

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ухта – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по науке АО «Гипрогазцентр»,  
**Агиней Руслан Викторович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, начальник технического отдела ООО «Газпром трансгаз Уфа»,  
**Чучкалов Михаил Владимирович**

кандидат технических наук, начальник лаборатории исследования процессов коррозионного растрескивания под напряжением Центра технологий строительства, ремонта и защиты от коррозии  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»  
**Ряховских Илья Викторович**

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится « 15 » декабря 2017 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

Автореферат разослан «  09  »   ноября   2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Борейко Д.А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Безаварийное функционирование опасных производственных объектов, к которым относятся системы магистральных трубопроводов, является важнейшей задачей предприятий, осуществляющих транспорт нефти и газа. Согласно статистике, основная причина аварийных разрушений магистральных газопроводов (МГ) – стресс-коррозионные дефекты (коррозионное растрескивание под напряжением, КРН), развивающиеся на наружной поверхности стенок газопроводов большого диаметра. Так, в период с 2000 года по настоящее время по причине КРН произошли 61% всех аварий в ООО «Газпром трансгаз Югорск» и порядка 67% всех аварий на газопроводах, эксплуатируемых ООО «Газпром трансгаз Ухта».

Несмотря на принимаемый комплекс превентивных мероприятий, в результате которого существенно снизилось общее число аварий в газопроводном транспорте, удельный вес аварий по причине КРН остается стабильно высоким.

**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 ВНИИ-ГАЗ» 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 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 МГ 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 коррозионной 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 усовершенствование 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 перелома кривой тока водорода, выделяющегося на катоде, можно определить эффективный потенциал «труба-земля», зависящий от водородного показателя среды.

3. Обнаружен эффект разнонаправленного изменения дисперсии 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 перелома

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 перелома, 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 «Севергеоэко-тех» (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.

Разработанные технические решения **внедрены** в учебный процесс по дисциплинам «Противокоррозионная защита» и «Электрохимические методы защиты газонефтепроводов», которые входят в учебные программы подготовки магистров и бакалавров по направлениям 21.03.01, 21.04.01 «Нефтегазовое дело» 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, 54 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 112 наименований.

### **Содержание работы**

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе показано, что механизм коррозионного растрескивания под напряжением характеризуется следствием воздействия совокупности трех групп факторов: механические напряжения в стенке газопровода, условия коррозионной окружающей среды, включая наличие и дефекты изоля-

ции, электрохимические условия, температуру и т.д., а также тип и состояние и предрасположенность трубной стали.

Существенный вклад в изучение особенностей развития КРН на газопроводах РФ внесли: Александров Ю.В., Аленников С.Г., Аскарлов Р.М., Арабей А.Б., Богданов Р.И., Волгина Н.И., Есиев Т.С., Кантор М.М., Камаева С.С., Карпов С.В., Конакова М.А., Коростелева Т.К., Кузьбожев А.С., Лисин В.Н., Маршаков А.И., Отт К.Ф., Притула В.В., Пужайло А.Ф., Ряховских И.В., Сергеева Т.К., Спиридович Е.А., Стеклов О.И., Теплинский Ю.А., Яковлев А.Я.

Рядом исследователей, в частности Александровым Ю.В., показано, что при реализации мероприятий противодействия КРН, эффективным может оказаться управление одним из факторов, вносящим существенный вклад в развитие дефектности. Одним из таких факторов является действие катодной защиты. В работах многих авторов приводятся сведения о наличии связи между дефектностью металла труб и уровнем катодной поляризации.

Известно, что в условиях катодной поляризации водородное охрупчивание становится ведущим механизмом КРН. В частности, в работах Юшманова В.Н. показано, что выделение водорода происходит при потенциалах ниже минус 1,05 В (м.с.э.), находящихся в пределах, рекомендуемых ГОСТ Р 51164–98. Следовательно, процессы образования и развития трещин КРН могут протекать и в условиях полной защищенности газопровода методами электрохимической защиты по требованиям нормативно-технической документации.

Теплинским Ю.А. с соавторами предложен способ регулирования параметров катодной защиты, основанный на снятии поляризационных кривых, подбору и поддержанию выбранного потенциала катодной защиты. Подбор потенциала в предложенном способе осуществляется с помощью идентификации точки перехода кривой восстановления кислорода в кривую восстановления воды. Значение потенциала поддерживается ниже определенного на 0,03-0,06 В. Однако, на практике, идентификация точки перехода одного процесса в другой зачастую бывает затруднительна из-за отсутствия перелома поляризационной кривой, что подтверждается в работах Глотова И.В., Никулина С.А., Юшманова В.Н.

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на развитие дефектов КРН, является околотрубная среда. В работах Богданова Р.И., Ряховских И.В., Маршакова А.И. показаны зависимости, описывающие влияние химического состава грунтового электролита на развитие трещин КРН. Кроме того, авторы в ходе своих исследований доказывают, что исключение доступа электролита к металлу трубы приводит к прекращению не только зарождения стресс-коррозионных процессов, но и их развития. В частности, в ходе исследований установлено отсутствие развития трещин глубиной менее 10% толщины стенки трубы при механических нагрузках, не превышающих эксплуатационные, при условии исключения электрохимической составляющей процесса КРН. Исключение электрохимической составляющей предлагается реализовать с помощью нанесения нового защитного покрытия на поверхность поврежденного металла трубы. 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 на основе термостойкого армированного материала «ДЕКОМ-РАМ» с ингибирующими КРН композициями. Предложенные ингибиторы, по мнению авторов, значительно снижают риск развития КРН в случае нарушения целостности защитного покрытия.

