

ЮШМАНОВ ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ
СТРЕСС-КОРРОЗИИ МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Газпром трансгаз Ухта»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Юрий Викторович Александров

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Зафар Хангусейн оглы Ягубов

кандидат технических наук
Владислав Николаевич Лисин

Ведущая организация: ОАО «Гипроспецгаз»
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 марта 2012 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат разослан 20 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор

Н.М. Уляшева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. По данным Ростехнадзора отмечается, что основные угрозы целостности магистрального трубопроводного транспорта являются следствием интенсивного развития коррозионных и стресс-коррозионных процессов.

С начала 1990-х годов по настоящее время установлена тенденция увеличения доли аварий на магистральных газопроводах (МГ) по причине стресс-коррозии с 25 до 60 %. При этом, несмотря на то, что благодаря современным методам диагностирования и ремонта трубопроводов абсолютное количество аварий снизилось, стресс-коррозия остается основной причиной, ограничивающей надежность трубопроводных систем.

Применение с 2000 г. внутритрубных диагностических комплексов, позволяющих достоверно выявлять поверхностные продольно ориентированные дефекты, в т.ч. трещины и зоны трещин коррозионного растрескивания и последующая оперативная замена дефектных участков труб, позволила за несколько лет в разы снизить количество аварий на МГ.

Такая работа проводится и в настоящее время, но уже не приводит к существенному снижению аварийности. Это обусловлено ограниченной разрешающей способностью внутритрубных снарядов, позволяющей определять наличие трещин, глубиной не менее 20% от номинальной толщины стенки трубы, а также тем, что к пропуску внутритрубных снарядов-дефектоскопов не подготовлены около половины всех эксплуатируемых МГ.

В таких условиях наиболее эффективным методом снижения вероятности развития стресс-коррозии, являются не методы диагностирования и ремонта труб, а превентивные методы, сдерживающие образование и рост дефектов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), что является актуальной задачей эксплуатации газопроводов в настоящее время, а с учетом увеличения срока эксплуатации трубопроводов, также в будущем.

Цель работы: Совершенствование методов предотвращения развития стресс-коррозии металла труб длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ факторов, инициирующих стресс-коррозионное растрескивание под напряжением на основе результатов расследования причин аварийных разрушений МГ на примере ООО «Газпром трансгаз Ухта».

2. В лабораторных условиях провести имитационные стресс-коррозионные исследования трубной стали в условиях статического нагружения, действия грунтовой среды и катодной поляризации.

3. Выполнить сопоставление и статистический анализ результатов внутритрубной диагностики, интенсивных и периодических электрометрических измерений на участке газопровода, предрасположенном к стресс-коррозии, для обоснования оптимального диапазона катодной поляризации.

4. Разработать комплекс практических мероприятий, обеспечивающих предотвращение развития стресс-коррозии на длительно эксплуатируемых магистральных газопроводах.

Научная новизна:

1. Лабораторными исследованиями определено, что наличие на поверхности трубы специфических гидроксидов железа: двухвалентного – белого цвета и магнитного железняка – черного цвета является диагностическим маркером участка газопровода, на котором катодная защита вызывает деполяризацию водорода и возможность развития стресс-коррозии, что подтверждается результатами шурфований газопроводов, подверженных стресс-коррозии.

2. По результатам периодических измерений потенциалов «труба-земля», установлено, что оценить предрасположенность участка МГ, ограниченного двумя соседними СКЗ, можно по среднему потенциалу, измеренному в точках дренажа станций. Для исследуемого участка МГ «Пунга-Ухта-Грязовец», км 0 – 205, получено: при среднем потенциале (-1,6;-1,8) В – количество дефектных труб менее двух;

(-1,8;-2,3) В – 3-5 дефектных труб; отрицательнее 2,3 В – 5-80 дефектных труб.

3. На основании анализа более 43 тысяч данных интенсивных электроизмерений на участке газопровода, предрасположенного к стресс-коррозии, с помощью критерия Вилкоксона обоснованы статистически значимые интервалы значений катодной поляризации с условной различной вероятностью образования дефектов КРН.

4. В результате исследования режимов работы 42 точек дренажа станций катодной защиты доказано, что отличия в значениях силы тока плеч защиты составляют не более $\pm 5\%$ в 97% случаев, что позволяет рассчитывать силу защитного тока участка трубопровода при оценке переходного сопротивления изоляционного покрытия, как полусумма значений силы тока двух соседних станций защиты с приемлемой для инженерных расчетов точностью.

Защищаемые положения:

- разработанная классификация факторов инициирующих стресс-коррозию по уровню влияния, степени контроля и возможности управления и вывод о том, что катодная поляризация является единственным мультипликативным фактором, имеющим возможность практического управления и регулирования;

- практическое применение разработанных критериев катодной защиты газопроводов, предрасположенных к стресс-коррозии, позволит снизить вероятность образования дефектов;

- оригинальная методика расчета переходного сопротивления изоляционного покрытия для назначения участков газопроводов к капитальному ремонту изоляции, основанная на анализе и расчете результатов периодических электроизмерений, что позволяет использовать имеющуюся базу данных для оценки динамики ухудшения свойств покрытия во времени;

- комплекс научно обоснованных, разработанных и внедренных в ООО «Газпром трансгаз Ухта» методов по установлению и поддержанию потенциала катодной поляризации на заданном уровне позволит снизить вероятность образования стресс-коррозии на МГ.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется применяемым уровнем значимости при проведении статистического анализа, корректностью лабораторных исследований по соответствию коррозионно-активной среды, измерительных электродов, типа материала, согласованностью результатов лабораторных исследований с результатами полученными другими авторами.

Практическая ценность работы заключается в расчетно-экспериментальном обосновании интервалов катодной поляризации газопроводов, предрасположенных к КРН. Поддержание значений катодной поляризации на длительно эксплуатируемых трубопроводах, предрасположенных к развитию стресс-коррозионных дефектов, позволяет снизить вероятность образования и развития дефектов и повысить надежность работы газопроводов. На основе результатов исследований разработаны и введены три стандарта организации ООО «Газпром трансгаз Ухта»:

- СТП 60.30.21-00159025-21-003-2009. Методика по определению состояния изоляции протяженных участков газопроводов методом интегральной оценки для назначения под переизоляцию;

- СТП 60.30.21-00159025-21-004-2009. Методические рекомендации по выводу в капитальный ремонт (реконструкцию) средств электрохимзащиты, включая установки катодной, протекторной и дренажной защиты, анодные заземлители;

- СТО 74.30.9-00159025-007-2011. Технологии поддержания и восстановления исходной работоспособности глубинных анодных заземлений средств электрохимзащиты при эксплуатации магистральных газопроводов.

Разработан программно-аппаратный комплекс «Подсистема контроля и управления средствами защиты от коррозии филиала эксплуатирующей организации ОАО «Газпром» (АРМ ЭХЗ), предназначенный, в том числе для поддержания

заданных значений потенциала на газопроводах. Комплекс АРМ ЭХЗ в марте 2011 г. успешно прошел приемочные испытания на базе филиала Мышкинском управлении ООО «Газпром трансгаз Ухта».

Получен патент №90215 на полезную модель «Автоматизированное устройство диагностики состояния подземных металлических сооружений».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: отраслевом совещании по проблемам защиты от коррозии (Барнаул, 21-26 апреля 2008 г.); Международной рабочей встрече в рамках Программы научно-технического сотрудничества ОАО «Газпром» и «Э.ОН Рургаз АГ» «Разработка совместной концепции по вопросам защиты газопроводов от коррозии» (г. Эссен, Германия, апрель 2008 г.); VI научно-практической конференции молодых специалистов и ученых ООО «Газпром ВНИИГАЗ» - «Севернипигаз» «Инновации в нефтегазовой отрасли – 2009» (29 июня – 4 июля 2009 года); научно-технической конференции сотрудников и преподавателей УГТУ (14-17 апреля 2009 г.); 3-ей Международной научно-технической конференция «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири», ТГНГУ, 2009 г.; X Международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2009», УГТУ, (18-20 марта 2009 г.); отраслевом совещании по проблемам защиты от коррозии (п. Небуг, 12-15 мая 2009 г.); Международной конференции «Актуальные вопросы противокоррозионной защиты» (РАСР-2009) (г. Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2009 г.); Научно-техническом семинаре «Рассохинские чтения», УГТУ, 2009, 2012 гг.; Отраслевом совещании по вопросам защиты от коррозии (г. Астрахань, 17-21 мая 2010 г.); Международной конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (GTS-2011) (г. Москва, ООО «ВНИИГАЗ», 2011 г.); Международной рабочей встрече в рамках Программы научно-технического сотрудничества ОАО «Газпром» и «Э.ОН Рургаз АГ» «Разработка совместной концепции по вопросам защиты газопроводов от коррозии» (ООО «Газпром трансгаз Ухта», г. Вологда, август 2011 г.).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 27 работ, из них 3 - в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 176 страницы текста, 100 рисунков, 35 таблиц и список литературы из 111 наименований.

