравнения

**Рисунок 3.10 – Схема измерительной ячейки**

### 3.3.5 Экспериментальная установка

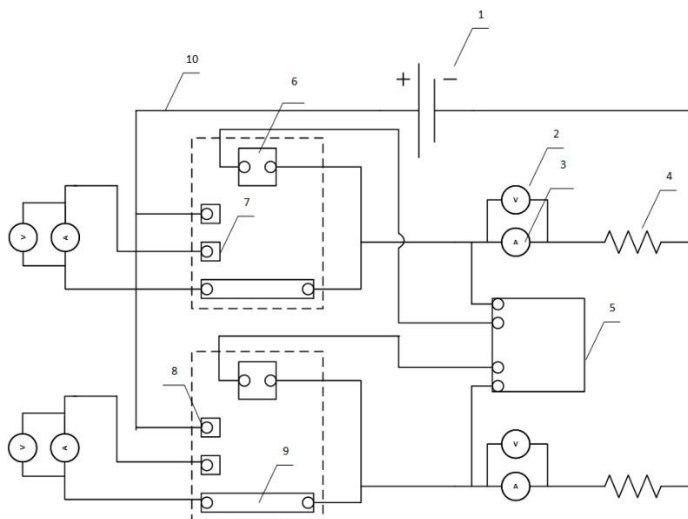
Экспериментальная установка представляет собой цепь из помещенных в измерительную ячейку образцов, находящихся под действием изгибающей

нагрузки и подключенных к модели станции катодной защиты (рис 3.8, 3.9). Настоящая схема экспериментальной установки позволяет одновременно исследовать несколько образцов, задавая требуемые параметры в каждой конкретной измерительной ячейке.



ПЭВМ; 2 – универсальный вольтметр; 3 – источник постоянного тока; 4,6 – мультиметр; 5 – измерительная ячейка; 7 – переменный резистор; 8 – соединительный провод

**Рисунок 3.8 – Схема экспериментальной установки**



1 – источник постоянного тока; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – переменный резистор; 5 – универсальный вольтметр; 6 – водородный датчик; 7 – электрод сравнения; 8 – анодный заземлитель; 9 – испытуемый образец; 10 – соединительный провод

**Рисунок 3.9 – Схема электрических соединений установки**

### 3.3.6 Ультразвуковой твердомер

Тестирование твердости с малой нагрузкой (ТМН) в образце проводилось ультразвуковым твердомером МЕТ-У1А (рис 1.7). В основе работы прибора лежит использование метода ультразвукового контактного импеданса: датчик ультразвукового принципа действия представляет собой отдельно выполненное устройство, связанное с электронным блоком при помощи кабеля. Датчик в основе своей использует стальной стержень с алмазной пирамидой на конце (угол между гранями  $136^\circ$ ), который является акустическим резонатором (вибратором) встроенного автогенератора ультразвуковой частоты. При внедрении пирамиды в контролируемое изделие под действием фиксированного усилия калиброванной пружины происходит изменение собственной частоты резонатора, определяемое твёрдостью материала, после чего относительное изменение частоты резонатора преобразуется электронным блоком в значение твёрдости выбранной шкалы и выводится на дисплей.

Прибор позволяет проводить измерения по четырем шкалам твердости - Роквелла (HRC), Бринелля (HB), Виккерса (HV), Шора (HSD). Технические характеристики прибора приведены в таблице 3.6.

**Таблица 3.6. Характеристики ультразвукового твердомера МЕТ-У1А**

Шкала твердости	Диапазон измерений	Погрешность, не более
«С» Роквелла	20...67 HRC	$\pm 2$ HRC
Бринелля	75...650 HB	$\pm 10$ HB
Виккерса	75...999 HV	$\pm 15$ HV
Шора	23...102 HSD	$\pm 2$ HSD

### 3.4 Порядок проведения эксперимента

#### 3.4.1 Подготовка оборудования и образцов к проведению испытаний

Перед проведением измерений ТМН необходимо подготовить зону измеряемой поверхности образца, удалив с неё влагу, загрязнения (масло, пыль и так далее), смазку, окалину, окисную плёнку, ржавчину, после чего производится абразивная подготовка поверхности. Это необходимо для исключения влияния шероховатости на результаты тестирования. Подготовка поверхности образцов осуществляется с помощью шлифовальной машинки с регулируемой скоростью работы, при этом используются абразивная бумага разной зернистости. Первоначально при шлифовке используется бумага с более крупным абразивом с дальнейшей сменой на бумагу с мелким абразивом. Во время проведения подготовки поверхности к измерению предусматривается принудительное охлаждение образцов с целью исключения влияния высоких температур на структуру металла. Подготовка поверхности осуществляется до тех пор, пока не будет достигнут уровень шероховатости  $R_a$  не более 2,5. [39]

Выделяют на образце зону контроля (рис 2.7). Проводят тестирование ТМН в зоне контроля не менее 100 раз. Закрепляют образец в изгибающем устройстве, проводят повторное тестирование ТМН.

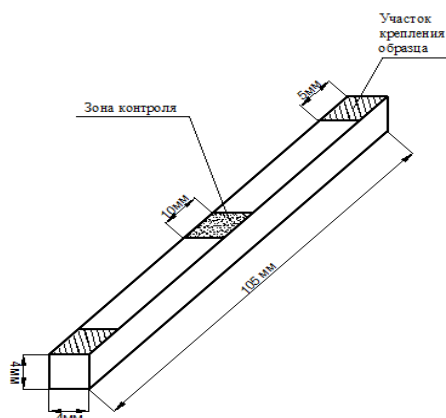


Рисунок 3.11 – Схема испытываемого образца



К концу стержневой части прижимных болтов гайками присоединяют контактные провода. Место крепления покрывают герметиком для предотвращения контакта с агрессивной средой.

Изготавливают в необходимом количестве агрессивную среду с требуемой концентрацией ионов водорода.

### **3.4.2 Порядок проведения испытаний**

Лабораторные испытания проводят в следующем порядке.

1. Закрепляют образец в изгибающем устройстве.
2. Помещают изгибающее устройство в измерительную ячейку.
3. Контактный провод соединяют с минусовым входом модели станции катодной защиты, измерительный – с плюсовым входом мультиметра.
4. Помещают в измерительную ячейку вспомогательный электрод.
5. Устанавливают хлоридсеребряный электрод сравнения максимально близко к зоне контроля образца.
6. Включают модель станции катодной защиты.
7. С помощью мультиметра и переменного резистора устанавливают требуемое значение потенциала относительно хлоридсеребряного электрода сравнения.
8. В измерительную ячейку помещают датчик тока, инициируемого выделением водорода. Измерительный «красный» провод датчика соединяют с вольтметром, контактный «синий» провод – с измерительным проводом изгибающего устройства.
9. На персональном компьютере запускают программное обеспечение, фиксирующее изменений значений тока проникновения водорода через мембрану датчика в реальном времени.
10. Выжидают условленное время проведения эксперимента, контролируя и, при необходимости, регулируя защитный потенциал.

11. Вынимают датчик водорода из измерительной ячейки, мембрану датчика протирают насухо и обрабатывают этанолом. Провода датчика замыкают накоротко.

12. Отсоединяют контактные и измерительные провода изгибающего устройства.

13. Выключают модель станции катодной защиты.

14. Вынимают изгибающее устройство из измерительной ячейки. Контрольную зону протирают насухо, обрабатывают этанолом.

15. Проводят тестирование ТМН в зоне контроля образца не менее 100 раз.

16. Образец извлекают из изгибающего устройства и проводят повторное тестирование ТМН не менее 100 раз.

17. Повторяют пункты 1-16 для различных потенциалов, концентраций водорода агрессивных сред и времени экспонирования.

Полученные результаты заносят в таблицу 3.7 (для примера показана таблица с тремя временными интервалами экспонирования)

**Таблица 3.7. Результаты испытаний**

рН среды		Разность потенциала «образец-среда», В			
Время экспонирования, ч					
0	0	3	3	6	6
НВ под нагрузкой	НВ без нагрузки	НВ под нагрузкой	НВ после разгрузки	НВ под нагрузкой	НВ после разгрузки

### **3.4.3 Порядок анализа результатов испытаний.**

Обработку результатов испытаний проводят в следующем порядке.

1. Определяют дисперсию ТМН для каждой из точек тестирования.
2. По таблицам стендовых испытаний строят графики зависимости дисперсии ТМН под нагрузкой и после разгрузки от времени экспонирования для каждого значения потенциала «образец-среда».

3. Строят графики зависимости тока проникновения водорода в сталь от значения потенциала «образец-среда» для каждого отрезка времени экспонирования.

4. Оценивают влияние среды, количества водорода катодной реакции и времени экспонирования на изменение дисперсии ТМН испытуемого образца с помощью инструментов статистической обработки данных.

### **3.5. Выводы по главе 3**

С учетом теории планирования эксперимента разработана методика имитационных испытаний образцов трубной стали в условиях одновременного действия катодной поляризации, механических напряжений и коррозионной среды. Методика включает две серии экспериментов:

1. Определение зависимости тока водорода от катодной поляризации в средах с различным водородным показателем;

2. Определение зависимости изменения механических характеристик стального образца от величины тока водорода в средах с различным водородным показателем, механических напряжений и временем экспонирования.

Разработана экспериментальная установка для проведения испытаний, выполнен подбор необходимого оборудования.

## Глава 4. Анализ результатов лабораторных испытаний

*В настоящей главе представлены результаты экспериментов, в рамках которых оценивалось влияние катодной поляризации на ток проникновения водорода в стальную мембрану датчика (первая серия испытаний) и влияние коррозионно-активной среды, количества водорода катодной реакции и времени экспонирования на механические характеристики образцов труб (вторая серия испытаний).*

### 4.1 Оценка влияния среды и потенциала катодной защиты на ток проникновения водорода

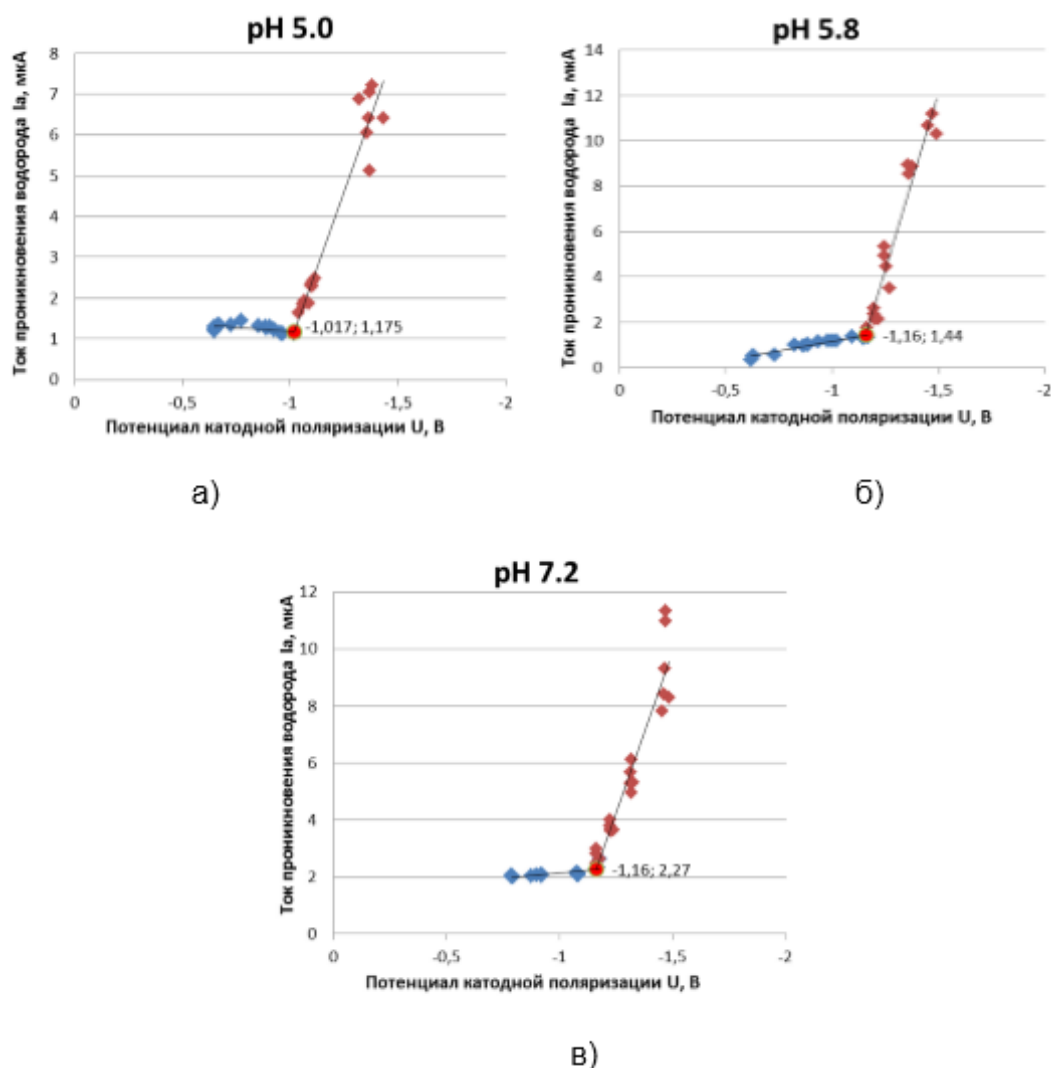
В процессе проведения эксперимента уровень защитного потенциала пошагово повышали от естественного значения до минус 1,5 В, изменение величины тока проникновения водорода в сталь фиксировали при помощи амперметра и ПЭВМ.

Исследование проводили в семи средах с различным водородным показателем от 5 до 9 рН. В качестве агрессивной среды использовали стандартные 0,1 н. растворы.

Установлено, что при повышении защитного потенциала происходит рост величины тока проникновения водорода  $i_a$ . При этом, при повышении (по модулю) защитного потенциала отрицательнее минус 1,0÷-1,1 В наблюдается более активный рост  $i_a$ , чем при низком. При этом легко можно выделить две зоны, соответствующие процессам восстановления кислорода в присутствии воды и восстановления воды с выделением водорода. Значение потенциала  $U_{кр}$ , физически соответствующего переходу процесса восстановления кислорода в присутствии воды в процесс восстановления воды с выделением водорода идентифицируют решением системы уравнений

$$\begin{cases} I = f(U), & \text{при } U \leq U_{кр}; \\ I = f^*(U), & \text{при } U > U_{кр}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Такого рода зависимости характерны для всех рассмотренных рН

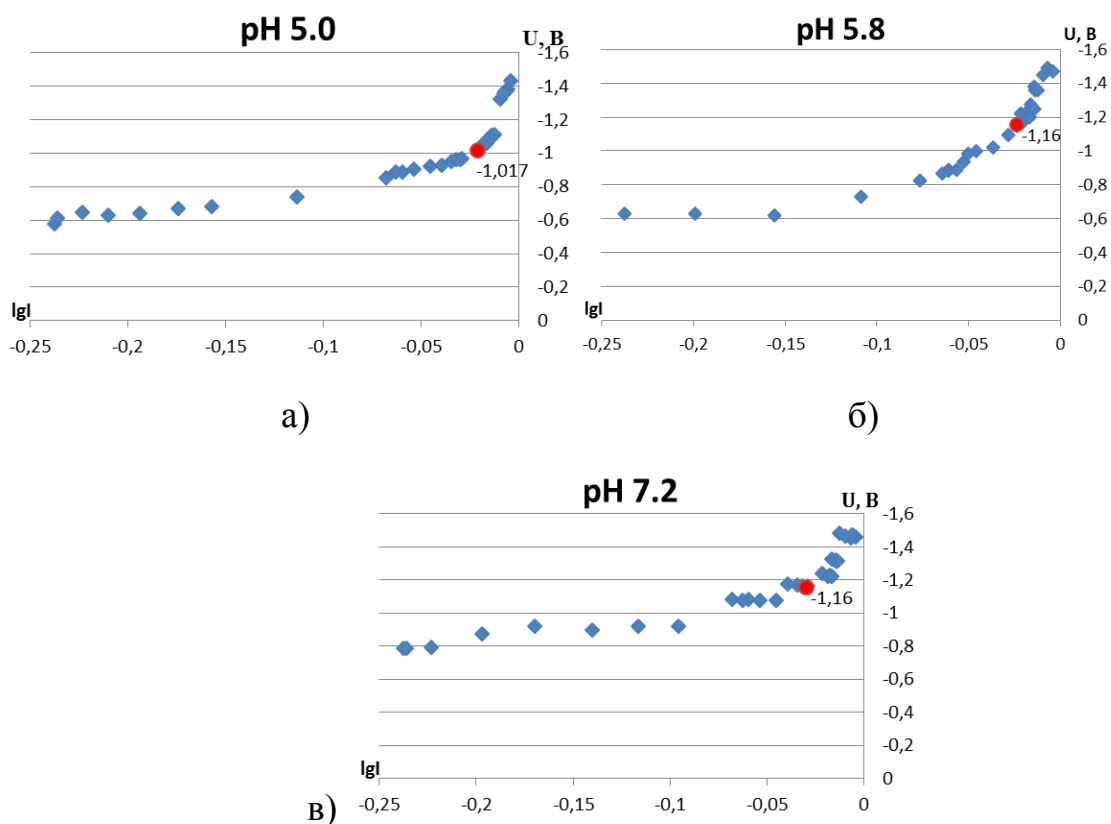


коррозионной среды (рис 4.1).