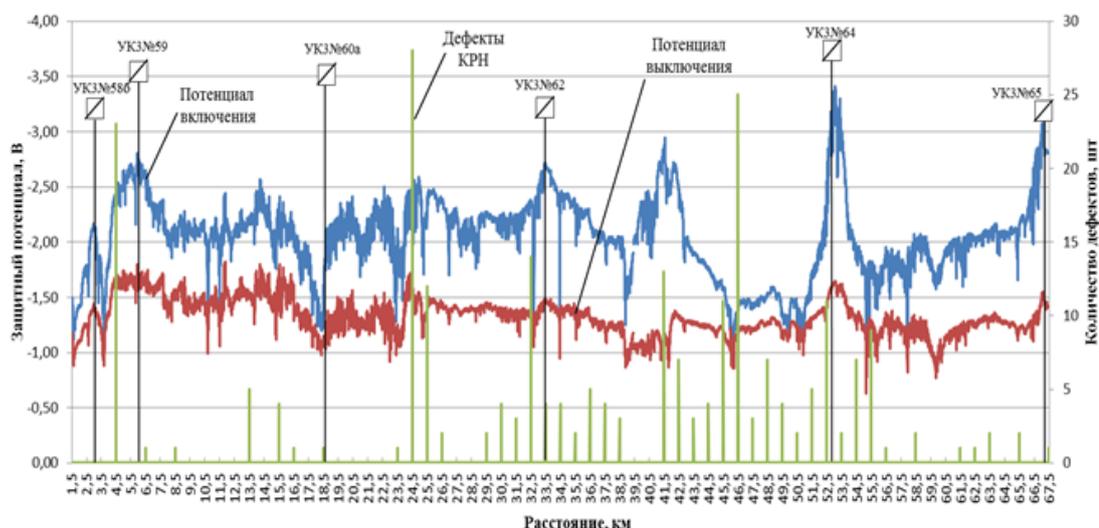
Проведенный обзор работ показывает, что существующие способы регулирования параметров катодной защиты носят достаточно общий характер и не учитывают особенностей предрасположенных к КРН участков. Работы практически всех авторов направлены на исследование в условиях воздействия одного фактора, влияющего на образование и развитие дефектов КРН. Таким образом, совершенствование методов предупреждения развития дефектов стресс-коррозии является актуальной проблемой эксплуатации магистральных газопроводов.

Во второй главе представлены результаты исследования факторов, инициирующих КРН на участке магистрального газопровода, подверженного стресс-коррозии.

В ходе исследования выполнен анализ результатов внутритрубной диагностики участка магистрального газопровода «Ухта-Торжок III», протяженностью 65,5 км в 2004, 2010 и 2014 годах, общее количество обнаруженных дефектов КРН - 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.

На первом этапе исследования проведен анализ зависимости возникновения стресс-коррозионных дефектов от расстояния до точки дренажа средств электрохимической защиты.

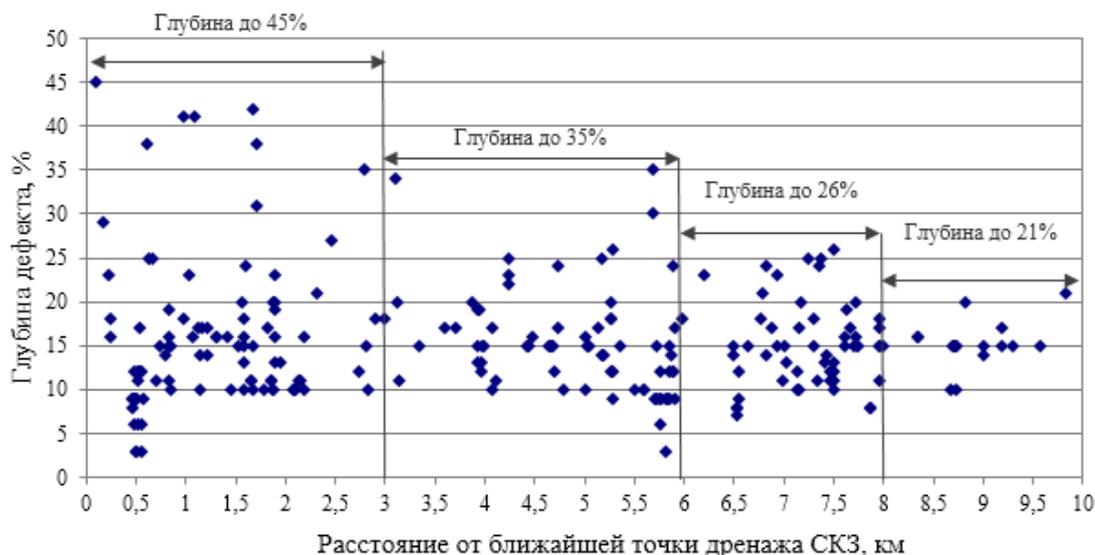
Графики распределения потенциалов включения и отключения, количества дефектов на каждом километре участка магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» представлены на рисунке 1.



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

Сопоставив сведения о распределении дефектов по длине участка с данными о расположении точек дренажа, получена зависимость количества

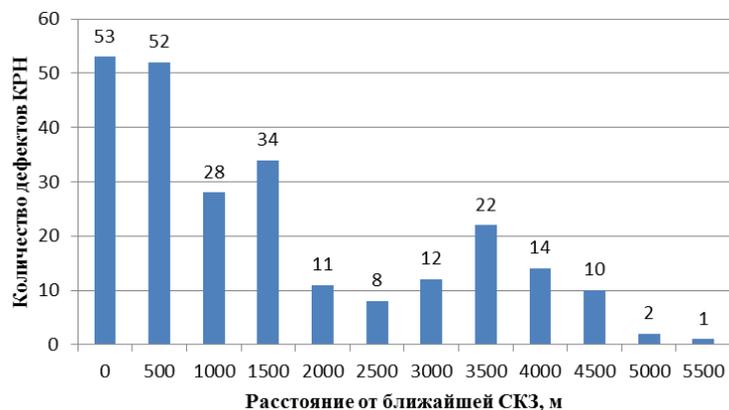
дефектов КРН от расстояния между местом образования дефекта и точкой дренажа СКЗ (рис. 2). Как видно на гистограмме, более 50 % всех дефектов КРН обнаружены на расстоянии менее 1500 м от ближайшей СКЗ. На удалении от СКЗ более 5 км встречаются только единичные дефекты. При анализе принимался во внимание 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.



**Рисунок 2 – Зависимость количества дефектов КРН от расстояния СКЗ**

По результатам регрессионного анализа установлено, что зависимость описывается уравнением регрессии  $N = -4 \cdot 10^{-3} L + 56$ , при  $L \in (250; 5250)$ .

Кроме этого установлено, что все обнаруженные дефекты с глубиной более 35% от толщины стенки расположены на удалении не более 3 км от СКЗ (рис. 3).