Содержание работы

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

В первой главе «Анализ методов предотвращения развития стресс-коррозии на магистральных газопроводах большого диаметра» на основе анализа научного опыта, содержащегося в теоретических и методологических трудах известных отечественных и зарубежных ученых и специалистов, занимавшихся проблемой коррозионного растрескивания трубных сталей, среди которых: Абдуллин И.Г., Антонов В.Г., Асадуллин М.З., Аскарлов Р.М., Васильев Г.Г., Волгина Н.И., Волков А.А., Воронин В.Н., Гареев А.Г., Галиуллин З.Т., Глазов Н.П., Есиев Т.С., Иванцов О.М., Игнатенко В.Э., Кантор М.М., Камаева С.С., Карпов С.В., Конакова М.А., Колотовский А.Н., Королёв М.И., Лисин В.Н., Маршаков А.И., Мейер М., Михайловский Ю.Н., Отт К.Ф., Петров Н.А., Притула В.В., Сергеева Т.К., Соловей В.О. Стеклов О.И., Теплинский Ю.А., Яковлев А.Я., Sutcliffe I.V., Duquette D.J., Beachem C.D., Baker T.R., Parkins R.N., O.Beirne I., Delanty B. и многие другие, показано, что для зарождения и развития КРН необходимо одновременное влияние трех групп известных факторов: первая группа включает параметры коррозионной среды; ко второй группе факторов отнесены параметры напряженно-деформированного состояния металла труб; третья группа факторов – металлургические.

Все факторы можно классифицировать по уровню воздействия на процесс КРН, по степени контролируемости и по степени управления (регулирования) (рисунок 1).

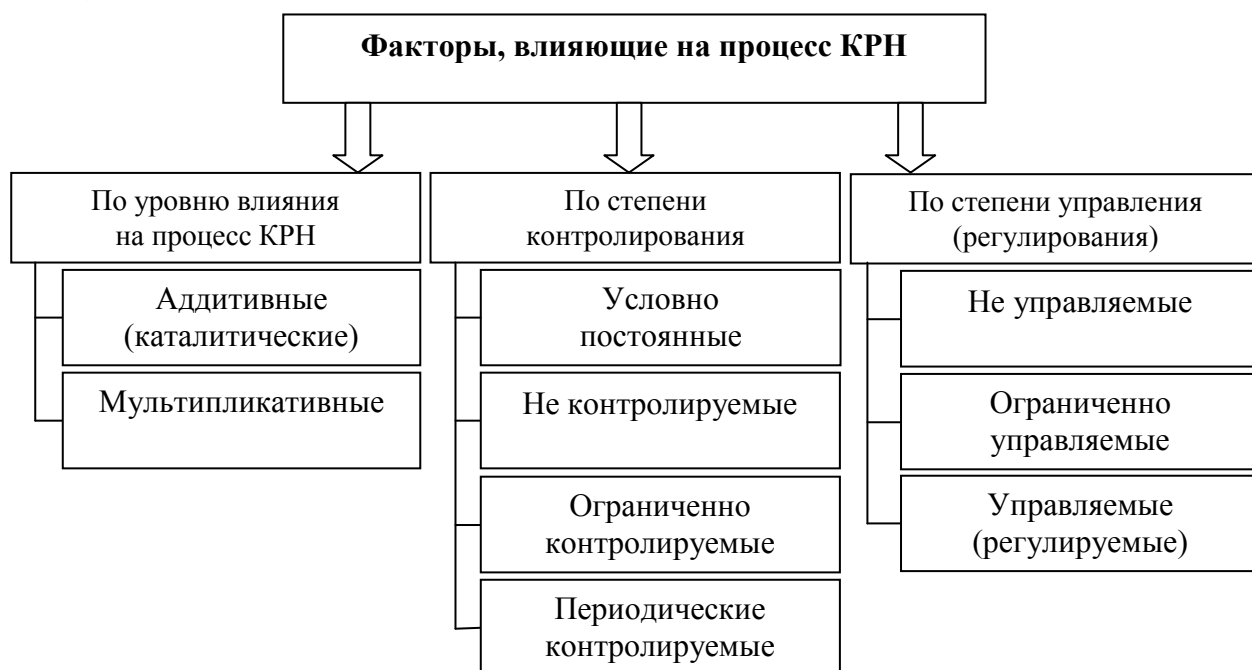


Рисунок 1 - Классификация факторов, влияющих на процесс КРН

По уровню влияния факторы делятся на две группы. Первая группа факторов самостоятельно не приводит к развитию КРН, а только увеличивает вероятность развития КРН при прочих равных условиях, например, температура продукта.

Мультипликативные факторы, являются определяющими в развитии КРН, при устранении любого мультипликативного фактора процесс КРН не идет вообще. Примером может служить напряженное состояние стенок труб.

Таким образом, развитие методов предотвращения КРН должно быть ориентировано на выявление мультипликативных факторов с возможностью контроля и регулирования.

В связи с предложенной классификацией факторов, присущих КРН, оценить вероятность образования КРН на участке газопровода ($P_{\text{КРН}}$) можно по следующей формуле:

$$P_{\text{КРН}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \prod_{j=1}^k K_j, \quad (1)$$

где N_i – балльное значение аддитивного i -того фактора; n – количество, учитываемых аддитивных факторов; K_j – балльное значение мультипликативного j -того фактора; k – количество, учитываемых мультипликативных факторов.

Анализ показал, что методы предотвращения развития КРН можно условно разделить на две группы:

1. Методы диагностирования и ремонта сформировавшихся дефектов газопроводов.
2. Методы предупреждения образования и развития дефектов КРН.

В настоящее время наиболее полно и системно реализуется первая группа методов, что позволило значительно снизить аварийность газопроводов. Но этому методу присущ ряд существенных недостатков, а именно: высокая стоимость ВТД и ремонта; техническая невозможность проведения внутритрубной диагностики (ВТД) на значительной части трубопроводов; высокая вероятность критического развития дефектов КРН между пропусками ВДТ в связи с высокой и нелинейной скоростью роста дефекта КРН во времени и недостаточной чувствительностью приборов.

Ко второй группе методов, включающем превентивные методы защиты трубопроводов от КРН, снижающие вероятность развития КРН, относят: изменение свойств коррозионной среды (грунта); снижение напряженного состояния газопроводов; капитальный ремонт изоляции; применение коррозионно-стойких труб; повышение эффективности катодной защиты.

Важным условием для развития КРН в большинстве случаев является катодная поляризация металла трубопроводов. В ряде работ отмечается связь между поляризацией металла и количеством дефектов КРН. В работах А.Я. Яковлева, В.Н. Воронина экспериментально на образцах установлен диапазон потенциалов катодной поляризации, способствующий торможению развития КРН для сред с

различным рН. Однако практически использовать выводы, полученные в работе некорректно, т.к. испытания были выполнены по ускоренной методике с применением модельных образцов и сред.

В этом случае уникальной основой для анализа являются многолетний банк данных периодических электроизмерений, данные интенсивных электрометрических измерений, результаты внутритрубной диагностики, шурфований, на МГ подверженных КРН, однако системных исследований по сопоставлению этих показаний не проводилось.

Во второй главе «Анализ аварийных разрушений по причине коррозионного растрескивания под напряжением в ООО «Газпром трансгаз Ухта»» показано, что наибольшее число аварийных разрушений газопроводов зафиксировано на трубах, изготовленных из нормализованной стали – 27 аварий. На трубах из стали контролируемой прокатки – 23 аварии. На термоулучшенных трубах из сталей второго поколения произошло 20 отказов.

Наибольшее время наработки до момента отказа зафиксировано на трубах из сталей первого поколения со сроком службы 25-35 лет, далее следуют стали второго поколения (16-24 года) и наименее долговечны трубы из сталей контролируемой прокатки (11-20 лет), что намного меньше назначенного ресурса трубопроводов.

