



IV Международный
научно-практический семинар

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ,
ПОДВЕРЖЕННЫХ КОРРОЗИОННОМУ
РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

6-8 июня 2018 г.



**ПРОГРАММА СЕМИНАРА.
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
г. Москва

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Нефёдов С.В. кандидат технических наук, председатель Программного и Организационного комитетов, заместитель Генерального директора по науке ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Арабей А.Б. кандидат технических наук, сопредседатель Программного комитета, начальник отдела 123/1/1 ПАО «Газпром»
- Бурутин О.В. начальник отдела 308/7/9 ПАО «Газпром»
- Запевалов Д.Н. кандидат технических наук, директор Центра ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Игошин Р.В. кандидат химических наук, главный технолог отдела 308/2 ПАО «Газпром»
- Ряховских И.В. кандидат технических наук, секретарь Программного комитета, начальник лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Селиванов А.А. кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 308/11/1 ПАО «Газпром»
- Силкин В.М. кандидат технических наук, директор КНТЦ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Григорьев Б.А. чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор, заместитель председателя Организационного комитета, ученый секретарь ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Анисимова Н.А. кандидат экономических наук, директор Учебного центра ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Богданов Р.И. кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Демьянов К.А. начальник отдела ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Кашковский Р.В. кандидат химических наук, секретарь Организационного комитета, ведущий научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Мишарин Д.А. научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
- Федоров И.А. научный сотрудник ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Публичное акционерное общество «Газпром»
Общество с ограниченной ответственностью «Газпром ВНИИГАЗ»

IV Международный научно-практический семинар

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ
ГАЗОПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ КОРРОЗИОННОМУ
РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

6–8 июня 2018 г.

Москва 2018

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Искренне рад приветствовать вас в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» на четвертом семинаре, посвященном повышению надежности магистральных газопроводов ПАО «Газпром», подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН).

Семинар зарекомендовал себя как уникальная площадка обмена знаниями в области стресс-коррозии между работниками Администрации, руководителями и специалистами производственных подразделений дочерних обществ и организаций ПАО «Газпром», научными работниками вузов, научно-исследовательских институтов, руководителями диагностических и ремонтных организаций, производителями инновационной продукции и технологий. Наше мероприятие проводится ежегодно при поддержке ПАО «Газпром» и в 2018 г. приобрело статус международного: в работе семинара примут участие специалисты из Германии, Китая, Кореи и Польши.

Действующая Система управления техническим состоянием и целостностью линейной части магистральных газопроводов ПАО «Газпром» (СУТСЦ МГ) обеспечивает должный контроль за их стресс-коррозионным состоянием. Однако с увеличением сроков эксплуатации магистральных газопроводов ПАО «Газпром» в условиях деградации свойств защитных покрытий все большую значимость приобретают задачи планирования и рационального распределения ресурсов на техническое диагностирование и ремонт труб с дефектами КРН.

Реализованные ООО «Газпром ВНИИГАЗ» системные исследования и натурные испытания труб со стресс-коррозионными повреждениями экспериментально подтвердили возможность торможения процесса КРН МГ при условии исключения доступа коррозионной среды к поврежденной поверхности стали.



С.В. Нефёдов
к.т.н., председатель
Программного и
Организационного
комитетов, заместитель
Генерального директора
по науке
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



А.Б. Арабей
к.т.н., сопредседатель
Программного комитета,
начальник отдела 123/1/1
ПАО «Газпром»



И.В. Ряховских
к.т.н., секретарь
Программного комитета,
начальник лаборатории
исследования
процессов КРН
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Трубы со стресс-коррозионными повреждениями основного металла глубиной до 10 % от толщины стенки трубы обладают существенным запасом прочности, а указанные повреждения не представляют опасности в отношении надежности МГ в среднесрочном периоде (до следующего обследования). Полученные результаты позволяют уже сейчас перейти к пересмотру требований к эксплуатации и ремонту МГ.

В начале 2018 г. в ПАО «Газпром» допущены к применению на МГ инновационные защитные покрытия, содержащие в своем составе ингибирующие композиции, применение которых в трассовых условиях минимизирует риски развития дефектов КРН.