**Рисунок 3 – Расстояние от дефектов КРН до ближайшей точки дренажа СКЗ**

Анализ зависимости между удельным электросопротивлением грунта и условной статистической вероятностью возникновения дефектов КРН, рассчитываемой по формуле:

$$P = \frac{n_{\text{дефект}}}{n_{\text{общ}}} \quad (1)$$

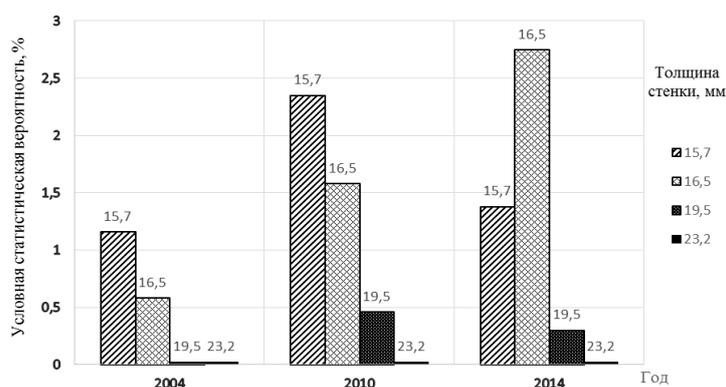
где  $n_{\text{дефект}}$  – количество участков газопровода с дефектами КРН для выбранного значения электросопротивления грунта, шт.;

$n_{\text{общ}}$  – общее количество участков с выбранным значением электросопротивления грунта, шт., показал, что имеется тенденция увеличения вероятности образования дефектов КРН с ростом электросопротивления грунта (рис. 4). Полученная закономерность подтверждает то, что развитие дефектов КРН не вписывается в классическую коррозионную теорию, для которой грунт с низкой электропроводностью менее агрессивен, чем с высокой.



**Рисунок 4 – Гистограмма распределения условной вероятности возникновения дефектов КРН от удельного электросопротивления грунта**

Установлено, что большинство дефектов КРН образовалось на трубах с наименьшей толщиной стенки (15,7 мм), что подтверждает выводы о значительном вкладе механических напряжений металла труб на процесс развития дефектов. Аналогичные результаты были получены Стекловым О.И. (рис. 5).



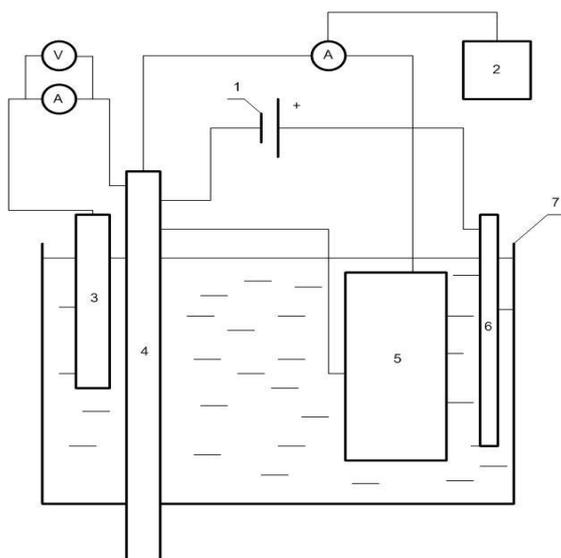
**Рисунок 5 – Распределение условной статистической вероятности образования дефектов КРН в зависимости от толщины стенки трубы**

В третьей главе 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. Полностью рандомизированный многоуровневый однофакторный эксперимент;
2. Определение зависимости изменения механических характеристик стального образца от величины тока водорода в средах с различным во-

дородным показателем, механических напряжений и временем экспонирования. Контроль состояния механических характеристик образцов осуществлялся по методике, предложенной в работах Стеклова О.В. и Михалева А.Ю., заключающейся в многократном (не менее 100 раз) измерении твердости с малой нагрузкой (ТМН) и определении дисперсии полученной выборки. Спланирован ряд активных количественных экспериментов с одним откликом (дисперсия ТМН), одним контролируемым фактором (величина тока проникновения водорода через стальную мембрану) и тремя управляемыми факторами (водородный показатель среды, разность потенциалов «образец-среда», время экспонирования).

Экспериментальная установка для первой серии испытаний (рис. 6) выполнялась в виде электрохимической ячейки, наполненной средой с известным водородным показателем и помещенными внутрь стальным стержнем, вспомогательным электродом, электродом сравнения и датчиком тока, инициируемого выделением водорода (датчик водорода). Необходимая разность потенциалов «стержень-среда» создавалась с помощью источника постоянного тока, имитирующего работу станции катодной защиты. Контроль электрических величин осуществлялся 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 – анод; 7 – пластиковая емкость.

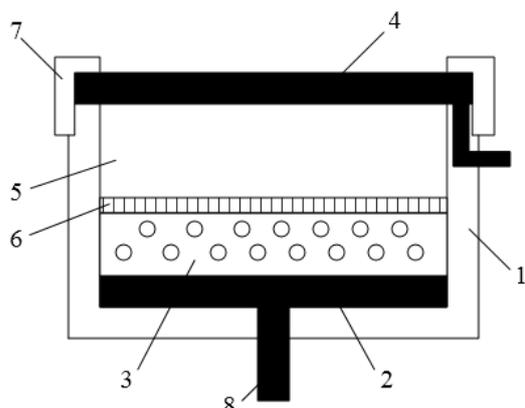
**Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для определения тока проникновения водорода через стальную мембрану**

Для измерения концентрации водорода использовались датчики водорода ДН1, представляющие собой модификацию известной ячейки Девантхана-Стахурского (рис. 7). Датчик состоит из графитового катода с засыпкой  $MnO_2$  и анодной мембраны толщиной 0,1 мм и диаметром 5 см, разделенных сепаратором. Ячейка заполнена раствором NaOH. Внутренняя ЭДС датчика составляет около 0,6 В. Ток, протекающий в таком элементе, эквивалентен потоку водорода через стальную мембрану. Если мембрана соединена с металлической конструкцией и помещена в тот же электролит, т.е. приобретает ее электродный потенциал, то можно считать, что ток ячейки изменяется аналогичным образом с потоком водорода в конструкцию.