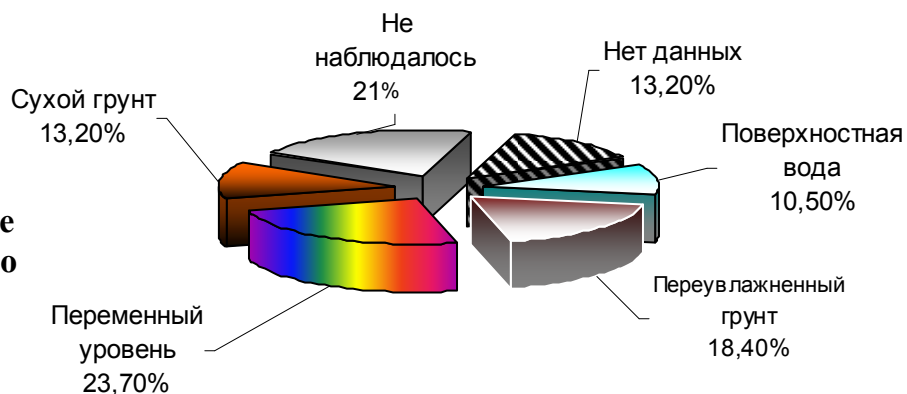
Наибольшую протяжённость в системе магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Ухта» имеют трубы из нормализованной стали 17Г1С – 3442,7 км, что составляет 40,3% от общей длины газопроводов. Наименьшее количество (16,8%) термоулучшенных труб – 1433, 9 км и труб производства Франции из стали контролируемой прокатки – 603,6 км (7,1%). Трубы из СКП производства ХТЗ, Японии, Италии занимают промежуточное положение, их протяженность составляет порядка 3050 км (35,8%).

Наибольшее число аварий приходится на апрель, июнь и сентябрь месяцы. Это связано с тем, что в апреле начинается оттаивание и подвижки грунта. В июне – наиболее жарком и влажном месяце, с повышением температуры процессы коррозии интенсифицируются, а в сентябре сказывается большое количество поверхностной воды, изменяющийся солевой и ионный состав грунтового электролита, и возможно, удаляющей продукты коррозии из стресс-коррозионных трещин. Т.е. исходя из этих данных следует, что дополнительными факторами, приводящими к стресс-коррозионным повреждениям и авариям, являются механические напряжения в трубе, температура и влажность грунта.

Состояние грунта в местах аварий, классифицировано на несколько групп. Кроме того, при расследовании аварий имеется некоторое количество данных об уровне грунтовых вод, имеющих неоднозначную интерпретацию, которые

обозначены в отчетах как «не наблюдалось», что свидетельствует об отсутствии воды в траншее при расследовании аварии, и может относиться как к переменному уровню грунтовых вод, так и к уровню грунтовых вод ниже нижней образующей трубы (рисунок 2). Наибольшее количество аварий по причине КРН произошло на участках с переменным уровнем грунтовых вод. Из этого следует, что стресс-коррозионная опасность возникает при периодическом появлении влаги на поверхности трубы.

Рисунок 2 – Распределение аварий по причине КРН по увлажненности грунта

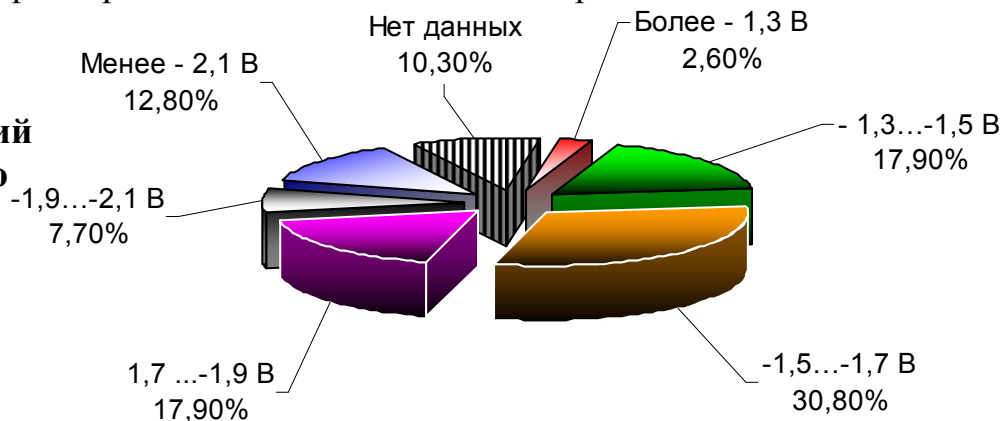


Анализ не выявил зависимости между общей минерализацией грунта и количеством аварий, хотя большее их число приходится на интервал 400-700 мг/кг.

Потенциал поляризации металла трубопровода не относится к числу постоянных параметров. Тем не менее, опыт показывает, что годовые и сезонные изменения потенциала труба-земля, как правило, не превышают 10%. Распределение аварий в зависимости от значений потенциала катодной защиты с омической составляющей, указанным на момент аварии приведено на рисунке 3.

При низких (по модулю) значениях потенциалов происходит всего 2,6% аварий. Как видно из этой диаграммы наибольшее количество аварий (30,8%) произошло при потенциалах минус 1,5...1,7В (по медно-сульфатному электроду), что свидетельствует о возможности существования некоторого интервала потенциалов, при котором происходит большее число аварий.

Рисунок 3 - Распределение аварий по причине КРН по защитным потенциалам с омической составляющей



Во третьей главе «Исследование развития стресс-коррозии в лабораторных условиях» для моделирования стресс-коррозионных процессов использовали установку с постоянной деформацией, как наиболее имитирующую

эксплуатационные условия (рисунок 4). Контроль за деформацией осуществляли с помощью микрометра часового типа с погрешностью $\pm 0,01$ мм. На образце предварительно выполнялся трещиноподобный дефект (рисунок 5). Часть поверхности образца изолировалась защитным покрытием. После экспозиции в течение 32 ч при катодной поляризации минус 0,9...-1,5 В, оценивалось изменение поверхностной твердости образцов, а также изменение размеров искусственного дефекта.

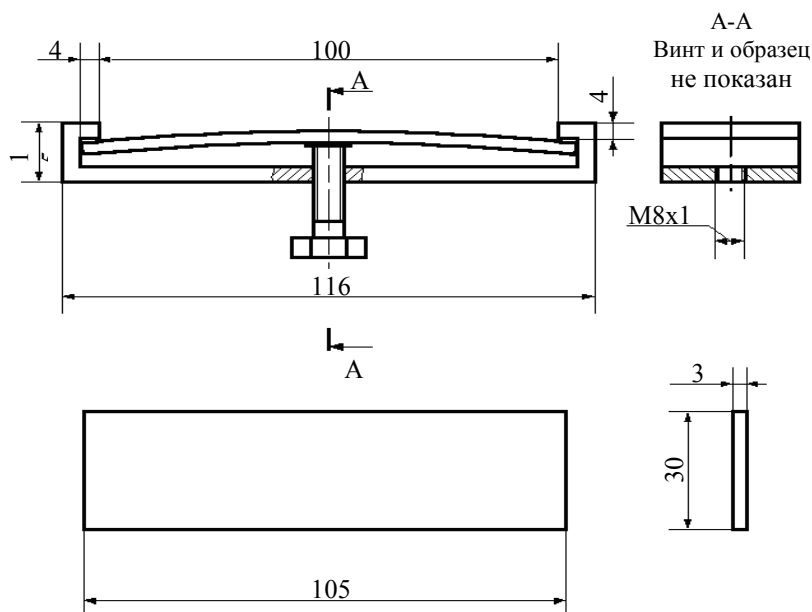


Рисунок 4 - Эскиз установки для исследования КРН при постоянной деформации

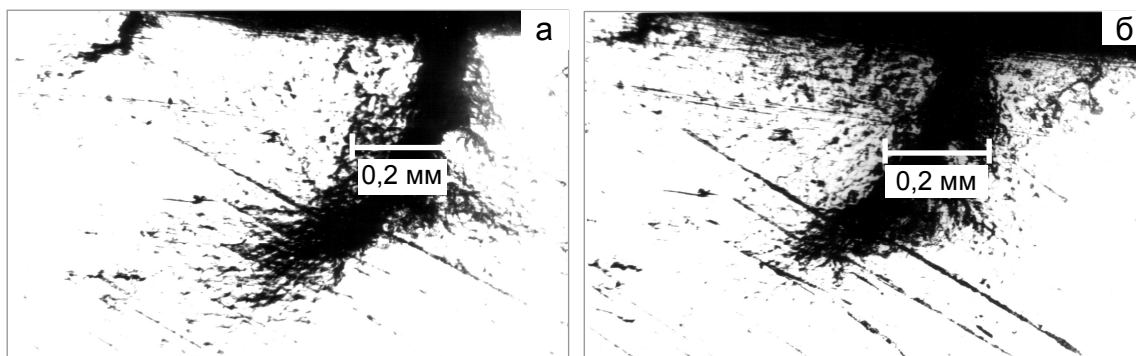


Рисунок 5 - Вид трещины на образце до (а) и после (б) коррозионных испытаний в условиях катодной поляризации

На корродированной поверхности зафиксирован факт увеличения средней микротвердости при увеличении потенциала (по модулю) катодной поляризации (рисунок 6). На изолированной поверхности микротвердости варьировалась в пределах допускаемой основной погрешности прибора ПМТ-3М (не более 5%). В результате подтверждены результаты полученные в работе В.О. Соловья и вывод о возможности оценки предрасположенности металла к развитию КРН измерением микротвердости.