**Рисунок 4.1 – Зависимости величины тока проникновения водорода от уровня защитного потенциала СКЗ для сред с водородным показателем: а) 5,0 рН; б) 5,8 рН; в) 7,2 рН**

Установлено, что точка излома на рисунке 4.1 соответствует точке излома поляризационной кривой «сила тока – разность потенциалов», полученной в ходе проведения эксперимента (рис. 4.2).

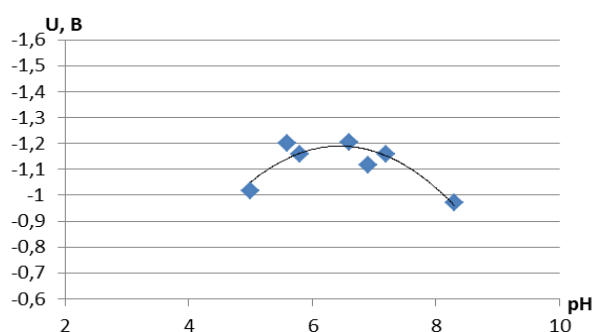
Таким образом, показано, что потенциал эффективной защиты может быть определен по излому кривой зависимости «сила тока в цепи датчика ДН-1 – разность потенциалов».



**Рисунок 4.2 – Зависимости «сила тока – разность потенциалов», полученные в ходе проведения эксперимента для сред с водородным показателем: а) 5,0 рН; б) 5,8 рН; в) 7,0 рН**

Установленный эффективный потенциал для выбранных условий эксперимента составил от минус 1,01 до минус 1,12 В и зависит от среды в которой он определен (рис. 4.3). Полученную зависимость для исследованных сред можно описать полиномом вида:

$$U_{кр} = -0,67 pH^2 + 0,86 pH - 1,6 \quad (4.2)$$



### **Рисунок 4.3 – Зависимость потенциала эффективной защиты от рН коррозионной среды**

#### **4.2 Оценка влияния коррозионно-активной среды, количества водорода катодной реакции и времени экспонирования на механические характеристики образцов труб**

##### **4.2.1 Оценка влияния среды на поврежденность образцов труб**

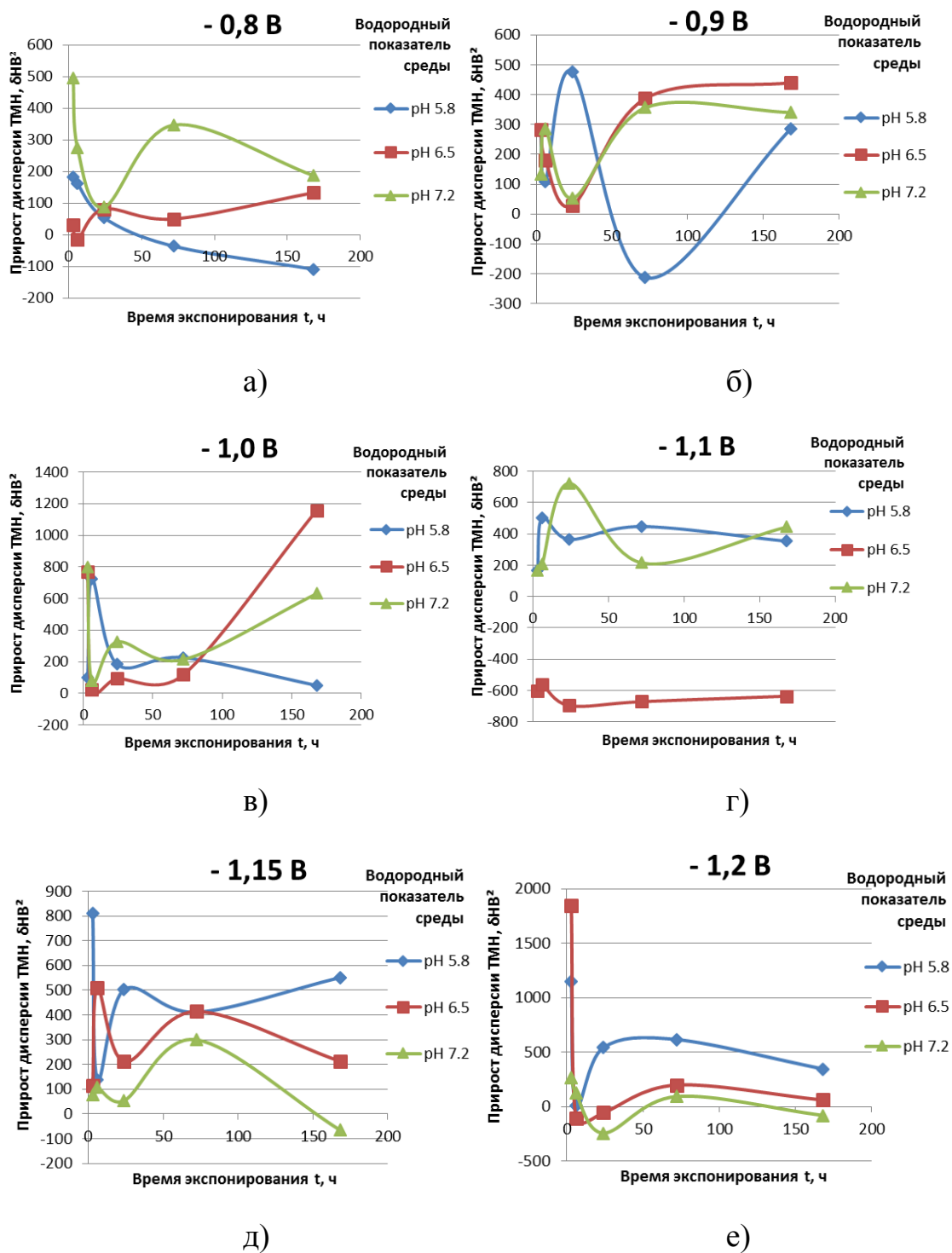
Известно, что основными факторами, определяющими особенности поляризации стального образца, являются водородный показатель модельного раствора, концентрация основных компонентов, температура [84,28]. При проведении исследований использовались стандартные 0,1 н. растворы при стандартной температуре, соответственно, в данном случае, основным фактором, определяющим условия поляризации, является водородный показатель.

Исследования проводились в растворах с рН 5.8, 6.5 и 7.2. Сужение диапазона обусловлено следующими факторами:

- указанные значения рН являются наиболее распространенными для околотрубных сред на территории Республики Коми [5];
- в средах с указанным рН наблюдаются повышенные значения эффективного защитного потенциала, которым соответствуют более высокие значения силы тока защиты (по сравнению с токами в средах вне указанного диапазона).

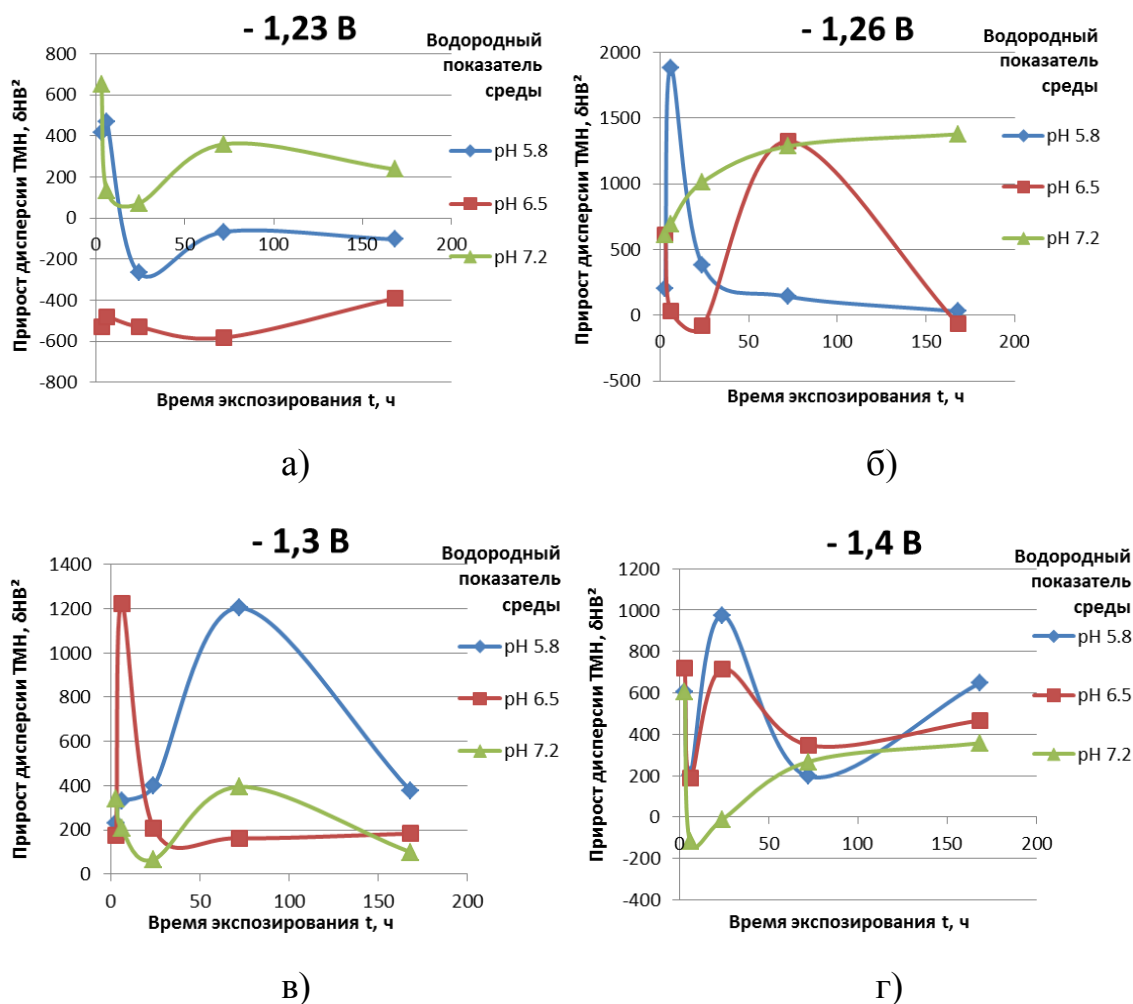
Результаты определения дисперсии ТМН на поверхности стальных образцов в средах с рН 5,8 – 7,2 показывают следующее (рис. 4.4, 4.5):

- особенности изменения дисперсии ТМН во всех случаях идентичны (имеет место характерный экстремум, формируемый в начале кривой, с последующей стабилизацией или плавным изменением значений);
- отличительных особенностей изменения дисперсии ТМН для каждой исследуемой среды не обнаружено.



**Рисунок 4.5 – Изменение дисперсии ТМН в средах с водородным показателем 5,0 рН, 6,5 рН и 7,2 рН при катодной поляризации: а) -0,8 В; б) - 0,9 В; в) -1,0 В; г) -1,1 В; д) -1,15 В и е) -1,2 В**