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

$$C_H = i_p LM / F \rho D \quad (2)$$

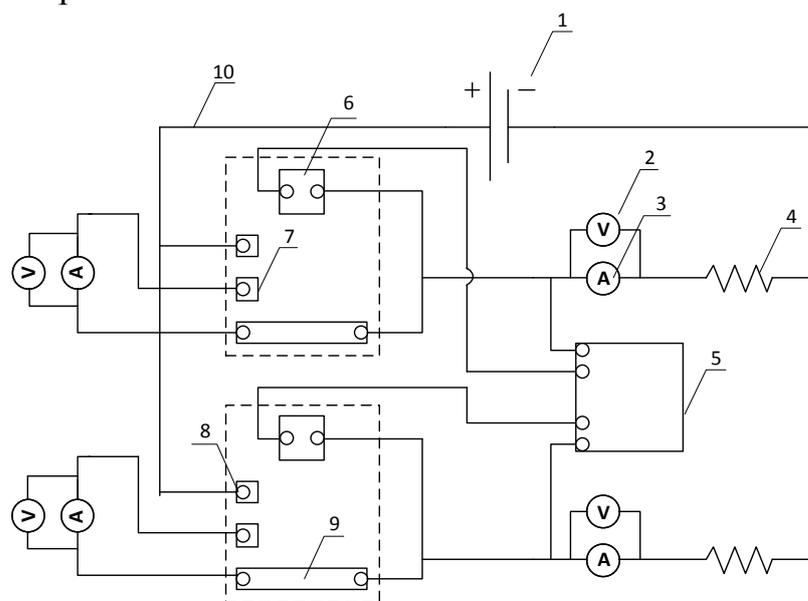
где  $L$  – толщина мембраны,  $M$  – атомный вес водорода,  $F$  – число Фарадея,  $\rho$  – плотность стали,  $D$  – коэффициент диффузии водорода в стали.



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 7 – Конструкция ячейки датчика водорода ДН-1**

Экспериментальная установка для второй серии испытаний представляла собой цепь из помещенных в измерительную ячейку образцов, находящихся под действием изгибающей нагрузки и подключенных к модели станции катодной защиты (рис. 8). Установка позволяет одновременно исследовать несколько образцов, задавая требуемые параметры в каждой конкретной измерительной ячейке.



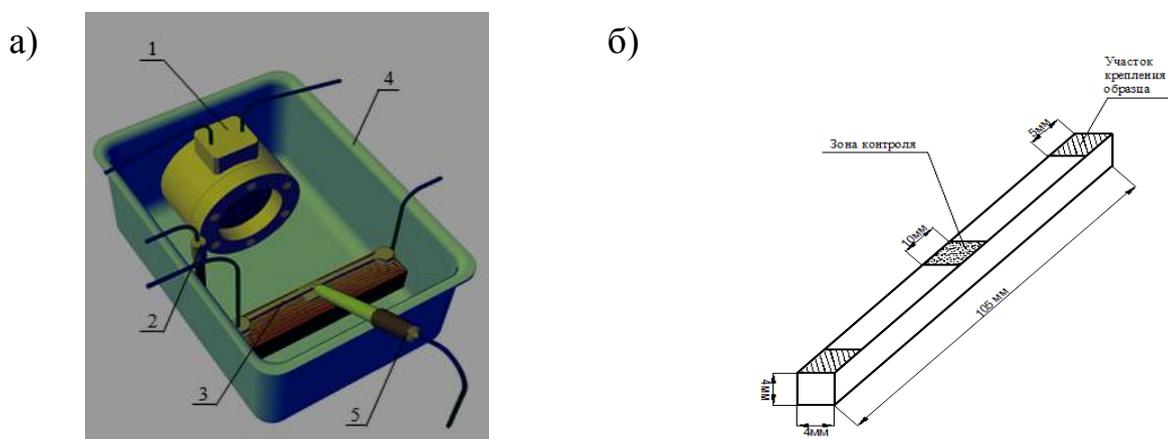
1 – источник постоянного тока; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – переменный резистор; 5 – универсальный вольтметр; 6 – водородный датчик; 7 – электрод сравнения; 8 – анодный заземлитель; 9 – испытуемый образец; 10 – соединительный провод.

**Рисунок 8 – Схема электрических соединений установки**

Измерительная ячейка представляет собой ёмкость длиной 19 см, шириной 13,5 см и глубиной 11 см, заполненную n-раствором  $NaCO_2$  (рис. 9 а). Внутри ячейки помещался образец, закрепленный в изгибающем устройстве, вспомогательный электрод, электрод сравнения, датчик водорода. Образец представляет собой стальной брус, закрепленный болтами на жестком немагнитическом 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. Напряже-

ния в бресе создавались под действием изгибающих усилий, возникающих при затяжке прижимных болтов, фиксирующих брус на жестком основании. Для изгиба под центральной частью образца устанавливалась опорная стальная полоса шириной 10 мм и длиной 20 мм. Опорная полоса толщиной 5,9-6,1 мм позволяет создавать изгибающую нагрузку на образце в 252-288 МПа ( $0,7 \div 0,8 \sigma_{0,2}$ ).

Выделяют на образце зону контроля (рис 9 б). Проводят тестирование ТМН в зоне контроля не менее 100 раз. Закрепляют образец в изгибающем устройстве, проводят повторное тестирование ТМН. Измерительную ячейку заполняют средой с известным рН, производят регулирование модели станции катодной защиты до установления необходимого уровня катодной поляризации. По истечении условленного времени экспонирования снимают значения тока водорода, образец извлекают из ячейки. Проводят тестирование ТМН, извлекают образец из изгибающего устройства и проводят повторное тестирование ТМН.