Руководство ПАО «Газпром» особое внимание уделяет повышению качества технического диагностирования МГ, развитию средств внутритрубной диагностики и внедрению инновационных технологий неразрушающего контроля труб и сварных соединений. В ближайшей перспективе применение инновационных диагностических комплексов на МГ приведет к существенному увеличению регистрируемых аномалий, в том числе от стресс-коррозионных повреждений различной глубины. Вероятным ключевым направлением деятельности в области исследования процессов КРН МГ представляется разработка расчетно-экспериментальных и кинетических моделей процесса, обеспечивающих достоверный прогноз ресурса поврежденных труб для адресного планирования капитального ремонта и обоснованного назначения междиagnostических интервалов. Перспективным является объединение российских и зарубежных лабораторий для проведения системных исследовательских работ в области коррозионно-механической прочности и долговечности стальных труб с учетом широкой номенклатуры труб и региональных условий эксплуатации МГ.

По мере развития компьютерных технологий все чаще в смежных отраслях науки для решения сложных многофакторных задач применяются алгоритмы искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа данных. Следует воспользоваться международным опытом и адаптировать существующие компьютерные технологии для прогнозирования многофакторного процесса коррозионно-механического разрушения сталей в рамках СУТСЦ газотранспортной системы в условиях неполных или зашумленных исходных данных технического диагностирования.

С учетом перспективных направлений исследований в области КРН МГ программа семинара предусматривает доклады по следующим основным тематикам:

- моделирование процессов КРН МГ с учетом результатов испытаний и разработка элементов интеллектуальных систем технического диагностирования;
- развитие средств неразрушающего контроля для обнаружения и определения размеров дефектов КРН;

- реализация программы долгосрочных испытаний труб с дефектами КРН, эксплуатируемых на объектах ПАО «Газпром», включающей экспериментальные работы по исследованию процессов КРН;
- выбор протяженных участков МГ для переизоляции в 2019–2020 гг. в соответствии с Порядком работ при трассовой переизоляции протяженных участков МГ с повреждениями поверхности металла глубиной до 10 % от толщины стенки;
- разработка и внедрение в ПАО «Газпром» элементов интеллектуального анализа данных технического диагностирования для прогнозирования коррозионного и стресс-коррозионного состояния МГ;
- развитие малозатратных технологий ремонта труб с дефектами КРН с применением защитных покрытий с ингибирующими композициями при проведении трассового ремонта МГ;
- внедрение методов оценки агрессивности грунтов и классификация участков МГ по степени опасности в отношении подпленочной коррозии и КРН;
- анализ методов расчета прочности и работоспособности газопроводов с дефектами типа КРН;
- разработка программы научно-технических мероприятий, направленных на профилактику образования и развития коррозионных процессов под отслоением защитного покрытия МГ.

Особо отмечаю, что по итогам текущего семинара в 2019 г. запланирована публикация специализированного выпуска (сборника статей) по теме коррозионного растрескивания под напряжением трубопроводов в журнале «Вести газовой науки», входящем в перечень ВАК. Статьи следует направлять до конца 2018 г. на официальный адрес семинара: SCC@vniigaz.gazprom.ru.

В завершение хочу пожелать успешной работы всем участникам семинара. Уверен, что совместными усилиями мы сможем достичь значительных успехов как в понимании механизма КРН и отдельных его аспектов, так и в нормативно-техническом регулировании процесса эксплуатации магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии, разработке требований к новым видам трубной продукции и защитных покрытий, а также внедрении современного оборудования и технологий для диагностирования и ремонта трубопроводов.

ПРОГРАММА

IV Международного научно-практического семинара

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

п. Развилка

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

5 июня 2018 г.

Заезд участников семинара.
Заселение в гостиницу ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

6 июня 2018 г.

9.00–9.30	Регистрация участников семинара. Кофе-брейк (блок «Е»)
9.30–9.35	ОТКРЫТИЕ СЕМИНАРА С.В. Нефёдов, заместитель Генерального директора по науке ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
9.35–10.00	Научно-технические аспекты профилактики коррозионного растрескивания под напряжением на газопроводах ПАО «Газпром». Состояние проблемы и перспективы решения Арабей Андрей Борисович (ПАО «Газпром»)
10.00–10.30	Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей Ряховских Илья Викторович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)
10.30–11.00	Стресс-коррозия как проявление феномена замедленного разрушения металла газопроводов Есиев Таймураз Сулейманович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