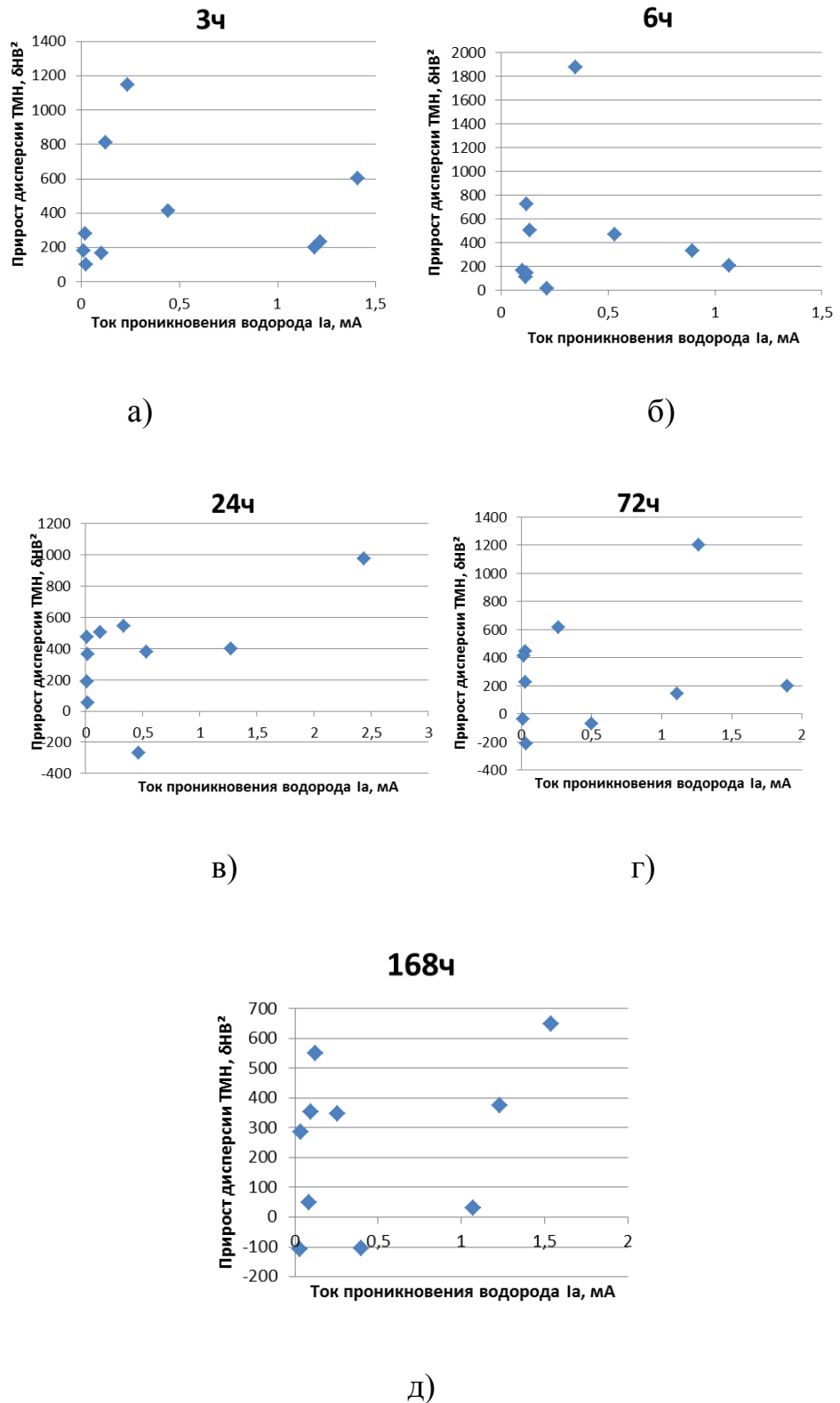




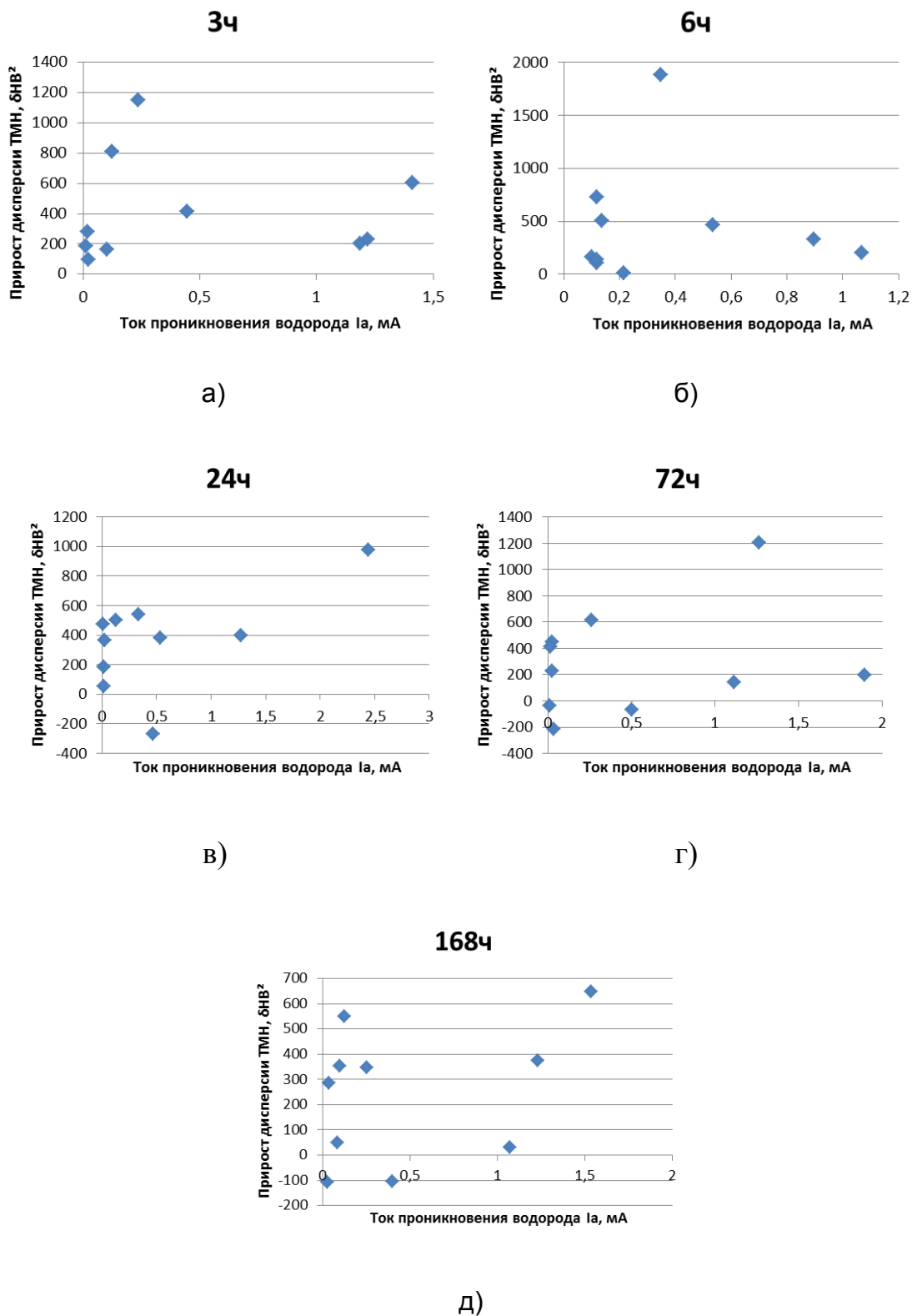
**Рисунок 4.5 – Изменение дисперсии ТМН в средах с водородным показателем 5,0 рН, 6.5 рН и 7,2 рН при катодной поляризации: а) -1,23 В; б) -1,26 В; в) -1,3 В; г) -1,4 В**

#### **4.2.2 Оценка влияния количества водорода катодной реакции на поврежденность образцов металла труб**

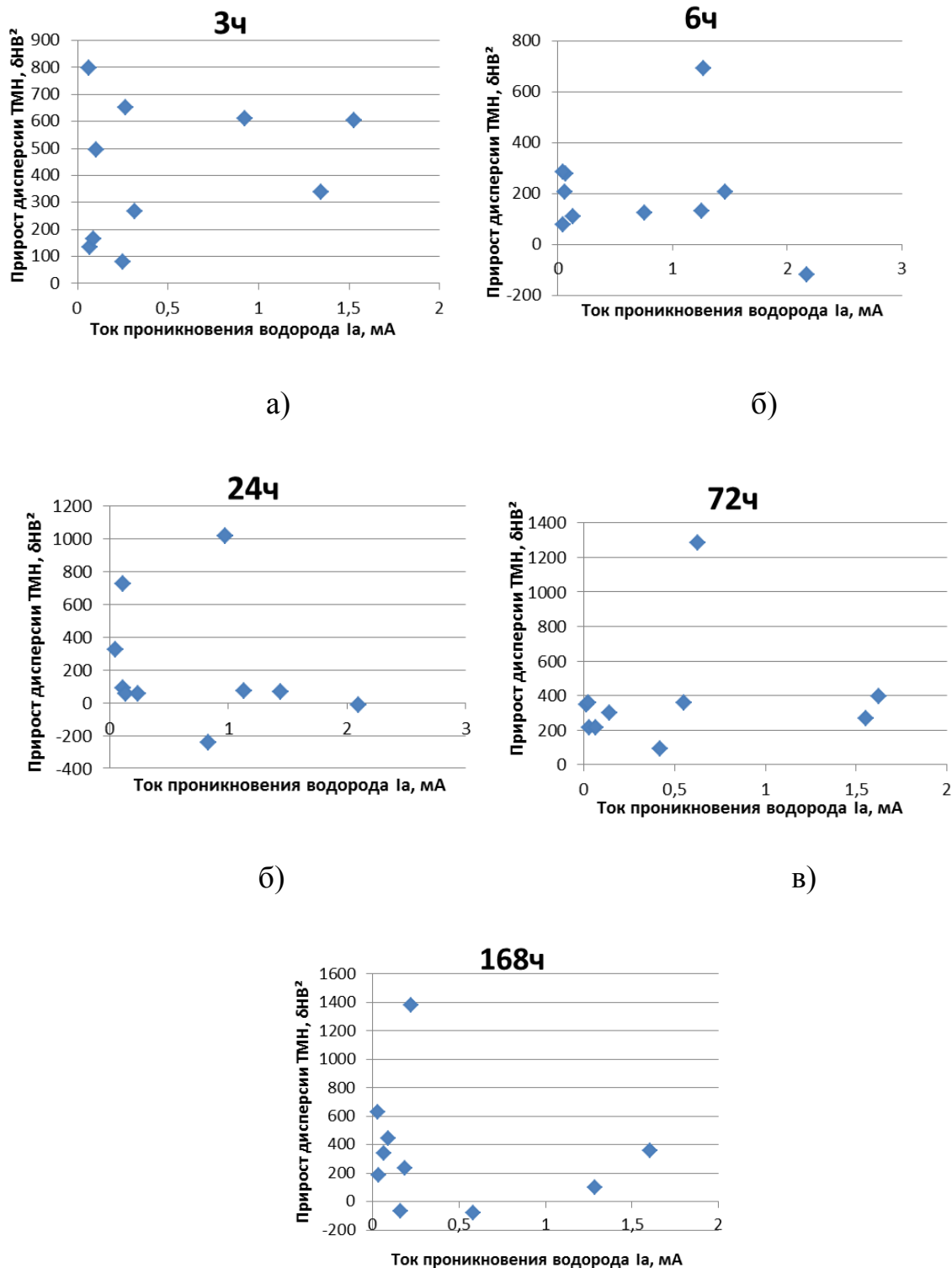
Особенности изменения дисперсии ТМН при повышении величины тока проникновения водорода через стальную мембрану датчика показаны на рисунках 4.5. - 4.7.



**Рисунок 4.5 – Зависимость изменения дисперсии ТМН от величины тока проникновения водорода для сред с водородным показателем 5.8 рН при времени экспонирования: а) 3 часа; б) 6 часов; в) 24 часа; г) 72 часа; д) 168 часов**



**Рисунок 4.6 – Зависимость изменения дисперсии ТМП от величины тока проникновения водорода для сред с водородным показателем 6.5 рН при времени экспонирования: а) 3 часа; б) 6 часов; в) 24 часа; г) 72 часа; д) 168 часов**



г)

**Рисунок 4.7 – Зависимость изменения дисперсии ТМН от величины тока проникновения водорода для сред с водородным показателем 7.2 рН при времени экспонирования: а) 3 часа; б) 6 часов; в) 24 часа; г) 72 часа; д) 168 часов**

Анализ представленных графических распределений показывает, что исследуемый параметр изменяется в широких пределах (от 200 до 600 единиц), однако, в большинстве случаев отмечается единичное (для рассматриваемого временного диапазона) резкое повышение дисперсии ТМН (на величину от 700 до 3800 единиц) при величине потенциала, превышающей потенциал точки перегиба поляризационной кривой.

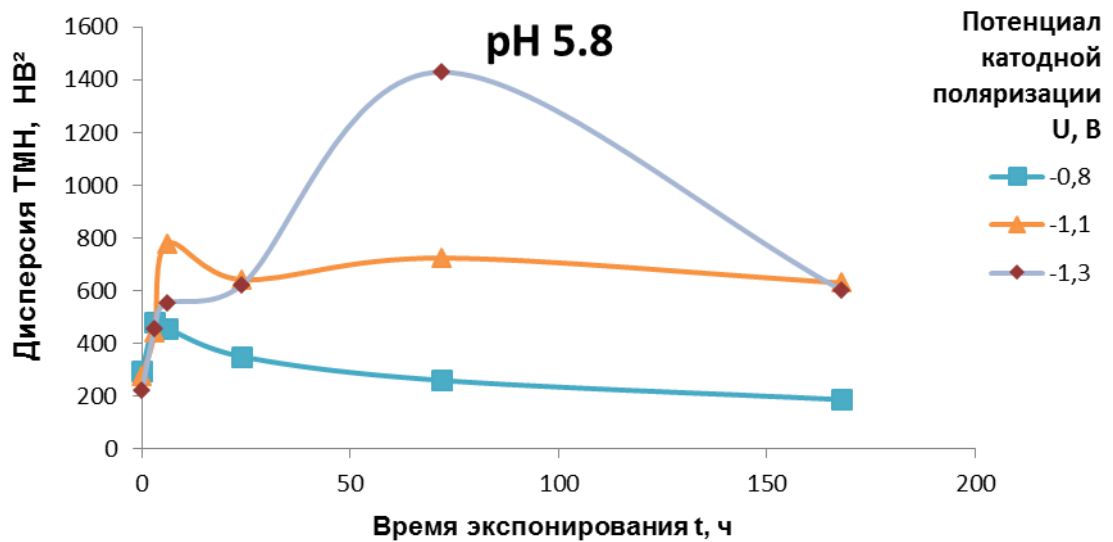
#### **4.2.3 Оценка влияния времени экспонирования на поврежденность труб**

Исследования показывают, что общий характер изменения контролируемого параметра (дисперсии ТМН) в зависимости от продолжительности воздействия эксплуатационных факторов (нагружения, катодной поляризации, химических особенностей среды) может быть представлен графически в виде кривой, содержащей от одного до трех экстремумов. В течение первых трех часов испытаний наблюдается резкое увеличение или снижение дисперсии ТМН, причем поведение функции в указанном временном диапазоне (возрастание или убывание) определяется исходным значением параметра на начало эксперимента. Далее (при продолжительности воздействия указанных факторов на материал образца более трех часов) форма экспериментальной кривой принимает вид:

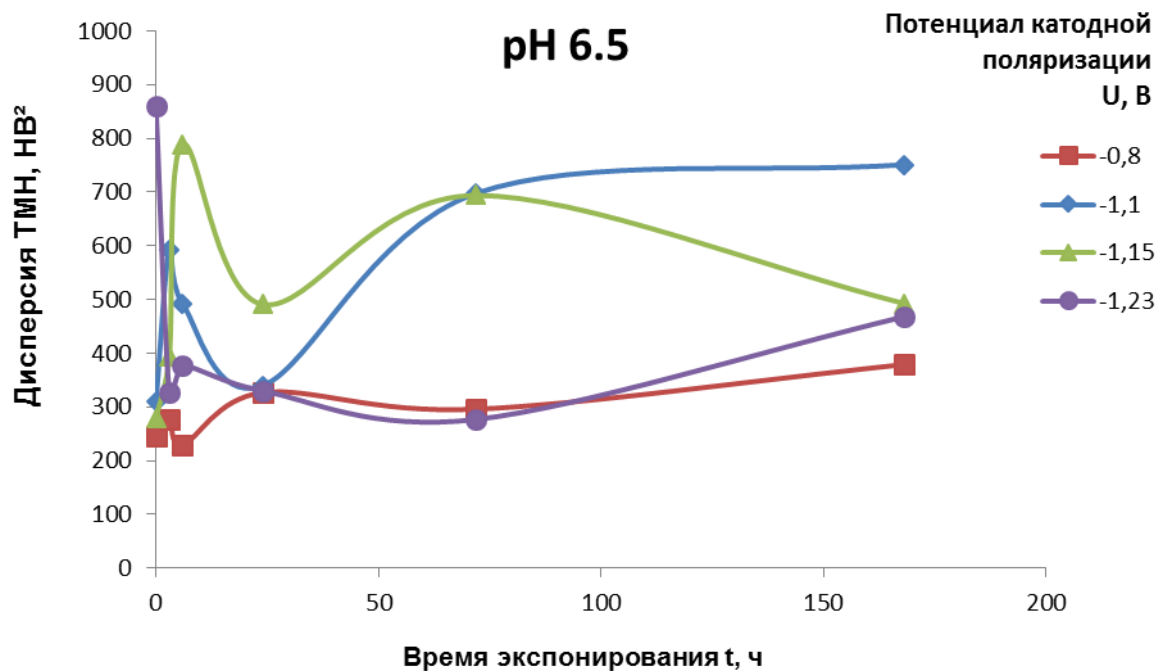
– после первого экстремума (максимума) происходит монотонное убывание функции (рис. 4.8);

– после первого экстремума (максимума) происходит интенсивное снижение параметра, с последующим монотонным возрастанием, убыванием или стабилизацией (рис. 4.9, 4.10);

– после первого экстремума (максимума) функция переходит в минимум и далее во второй экстремум (максимум), после которого монотонно убывает, возрастает или стабилизируется (рис. 4.11, 4.12).