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

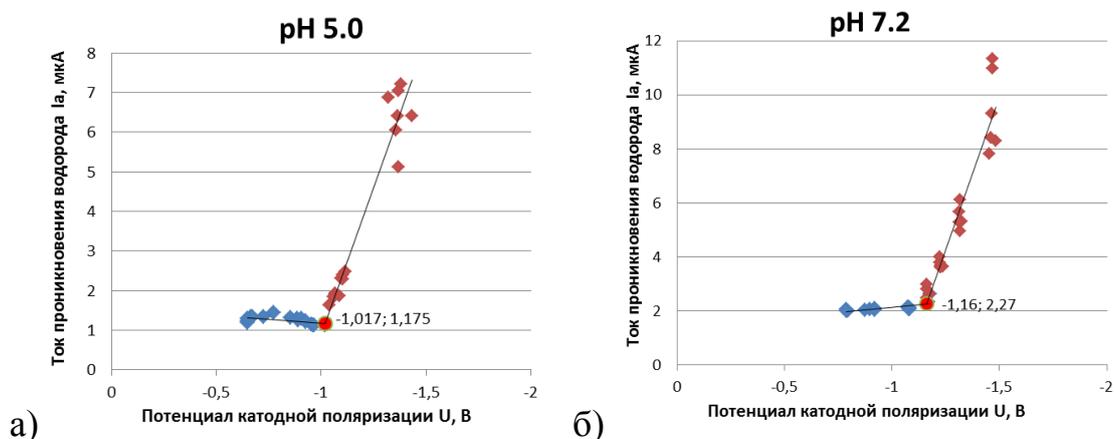
**Рисунок 9 – Схема измерительной ячейки (а) и схема испытуемого образца (б)**

В четвертой главе представлены результаты двух серий лабораторных испытаний.

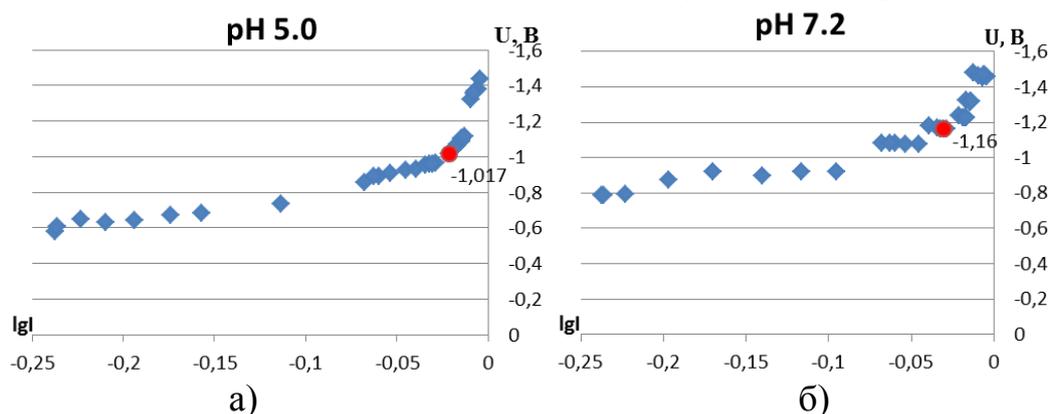
В рамках первой серии испытаний проведена оценка влияния среды и потенциала катодной защиты на ток проникновения водорода. Исследование проводили в семи средах с различным водородным показателем от 5 до 9 рН. В качестве агрессивной среды использовали стандартные 0,1 н. растворы. Установлено, что при повышении защитного потенциала происходит рост величины тока проникновения водорода  $i_a$  (рис. 10). При этом, при повышении (по модулю) защитного потенциала отрицательнее минус 1,0÷1,1 В м.с.э. наблюдается более активный рост  $i_a$ , чем при низком. Легко можно выделить две зоны, соответствующие процессам восстановления кислорода в присутствии воды и восстановления воды с выделением водорода. Такого рода зависимости характерны для всех рассмотренных рН коррозионной среды.

Установлено, что точка перелома на рисунке 10 соответствует точке перелома поляризационной кривой «сила тока – разность потенциалов», полученной в ходе проведения эксперимента (рис. 11). Таким образом, показав

но, что потенциал эффективной защиты может быть определен по перелому кривой зависимости «сила тока в цепи датчика ДН-1 – разность потенциалов». Установленный эффективный потенциал для выбранных условий эксперимента составил от минус 1,01 до минус 1,12 В м.с.э. и зависит от среды в которой он определен (рис. 12).



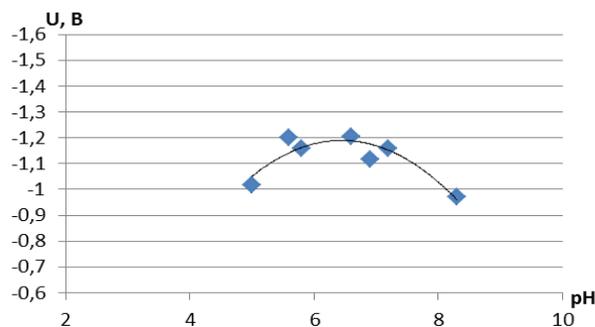
**Рисунок 10 – Зависимости величины тока проникновения водорода от уровня защитного потенциала СКЗ для сред с водородным показателем: а) 5,0 рН; б) 7,2 рН**



**Рисунок 11 – Зависимости «сила тока – разность потенциалов», полученные в ходе проведения эксперимента для сред с водородным показателем: а) 5,0 рН; б) 7,2 рН**

Полученную зависимость для исследованных сред можно описать полиномом вида:

$$U_{кр} = -0,067 pH^2 + 0,86 pH - 1,6 \quad (3)$$

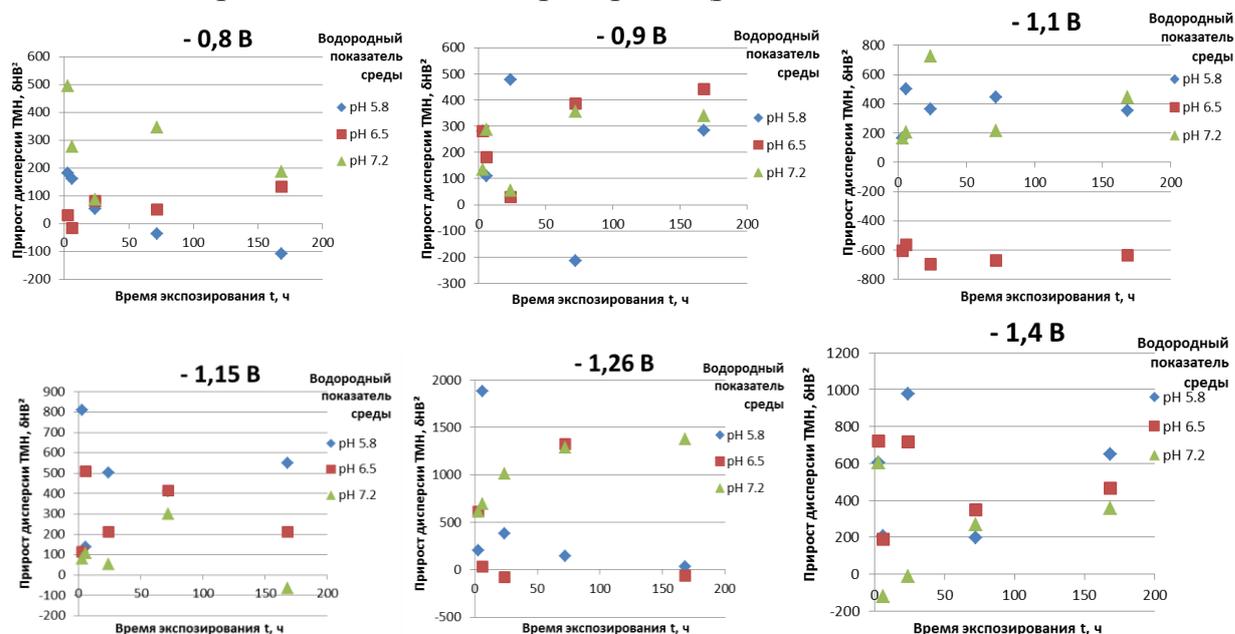


**Рисунок 12 – Зависимость потенциала эффективной защиты от рН коррозионной среды**

В рамках второй серии экспериментов выполнена оценка влияния коррозионно-активной среды, количества водорода катодной реакции и времени экспонирования на механические характеристики образцов труб. При прове-

дении испытаний использовались стандартные 0,1 н. растворы при стандартной температуре. Испытания проводились в растворах с pH 5,8, 6,5 и 7,2. Время экспонирования – 3, 6, 24, 72 и 168 часов, исследуемые потенциалы катодной поляризации – минус 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,15; 1,2; 1,23; 1,26; 1,3; 1,4 В м.с.э. Общее количество экспериментов – 45, в ходе которых получено 36000 значений твердости с малой нагрузкой.

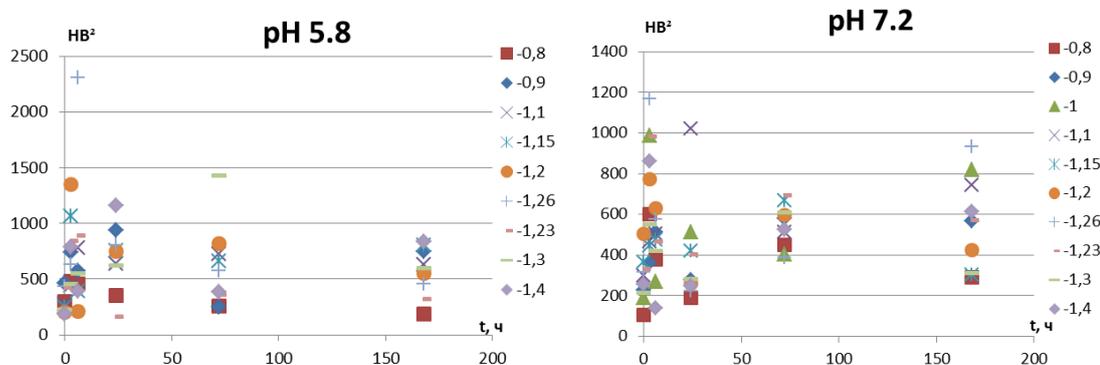
Установлено, что при значениях потенциала минус 0,8-0,9 изменение дисперсии ТМН не превышает 500 единиц (по модулю) и не зависит от времени экспонирования и значения pH среды (рис. 13).



**Рисунок 13 – Зависимость прироста дисперсии ТМН от времени экспонирования в средах с различным показателем pH и защитным потенциалом.**

В результате исследования обнаружены следующие закономерности первичного изменения дисперсии ТМН (рис. 14):

- при  $\Delta HV^2$  в начальный момент нагружения менее 550 единиц прирост положителен при всех значениях защитного потенциала и во всех агрессивных средах;
- при  $\Delta HV^2$  в начальный момент нагружения более 700 единиц прирост отрицателен при всех значениях защитного потенциала и во всех агрессивных средах.



**Рисунок 14 – Изменение дисперсии ТМН для разных отрезков времени экспонирования**

Для данных условий установлено, что дисперсия ТМН не зависит от тока проникновения водорода в сталь и характеризуется коэффициентом корреляции не выше  $0,13 \div 0,17$ .

Для изучения особенностей влияния времени экспонирования, присутствия механических напряжений и вариации защитного потенциала на свойства металла испытанных образцов применяется критерий Ван дер Вардена. Критерий характеризуется высокой эффективностью, возрастающей при увеличении количества значений в анализируемых выборках. Статистика критерия имеет вид:

$$X = \sum_{i=1}^m u_{\frac{R_i}{n+m+1}}, \quad (4)$$

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

$R_i$  – ранг выборочного значения  $x_i$ ;

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

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 ГОСТ Р 50779.21-2004,  $x_{0,95} = 1,65$ . Критические значения критерия Ван дер Вардена для образцов, экспонированных в среде с рН 7,2, представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – 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>

Анализ результатов статистической обработки данных подтверждает вывод о том, что при значениях потенциала минус 0,8-0,9 В м.с.э в исследуемых образцах не происходит значительных изменений механических свойств для всех рассмотренных интервалов времени экспонирования.

В пятой главе описаны практические рекомендации по применению разработанной технологии предотвращения развития дефектов на магистральных газопроводах с применением современных систем дистанционного коррозионного мониторинга

Применение разработанных систем целесообразно только на участках МГ, предрасположенных к образованию и развитию КРН. Для оценки целесообразности установки датчиков разработана система балльных оценок по-

казателей факторов, которая была составлена с учетом результатов, полученных в главе 2 (табл. 2). Общую балльную характеристику участка газопровода определяют по формуле:

$$k = \prod_{i=1}^n k_i \quad (5)$$

где  $k_i$  – балльная оценка каждого фактора соответственно.