<p>11.00–11.30</p>	<p>Влияние малоамплитудных переменных и остаточных напряжений на коррозионное растрескивание высококачественной трубной стали</p> <p style="text-align: right;">Фу Аньцин (НИИ трубной продукции Китайской национальной нефтегазовой корпорации)</p>
<p>11.30–12.00</p>	<p>Совершенствование моделей развития коррозионных дефектов для задач прогнозирования технического состояния магистральных газопроводов</p> <p style="text-align: right;">Запевалов Дмитрий Николаевич (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
<p>12.00–12.30</p>	<p>Унифицированные подходы к расчетной оценке прочности трубопроводных конструкций с трещиноподобными дефектами</p> <p style="text-align: right;">Силкин Виктор Михайлович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
<p>12.30–13.30</p>	<p style="text-align: center;">Фотографирование участников семинара. Обед (ресторан гостиницы)</p>
<p>13.30–14.00</p>	<p>Опыт эксплуатации и планирования ремонта участков газопроводов, подверженных КРН</p> <p style="text-align: right;">Козляков Владимир Александрович (ООО «Газпром трансгаз Югорск»)</p>
<p>14.00–14.30</p>	<p>Особенности выявления дефектов КРН различными средствами диагностирования и методами неразрушающего контроля</p> <p style="text-align: right;">Лазарев Владимир Львович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
<p>14.30–15.00</p>	<p>Обследования газопроводов с использованием ультразвуковых технологий: практика</p> <p style="text-align: right;">Гюнтер Кристина («Опен Грид Юроп», Германия)</p>

15.00–15.30	<p>Мониторинг напряженно-деформированного состояния газопроводов как элемент системы предупреждения их коррозионного растрескивания</p> <p style="text-align: right;">Ляпичев Дмитрий Михайлович (АО «Газпром энергосервис»)</p>
15.30–16.00	Кофе-брейк
16.00–16.30	<p>Эволюция требований к сталям повышенной коррозионной стойкости, эксплуатируемым в нейтральных водных средах, в том числе при контакте с грунтовыми электролитами</p> <p style="text-align: right;">Родионова Ирина Гавриловна (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)</p>
16.30–17.00	<p>Факторы развития и возможности мониторинга дефектов КРН на трубопроводах ООО «Газпром трансгаз Самара»</p> <p style="text-align: right;">Афанасьев Алексей Викторович (ООО «Газпром трансгаз Самара»)</p>
17.00–17.30	<p>Предложения по разработке методики классификации эксплуатируемых участков магистральных газопроводов по предрасположенности к КРН</p> <p style="text-align: right;">Коваленко Сергей Владимирович (ООО «Газпром газнадзор»)</p>
17.30–18.00	<p>Прогнозирование объема замены труб при капитальном ремонте газопроводов, подверженных КРН</p> <p style="text-align: right;">Подольская Вера Владимировна (ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»)</p>
18.00–20.00	Торжественный ужин (блок «Е»)

7 июня 2018 г.

Продолжение работы семинара	
9.00–9.30	Кофе-брейк
9.30–10.00	Концепция развития испытательного комплекса ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Перспективные направления современных фундаментальных и прикладных исследований в области коррозионно-механического разрушения трубных сталей Богданов Роман Иванович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)
10.00–10.30	Оценка несущей способности и остаточного ресурса труб магистральных газопроводов с трещинами КРН по результатам полигонных испытаний в ООО «Газпром трансгаз Ухта» Погуляев Степан Иванович (ООО «Газпром трансгаз Ухта»)
10.30–11.00	Реализация технологии консервации коррозионного растрескивания под напряжением на магистральных газопроводах ООО «Газпром трансгаз Чайковский» Шкапенко Артём Алексеевич (ООО «Газпром трансгаз Чайковский»)
11.00–11.30	Оценка склонности к хрупкому разрушению конструкционных сталей Кудря Александр Викторович (НИТУ «МИСиС»)
11.30–12.00	Создание образцов с заданным распределением остаточных напряжений для исследования коррозионных свойств материалов Тихонов Сергей Валериевич (МГТУ имени Н.Э. Баумана)
12.00–12.30	О влиянии кристаллографической текстуры и остаточных напряжений на развитие трещин КРН в трубах магистральных газопроводов Крымская Ольга Александровна (НИЯУ «МИФИ»)