Так же наблюдается увеличение ширины раскрытия трещины после испытания (рисунок 7).

Однако развитие трещины в глубину без циклирования нагрузки, только под действием катодной поляризации и статической изгибной нагрузки, не достигнуто.

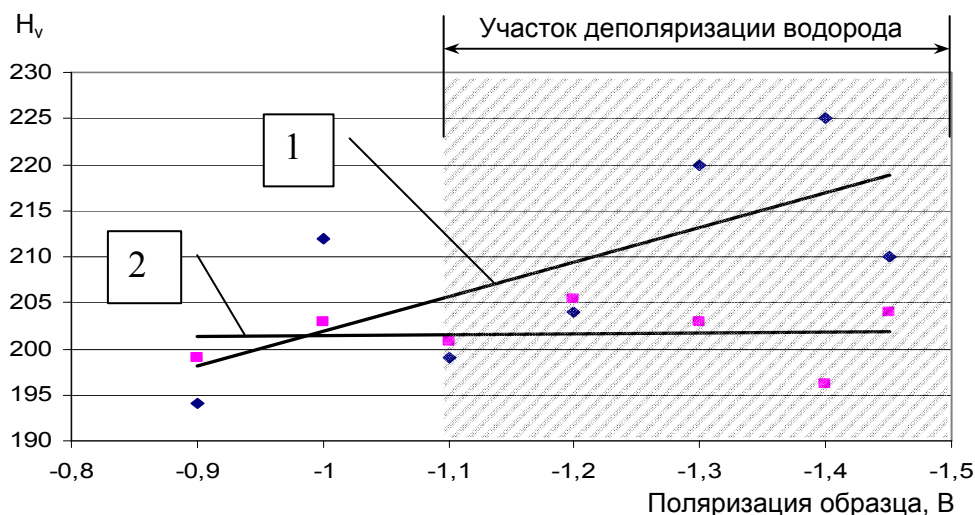


Рисунок 6 - Зависимости изменения микротвердости (H_v) открытой (1) и изолированной (2) поверхности образцов от потенциала поляризации (м.с.э.)

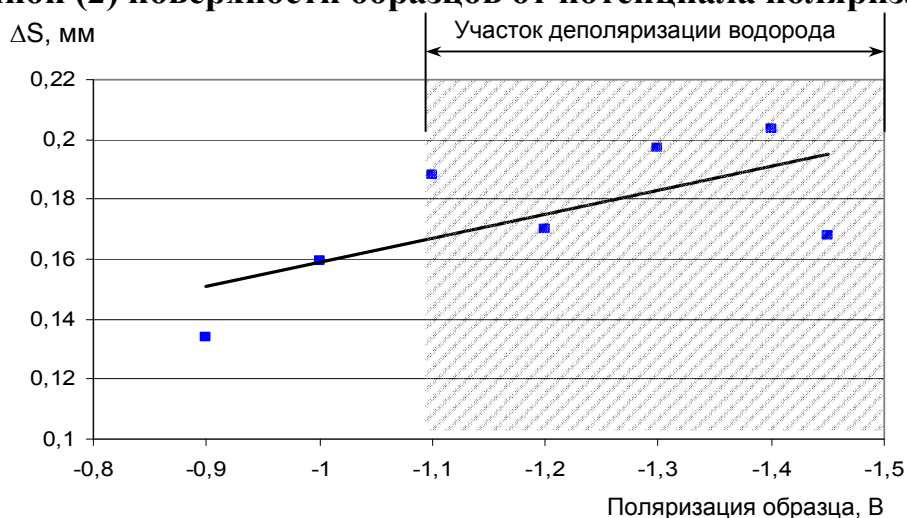


Рисунок 7 - Зависимость изменения средней ширины раскрытия трещины образца после испытания (ΔS) от потенциала поляризации (м.с.э.)

Установлено, что при катодной защите возможно протекание двух процессов – кислородной и водородной деполяризации (рисунок 8). Точка перехода от одного к другому находится около потенциала минус 1,04-1,08 В (м.с.э.), т.е. при катодной защите на поверхности защищаемого трубопровода могут происходить два процесса – процесс превращения растворенного в воде кислорода в ион гидроксида и восстановления иона водорода из воды.

Поэтому следует обеспечивать такой потенциал, чтобы происходило восстановление кислорода и не происходило восстановление воды – водородной деполяризации.

В работе установлен важный практический вывод: при выделении водорода происходит частичное восстановление оксидов или гидроксидов трехвалентного железа, которые являются вторичными продуктами коррозии железа.

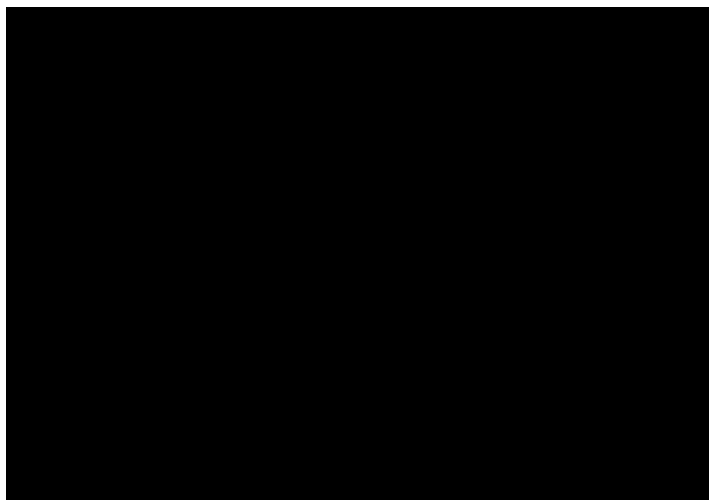


Рисунок 8 - Логарифмическая зависимость тока катодной защиты от величины потенциала

Гидроксиды двухвалентного железа, реагируя с соединениями трехвалентного железа, образуют магнитный железняк. Так как соединения трехвалентного железа красно-коричневого цвета, двухвалентного – белого, а магнитный железняк черный, то цвет образованных оксидов дает возможность визуального контроля участков с избыточной поляризацией (ниже минус 1,1 В). Именно такие соединения разными исследователями наблюдались при идентификации стресс-коррозионных дефектов МГ в шурфах.

Во четвертой главе «Статистический анализ результатов внутритрубной диагностики и интенсивных электрометрических измерений» показано, что эффективный диапазон защитного потенциала в условиях КРН может несколько отличаться от диапазона для защиты от язвенной коррозии. Определение этих потенциалов в лабораторных условиях нецелесообразно, вследствие того, что чрезвычайно сложно воспроизвести все факторы, присущие КРН.

Такая задача может быть решена сопоставлением данных электрометрических измерений и внутритрубной диагностики, выполненных на участке магистрального газопровода, предрасположенного к КРН.

В качестве объекта исследования выбран участок 0-205 км МГ Пунга-Ухта-Грязовец ООО «Газпром трансгаз Ухта», который характеризуется высокой вероятностью формирования и развития дефектов КРН, кроме этого его условно

можно разделить на два отрезка, характеризующихся различной плотностью выявленных дефектов КРН.

Определено, что для рассматриваемого участка наблюдается неравномерность распределения защитных потенциалов. В 1987 году на участке 0-110 км распределение потенциалов укладывались в нормативный диапазон, однако в последующем, минимальные (по модулю) значения потенциала стали приближаться к минус 0,95 В а максимальные поэтапно от года к году увеличивались, достигнув предела в минус 3,5 В, определяемого ГОСТ Р 51164-98.