а)

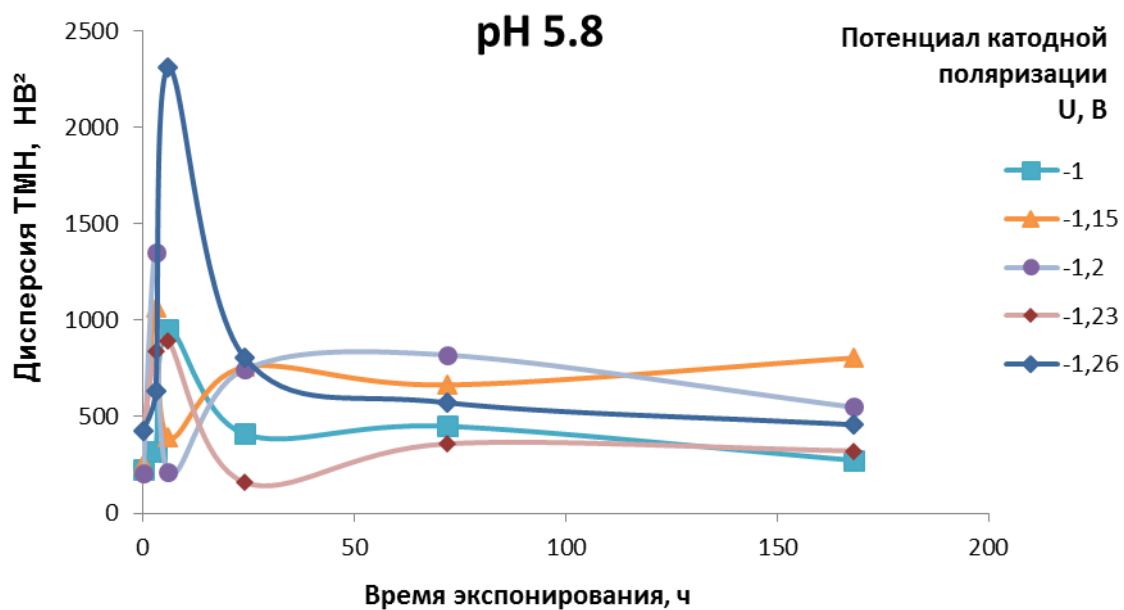


б)

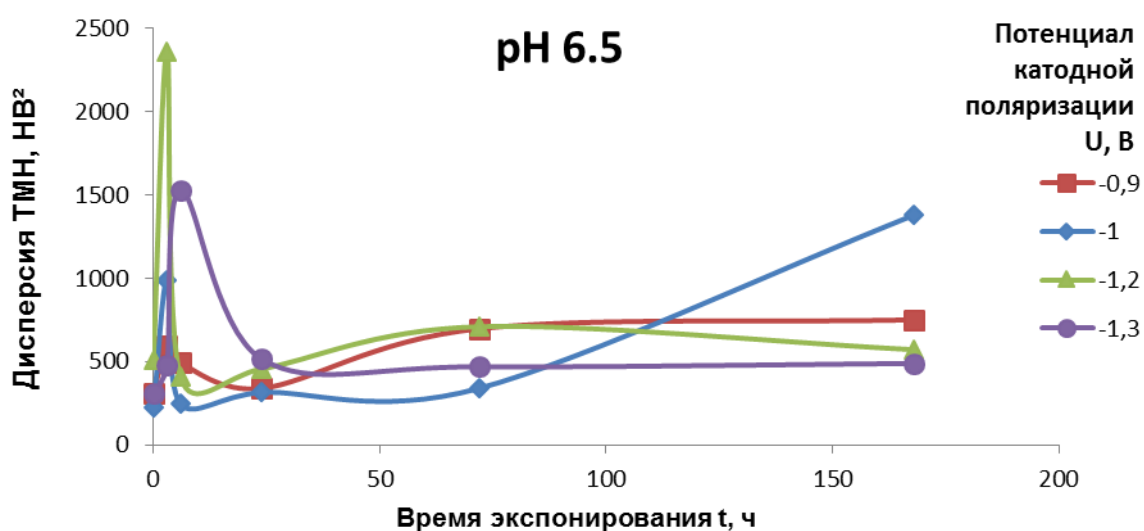
**Рисунок 4.8 – Изменение дисперсии ТМН от времени экспонирования:**

**а - при водородном показателе среды 5.8 рН и катодной поляризации минус 0,8 В, минус 1,1 В и минус 1,2 В;**

**б - при водородном показателе среды 6.5 рН и катодной поляризации минус 0,8 В, минус 1,1 В, минус 1,15 В и минус 1,2 В.**



а)

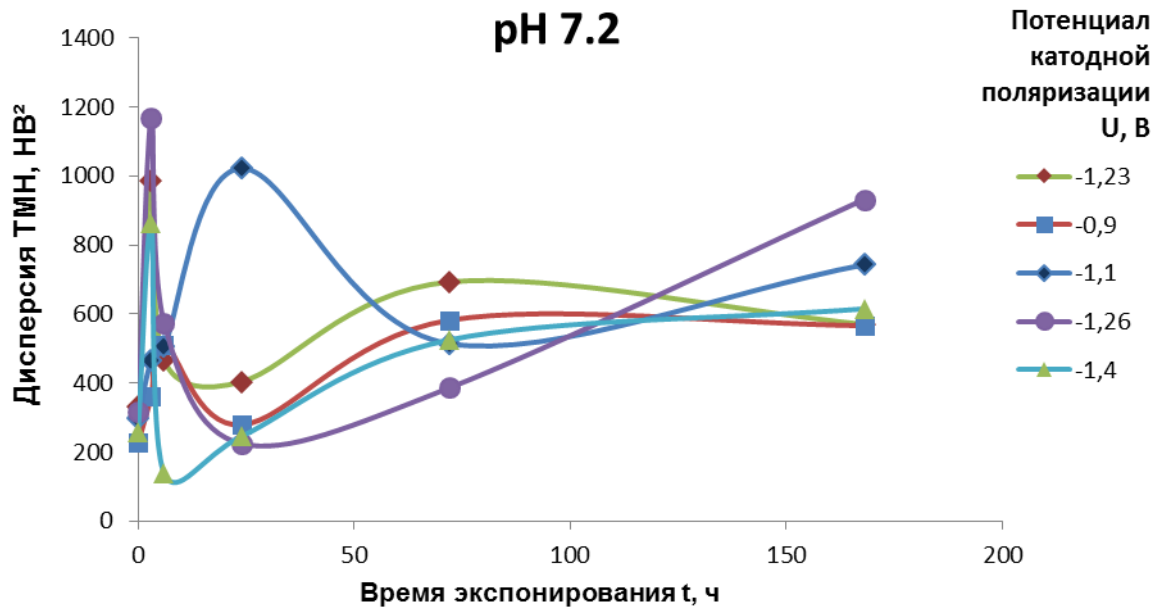


б)

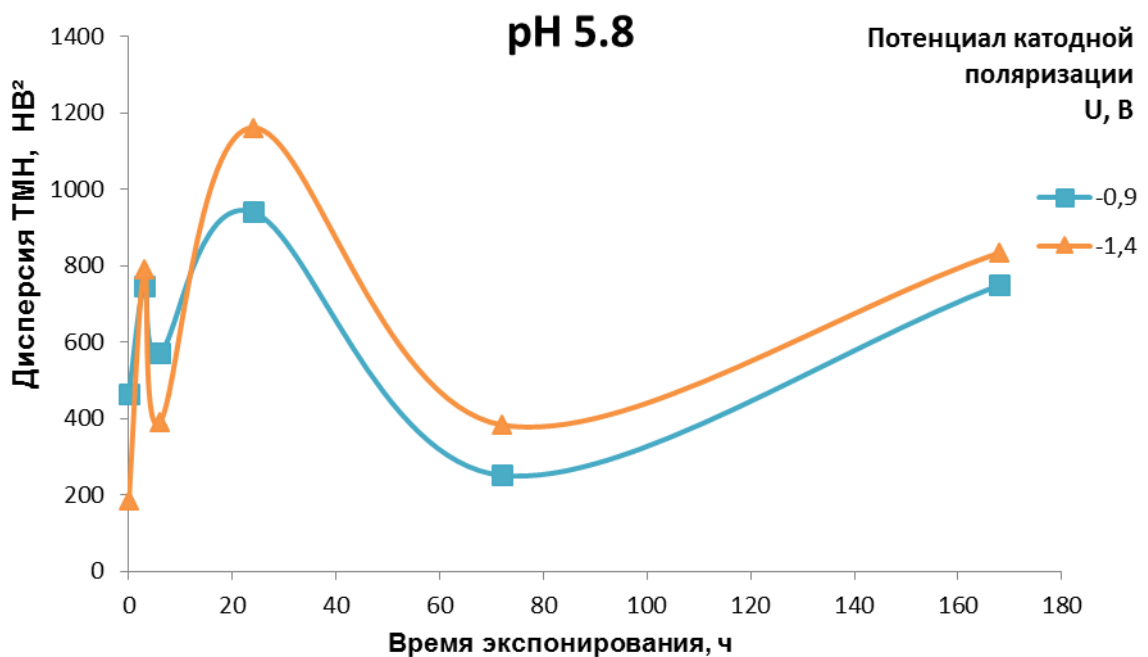
**Рисунок 4.9 – Изменение дисперсии ТМН от времени экспонирования:**

**а - при водородном показателе среды 5.8 pH и катодной поляризации минус 1,0 В, минус 1,15 В, минус 1,2 В, минус 1,23 и минус 1,26 В;**

**б - при водородном показателе среды 6.5 pH и катодной поляризации минус 0,9 В, минус 1,0 В, минус 1,2 В и минус 1,3 В.**

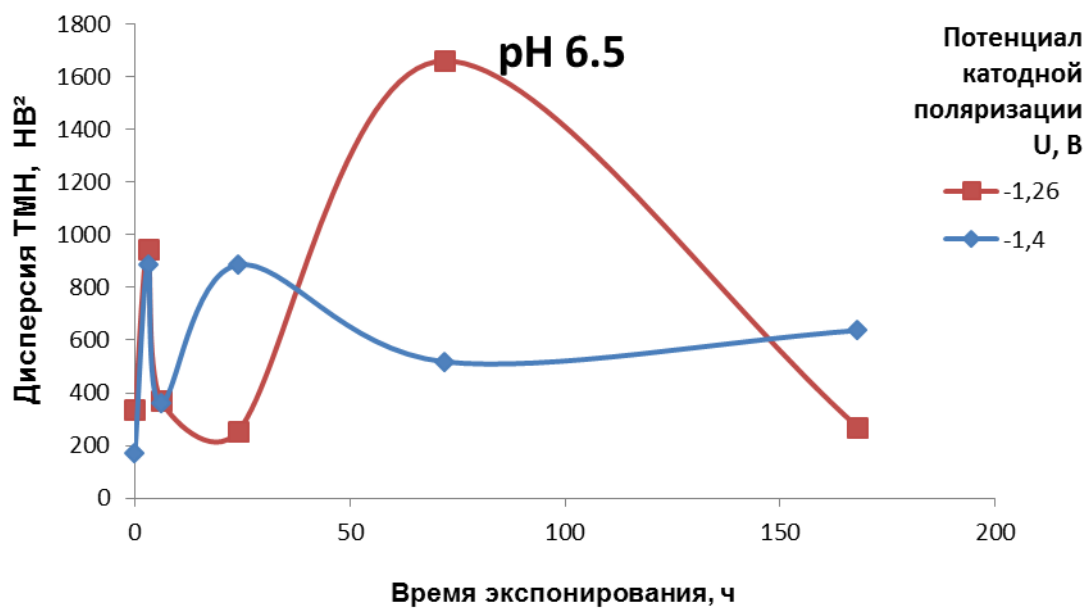


**Рисунок 4.10 – Изменение дисперсии ТМН от времени экспонирования при водородном показателе среды 7.2 pH и катодной поляризации минус 0,9 В, минус 1,1 В, минус 1,23 В, минус 1,26 и минус 1,4 В**

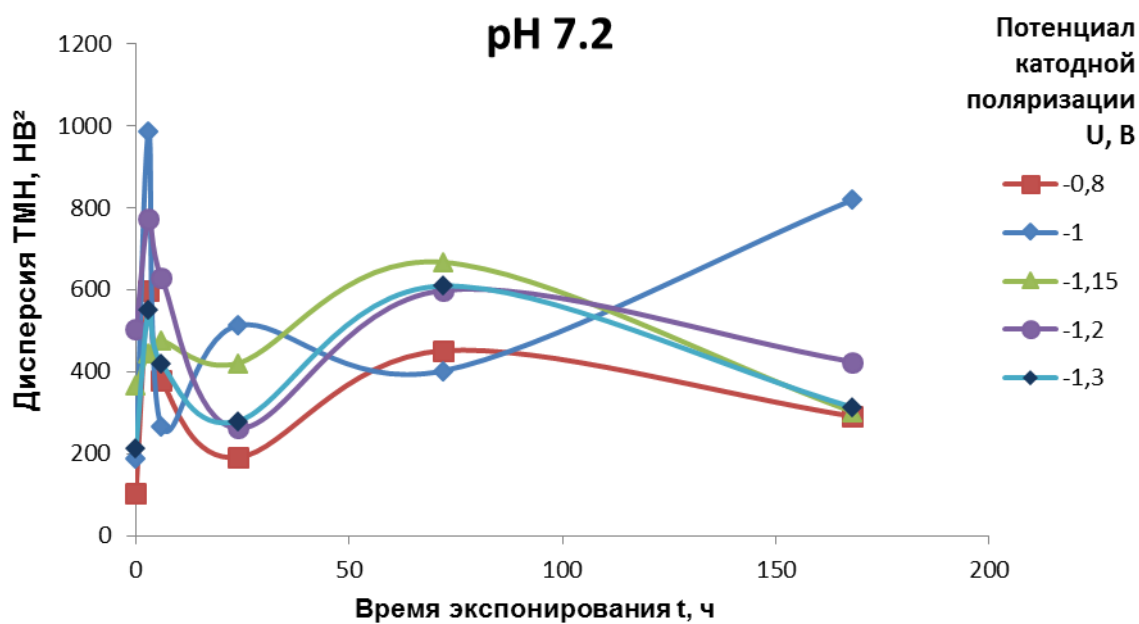


**Рисунок 4.11 – Изменение дисперсии ТМН от времени экспонирования при водородном показателе среды 7.2 pH и катодной поляризации минус 0,9 В, минус 1,1 В, минус 1,23 В, минус 1,26 и минус 1,4 В**





а)



б)

**Рисунок 4.12 – Изменение дисперсии ТМН от времени экспонирования:**  
**а - при водородном показателе среды 6.5 рН и катодной поляризации минус 1,26 и минус 1,4 В;**

**б - при водородном показателе среды 7.2 рН и катодной поляризации минус 0,8 В, минус 1,0 В, минус 1,15 В, минус 1,2 В и минус 1,3 В.**

Анализ экспериментальных данных показывает, что форма кривой не зависит от параметров нагружения и поляризации, а также водородного показателя модельной среды. Стабилизация дисперсии ТМН (или плавное снижение/повышение в диапазоне не более  $100 \text{ НВ}^2$  при продолжительности проведения испытаний 168 ч) при величине потенциала катодной поляризации от минус 1,15 до минус 1,23 происходит через 72 часа после начала эксперимента. В остальных случаях снижение или повышение дисперсии ТМН может происходить более интенсивно, при этом какой-либо связи динамики изменения с интенсивностью воздействия эксплуатационных факторов не прослеживается. Экстремумы функций, наблюдаемые при продолжительности проведения эксперимента более 72 часов, также проявляются случайно и какой-либо связи с параметрами действующих на исследуемый образец факторов также не наблюдается.

#### **4.3 Обработка результатов испытаний методами математической статистики**

Для качественного анализа полученных в ходе экспериментов данных, а именно для выявления факторов, оказывающих влияние на состояние металла в процессе экспонирования, необходимо применить специализированные методы математической статистики.

В ряде работ, посвященных исследованию изменения распределения значений твердости с малой нагрузкой трубных сталей, показано, что под воздействием внешних факторов может происходить отклонение закона распределения от нормального [39,40]. С учетом вышесказанного можно сделать вывод о целесообразности применения непараметрических критериев оценки, получившие широкое распространение для анализа экспериментальных данных, закон распределения которых неизвестен [30,34].

Для изучения особенностей влияния времени экспонирования, присутствия механических напряжений и вариации защитного потенциала на свойства металла испытанных образцов применяется критерий Ван дер Вардена [30,19,99,100]

упоминаемый так же в литературе как X-критерий [19]. Критерий характеризуется высокой эффективностью, возрастающей при увеличении количества значений в анализируемых выборках.