12.30–13.30	Обед (ресторан гостиницы)
13.30–14.00	<p>Методика оценки агрессивности грунтов, провоцирующих коррозионное растрескивание под напряжением</p> <p>Игнатенко Василий Эдуардович (Институт физической химии и электрохимии РАН)</p>
14.00–14.30	<p>Оценка остаточных напряжений в сварных швах с точки зрения их влияния на коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов</p> <p>Бровко Виктор Васильевич (НУЦСК при МГТУ имени Н.Э. Баумана)</p>
14.30–15.00	<p>Особенности коррозионного разрушения магистральных газопроводов под отслоившимся изоляционным покрытием</p> <p>Кашковский Роман Владимирович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
15.00–15.30	<p>Экспериментальное определение скорости развития локальных коррозионных повреждений на поверхности трубных сталей в растворах, имитирующих грунтовый электролит</p> <p>Рыбкина Алевтина Александровна (Институт физической химии и электрохимии РАН)</p>
15.30–15.45	Кофе-брейк
15.45–16.15	<p>Создание сверхпрочных композитных муфт для восстановления и поддержания эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов (ЛЧ МГ) высокого давления</p> <p>Смирнов Михаил Михайлович (ООО «НПО «Центротех»)</p>
16.15–16.40	<p>Оценка показателей надежности трубопроводных конструкций с трещиноподобными дефектами</p> <p>Овсянников Евгений Николаевич (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>

16.40–17.05	<p>Гибридные металлокомпозитные трубы для газопроводов, подверженных растрескиванию под напряжением</p> <p style="text-align: right;">Хоменко Владимир Иванович (Российский союз нефтегазостроителей)</p>
17.05–17.30	<p>Оценка влияния природных факторов КРН аварий на основе геопространственного моделирования и анализа</p> <p style="text-align: right;">Власова Лада Владимировна (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
17.30–18.00	<p>Ужин (ресторан гостиницы)</p>
18.00–20.00	<p>ИСТОРИЧЕСКАЯ ВИКТОРИНА</p> <p>для участников семинара и сотрудников Института в честь 70-летнего юбилея ООО «Газпром ВНИИГАЗ»</p> <p>(блок «Е»)</p>

8 июня 2018 г.

Продолжение работы семинара	
9.00–9.30	Кофе-брейк
9.30–9.50	Информационная система анализа данных внутритрубной диагностики IntroScan как элемент системы повышения эффективности технического диагностирования технологических трубопроводов компрессорных станций Ворончихин Станислав Юрьевич (ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи»)
9.50–10.10	Состояние внедрения системы идентификации коррозионного растрескивания под напряжением объектов ООО «Газпром трансгаз Москва» Измайлов Александр Борисович (ООО «Газпром трансгаз Москва»)
10.10–10.30	Сравнительный анализ результатов работ подрядных организаций по обнаружению и идентификации стресс-коррозионных дефектов на участках ЛЧ МГ ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» по результатам ВТД Зазнобин Виктор Александрович (ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»)
10.30–10.50	Обследование стресс-коррозионных участков трубопроводов с применением роботизированного диагностического комплекса IntroScan Митуркин Алексей Васильевич (ООО «ЭНТЭ»)
10.50–11.10	Прогнозирование стресс-коррозионной поврежденности участков магистральных газопроводов на основе нелинейных методов оптимизации и алгоритмов нейронных сетей Мишарин Дмитрий Андреевич (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

11.10–11.30	<p>Особенности коррозионного растрескивания под напряжением в сероводородных средах. Трубная продукция для месторождений газа, содержащих сероводород</p> <p style="text-align: right;">Коницев Константин Борисович (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)</p>
11.30–11.50	<p>Повышение ресурса усиленных патрубков (велдолетов) на основе компьютерного моделирования их усталостной прочности</p> <p style="text-align: right;">Пономарёв Михаил Александрович (МГТУ имени Н.Э. Баумана)</p>
11.50–12.10	<p>Мониторинг переходной активности суперсистемы «литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера» для прогнозирования землетрясений в зонах магистральных газопроводов</p> <p style="text-align: right;">Логинов Евгений Леонидович (Институт проблем рынка РАН)</p>
12.10–12.30	<p>Перспективы механохимической концепции для понимания и предотвращения коррозионного растрескивания магистральных газопроводов</p> <p style="text-align: right;">Гутман Эммануил Маркович (Университет имени Бен-Гуриона, Израиль)</p>
12.30–14.00	<p style="text-align: center;">Выдача удостоверений о повышении квалификации. Обсуждение предложений и принятие решений. Обед (ресторан гостиницы)</p>
ЗАКРЫТИЕ СЕМИНАРА	