Для второго участка 110-205 км характерен невысокий уровень максимальных (по модулю) значений, не превышающих 2,0 В, а минимальных – на уровне 0,9-1,2 В, практически неизменный за весь период эксплуатации. Анализ выполняли с учетом имеющихся данных за весь период измерений.

В случае, когда имеются результаты измерения в каждый год анализируемого периода времени, средний потенциал предложено рассчитать по формуле:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{T=T_0}^{T_k} U_T}{(T_k - T_0) + 1}, \quad (2)$$

где U_T – потенциал на КИК, измеренный в год T , В; T_0 и T_k – соответственно, начальный и конечный год измерений, год.

В случае, когда в рассматриваемом периоде имеются годы, в которых измерения не выполнялись (либо эти данные отсутствуют), расчет выполняли по следующей формуле:

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (3)$$

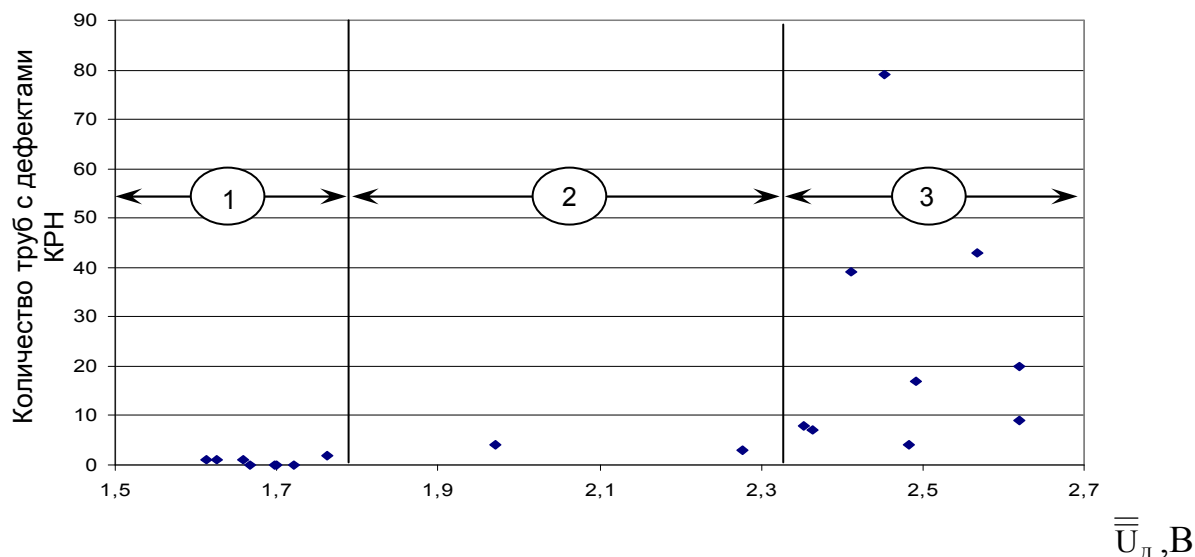
где U_i – потенциал на КИК, измеренный в год порядковым номером i , В; n – количество лет в которые выполнялись измерения.

Анализ выполнили в следующем порядке: на выбранном участке МГ отмечали участки, ограниченные станциями катодной защиты; используя данные внутритрубной диагностики, определяли количество дефектов КРН, образовавшихся за период эксплуатации на участках, ограниченных СКЗ; используя данные периодических измерений «труба-земля», рассчитывали согласно (2,3) средние значения потенциала в точке дренажа на каждой станции за весь период имеющихся измерений (до даты проведения ВТД); рассчитывали среднее значение потенциала в точках дренажа соседних станций защиты, используя средние значения потенциала для каждой станции за рассматриваемый период измерений \bar{U}_d ; определяли максимальную глубину дефектов КРН.

Результаты анализа данных периодических измерений представлены на рисунке 9.

Вывод о влиянии катодной поляризации на развитие дефектов КРН подтверждается тенденцией увеличения максимальной глубины повреждения КРН с возрастанием (по модулю) среднего значения потенциала в точках дренажа этих станций (рисунок 10).

Результаты исследования показали, что увеличение, как количества (рисунок 9), так и средней глубины (рисунок 10) трещин КРН зависят от уровня катодной поляризации трубы.



- 1 – область потенциалов с низким значением условной статистической вероятности (количество дефектных труб менее 2 шт. на участке между СКЗ);
- 2 – область потенциалов со средним значением УСВ (количество дефектных труб 3-5);
- 3 – область потенциалов со средним значением УСВ (количество дефектных труб более 5 шт.)

Рисунок 9 - Зависимость количества дефектных труб на участке между СКЗ от среднего потенциала в точках дренажа этих СКЗ

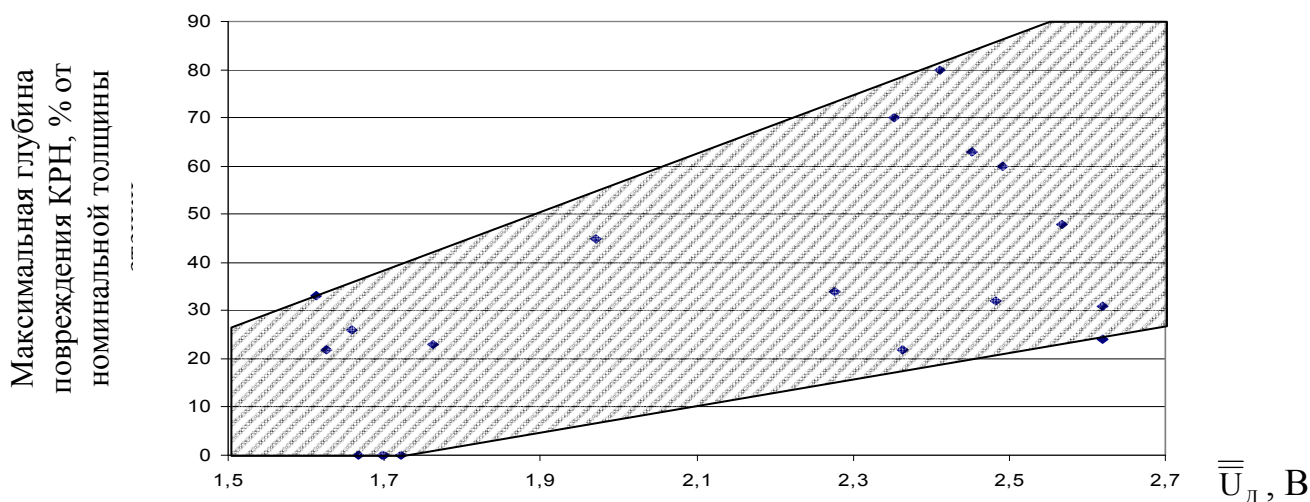


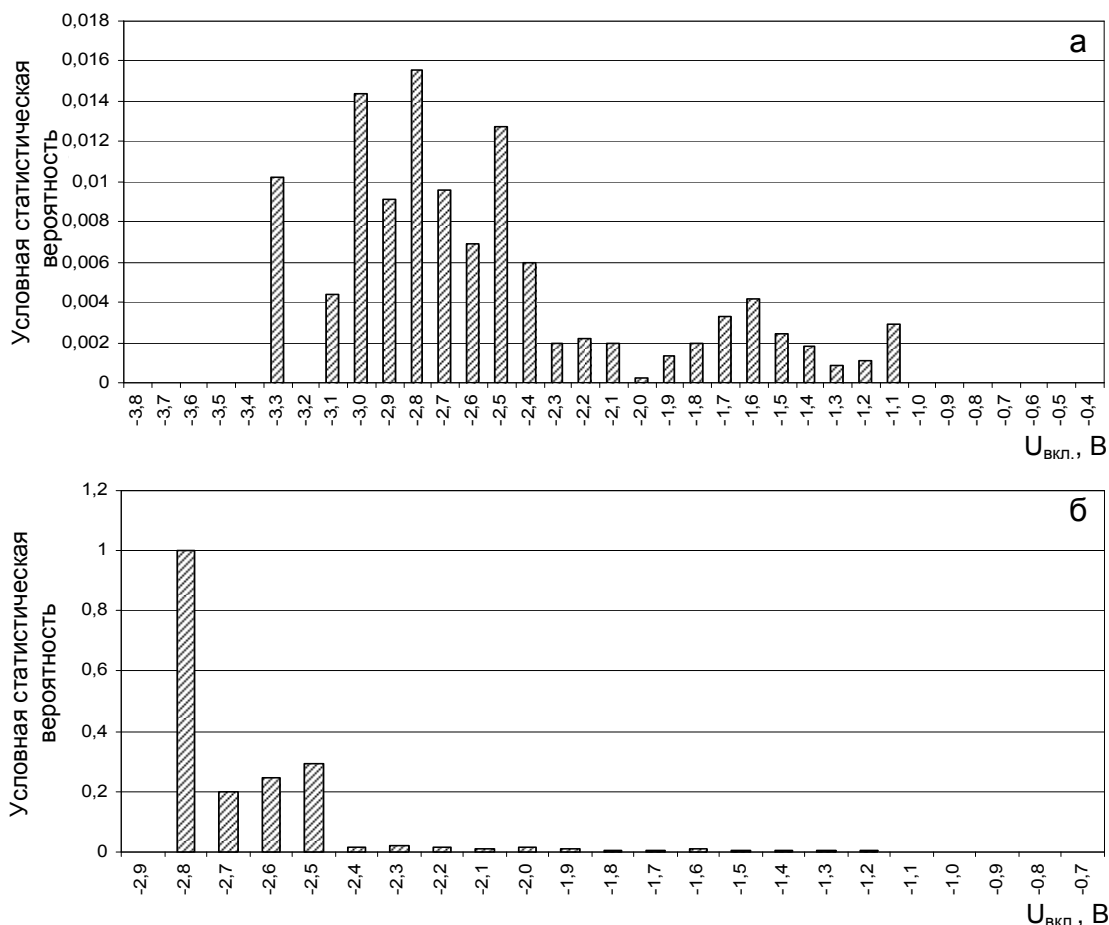
Рисунок 10 - Зависимость максимальной глубины дефекта КРН, выявленного ВТД на участке между СКЗ от среднего потенциала в точках дренажа этих СКЗ