В случае, если характеристика  $k < 80$ , участок для КРН считается не опасным и дополнительный мониторинг (установка датчика водорода) и регулирование режимов работы станции катодной защиты не требуется. Если  $k \geq 80$ , на ближайшем к точке дренажа контрольно-измерительном пункте необходимо произвести установку датчика водорода, определить и поддерживать эффективный потенциал катодной защиты.

**Таблица 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 от 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 аварийных разрушений	Да	2
	Нет	1

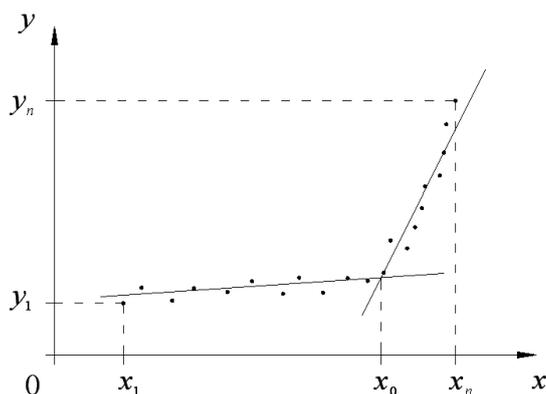
Апробация предлагаемого алгоритма определения необходимости установки датчика водорода проводилась на участке магистрального газопровода «Ухта-Торжок III» км 1,5-67. На исследуемом участке с шагом в 100 м определяли значения необходимых факторов (удельное электрическое сопротивление грунта, расстояние от точки дренажа средств электрохимической защиты, тип и диаметр трубы, тип защитного покрытия, тип и увлажненность грунта, наличие аварийных разрушений) и их общую балльную оценку. Сопоставление общей балльной оценки участка и количества дефектов, выявленных на нем в ходе проведения внутритрубной дефектоскопии,

показывает высокую степень взаимосвязи, характеризующуюся коэффициентом линейной корреляции  $R=0,7$ .

Анализ результатов сопоставления показал, 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. Для определения и контроля эффективного потенциала катодной защиты и установки датчиков водорода выбраны ближайшие к точке дренажа средств электрохимической защиты существующие контрольно-измерительные пункты.

Для определения эффективного потенциала защиты участка газопровода по координате точки перелома кривой тока водорода разработан алгоритм и программное обеспечение для его реализации.

В ходе проведения измерений получены значения силы тока водорода  $I_i$  и потенциала поляризации  $U_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения. Введем следующие обозначения:  $x_i = U_i$ ,  $y_i = I_i$ . Исходя из лабораторных испытаний, предполагается, что зависимость  $y(x)$  состоит из двух участков, которые можно считать линейными (рис. 16). Для дальнейшего регулирования режимов работы станции катодной защиты необходимо найти значение потенциала  $x_0 = U_0$ , соответствующее точке пересечения прямых, которыми могут быть аппроксимированы два линейных участка зависимости  $y(x)$ .



**Рисунок 16 – Общий вид поляризационной кривой**

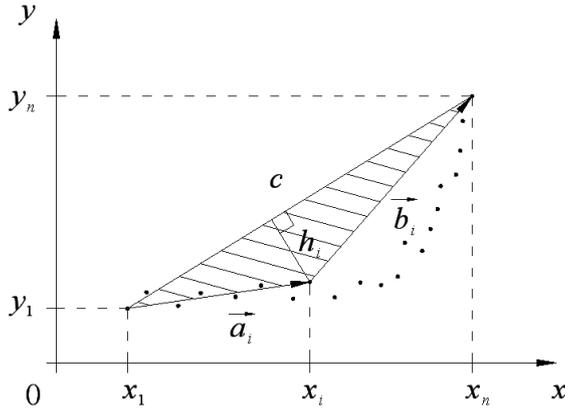
Определение значения  $x_0$  производится в следующей последовательности.

1. Определение положения точки перелома зависимости  $y(x)$ .

Для определения положения точки перелома зависимости  $y(x)$  могут быть использованы различные способы. Для реализации алгоритма выбран наиболее простой и наглядный, заключающийся в поиске точки, максимально удаленной от прямой, соединяющей первую и последнюю точки зависимости  $y(x)$ .

Рассмотрим треугольник с вершинами в точках  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_n, y_n)$ . Известно, что площадь такого треугольника  $s_i$  равна половине произведения стороны  $c$  на высоту  $h_i$  (рис. 17). В то же время площадь данного треугольника равна половине модуля векторного произведения векторов  $a_i$  и  $b_i$ :

$$s_i = \frac{1}{2} ch_i = \frac{1}{2} |[a_i b_i]| = \frac{1}{2} (a_{ix} b_{iy} - a_{iy} b_{ix}). \quad (6)$$



**Рисунок 17 – Определение положения точки перелома**

Очевидно, что

$$a_{ix} = x_i - x_1, \quad a_{iy} = y_i - y_1, \quad b_{ix} = x_n - x_i, \quad b_{iy} = y_n - y_i. \quad (7)$$

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

$$ch_i = (x_i - x_1)(y_n - y_i) - (y_i - y_1)(x_n - x_i). \quad (8)$$

Рассчитываются величины  $ch_i$  для всех  $i$  из диапазона  $1 < i < n$ . И определяется индекс  $m$  точки, соответствующей максимальному значению  $ch_i$ . Точка с индексом  $m$  и будет точкой перелома зависимости  $y(x)$ .

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

Если  $m$  – номер точки перелома, определенный ранее, то точки с номерами от 1 до  $m$  будут относиться к первому линейному участку зависимости  $y(x)$ , а точки с номерами от  $m$  до  $n$  – 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 будут иметь следующий вид:

$$y = p_1x + q_1, \quad (9)$$

$$y = p_2x + q_2. \quad (10)$$

Параметры аппроксимирующих прямых определяются соотношениями:

$$p_1 = \frac{m \sum_{k=1}^m x_k y_k - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right) \left( \sum_{k=1}^m y_k \right)}{m \sum_{k=1}^m x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right)^2}, \quad (11)$$

$$q_1 = \frac{\left( \sum_{k=1}^m x_k^2 \right) \left( \sum_{k=1}^m y_k \right) - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right) \left( \sum_{k=1}^m x_k y_k \right)}{m \sum_{k=1}^m x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^m x_k \right)^2}, \quad (12)$$

$$p_2 = \frac{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k y_k - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right) \left( \sum_{k=m}^n y_k \right)}{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right)^2}, \quad (13)$$

$$q_2 = \frac{\left( \sum_{k=m}^n x_k^2 \right) \left( \sum_{k=m}^n y_k \right) - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right) \left( \sum_{k=m}^n x_k y_k \right)}{(n-m+1) \sum_{k=m}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=m}^n x_k \right)^2} \quad (14)$$

4. Определение значения  $x_0$ , соответствующего точке пересечения двух аппроксимирующих прямых.