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Научно-технические аспекты профилактики коррозионного растрескивания под напряжением на газопроводах ПАО «Газпром». Состояние проблемы и перспективы решения

А.Б. Арабей

ПАО «Газпром»
A.Arabey@adm.gazprom.ru

Одним из основных факторов, определяющих техническое состояние, техногенный риск и надежность магистральных газопроводов (МГ) ПАО «Газпром» с длительными сроками эксплуатации (25–30 лет и более), является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) металла труб. КРН определяется комплексом технических, технологических причин и внешних природных условий, характеризуется сложностью и нелинейностью развития процессов, имеет широкий географический охват.

В период с 1996 по 2004 гг. ОАО «Газпром» для решения комплекса задач повышения надежности МГ, подверженных КРН, был сформирован Координационный совет, работа которого осуществлялась при научно-технической поддержке ООО «ВНИИГАЗ». Результатами деятельности Координационного совета стал ряд системных решений (организация технического обслуживания, мониторинга, разработка средств технического диагностирования, промышленные образцы оборудования и технологии для ремонта трубопроводов, новые виды защитных покрытий), позволяющих существенно снизить ежегодное число отказов (интенсивность отказов) МГ по причине КРН.

В 2005 г. по решению производственного и научно-технического департаментов ОАО «Газпром» на базе ООО «ВНИИГАЗ» организована специализированная лаборатория мониторинга и прогноза стресс-коррозионных процессов, специалистами которой в развитие ранее выполненных работ выработаны общие подходы к решению проблемы профилактики и защиты МГ от КРН, разработаны базовые нормативные документы системы стандартизации ОАО «Газпром» в области эксплуатации МГ и организации специализированных коррозионно-механических испытаний трубных сталей.

С 2013 г. в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» действует лаборатория исследования процессов КРН, ключевой задачей которой является разработка научно обоснованных эффективных мероприятий Системы управления техническим состоянием и целостностью газотранспортной системы ПАО «Газпром», направленных на обеспечение длительной работоспособности МГ с коррозионно-механическими повреждениями при оптимизации оперативных затрат на техническое диагностирование и ремонт. В кратчайшие сроки совместно с крупнейшими газотранспортными обществами ПАО «Газпром» были реализованы комплексные лабораторные

и натурные испытания труб со стресс-коррозионными повреждениями, по результатам которых разработаны критерии ранжирования повреждений по степени опасности и допустимости до эксплуатации, научно обоснована возможность эксплуатации газопроводов при наличии неопасных стресс-коррозионных дефектов. Разработаны технические решения по повышению функциональных свойств защитных покрытий трассового нанесения за счет применения в их составе ингибирующих КРН композиций.

В настоящее время с учетом накопленного за период исследования проблемы научно-технического задела ПАО «Газпром» при непосредственном участии ООО «Газпром ВНИИГАЗ» появляются существенные основания для внедрения эффективных методов и технологий профилактики МГ за счет развития:

- расчетно-экспериментального моделирования кинетики процесса КРН как для новых, так и для длительно эксплуатируемых трубопроводов по результатам серийных гидравлических и лабораторных испытаний труб, в том числе с учетом воздействия на поврежденную поверхность стали коррозионной среды, катодной и анодной поляризации;

- экспериментального комплекса ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и дочерних обществ для оценки коррозионно-механической прочности труб и долговечности МГ в условиях воздействия коррозионной среды;

- технологий ремонта трубопроводов с применением инновационных изоляционных покрытий и материалов, в том числе содержащих ингибирующие КРН композиции;

- методов компьютерного моделирования и внедрения интеллектуальных систем, обеспечивающих комплексный учет влияния факторов среда–металл–напряжения при прогнозировании процессов КРН.