На следующем этапе исследования на основе исходных результатов интенсивных электроизмерений, выполненных с шагом 5 м, строили гистограмму потенциалов включения по участку МГ. Всего было проанализировано 43658 результатов.

Условную статистическую вероятность возникновения дефекта КРН для определенного диапазона потенциалов катодной поляризации, определяли по формуле (рисунок 11):

$$P = \frac{n_{\text{дефект}}}{n_{\text{общ}}} , \quad (4)$$

где $n_{\text{дефект}}$ - количество пятиметровых интервалов МГ с обнаруженными дефектами КРН, соответствующих определенному диапазону потенциалов катодной поляризации; $n_{\text{общ}}$ - общее количество пятиметровых интервалов МГ, соответствующих этому диапазону потенциала катодной поляризации.



а – распределение вероятности возникновения дефектов от потенциалов включения (с омической составляющей); б – распределение вероятности возникновения дефектов от потенциалов выключения (без омической составляющей)

Рисунок 11 - Распределение относительной вероятности возникновения дефектов КРН от потенциалов включения и выключения $U_{\text{вкл.}}$, В

Установлено, что условная статистическая вероятность развития дефектов КРН (Р) в значительной степени зависит от значения потенциала включения и выключения. Так, например, на пятиметровых интервалах МГ, имеющих поляризацию по потенциалу отключения в диапазоне минус 0,5 – минус 0,9 В обнаружен один дефект КРН (или 0,41% от общего количества дефектов КРН на исследуемом МГ), но при этом общее количество участков с указанным значения потенциала составляет около 7%.

Таким образом, можно имеющиеся данные об условной вероятности образования дефектов КРН разбить на несколько диапазонов значений потенциала, соответствующих различной вероятности образования дефектов, что в дальнейшем позволит рекомендовать устанавливать потенциалы с наименьшей вероятностью образования дефектов КРН на участках МГ, предрасположенных к образованию дефектов.

Для проверки гипотезы различий вероятности образования КРН при разных интервалах поляризации был использован критерий Вилкоксона.

Число инверсий, порождаемых каким либо членом x_i ряда X - это число членов из ряда Y, которые меньше x_i . Сумму инверсий всех членов ряда X относительно ряда Y обозначим v .

Критическое значение критерия Вилкоксона $U_{крит.}$ вычисляли по формуле:

$$U_{крит.} = \begin{cases} v, & \text{если } v < \frac{mn}{2} \\ mn - v, & \text{если } v > \frac{mn}{2} \end{cases} \quad (5)$$

где n – объем выборки ряда X, m – объем выборки ряда Y.

Данные относительных частот дефектов при потенциале отключения разбили на три выборки, соответствующие интервалам потенциала [-2,8; -2,5], [-2,4; -1,9], [-1,8;-0,9В]. Обнаружено, что инверсий выборок не наблюдается, нет перемешивания выборок. Это значит, что гипотезы о принадлежности любой пары выборок к одной генеральной совокупности отвергаются практически со 100% вероятностью.

Таким образом, относительная частота дефектов труб статистически значимо отличается для выбранных интервалов потенциала включения и отключения. Полученные результаты позволяют заключить, что при поддержании потенциала с омической составляющей в диапазоне минус 1,2 ÷ 2,3 В, а потенциала отключения положительнее минус 1,2 В, несмотря на общую предрасположенность участка газопровода к возникновению КРН, можно снизить вероятность образования дефектов КРН.

В пятой главе «Управление значением защитного потенциала вдоль газопроводов, подверженных КРН» описаны разработанные и апробированные методы поддержания потенциалов на МГ (рисунок 12).

Подсистема АРМ ЭХЗ разработана в отношении совокупности объектов «магистральный газопровод – противокоррозионная защита – окружающая коррозионно-агрессивная среда». Она предназначена: для осуществления функций управления средствами ПКЗ (прежде всего, системами электрохимической защиты) в функции поддержания заданных параметров системы защиты в контрольных точках; сбора, архивирования и обработки контролируемых параметров системы защиты от коррозии с целью анализа и прогнозирования изменения коррозионного состояния защищаемых трубопроводов и сооружений.

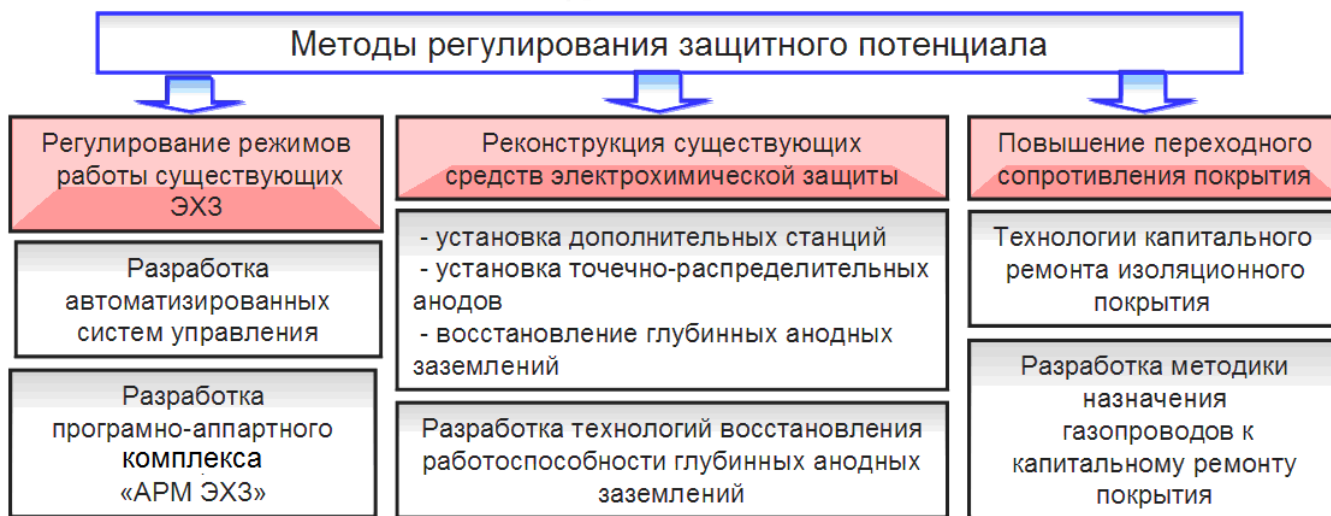
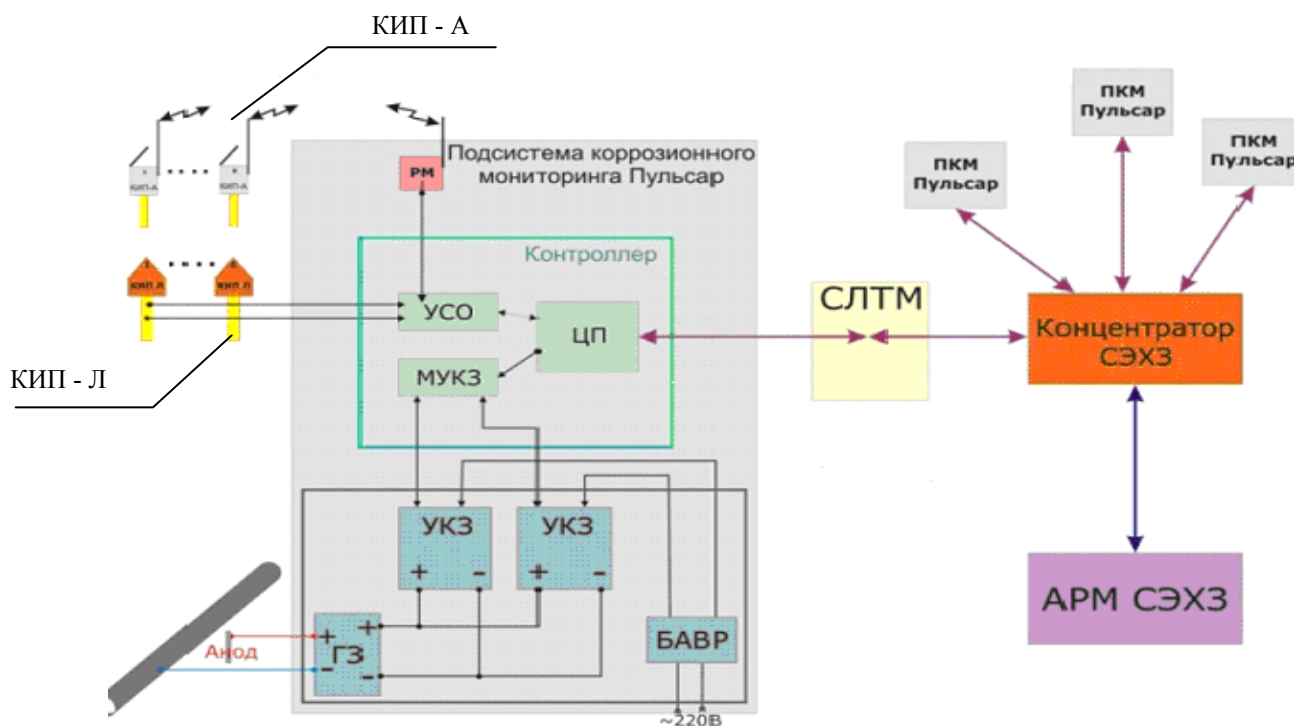