Критерий реализуется следующим образом.

$$X = \sum_{i=1}^m u_{\frac{R_i}{n+m+1}}, \quad (4.1)$$

где  $n$  и  $m$  – анализируемые выборки,  $n=m=100$ ;

$R_i$  – ранг выборочного значения  $x_i$ ;

$u_\gamma$  –  $\gamma$ -квантиль стандартного нормального распределения.

Для вычисления квантилей  $u_\gamma$  применено приближение

$$U_{\frac{R_i}{n+m+1}} \approx 4,91 \left[ \left( \frac{R_i}{n+m+1} \right)^{0,14} - \left( 1 - \frac{R_i}{n+m+1} \right)^{0,14} \right] \quad (4.2)$$

Гипотеза сдвига отклоняется, если  $|X| < x_\alpha$ , где  $x_\alpha$  – критическое значение.

Критическое значение  $x_\alpha$  принимается для уровня достоверности  $\alpha = 0,95$ . В соответствии с [26]  $x_{0,95} = 1,65$ .

При  $n, m \geq 20$  распределение  $X$  удовлетворительно описывается нормальным со средним  $\mu = M(x) = 0$  и дисперсией

$$D(X) = \frac{mn}{(m+n)(m+n-1)} \sum_{i=1}^{m+n} u_{\frac{R_i}{m+n+1}}^2. \quad (4.3)$$

Если

$$\left| X^* \right| = \left| \frac{X}{D(X)} \right| < u_{\frac{1+\alpha}{2}}, \quad (4.4)$$

то гипотеза сдвига отклоняется с достоверностью  $\alpha$ .

При  $n+m \rightarrow \infty$  эффективность критерия Ван дер Вардена не уступает эффективности критерия Стьюдента.

Ввиду больших объемов выборки вычисления выполнялись с использованием ЭВМ, для чего на базе табличного редактора была написана программа. Результаты расчета критических значений критерия  $X^*$  представлены в таблицах 4.1-4.3.

**Таблица 4.1. Критические значения критерия Ван дер Вардена для образцов, экспонированных в среде с рН 5,8**

Потенциал катодной поляризации, -В	Время экспонирования, ч				
	3	6	24	72	168
0,8	2,47	3,41	3,19	5,1	3,64
0,9	3,91	8,23	2,02	6,2	10,41
1	3,67	3,85	6,44	<b>1,57</b>	3,93
1,1	7,42	6,33	4,74	4,19	<b>1,08</b>
1,15	5,37	<b>1,31</b>	4,47	5,84	<b>1,11</b>
1,2	8,08	7,84	4,19	7,53	<b>1,49</b>
1,23	6,13	2,66	5,16	<b>0,75</b>	<b>0,69</b>
1,26	6,61	6,08	6,35	5,48	<b>1,45</b>
1,3	2,25	3,71	<b>0,64</b>	<b>0,48</b>	1,68
1,4	7,42	6,13	<b>1,52</b>	<b>1,08</b>	<b>0,7</b>

**Таблица 4.2. Критические значения критерия Ван дер Вардена для образцов, экспонированных в среде с рН 6,5**

Потенциал катодной поляризации, -В	Время экспонирования, ч				
	3	6	24	72	168
0,8	5,62	4,72	1,72	3,44	5,25
0,9	3,98	6,52	5,16	<b>1,04</b>	5,89
1	7,82	7,48	7,28	5,78	5,43
1,1	6,31	7,82	3,91	6,14	5,51
1,15	9,45	9,71	3,24	7,97	<b>1,33</b>
1,2	8,09	5,59	5,59	1,78	5,47
1,23	6,01	1,86	<b>1,51</b>	3,54	<b>1,17</b>
1,26	7,8	8,18	6,46	<b>1,13</b>	<b>0,99</b>
1,3	10,26	6,31	<b>1,22</b>	<b>0,61</b>	<b>1,18</b>
1,4	6,72	2,93	<b>1,55</b>	4,6	<b>1,08</b>

**Таблица 4.3. Критические значения критерия Ван дер Вардена для образцов, экспонированных в среде с рН 7,2**

Потенциал катодной поляризации, -В	Время экспонирования, ч				
	3	6	24	72	168
0,8	5,62	5,22	3,47	6,29	6,59
0,9	4,86	4,86	5,57	4,98	5,88
1	1,86	<b>1,25</b>	5,47	5,09	5,77
1,1	6,34	2,01	13,47	<b>1,45</b>	2,71
1,15	8,42	6,33	10,02	3,68	7,56
1,2	14,26	7,7	13,06	11,35	<b>0,67</b>
1,23	4,1	2,15	6,05	<b>0,55</b>	<b>0,28</b>
1,26	6,22	7,77	9,27	1,57	<b>1,17</b>
1,3	6,59	8,48	<b>0,65</b>	<b>0,06</b>	3,14
1,4	4,72	3,57	<b>0,85</b>	<b>0,71</b>	<b>1,19</b>

Из таблиц видно, что в ряде случаев имеются факты отклонения гипотезы, присутствует сдвиг распределения:

- при времени экспонирования 168 часов для всех рассмотренных сред при значениях потенциала катодной поляризации, превышающих минус 1,1-1,15 В;
- при времени экспонирования 24 часа и более для всех рассмотренных сред при значениях потенциала катодной поляризации минус 1,3-1,4 В.

#### **4.4 Выводы по главе 4**

1. При защитном потенциале минус 0,8-0,9 В (по медносульфатному электроду) изменения дисперсии твердости от начальных значений не превышает 500 единиц и слабо зависит от водородного показателя среды и времени экспонирования.

2. Для всех испытанных образцов марки стали 17Г1С, имеющих начальную дисперсию твердости менее 550 НВ<sup>2</sup>, характерен первичный рост дисперсии твердости в процессе испытания, при начальных значениях дисперсии

более 700 НВ<sup>2</sup> происходит первоначальное уменьшение дисперсии, что соответствует результатам, полученным другими авторами.

3. Не обнаружено зависимости дисперсии твердости от интенсивности выделения водорода и водородного показателя агрессивной среды в интервале 5,8÷7,2 рН, что, возможно, связано с относительно малым временем проведения испытаний.

## **Глава 5. Разработка практических рекомендаций по совершенствованию системы коррозионного мониторинга состояния магистральных газопроводов**

*В настоящей главе описаны предложения по внедрению датчика водорода ДН1 в систему коррозионного мониторинга состояния магистральных газопроводов. Предложен и обоснован выбор места установки датчика. Приведены конструктивные решения по схеме подключения датчика к подсистеме коррозионного мониторинга.*

### **5.1 Определение места установки датчиков тока, инициируемого выделением водорода.**

Выявление потенциально опасных участков (ПОУ) является актуальной проблемой на всех этапах проектирования, сооружения и эксплуатации магистральных газопроводов [64-68]. Определению участков, предрасположенных к КРН посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых [75,70,2,9]. В частности, в работе Спиридовича Е.А. [75] предложен алгоритм выявления ПОУ, склонных к КРН в зависимости от типа изоляционного покрытия газопровода, преобладающего типа грунтов, наличия пересечения газопроводом, уровня наиболее длительного стояния грунтовых вод. В качестве источников получения исходных данных для анализа предлагается использовать исполнительную и проектную документацию. По итогам анализа исходных данных, участку газопровода присваивается категория опасности от I до IV. Порядок ранжирования представлен в таблице 5.1.

Предложенная система ранжирования ПОУ не учитывает влияние работы средств электрохимической защиты на развитие КРН, поэтому для определения места установки датчиков тока, инициируемого выделением водорода, применяться не может.

**Таблица 5.1. Ранжирование ПОУ по категориям опасности**

Наличие факторов, присущих разрушениям по признакам КРН	Категория участка
Изоляция – полимерная лента, грунт - суглинки, тугопластичные глины, труба - двухшовная, нормальной толщины.переменное смачивание поверхности трубы грунтовыми водами, прилегающие плечи к замененному участку после разрушения, выявленные в местах гидрологическими изысканиями, полного погружения трубы в воду, либо выходом в сухой грунт	I
Все газопроводы большого диаметра, эксплуатирующиеся в одном коридоре произошедших аварий, изоляция - полимерная лента, грунты – суглинки, тугопластичные глины, труба - двухшовная с нормальной толщиной стенки, протяженность ПОУ каждой нитки определяется линией уровня грунтовых вод, проходящей по поверхности газопровода	II
«Горячие» участки газопровода (до 20 км от КС), имеющие все факторы, присущие КРН первой категории, за исключением разрушений, независимо от конструкции труб (двухшовные, одношовные, спиральношовные)	III
Участки газопроводов с факторами, обозначенными в первой категории, располагающимися на расстоянии км 20 - км 50 от компрессорных станций	IV
Изоляция –полимерная лента, грунты – суглинки, тугопластичные глины; труба – двухшовная, одношовная, спиральношовная; толщина стенки – нормальная; переменное смачивание поверхности трубы грунтовыми водами; удаленность участков от КС более пятидесяти километров	V
Изоляция – заводская (битумная), трубы с нормальной толщиной стенки, грунты – суглинки, переменное смачивание поверхности труб грунтовыми водами	VI

В настоящей работе предложена система отнесения участка магистрального газопровода к потенциально опасному и требующему дополнительного



мониторинга путем установки датчика тока, инициируемого выделением водорода, определения и поддержания эффективного потенциала катодной защиты. Система основана на присвоении каждому конкретному участку балльной оценки, учитывающей в себе воздействие практически всех факторов, влияющих на развитие стресс-коррозионных процессов: удельное электрическое сопротивление грунта, расстояние до точки дренажа средств электрохимической защиты, тип изоляционного покрытия, тип и диаметр трубы, тип и увлажненность грунта, наличие дефектов КРН глубиной менее 10% от толщины стенки трубы, наличие в прошлом аварийных разрушений по причине КРН на рассматриваемом участке газопровода (табл. 5.2).

Необходимость установки датчика определяют следующим образом.

1. Производят сбор необходимых исходных данных об анализируемом участке.
2. Определяют для каждого фактора балльную оценку согласно таблице 5.2.
3. Определяют общую балльную характеристику по формуле:

$$k = \prod_{i=1}^n k_i \quad (5.1)$$

где  $k_i$  – балльная оценка каждого фактора соответственно.

4. В случае, если характеристика  $k < 80$ , участок для КРН по механизму водородного охрупчивания считается не опасным и дополнительный мониторинг (установка датчика наводороживания) не требуется. Если  $k \geq 80$ , на ближайшем к точке дренажа контрольно-измерительном пункте необходимо произвести установку датчика.

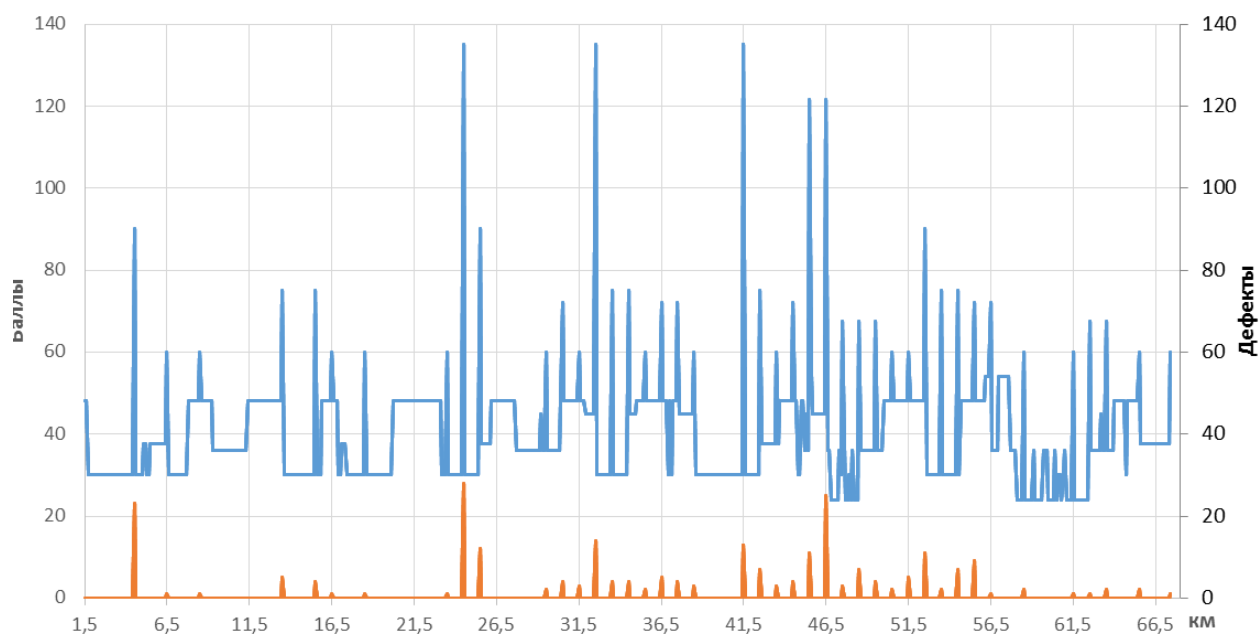
Апробация предлагаемого алгоритма определения необходимости установки датчика проводилась на участке магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» км 1,5-67, характеристика которого приведена в главе 2 настоящей работы.

**Таблица 5.2. Факторы, характеризующие опасность возникновения КРН и их балльные количественные оценки**

Фактор	Значение	Балльная оценка
Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом•м	менее 700	1
	от 700 до 1100	1,25
	свыше 1100	1,5
Расстояние до точки дренажа средств электрохимической защиты, км	до 1,5	5
	от 1,5 до 3	4
	от 3 до 4,5	3
	от 4,5 до 6	2
	свыше 6	1
Тип изоляционного покрытия	Полимерная лента	2
	Битумная мастика	1
	Заводское нанесение (полиэтилен, полипропилен и т.д.)	0
Тип трубы	одношовная	1
	двухшовная	1,25
	спиралешовная	1,5
Диаметр трубы, мм	1020	1
	1220	1,25
	1420	1,5
Увлажненность грунта	Переменное смачивание	3
	Постоянный уровень грунтовых вод	2
	Сухой грунт	1
Тип грунта	Глины	3
	Суглинки	2
	Песок, торф	1
Наличие дефектов КРН глубиной менее 10% от толщины стенки трубы	Да	2
	Нет	1
Наличие аварийных разрушений	Да	2
	Нет	1

На исследуемом участке с шагом в 100 м определяли значения необходимых факторов (табл. 5.2) и их общую бальную оценку. Сопоставление общей бальной оценки участка и количества дефектов, выявленных на нем входе проведения внутритрубной дефектоскопии (рис. 5.2), показывает высокую степень взаимосвязи, характеризующуюся коэффициентом корреляции  $R=0,7$ .

Анализ результатов сопоставления показывает, что наиболее опасные участки, требующие дополнительного контроля, находятся на отметках 4,5; 24,5; 25,5; 32,5; 41,5; 45,5; 46,5 и 52,5 км. Следовательно, датчики тока, инициируемого выделением водорода, необходимо подключить к существующим контрольно-измерительным пунктам, установленным на 4,56; 24,675; 32,145; 42,11; 45,2; 46,23; и 52,355 км, соответственно.



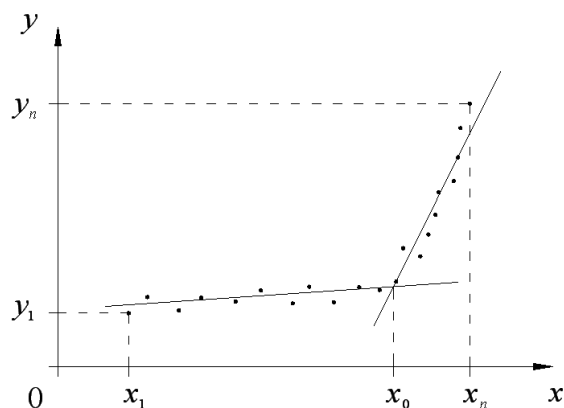
**Рисунок 5.2 – Сопоставление общей бальной оценки и количества дефектов на участке газопровода «Ухта-Торжок III» км 1,5-67**

## **5.2 Алгоритм обработки данных.**

Определение координат точки излома  $I(U)$  является ключевым моментом в предлагаемом способе регулирования параметров катодной защиты магистральных газопроводов. Выявление граничного значения потенциала,

относительно которого будут изменяться настройки работы станции катодной защиты должно происходить автоматически и с максимально возможной точностью. Ниже представлен ряд математических и графических способов, которые можно взять за основу при разработке программного обеспечения.