Координата  $x_0$  точки пересечения двух прямых (9) и (10) определяется следующим образом:

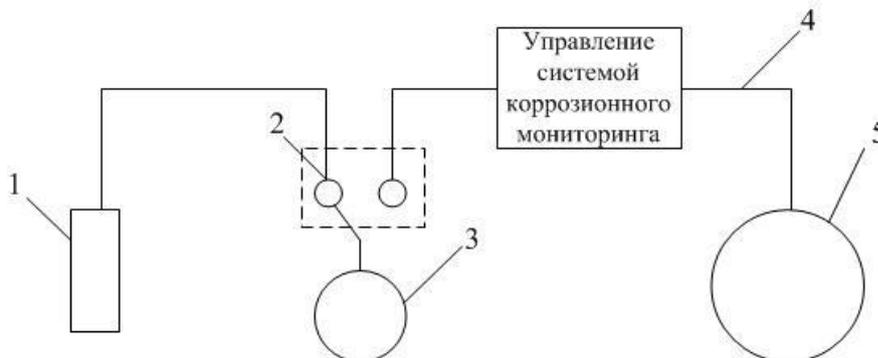
$$x_0 = \frac{q_2 - q_1}{p_1 - p_2}. \quad (15)$$

С целью проверки и демонстрации работы предложенного алгоритма разработано программное обеспечение. На рисунке 18 представлены результаты расчета (аппроксимирующие прямые на графике, уравнения аппроксимирующих прямых и координата  $x$  точки их пересечения в текстовом поле в нижней части главного окна).



**Рисунок 18 – Интерфейс программного обеспечения**

Особенности установки и эксплуатации датчика водорода ДН-1 подразумевают наличие постоянного контакта с исследуемым газопроводом с целью защиты стальной мембраны датчика, что будет негативно сказываться на работе всей системы катодной защиты объекта. Мембрана датчика, площадью  $35 \text{ см}^2$ , при контакте с грунтом будет являть собой искусственный дефект изоляции газопровода, вследствие чего будет увеличиваться нагрузка на станцию катодной защиты и уменьшаться срок службы анодных заземлений. Исходя из этого, рекомендуется предусмотреть переключение датчика на автономную электрохимическую защиту на время между проведениями измерений (рис 19).



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

**Рисунок 19 – Схема подключения датчика к газопроводу**

Для определения эффективного потенциала катодной защиты на участке магистрального газопровода и его поддержания разработан алгоритм, который может быть реализован в штатных системах СКМ (рис. 20).



**Рисунок 20 – Порядок определения эффективного потенциала «труба-земля»**

В том случае, если после регулирования станции катодной защиты на одном или нескольких участках защитный потенциал станет ниже по модулю требуемого по ГОСТ Р 51164–98, необходимо внести изменения в схему электрохимической защиты участка, например, использовать точно-распределенные анодные заземления.

### 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 перелома графика зависимости тока выделения водорода от силы поляризующего тока.

3. Экспериментально доказано, что при поддержании потенциала металла относительно грунта в области значений ниже точки перелома 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.

**Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:**

***Ведущие рецензируемые научные журналы***

1. Онацкий В.Л., Агинея Р.В. Лабораторные исследования рационального потенциала катодной защиты подземных трубопроводов от коррозии // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. - № 3-4. – С. 20-22.

2. Онацкий В.Л., Агинея Р.В. Исследование влияния катодной поляризации и интенсивности выделения водорода на механические свойства стали марки 17Г1С // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2014. – № 5-6. – С. 15-17.

3. Гуськов С.С., Мусонов В.В., Агинея Р.В. Садртдинов Р.А., Лапин В.А., Онацкий В.Л. Особенности расположения стресс-коррозионных дефектов, выявленных в ходе диагностического обследования при капитальном ремонте участков магистральных газопроводов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. – № 4. – С. 30-34.

4. В.А. Середёнок, В.Л. Онацкий, В.Н. Толкачева, Р.В. Агинея. Исследование особенностей КРН магистральных газопроводов большого диаметра // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2016. - № 5. – С. 46-50.

5. Онацкий В.Л., Александров Ю.В., Толкачева В.Н., Агинея Р.В. Исследование влияния параметров работы электрохимической защиты и электрических свойств грунта на образование дефектов КРН // Практика противокоррозионной защиты. – 2016. – № 4. – С. 31-36.

***Прочие печатные издания***

6. Онацкий В.Л., Агинея Р.В. Исследование влияния уровня защитного потенциала станции ЭХЗ на концентрацию водорода в основном металле трубопровода // VII учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2012» / редкол. : А. М. Шаммазов и др. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 14-15.

7. Онацкий В.Л., Агинея Р.В. Исследование влияния коррозионной среды и потенциала на скорость проникновения водорода в сталь марки 17Г1С // Рассохинские чтения : материалы научно-технической конференции

(6-7 февраля 2014 г.): в 2 ч. ; ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014. – С. 133-135.

8. Онацкий В.Л., Агинея Р.В. Влияние коррозионной среды и потенциала на скорость проникновения водорода в сталь марки 17Г1С // XV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2014» : материалы конференции (26-28 марта 2014 г.): в 5 ч. ; ч. 2 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014. – С. 130-132.

9. Онацкий В.Л. Исследование изменения механических характеристик образцов трубной стали в результате наводороживания в лабораторных условиях // Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (с международным участием). – Тюмень, 2014. – С. 128-130.

10. Онацкий В.Л. Влияние катодной поляризации и интенсивности выделения водорода на механические свойства основного металла трубы // X учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт - 2015». – Уфа: УГНТУ, 2015. – С. 161-162.

Подписано к печати « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Заказ № \_\_\_\_\_

Тираж 100 экз.

2 уч.-изд.л. ф-т 60x84/16