Рисунок 12 – Методы поддержания и управления защитного потенциала по длине газопровода

Функциональная схема подключения оборудования с подсистему АРМ ЭХЗ представлена на рисунке 13.



КИП-А – контрольно-измерительный пункт с автономным питанием; КИП-Л – контрольно-измерительный пункт линейной части; РМ – радиомодуль; УСО – устройство связи с удаленными объектами; ЦП – центральный процессор; МУКЗ – модуль управления устройствами катодной защиты; УКЗ – устройство катодной защиты; ГЗ – блок грозозащиты; БАВР – блок аварийного включения резерва; СЛТМ – система линейной телемеханики; АРМ СЭХЗ – автоматизированное рабочее место оператора системы электрохимической защиты.

Рисунок 13 – Функциональная схема подсистемы АРМ ЭХЗ

Для интегральной оценки состояния изоляционного покрытия за основу выбрана методика, изложенная ГОСТ Р 51164-98, основанная на том положении, что чем меньше сила катодного тока вызывающая смещение потенциала «труба-земля», тем выше переходное сопротивление и лучше состояние покрытия и наоборот.

К недостаткам базовой методики относят необходимость проведения большого объема трассовых работ и невозможность использования для анализа имеющейся базы данных периодических электроизмерений.

Согласно разработанной методике расчет выполняется для участков МГ, ограниченных точками дренажа соседних станций катодной защиты без их отключения, а сила поляризующего тока рассчитывается как полусумма значений силы тока на выходе каждой из этих станций. В качестве стационарного потенциала принимают собственный потенциал аналогичной стали в грунте, который однократно измеряют в лабораторных или трассовых условиях.

С целью определения корректности такого допущения для исследования разности силы тока в левом и правом плечах защиты были проведены измерения силы тока на 42 точках защиты. Определение силы тока выполняли по падению напряжения на участке электрической цепи. Точки подключения прибора: точка дренажа и ближайший КИП. Установлено, что в 31 точке дренажа (74 %) значения силы тока натекающего на левое и правое плечо защиты практически идентичны, отклонение составляет $\pm 2,5$ %. В 41 точке дренажа (98%) отклонение составляет ± 5 %.

Таким образом, определено, что расчет переходного сопротивления можно выполнять по предложенному алгоритму с достаточной для инженерных расчетов точностью.

В таблице приведены мероприятия, направленные на поддержания работоспособности покрытий, в зависимости от его технического состояния.

Методика позволяет оценивать динамику изменения качества покрытия во времени путем расчета градиента снижения переходного сопротивления во времени, который также учитывается при назначении ремонта покрытия:

$$\beta = \frac{R_{и}^{нач} - R_{и}^{кон}}{R_{и}^{кон} \cdot T} \quad (6)$$

где $R_{и}^{нач}$, $R_{и}^{кон}$ - переходные сопротивления в начальный и конечный период времени соответственно; T – временной период между измерениями $R_{и}^{нач}$, $R_{и}^{кон}$, лет.

Для повышения работоспособности глубинных анодных заземлений (ГАЗ) разработан метод, основанный на электрогидроударном эффекте, открытом Л. А. Юткиным.

Установка состоит из силового и зарядного блоков, разрядника с высоковольтным кабелем, кабельного подъемника с грузонесущим тросом.

Критерии оценки состояния изоляционных покрытий длительно эксплуатируемых газопроводов по величине переходного электрического сопротивления

Состояние покрытия	Переходное сопротивление покрытия, Ом м ²		Назначение к ремонту и диагностике изоляционного покрытия	Периодичность проведения интегральной оценки переходного сопротивления изоляции
	Для покрытия на основе битума	Для покрытия на основе полимерных лент		
Отличное	Более $6 \cdot 10^4$	Более $2 \cdot 10^5$	Не требуется	Раз в 5 лет
Хорошее	$1,5 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$	Не требуется	Раз в 3 года
Удовлетворительное	$3000 - 1,5 \cdot 10^4$	$5000 - 2,5 \cdot 10^4$	Контроль искателями повреждения изоляции (метод Пирсона)	Каждый год
Плохое	300-3000	500-5000	Рекомендуется плановый капитальный ремонт покрытия (переизоляция)	-
Разрушенное	30-300	50-500	Рекомендуется первоочередной капитальный ремонт покрытия (переизоляция)	-
Следы покрытия	Менее 30	Менее 50		

Накопленная в конденсаторах зарядного блока энергия выделяется в разряднике, помещенном в заполненную водой очищаемую колонну ГАЗ в виде импульсной электрической искры, которая формирует механическую ударную волну в воде.

Разрушение коррозионных отложений на внутренней и внешней поверхностях ГАЗ осуществляют путем перемещения разрядника в полости ГАЗ с определенной скоростью и подачей на него импульсов электрической энергии. Спуск проводят с помощью грузонесущего троса к которому прикрепляется электрический высоковольтный кабель. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработки составляет более 62,5 млн. руб.

Основные выводы:

1. На основании анализа факторов, инициирующих стресс-коррозию, разработана их классификация по уровню влияния, степени контролирования и управления. Установлено, что единственным фактором, имеющим возможность управления и контроля является значение катодной поляризации МГ.

2. Выполнен анализ особенностей 70 аварийных разрушений газопроводов, эксплуатируемых ООО «Газпром трансгаз Ухта», произошедших по причине стресс-коррозии. Показано, что разрушения происходили преимущественно в периоды

протекания нестационарных процессов промерзания-оттаивания в тугопластичных грунтах при их переменном увлажнении не зависимо от марки стали и производителя металла труб.

3. По результатам лабораторного моделирования процессов стресс-коррозии установлено, что избыточная катодная защита (водородная деполяризация) увеличивает ширину раскрытия искусственных трещин, увеличивает количество коррозионных питтингов и твердость поверхности образца с «закрытым» дефектом изоляции.