Пусть известны значения силы тока и потенциала поляризации  $I_i$  и  $U_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения. Введем следующие обозначения:  $x_i = \ln I_i$ ,  $y_i = U_i$ . Предполагается, что зависимость  $y(x)$  состоит из двух участков, которые могут считаться линейными (рис. 5.3). Необходимо найти значение  $x_0 = \ln I_0$ , соответствующее точке пересечения прямых, которыми могут быть аппроксимированы два линейных участка зависимости  $y(x)$ .



**Рисунок 5.3 – Общий вид поляризационной кривой**

Решение задачи проводится в следующей последовательности.

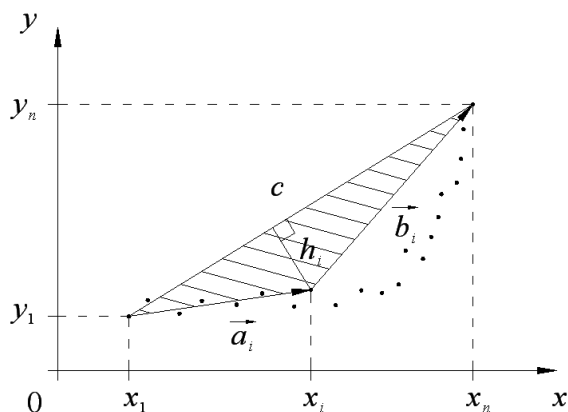
#### 1. Определение положения точки излома зависимости $y(x)$ .

Для определения положения точки излома зависимости  $y(x)$  могут быть использованы различные способы. Рассмотрим три наиболее простых и наглядных.

1.1. Поиск точки, максимально удаленной от прямой, соединяющей первую и последнюю точки зависимости  $y(x)$ .

Рассмотрим треугольник с вершинами в точках  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_n, y_n)$ . Площадь этого треугольника  $s_i$  равна половине произведения стороны  $c$  на высоту  $h_i$  (рисунок 5.4). В то же время площадь данного треугольника равна половине модуля векторного произведения векторов  $\mathbf{a}_i$  и  $\mathbf{b}_i$ :

$$s_i = \frac{1}{2} ch_i = \frac{1}{2} |[\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i]| = \frac{1}{2} (a_{ix} b_{iy} - a_{iy} b_{ix}). \quad (5.1)$$



**Рисунок 5.4 – Определение положения точки излома**

Очевидно, что

$$a_{ix} = x_i - x_1, \quad a_{iy} = y_i - y_1, \quad b_{ix} = x_n - x_i, \quad b_{iy} = y_n - y_i. \quad (5.2)$$

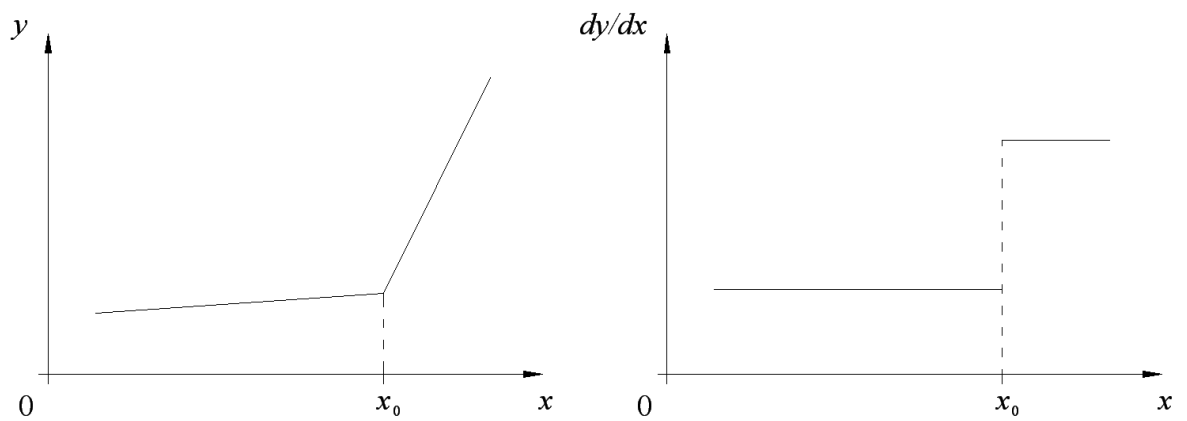
Следовательно, расстояние  $h_i$  от прямой, соединяющей первую и последнюю точки зависимости  $y(x)$  до точки с индексом  $i$  удовлетворяет следующему уравнению:

$$ch_i = (x_i - x_1)(y_n - y_i) - (y_i - y_1)(x_n - x_i). \quad (5.3)$$

Рассчитаем величины  $ch_i$  для всех  $i$  из диапазона  $1 < i < n$ . Определим индекс  $t$  точки, соответствующей максимальному значению  $ch_i$ . Точку с индексом  $t$  будем считать точкой излома зависимости  $y(x)$ .

## 1.2. Поиск точки разрыва производной зависимости $y(x)$ .

Очевидно, что в точке излома функции  $y(x)$  производная  $dy(x)/dx$  имеет разрыв (рис. 5.5).



**Рисунок 5.5 – Определение точки разрыва производной зависимости  $y(x)$**

Рассмотрим точку с индексом  $i$ ,  $1 < i < n$ . Разделим все имеющиеся точки  $(x_i, y_i)$  на две группы: первая группа – точки с номерами от 1 до  $i$ , вторая группа – точки с номерами от  $i$  до  $n$ . Аппроксимируем указанные две группы точек прямыми, уравнения которых имеют следующий вид:

$$y = p_{1i}x + q_{1i}, \quad (5.4)$$

$$y = p_{2i}x + q_{2i}. \quad (5.5)$$

Коэффициенты при  $x$  в этих уравнениях определяются следующими соотношениями:

$$p_{1i} = \frac{i \sum_{k=1}^i x_k y_k - \left( \sum_{k=1}^i x_k \right) \left( \sum_{k=1}^i y_k \right)}{i \sum_{k=1}^i x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^i x_k \right)^2}, \quad (5.6)$$

$$p_{2i} = \frac{(n-i+1) \sum_{k=i}^n x_k y_k - \left( \sum_{k=i}^n x_k \right) \left( \sum_{k=i}^n y_k \right)}{(n-i+1) \sum_{k=i}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=i}^n x_k \right)^2}. \quad (5.7)$$

Рассчитаем разности  $p_{2i} - p_{1i}$  для всех  $i$  из диапазона  $1 < i < n$ . Определим индекс  $m$  точки, соответствующей максимальному значению разности  $p_{2i} - p_{1i}$ . Точку с индексом  $m$  будем считать точкой излома зависимости  $y(x)$ .

1.3. Поиск точки, соответствующей максимальной достоверности аппроксимации.

Рассмотрим точку с индексом  $i$ ,  $1 < i < n$ . Разделим все имеющиеся точки  $(x_i, y_i)$  на две группы: первая группа – точки с номерами от 1 до  $i$ , вторая группа – точки с номерами от  $i$  до  $n$ . Рассчитаем коэффициенты корреляции для указанных двух групп точек с использованием следующих соотношений:

$$R_{1i} = \frac{\sum_{k=1}^i ((x_k - \bar{x}_1)(y_k - \bar{y}_1))}{\sqrt{\sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^i (y_k - \bar{y}_1)^2}}, \quad (5.8)$$

$$R_{2i} = \frac{\sum_{k=i}^n ((x_k - \bar{x}_2)(y_k - \bar{y}_2))}{\sqrt{\sum_{k=i}^n (x_k - \bar{x}_2)^2} \sqrt{\sum_{k=i}^n (y_k - \bar{y}_2)^2}}, \quad (5.9)$$

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i x_k, \quad \bar{y}_1 = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i y_k, \quad (5.10)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n-i+1} \sum_{k=i}^n x_k, \quad \bar{y}_2 = \frac{1}{n-i+1} \sum_{k=i}^n y_k. \quad (5.11)$$

Рассчитаем суммы  $R_{1i} + R_{2i}$  для всех  $i$  из диапазона  $1 < i < n$ . Определим индекс  $m$  точки, соответствующей максимальному значению суммы  $R_{1i} + R_{2i}$ . Точку с индексом  $m$  будем считать точкой излома зависимости  $y(x)$ .

2. Разделение всех имеющихся точек  $(x_i, y_i)$  на две группы, относящиеся к первому и второму линейным участкам.

Пусть  $m$  – номер точки излома, определенный одним из способов, представленных выше. Рассмотрим две группы точек: первая группа – точки с номерами от 1 до  $m$ , вторая группа – точки с номерами от  $m$  до  $n$ . Будем считать, что точки первой группы относятся к первому линейному участку зависимости

$y(x)$ , а точки второй группы относятся ко второму линейному участку зависимости  $y(x)$ .

3. Определение уравнений аппроксимирующих прямых на первом и втором линейных участках.

Уравнения аппроксимирующих прямых на первом и втором линейных участках имеют следующий вид:

$$y = p_1 x + q_1, \quad (5.12)$$

$$y = p_2 x + q_2. \quad (5.13)$$

Параметры аппроксимирующих прямых определяются следующими соотношениями:

$$p_1 = \frac{m \sum_{k=1}^m x_k y_k - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right) \left( \sum_{k=1}^m y_k \right)}{m \sum_{k=1}^m x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right)^2}, \quad (5.14)$$

$$q_1 = \frac{\left( \sum_{k=1}^m x_k^2 \right) \left( \sum_{k=1}^m y_k \right) - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right) \left( \sum_{k=1}^m x_k y_k \right)}{m \sum_{k=1}^m x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right)^2}, \quad (5.15)$$

$$p_2 = \frac{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k y_k - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right) \left( \sum_{k=m}^n y_k \right)}{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right)^2}, \quad (5.16)$$

$$q_2 = \frac{\left( \sum_{k=m}^n x_k^2 \right) \left( \sum_{k=m}^n y_k \right) - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right) \left( \sum_{k=m}^n x_k y_k \right)}{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right)^2}. \quad (5.17)$$

4. Определение величин  $x_0$  и  $I_0$ , соответствующих точке пересечения двух аппроксимирующих прямых.



Координата  $x_0$  точки пересечения двух прямых (5.12) и (5.13) определяется следующим образом:

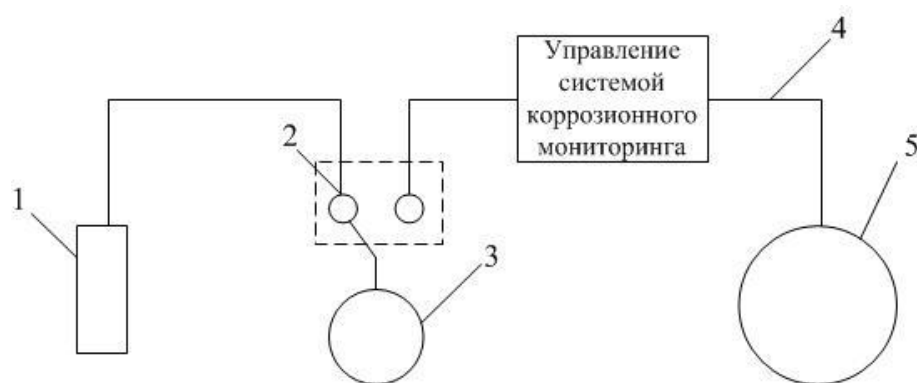
$$x_0 = \frac{q_2 - q_1}{p_1 - p_2}. \quad (5.18)$$

Величина  $I_0$  определяется следующим уравнением:

$$I_0 = e^{x_0}. \quad (5.19)$$

### 5.3 Конструктивные решения по схеме подключения датчика

Особенности установки и эксплуатации датчика водорода ДН-1 подразумевают наличие постоянного контакта с исследуемым газопроводом с целью защиты стальной мембраны, что будет негативно сказываться на работе всей системы катодной защиты объекта. Мембрана датчика при контакте с грунтом будет являть собой искусственный дефект изоляции газопровода, вследствие чего средства автоматического контроля станцией катодной защиты будут вынуждены регулировать защитный потенциал системы, повышая ток на выходе станции. Исходя из этого, рекомендуется предусмотреть переключение датчика на автономную электрохимическую защиту на время между проведениями измерений (рис 5.6).



1 – протектор; 2 – переключатель «автономная защита/газопровод»; 3 – датчик водорода; 4 – соединительные провода; 5 – магистральный газопровод

**Рисунок 5.6 – Схема подключения датчика к газопроводу**

Схема, представленная на рисунке 5.6, состоит из магистрального газопровода 5 с подключенным через контрольно-измерительный пункт средств коррозионного мониторинга датчиком водорода 3. Для обеспечения защиты стальной мембраны датчика от коррозии в режиме ожидания предусмотрен протектор 1. Переключение датчика на автономную защиту происходит автоматически после окончания измерений либо по команде оператора.

Для автономной защиты датчика тока, инициируемого выделением водорода рекомендуется использовать протекторы на основе магниевых сплавов типа МП1. Минимальную массу такого протектора, исходя из планируемого срока эксплуатации, можно определить по формуле:

$$G = \frac{T \cdot I \cdot 8760}{\eta_u \cdot \eta_n \cdot q}, \quad (5.20)$$

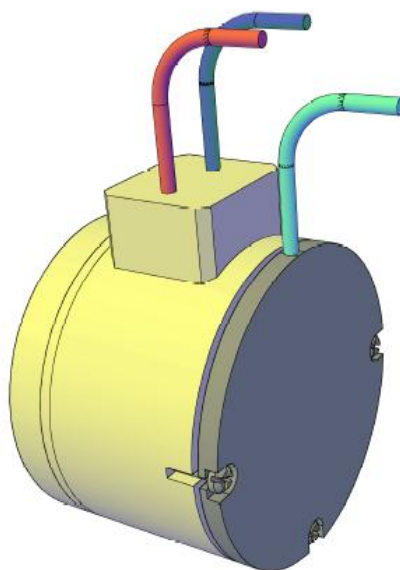
где  $I$  – сила тока в цепи «протектор-мембрана датчика»;  $T$  – планируемый срок службы протектора;  $\eta_u$  – коэффициент использования материала протектора (для сплава МП1  $\eta_u=0,9$ );  $\eta_n$  – коэффициент полезного действия протектора (для сплава МП1  $\eta_n=0,6$ );  $q$  – теоретическая токоотдача материала протектора (для сплава МП1  $q \approx 2200$  А·час/кг).

Учитывая достаточно низкое переходное сопротивление мембраны датчика и соединительных проводов, силу тока в цепи можно определить как

$$I = \frac{0,6}{R_{II}}, \quad (5.21)$$

где  $R_{II}$  – переходное сопротивление протектора.