Закономерности коррозионного растрескивания под напряжением трубных сталей

И.В. Ряховских, Р.И. Богданов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
I_Ryakhovskikh@vniigaz.gazprom.ru

Единая система газоснабжения представляет собой уникальный технологический комплекс, ключевым элементом которого является крупнейшая в мире газотранспортная система ПАО «Газпром» (ГТС). К настоящему времени около 80 % магистральных газопроводов (МГ) большого диаметра в составе ГТС эксплуатируется за пределами нормативного срока службы защитных покрытий. В результате при доступе коррозионной среды к поверхности труб в местах отслоения изоляционных покрытий происходит образование и постепенное развитие коррозионных процессов, наиболее опасным среди которых является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

В докладе рассмотрены характерные сценарии КРН стальных труб в составе МГ, описывающие основные стадии процесса, скорости и условия их реализации. Для конструктивно различных труб диаметром 1420 мм, произведенных на заводах Mannesmann и Харцызском трубном из малоуглеродистых сталей класса прочности X70, после длительной эксплуатации в составе МГ реализован комплекс электрохимических, коррозионных, коррозионно-механических, механических, ресурсных испытаний, а также рентгеновских исследований послойной текстурной неоднородности и остаточных напряжений, металлофизических исследований микроструктуры и дислокационной субструктуры фрагментов труб. На долю исследованных труб приходится около половины аварий МГ по причине КРН и порядка 83 % аварий среди труб диаметром 1420 мм, что обеспечивает существенный консерватизм полученных результатов при построении кинетической модели.

Процесс образования трещин в сталях в основном происходит в местах формирования локальных коррозионных повреждений, очагами которых являются скопления неметаллических включений, выходящих на поверхность стали. Кинетика роста вновь образованных трещин определяется уровнем остаточных технологических напряжений на поверхности стали и аспектным отношением трещин. Показано, что параметром, характеризующим возможность роста или торможения трещин на начальных стадиях процесса, является уровень текстурной неоднородности материала и остаточных технологических напряжений во внешних слоях стенки трубы. Фактором, способствующим релаксации напряжений в вершине трещины, является расположенная здесь зона пластической деформации. После циклических испытаний труб, моделирующих работу МГ, вблизи вершин коррозионно-механических трещин глубиной до 3 мм не установлено признаков усталостного прироста и существенных изменений дислокационной субструктуры. Однако по результатам фрактографических исследований изломов для большинства из них после циклических испыта-

ний отмечается нарушение целостности оксидных пленок, что при доступе коррозионной среды может стимулировать рост трещин по механизму локального анодного растворения. Показано, что при статических и малоамплитудных циклических нагрузках скорость роста трещины в испытательных средах с рН 5,5 и 7,0 ускоряется в присутствии компонентов грунта (сульфид, карбонат и фосфат ионы), стимулирующих анодное растворение металла.

По результатам выполненных исследований установлено, что незначительные повреждения КРН глубиной до 10 % от толщины стенки трубы не представляют непосредственной опасности в отношении эксплуатационной надежности МГ, а прогнозируемые скорости развития таких повреждений при воздействии на них коррозионной среды не превышают 0,3-0,4 мм/год. Поэтому в случае сохранения при эксплуатации указанных повреждений или необнаружения при техническом диагностировании участков линейной части МГ и технологических трубопроводов компрессорных станций средствами внутритрубной диагностики их размеры не достигнут аварийных значений за нормативный междиагностический период до 5 лет. Полученный результат позволяет научно обоснованно оставлять трубы с дефектами в эксплуатации до проведения капитального ремонта. Предотвращение доступа коррозионной среды к поврежденной дефектами КРН поверхности труб глубиной до 15 % от толщины стенки трубы, например, посредством их переизоляции, обеспечит полную остановку (консервацию) данного процесса. Исключением являются коррозионно-механические трещины любых размеров, расположенные в сварных соединениях и по линии сплавления, которые всегда следует рассматривать как потенциально опасные и подлежащие устранению в возможно короткие сроки после обнаружения.

Стресс-коррозия как проявление феномена замедленного разрушения металла газопроводов

Т.С. Есиев

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
T_Esiev@vniigaz.gazprom.ru

В докладе представлена концепция, согласно которой стресс-коррозионная повреждаемость металла газопроводов является частным случаем проявления более общего явления, называемого замедленным разрушением металла. Согласно известным положениям механики материалов замедленным разрушением называют разрушение детали (образца), происходящее в процессе длительного действия постоянной нагрузки при напряжениях ниже расчетных (т.е. ниже предела текучести). Помимо стресс-коррозии к проявлению замедленного разрушения металла газопроводов следует отнести случаи разрушения труб с механическими повреждениями – задирами и рисками, а также разрушения сварных соединений трубопроводов, наблюдаемые после длительных сроков эксплуатации. Показано, что, несмотря на существенные различия перечисленных видов повреждаемости металла труб, общими для них являются зависимость действующих в металле напряжений и деформаций от времени, а также факторы, контролирующие процесс разрушения.