4. Впервые выполнен сопоставительный анализ результатов ВТД и данных периодических электроизмерений потенциала «труба-земля» на участке газопровода, предрасположенном к стресс-коррозии, который показал, что существуют интервалы поляризации металла, при которых в десятки раз увеличивается вероятность развития КРН. С помощью критерия Вилкоксона обоснованы эффективные интервалы поляризации металла для участков МГ, предрасположенных к КРН.

5. Разработан, испытан и внедрен комплекс мероприятий по поддержанию защитного потенциала МГ, включающий программно-аппаратный комплекс управления и контроля средствами ЭХЗ, методику выбора участков МГ для проведения ремонта изоляции и технологию восстановления глубинных анодных заземлений.

6. Материалы исследования вошли составной частью в три стандарта организации «Газпром трансгаз Ухта». Суммарный экономический эффект от внедрения – более 100 млн. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Глотов И.В., Юшманов В.Н., Агиней Р.В. Экспериментальное определение математических моделей для оптимизации защиты подземных нефтегазопроводов несколькими катодными станциями // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе – 2009 – № 8 – С. 18-22.

2. Александров Ю.В., Юшманов В.Н., Агиней Р.В. Сопоставительный анализ результатов диагностики и электрометрических измерений на участке газопровода, предрасположенном к стресс-коррозии // Практика противокоррозионной защиты – 2011 – №3.

3. Александров Ю.В., Юшманов В.Н., Теплинская О.Ю. Оценка эффективности работы катодной защиты газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением // Трубопроводный транспорт (теория и практика) – 2011 – №4 – С. 22-24.

4. Юшманов В.Н., Агиней Р.В. Влияние наведенных токов высоковольтных линий электропередач на работу системы электрохимической защиты газопровода // Тезисы докладов VI научн.-практ. конф. молодых специалистов и ученых «Инновации в нефтегазовой отрасли – 2009» (Ухта, 29 июня – 4 июля 2009 г.) – Ухта: ООО «Газпром ВНИИГАЗ» - «Севернипигаз» – С. 47-48.

5. Юшманов В.Н., Мамаев Н.И. Приемка и сертификация средств противокоррозионной защиты строящихся газопроводов ООО «Газпром трансгаз Ухта» // М-лы отрасл. совещ. по проблемам защиты от коррозии (Барнаул, 21-26 апреля 2008 г.) – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2008 – С.49-53.

6. Юшманов В.Н., Агинец Р.В., Фуркин А.В. Особенности интерпретации градиентов напряжения постоянного тока при электроизмерениях на газопроводах // М-лы науч.-технич. конф. (Ухта, 14-17 апреля 2009 г.): в 2 ч.; ч. I / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009 – С. 205-208.

7. Юшманов В.Н., Фуркин А.В. Электрометрическое обследование газопровода в зоне наведенных токов линии электропередач // М-лы 3-ей Международной науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» (Тюмень, ТГНГУ) – Тюмень: Экспресс, 2009 – С. 90-93.

8. Юшманов В.Н., Фуркин А.В. Опыт обследования газопроводов в зоне наведенных токов линий электропередач // М-лы X Международной молодежной научн. Конф. «Севергеоэкотех-2009» (Ухта, 18-20 марта 2009 г.): в 4 ч. ; 4ч / под. ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 232-235.

9. Юшманов В.Н. Организационные и технические принципы формирования автоматизированного рабочего места специалиста по электрохимической защите // М-лы отрасл. совещ. по проблемам защиты от коррозии (п. Небуг, 12-15 мая 2009 г.) – М.: ООО «Газпром экспо», 2009 – С. 105-110.

10. Юшманов В.Н. Проблемы строительства подводных газопроводов на примере подводного перехода СМГ Бованенково-Ухта через Байдарацкую губу Карского моря // М-лы отрасл. совещ. по проблемам защиты от коррозии (п. Небуг, 12-15 мая 2009 г.) – М.: ООО «Газпром экспо», 2009 – С. 163-167.

11. Юшманов В.Н. Организация системы диагностики коррозионного состояния газопроводов с их ранжированием по классам эксплуатационной надежности и результатам обследований объектов // М-лы отрасл. совещ. по проблемам защиты от коррозии (п. Небуг, 12-15 мая 2009 г.) – М.: ООО «Газпром экспо», 2009. – С. 32-35.

12. Юшманов В.Н., Александров Ю.В., Ивонин А.А. Организация системы диагностики коррозионного состояния газопроводов на основе ранжирования по классам эксплуатационной надежности // Москва: Науч.-техн. сбор. Транспорт и подземное хранение газа – 2010 - № 2, С. 50-53.

13. Юшманов В.Н., Агинец Р.В. Электрометрическое обследование газопровода в зоне наведенных токов линий электропередач. Ухта // Науч.-техн. сб. «Эффективность освоения запасов углеводородов»; в 4 ч. Ч.3. Надежность и ресурс объектов транспорта газа – Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта – Ухта, 2010. – С. 130-135.

14. Юшманов В.Н., Воронин В.Н., Агинец Р.В. Перспективы применения топливных элементов в качестве автономных источников энергоснабжения объектов линейной части магистральных газопроводов // Науч.-техн. сбор. Транспорт и подземное хранение газа – 2010 - № 2, С. 40-44.

15. Юшманов В.Н., Александров Ю.В. Исследование возможности применения интенсивных измерений в стресс-коррозионном мониторинге

магистральных газопроводов // Наука в нефтяной и газовой промышленности – Тюмень: 2011 – № 1 – С. 2 – 8.

16. Юшманов В.Н. Методы выявления участков газопроводов, подверженных стресс-коррозии // М-лы науч.-технич. семинара «Рассохинские чтения». – Ухта: УГТУ, 2011 – С. 274-277.

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

18. Юшманов В.Н. Вопросы построения схемы электроснабжения объектов линейной части магистральных газопроводов в условиях отсутствия централизованного электроснабжения на примере системы магистральных газопроводов Бованенково-Ухта // М-лы отрасл. совещ. по вопросам защиты от коррозии (г. Астрахань, 17-21 мая 2010 г.) – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – С. 220-227.

19. Юшманов В.Н. Несовершенство нормативной базы в области проведения сертификации противокоррозионной защиты и применения изоляционных покрытий // М-лы отрасл. совещ. по вопросам защиты от коррозии (г. Астрахань, 17-21 мая 2010 г.) – М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – С. 183-190.

20. Юшманов В.Н., Кузьбожев А.С., Козлов Д.И. Исследование возможности применения ультразвука для очитка внешней поверхности труб, установленных в грунт // М-лы науч-техн. конференции (Ухта, 20-23 сент. 2011 г.), Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая – С. 211-214.

21. Юшманов В.Н., Кузьбожев А.С., Козлов Д.И. Технология электрогидравлической очистки поверхности колонны анодных заземлений систем ЭХЗ магистральных газопроводов / М-лы науч-техн. конференции (Ухта, 20-23 сент. 2011 г.), Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая – С. 217-221.

22. Юшманов В.Н., Козлов Д.И., Шишкин И.В. Коррозионные разрушения колонны анодного заземления при эксплуатации // М-лы науч-техн. конференции (Ухта, 20-23 сент. 2011 г.), Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая – С. 225-228.

23. Юшманов В.Н., Александров Ю.В. Внедрение системы контроля и управления работой средств защиты от коррозии на предприятиях ОАО «Газпром» // М-лы науч-техн. конференции (Ухта, 20-23 сент. 2011 г.), Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая – С. 234-238.

24. Юшманов В.Н., Александров Ю.В. Обоснование критерия противокоррозионной защиты газопроводов, предрасположенных к коррозионному растрескиванию под напряжением // М-лы науч-техн. конференции (Ухта, 20-23 сент. 2011 г.), Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая – С. 246-250.

25. Юшманов В.Н. Исследование эффективности катодной защиты трубопроводов от КРН // М-лы седьмой международной науч.-технич. конф. «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» – Новополюк: ПГУ, 2011. – С. 100-101.

26. Юшманов В.Н., Агинея Р.В. Интерпретация результатов интенсивных электроизмерений. Методические указания – Ухта: УГТУ, 2009.

27. Пат. РФ №90215. Автоматизированное устройство диагностики состояния подземных металлических сооружений / Петров Н.Г., Жаров В.В., Жаров Д.В., Юшманов В.Н., Попова Н.В. Заявл. 27.08.2009 г. Опубл. 27.12.2009 г.

Подписано в печать __. __. ____ г. Формат А5

Уч. изд. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ №5628

Отпечатано в отделе механизации и выпуска НТД Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

Лицензия КР №0043 от 9 июня 1998 г.

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1а