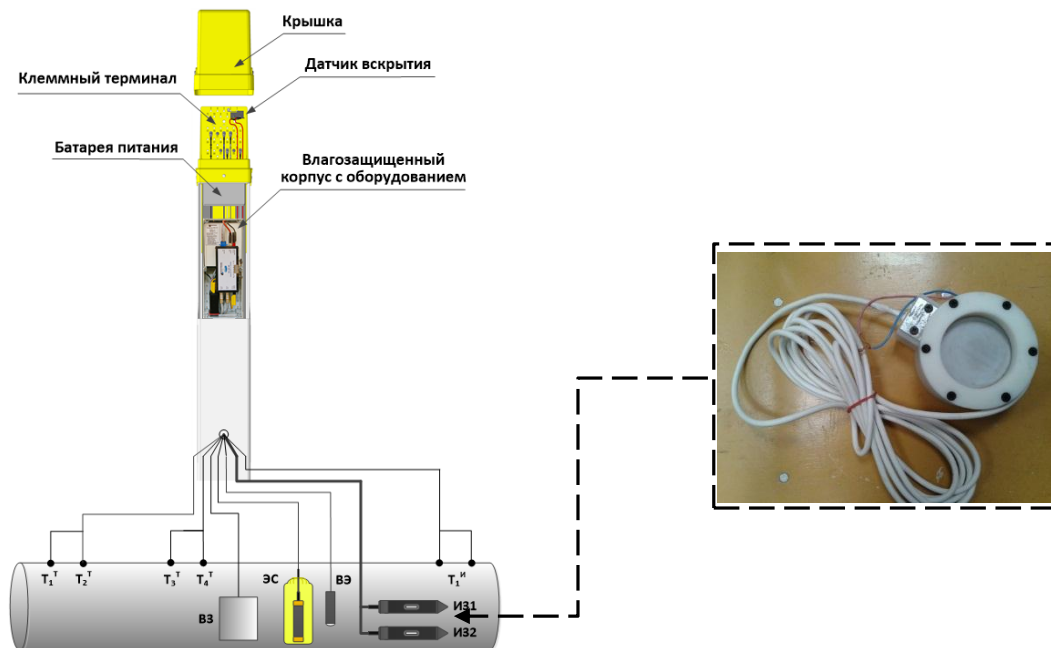
При планируемом сроке эксплуатации датчика с системой автономной противокоррозионной защиты 10 лет минимальная масса протектора на основе магниевого сплава МП1 должна составлять 0,815 кг. Оптимальной формой протектора будет диск, установленный с тыльной стороны датчика (рис. 5.7).



**Рисунок 5.7 – Датчик тока, инициируемого водородом с установленным протектором**

Датчик вместе с автономной противокоррозионной защитой предлагается интегрировать в серийно выпускаемую подсистему коррозионного мониторинга ПКМ-ТСТ-КонтКорр, разработанную ЗАО «Газопроводные системы и технологии». Оборудование подсистемы коррозионного мониторинга размещается в пластиковом корпусе контрольно-измерительного пункта (КИП), внешне не отличающемся от КИП, применяемых на объектах газопроводного транспорта углеводородов. При этом в корпусе осуществляется компактное размещение блока батареи автономного питания, управляющего контроллера и электронных блоков устройств, применяемых для оценки состояния средств ЭХЗ магистрального газопровода.

Оборудование подсистемы коррозионного мониторинга ПКМ-ТСТ-КонтКорр управляется контроллером ПКМ-ТВПС ICL-02i-40, в действующей схеме датчик водорода предлагается включить в состав оборудования вместо одного из измерительных зондов (рис. 5.8).



**Рисунок 5.6 – Устройство контрольно-измерительного пункта системы коррозионного мониторинга ПКМ-ТСТ-КонтрКорр**

### **5.3.1 Порядок подключения датчика ДН-1 к магистральному газопроводу**

Подключение датчика ДН-1 к магистральному газопроводу производят следующим образом.

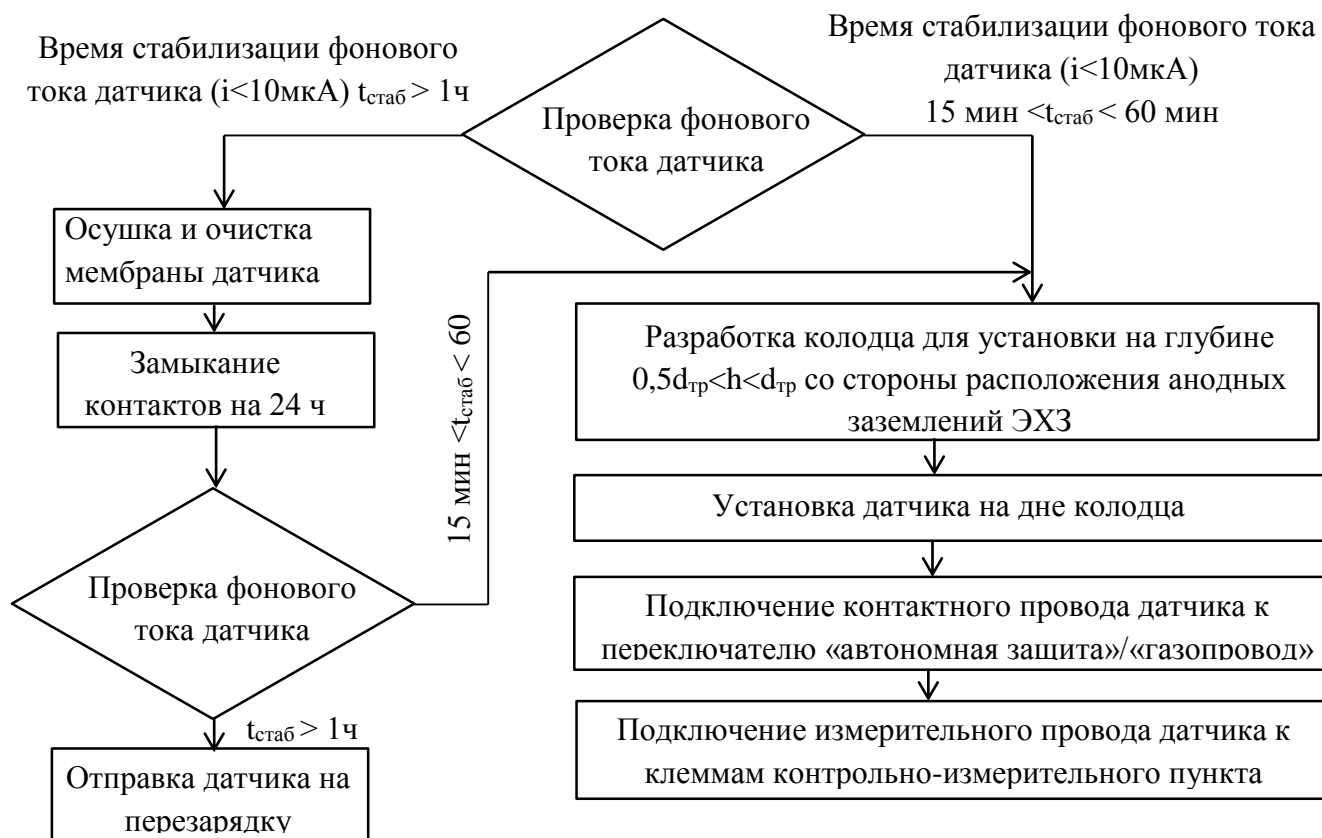
1. Проверяют состояние и целостность провода и контактного узла «измерительный провод-датчик». Измерительные провода датчика замыкаются накоротко и датчик выдерживается в неподвижном состоянии в течении не менее 2 часов, при этом поверхность мембраны датчика должна быть сухой (не контактировать с грунтом).
2. Мультиметром измеряют фоновый ток датчика. Время измерения (от 15 до 60 минут) определяется временем стабилизации  $t_{\text{стаб}}$  тока датчика. Датчик считается пригодным для установки, если величина фонового тока не превышает 10 мкА.
3. При величине фонового тока более 10 мкА необходимо убедиться, что поверхность мембраны датчика сухая, и повторить операции 1 и 2. Если величина

фонового тока датчика не уменьшится до необходимого уровня за 24 часа, датчика отправляется на перезарядку.

4. Разрабатывают колодец для установки датчика на глубине между горизонтальной осью и крайней нижней точкой газопровода. Осторожно послойно засыпают и утрамбовывают датчик грунтом обратной засыпки без крупных включений, по мере утрамбовки увлажняя 15-20 литрами воды.

5. Контактный провод датчика подключают к переключателю «автономная защита/газопровод». Измерительный провод датчика подключают к контактам контрольно-измерительного пункта.

Алгоритм подключения датчика водорода ДН1 к магистральному газопроводу представлен на рисунке 5.7.



**Рисунок 5.7 – Порядок подключения датчика водорода ДН1 к магистральному газопроводу**

### 5.3.2 Порядок определения эффективного потенциала «труба-земля»

Определение эффективного потенциала «труба-земля» и регулирование настроек станции катодной защиты производят в следующем порядке.

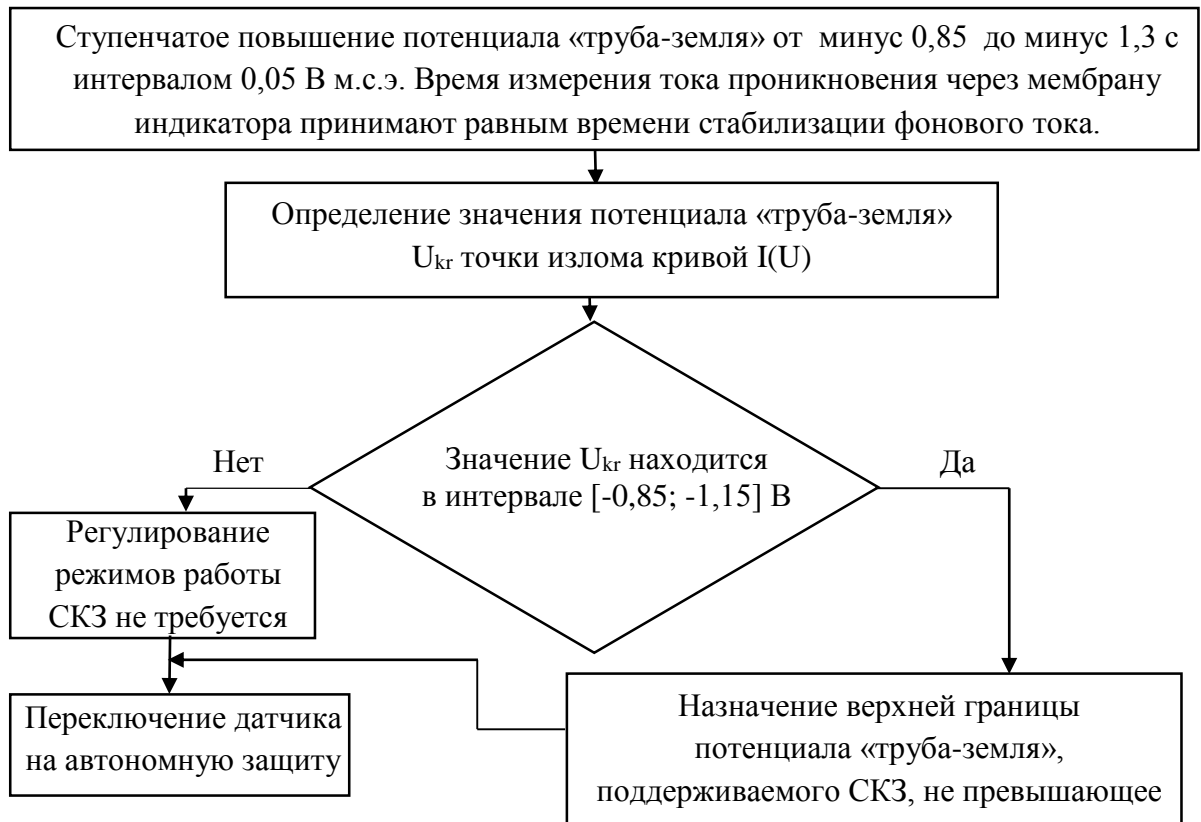
1. Производят ступенчатое повышение потенциала «труба-земля» от минимального защитного (-0,85 В) до минус 1,3 с интервалом в 0,05 В м.с.э. Фиксируют показания датчика водорода. Время измерения тока проникновения через мембрану датчика принимают равным времени стабилизации фонового тока.

2. Определяют значения потенциала «труба-земля»  $U_{кр}$  точки излома  $I(U)$  одним из методов, представленных в 5.2.

3. Если значение  $U_{кр}$  не находится в интервале [-0,85; -1,15] В, то дополнительная уставка для систем автоматического регулирования станции катодной защиты не нужна. Датчик переключается на автономную электрохимическую защиту.

4. Если значение  $U_{кр}$  принадлежит интервалу [-0,85; -1,15], то для систем автоматического регулирования вводят дополнительную уставку, ограничивающую верхнюю границу потенциала «труба-земля» таким образом, чтобы потенциал не превышал  $U_{кр}$ .

Алгоритм определения эффективного потенциала «труба-земля» представлен на рисунке 5.8.



**Рисунок 5.8 – Порядок определения эффективного потенциала «труба-земля»**

### Выводы по главе 5

1. Разработана и апробирована на участке газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км система бальной оценки необходимости установки датчика водорода.
2. Предложены конструктивные решения по внедрению датчиков тока, инициируемого выделением водорода, в существующую систему коррозионного мониторинга магистральных газопроводов.
3. Предложены варианты математической обработки данных, поступающих с датчиков водорода, которые можно использовать в качестве базовых при разработке программного обеспечения по автоматическому определению эффективного потенциала катодной поляризации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основе анализа данных внутритрубной дефектоскопии и результатов электрометрических обследований участка газопровода, определены критерии отнесения участка магистрального газопровода к категории предрасположенных к образованию стресс-коррозии, дополнительно включающие высокие значения удельного электросопротивления грунта, толщину стенки трубы, близость к точке дренажа ближайшей станции катодной защиты.

2. В результате имитационных экспериментальных исследований с применением датчика, инициируемого выделением водорода ДН-1 разработан новый критерий определения эффективного потенциала катодной защиты газопровода по точке излома графика зависимости тока выделения водорода от силы поляризующего тока.

3. Экспериментально доказано, что при поддержании потенциала металла относительно грунта в области значений ниже точки излома кривой Тафеля, не происходит заметного изменения механических свойств металла в процессе экспозиции при заданных режимах испытаний, тем самым не создаются дополнительные условия для образования КРН.

4. Разработана методика обоснования целесообразности и шага установки датчиков тока, инициируемого выделением водорода на участках МГ при проектировании и эксплуатации газопроводов, система балльной оценки необходимости установки датчиков, апробированная на участке газопровода «Ухта-Торжок III» 1,5-67 км.

5. Разработаны конструктивные решения, включающие обеспечение автономной защиты мембраны датчика протекторной установкой, а также алгоритмы по внедрению датчиков тока, инициируемого выделением водорода в систему коррозионного мониторинга магистральных газопроводов и алгоритм математической обработки данных, которые могут быть использованы при разработке программного обеспечения по автоматическому определению



эффективного потенциала катодной поляризации системами коррозионного мониторинга.

6. В результате работы проведена модернизация метода предупреждения развития стресс-коррозии за счет эффективного регулирования работы средств противокоррозионной защиты, что позволяет в комплексе с другими мероприятиями обеспечить безаварийную эксплуатацию газопроводов, имеющих трещины КРН глубиной до 5-8% от номинальной толщины стенки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров Ю.В., Юшманов В.Н., Агинец Р.В. Сопоставительный анализ результатов диагностики и электрометрических измерений на участке газопровода, предрасположенном к стресс-коррозии // Практика противокоррозионной защиты –2011. – №3. – С. 15-20.
2. Александров, Ю. В. Выявление факторов, инициирующих развитие разрушений магистральных газопроводов по причине КРН / Ю. В. Александров // Практика противокоррозионной защиты. – 2011. - №1. – С. 22-26.
3. Александров, Ю. В. Оценка эффективности работы катодной защиты газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением / Ю. В. Александров, В. Н. Юшманов, О. Ю. Теплинская // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – №4. – С. 22-24
4. Александров, Ю.В. Актуальные вопросы защиты от коррозии длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов / Ю.В. Александров, Р.В. Агинец // СПб.: «Недра», 2012.- 394 с.
5. Александров, Ю.В. Разработка методологии эффективного предупреждения разрушения длительно эксплуатируемых газопроводных систем, подверженных стресс-коррозии, автореф. дис. доктора техн. наук / Ю.В. Александров. - Ухта: УГТУ, 2013. – 43 с.
6. Алимов С. В. Концепция диагностирования и ремонта магистральных газопроводов в регионах с высокой предрасположенностью к стресс-коррозии / С. В. Алимов, А. Б. Арабей, И. В. Ряховских, Т. С. Есиев, С. В. Нефедов, И. И. Губанок, П. В. Абросимов // Газовая промышленность. – 2015. – № S (724). – С. 10-16.
7. Антонов В.Г., Алексакин А.В., Фатрахманов Ф.К., Карпов С.В., Ляшенко А.В. Состояние нормативной базы по противокоррозионной

защите транспорта, добычи и переработки газа и пути ее совершенствования // М-лы НТС. – М.: ИРЦ Газпром. – 2002. - С. 10-15.

8. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т.1. – 9-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 206. – 928 с.

9. Арабей А. Б. Закономерности и зависимости коррозионного растрескивания под напряжением магистральных газопроводов с учетом влияния параметров трубной продукции / А. Б. Арабей, Т. С. Есиев, И. В. Ряховских // Тезисы Третьей международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2009). – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009. – 122 с.

10. Арабей, А. Б. Влияние состава коррозионной среды на скорость роста трещины в трубной стали X70 / А. Б. Арабей, Р. И. Богданов, В. Э. Игнатенко, и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 208-217.

11. Бакастов А. А. Достоверность выявления дефектов КРН методами ВТД / А. А. Бакастов // Тезисы II научно-практического молодежного семинара «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением». – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2016. – 44 с.

12. Бекман В. Катодная защита /В.Бекман //Справочник. - М.: Металлургия. – 1992. – 176с.

13. Бекман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии /В.Бекман, В.Швенк //Справ. изд. Пер с нем. – М.: Металлургия, 1984. – 496с.

14. Богданов, Р.И. Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали X70 в грунтовых электролитах с рН близким к нейтральному: дисс. ... канд. техн. наук : 05.07.13 / Богданов Роман Иванович.// – М., 2012. – 195 С.

15. Болотов А.С., Розов В.Н., Коатес К., Васильев Г.Г., Клеин В.Н. Коррозионное растрескивание на магистральных газопроводах // Газовая промышленность. – 1994. - № 6. - С. 12-14.
16. Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1987. - 123 с.
17. Бурдинский Э.В. Повышение эффективности противокоррозионной защиты в отслаиваниях покрытия подземных газонефтепроводов: дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Бурдинский Эрнест Владимирович.
18. Вайншток, С.М. Трубопроводный транспорт нефти / С.М. Вайншток, В.В. Новоселов, А.Д. Прохоров, А.М. Шаммазов и др. // Под ред. С. М. Вайнштока: учеб. для вузов: в 2 т. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т.2. – 621 с.
19. Ван дер Варден, Б.Л. Математическая статистика / Пер. с нем. – М.: ИЛ, 1960. – 436 с.
20. Варламов Д.П., Стеклов О.И. Анализ рисков магистральных газопроводов России по данным мониторинга результатов внутритрубной диагностики // Сварочное производство. 2013. № 9. С. 28-34.
21. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье К.: Техніка, 1975. - 168 с.
22. Воробьев А. А. Экспериментальное исследование возможности консервации дефектов коррозионного растрескивания под напряжением в процессе трассовой переизоляции участков магистральных газопроводов / А. А. Воробьев, Д. А. Мишарин // Тезисы II научно-практического молодежного семинара «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением». – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2016. – 44 с.
23. Глотов, И.В. Повышение эффективности противокоррозионной защиты подземных нефтегазопроводов в условиях промышленных

площадок; дис. . канд. техн. наук / Глотов Иван Владимирович. – Ухта: УГТУ, 2009. – 164 с.

24. ГОСТ 17792-72\*. Электрод сравнения хлорсеребряный насыщенный образцовый 2-го разряда; Введ. 01.07.1973. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1972. – 9 с. ГОСТ ИСО 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартиформ, 2006. – 59 с.

25. ГОСТ Р 50779.21-2004 Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 47 с.

26. ГОСТ Р 51164–98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 45 с.

27. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. - 472 с.

28. Индикатор водорода ДН1 для контроля наводороживания подземных трубопроводов: руководство по эксплуатации. -М.: Центр коррозионных испытаний, 2011. - 4 с.

29. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь.// – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

30. Конакова М.А., Волков А.А., Яковлев А.Я., Романцов С.В. Анализ влияния различных факторов на аварийные разрушения МГ // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2007. - №6. - с.7 - 12.

31. Конакова, М. А. Закономерности и особенности коррозионного растрескивания под напряжением труб магистральных газопроводов ООО "Севергазпром" :дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Конакова Марина Анатольевна.// – М., 2001. – 180 С.

32. Коршак, А. А. Основы нефтегазового дела: Учебник для ВУЗов / А. А. Коршак, А. М. Шаммазов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 544 с.

33. Лемешко Б.Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход : монография / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

34. Малеева М. А. Разработка ингибированных полимерных композиций с целью предотвращения риска коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных газопроводах / М. А. Малеева, М. А. Петрунин, А. И. Маршаков, В.Э. Игнатенко, А.В. Шапагин, и др. // Тезисы научно-практического молодежного семинара «Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением». – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2015. – 44 с.

35. Меркурьева И. А. Развитие методов диагностирования изоляционных покрытий нефтегазопроводов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Меркурьева Ирина Анатольевна.// – Ухта, 2009. – 156 с.

36. Михайловский Ю.Н. Датчик проникновения водорода в стальные конструкции, эксплуатируемые в различных коррозионных средах / Ю.Н. Михайловский, А.И. Маршаков, В.М. Попова, Т.И. Соколова. // Защита металлов. – 1993. – № 4. – Т. 29. – С. 647-649.

37. Михайловский, Ю. Н. Оценка вероятности водородного охрупчивания стальных газопроводов в зоне действия катодных станций / Ю. Н. Михайловский, А. И. Маршаков, В. Э. Игнатенко // Защита металлов. – 1999. – № 2. – Т. 36. – С. 140-145.

38. Михалев А. Ю. Разработка метода оценки работоспособности нефтегазопроводов по твердости с малой нагрузкой : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Михалев Андрей Юрьевич.// Ухта, 2012. – 127 с.

39. Михалев А.Ю., Агинея Р.В., Пыстин В.А., Парфенов Д.В. Экспериментальная оценка влияния контакта поверхности газопровода с грунтовым электролитом на состояние металла труб // Газовая промышленность –2013. – №10. – С. 34-38.
40. Никулин, С.А. Повышение эффективности предотвращения коррозии нефтегазопроводов на основе оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты; дис. . канд. техн. наук / Никулин Сергей Александрович. – Ухта: УГТУ, 2015. – 146 с.
41. Нохрин, А. В. Старение сталей труб магистральных газопроводов / А. В. Нохрин, В. Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – №5(2). – 2010. – С. 171-180.
42. Отт К.Ф. Механизм и кинетика стресс-коррозии магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 1999. - № 7. - С. 46-48
43. Отт К.Ф. Стресс-коррозионная повреждаемость газопроводных труб// Газовая промышленность. – 1993. - № 1. - С. 20-22
44. Отт К.Ф. Стресс-коррозионная повреждаемость магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2000. - № 4. - С. 38-41
45. Отт К.Ф. Стресс-коррозия на газопроводах. Гипотезы, аргументы и факты. – М.: ИРЦ Газпром, 1998. – 70 с.
46. Отт К.Ф. Функции неметаллических включений в жизненном цикле сталей газопроводных труб // Энергия. - 1993. - № 3. - С. 32-35
47. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2004 году. – М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. – 344 с.
48. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2005 году. – М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 510 с.
49. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2006 году. – М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007. – 508 с.

50. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2007 году. – М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. – 548 с.

51. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2008 году. – М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2009. – 447 с.

52. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2009 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 460 с.

53. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2010 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2011. – 195 с.

54. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2011 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 536 с.

55. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2012 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 398 с.

56. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2013 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 406 с.

57. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – 442 с.

58. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2015 году. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 361 с.

59. Притула, В. В. Коррозионное растрескивание газопроводов под напряжением: история и состояние проблемы / В. В. Притула // Коррозия Территории «Нефтегаз». – 2010. – №3. – С. 50-53.



60. Притула, В. В. Механизмы и кинетика стресс-коррозии подземных газопроводов /В.В. Притула// Тем.обзор. Серия «Защита от коррозии в газовой промышленности». – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 56 с.
61. Пужайло А.Ф., Спиридович Е.А. Анализ данных о состоянии участка магистрального газопровода с целью выявления факторов, влияющих на возникновение и развитие стресс-коррозионных дефектов // Журнал нефтегазового строительства – 2013 – №3
62. Р Газпром 2-2.3-1039-2016 Применение ингибирующих композиций при переизоляции газопроводов для предотвращения коррозионного растрескивания под напряжением (КРН)
63. Р Газпром 2-2.3-421-2010 Руководство по организации системы мониторинга стресс-коррозионных процессов на трассах действующих и проектируемых магистральных газопроводов
64. Р Газпром 2-2.3-622-2011 Методика ранжирования труб большого диаметра по склонности к коррозионному растрескиванию под напряжением
65. Р Газпром 2-2.3-980-2015 Определение критериев безопасной эксплуатации магистральных газопроводов в условиях интенсификации процессов коррозии под напряжением и изменения технических характеристик трубных сталей и сварных соединений
66. Р Газпром 9.4-030-2014 Методика оценки прочности технологических трубопроводов компрессорных станций со стресс-коррозионными дефектами
67. Р Газпром 9.4-048-2015 Руководство по организации системы мониторинга стресс-коррозионных процессов на действующих и проектируемых технологических трубопроводах компрессорных станций
68. Редькина Г. В. Предотвращение коррозионного растрескивания стали X70 под покрытиями с помощью ингибиторов / Г. В. Редькина, Ю. А. Кузенков, А. А. Чиркунов // Тезисы научно-практического молодежного семинара «Повышение надежности магистральных газопроводов,

подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением». – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2015. – 44 с.

69. Салюков, В. В. Анализ аварийности газопроводов ОАО "Газпром" по причине КРН / В. В. Салюков // Научно-технический сборник "Опыт эксплуатации и технической диагностики магистральных газопроводов с дефектами КРН", ч. 1. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – С. 3-17.

70. Сергеева, Т. К. Влияние состояния водорода на коррозию под напряжением / Т. К. Сергеева, В. Д. Тарлинский, А. С. Болотов // Строительство трубопроводов. – 1993. - С.11-13

71. Сергеева, Т. К. Коррозионное растрескивание газопроводных труб в слабокислом грунте / Т. К. Сергеева, Н. И. Волгина, А. С. Болотов и др. // Газовая промышленность. – 1995. – № 4. – С.34-38.

72. Сергеева, Т.К. К вопросу о механизмах наводороживания и охрупчивания в разных видах иницируемого водородом КРН трубных сталей / Т. К. Сергеева // Материалы 2-й Международной конференции ВОМ - 2. – Донецк. – 1998. – С. 235.

73. Соловей, В. О. Оценка работоспособности газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 : защищена 22.12.2010 / Соловей Валерий Олегович.// – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2010. – 201 с.

74. Спиридович, Е.А. Повышение надежности магистральных газопроводов в условиях коррозионного растрескивания под напряжением: дисс. ... док. техн. наук : 25.00.19 / Спиридович Евгений Апполинарьевич.// – Нижний Новгород, 2014. – 425 С.

75. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. – Введен 28.08.2007. – М.: ИРЦ Газпром, 2007. – 91 с.

76. СТО Газпром 2-2.3-253-2009. Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов. – Введен 30.09.2009. – М.: Газпром экспо, 2009. – 73 с.

77. СТО Газпром 2-2.3-419-2010 Инструкция по обследованию и определению стресс-коррозионного (технического) состояния технологических перемычек и участков магистральных газопроводов между охранными кранами

78. СТО Газпром 2-2.3-761-2013 Методика определения характеристик грунтов, провоцирующих коррозионное растрескивание под напряжением металла на магистральных газопроводах

79. СТО Газпром 2-3.5-454-2010 Правила эксплуатации магистральных газопроводов. – Введ. 24.05.2010. – Взамен ВРД 39-1.10-006-2000\*. – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – 229 с.

80. СТО Газпром РД 39-1.10-0088-2004. Регламент электрометрической диагностики линейной части магистральных газопроводов; Введ. 15.03.2004. - М. ; ООО «ИРЦ Газпром», 2004. - 8 с.

81. Теплинский, Ю. А. Коррозионная активность грунтов в зоне прокладки коридора магистральных газопроводов ООО «Севергазпром»: Альбом / Ю. А. Теплинский, А. А. Волков и др.// – Ухта: Севернипигаз, 2006. - 174 с.

82. Теплинский, Ю. А. Коррозионное растрескивание под напряжением трубных сталей: Атлас / Ю. А. Теплинский, М. А. Конакова.// - Ухта: Севернипигаз, 2004. - 374 с.

83. Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней. / Пер. с англ. под ред. Сухотина А.М – Л.: Химия, 1980. – 455 с.

84. Филиппов Г.А., Морозов Ю.Д., Чевская А.Н. Факторы, влияющие на склонность трубных сталей к КРН / Сб. трудов науч.- практич. семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов». – Н.Новгород. –2006. – С.164-176

85. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967, 406 с.

86. Чувильдеев, В. Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов / В. Н. Чувильдеев //

Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов. - Н. Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 18–67.

87. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2003. – 363 с.

88. Юшманов В. Н. Моделирование стресс-коррозионных испытаний в лабораторных условиях / В. Н. Юшманов, Ю. В. Александров // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2011. – №1. – С. 19-22.

89. Юшманов, В. Н. Совершенствование методов предотвращения стресс-коррозии металла труб магистральных газопроводов :автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.19 : защищена 23.03.2012 / Юшманов Валерий Николаевич.// – Ухта: УГТУ, 2012. – 24 С.

90. Яковлев, А. Я. Стресс-коррозия на магистральных газопроводах / А. Я. Яковлев, В. Н. Воронин, С. Г. Алейников и др. //– Киров: ОАО Кировская областная типография, 2009. – 320 с.

91. Beavers, J.A. Stress Corrosion Cracking Prediction Model / J. A. Beavers, W. V. Harper // Corrosion. – 2004. – Paper 04189

92. Parkins R.N. Environment sensitive cracking of high-pressure pipelines in contact with carbon-dioxide-containing solutions. // AGA NG-18 Report 205. - 1992.-P. 61.

93. Parkins R.N., O Dell C.S., Fessler R.R. Factors affecting the potential of galvanostatically polarised pipeline steel in relation to SCC in CO<sub>2</sub>-HCO<sub>3</sub> solutions. Cor. Sci., 1984, v. 24, n4, p. 343-374.

94. Parkins, R. N. Factors Influencing Stress Corrosion Crack Growth Kinetics / R. N. Parkins // Corrosion. – 1987. – Vol. 43. – P. 130-138

95. Parkins, R. N. Factors Influencing Stress Corrosion Crack Growth Kinetics / R. N. Parkins // Corrosion. – 1987. – Vol. 43. – P. 130-138.

96. Parkins, R.N. The Influence of Hydrogen on Crack Growth in Pipelines / R. N. Parkins // Materials for Resource Recovery and Transport. The Metallurgical Society of CIM. – 1998. – P. 35-49.

97. Puiggali M., Rousserie S., Touzet M. Fatigue crack initiation on low-carbon steel pipes in a near-neutral pH environment under potential control conditions. // Corrosion. - 2002. - V. 58. - №11. - P. 961-969.
98. Van der Waerden B.L Order tests for the two-sample problem and their power. Proc. Koninklijke Nederlandse Akad. Wetenschappen 55, 453-458, 1953.
99. Van der Waerden B.L. und Nievergelt E., Tafeln zum Vergleich zweier Stichproben mittels X-Test und Zeichentest, Springer – Verlag, 1956.
100. Yang W., Li G., Huang C., Zhou J. Stress corrosion cracking of pipeline steels. 16-th ICC.Paper 10-SCC-13. 2005. Beijing. China