Отмечается, что отличительным признаком замедленного разрушения является его кинетический характер, а именно то, что оно включает последовательно инкубационный период, стадию докритического подрастания трещины (группы трещин) и заключительный этап нестабильного роста разрушающей трещины.

Существующие классические модели коррозионного растрескивания под напряжением не в полной мере способны объяснить природу стресс-коррозии газопроводов. Во-первых, в подавляющем большинстве случаев составы грунтовых вод не содержат необходимых концентраций агрессивных компонентов, вызывающих растрескивание. Во-вторых, в отличие от известных форм коррозионного растрескивания, в лабораторных условиях до сих пор не удается воспроизвести процесс стресс-коррозии при статических нагрузках. На сегодня отсутствует также полное понимание механизма развития трещин от задиров и в сварных соединениях труб. Довольно часто для объяснения механизма развития трещин (в том числе и стресс-коррозионных) в трубах привлекают усталостный механизм (механизм коррозионной усталости). Не отрицая роль переменных (а вернее, повторно-статических) напряжений, отмечается, что данный механизм не охватывает всего многообразия случаев замедленного разрушения трубопроводов, для реализации которого переменные напряжения не являются обязательными.

На основе анализа материалов разрушений труб с перечисленными видами повреждений предложена модель замедленного разрушения трубных сталей, обладающих высокой пластичностью и вязкостью, особенностью которой является учет того, что зарождение и рост трещины

от дефекта контролируется процессом непрерывной пластической деформации (низкотемпературной ползучести, *англ.* cold creep) в локальных участках металла труб, отличающихся повышенным напряженным состоянием. При этом движущей силой процесса ползучести (а, следовательно, и замедленного разрушения) является наличие в нагруженном теле неоднородностей полей напряжений, вызванных различными причинами.

Согласно модели кинетика ползучести зависит от структуры (в том числе тонкой), фазового состава и физико-механических свойств металла трубы, но главное – от уровня и темпа изменения напряжений в локально неоднородной зоне. В обычных условиях ползучесть носит быстро затухающий характер, подчиняясь логарифмическому закону: $\varepsilon_{\text{п}} \sim \ln t$, где $\varepsilon_{\text{п}}$ – деформация ползучести, t – время. Однако под влиянием коррозионно-активных (или поверхностно-активных) сред низкотемпературная ползучесть может продолжаться и более продолжительное время, подчиняясь другому выражению: $\varepsilon_{\text{п}} \sim t$. В результате непрерывно протекающей пластической деформации в локальных объемах металла происходит исчерпание пластичности, наступающее по достижении накопленной пластической деформацией критического значения ($\varepsilon_{\text{пл}} = \varepsilon_{\text{кр}}$) и завершающееся образованием трещин. Представленная модель предусматривает реализацию нескольких возможных сценариев развития процесса: 1) продолжающийся рост единичной трещины, завершающийся образованием сквозного повреждения – свища; 2) продолжающийся рост группы близко расположенных трещин, завершающийся их спонтанным объединением и разрывом перемычки металла под дефектами (разрывом трубы); 3) постепенная стабилизация трещин и прекращение их дальнейшего развития. Последний сценарий предполагает затухание скорости ползучести, происходящее как по причине роста сопротивления дислокационным перемещениям в решетке металла (деформационного упрочнения металла), так и в связи со снижением (релаксацией) локальных напряжений в окрестности трещины (поля трещин).

Отмечается также, что непрерывная пластическая деформация (ползучесть) и последующее трещинообразование металла трубы представляют, по сути, единый релаксационный процесс, в ходе которого система (труба под давлением) «приспосабливается» к изначально неблагоприятному локальному напряженному состоянию.

Показано, что помимо прочего (рабочего давления в трубопроводе, диаметра и толщины стенки трубы) кинетика ползучести металла зависит от запаса упругой энергии, накопленной в трубопроводе. Так, в газопроводах поддержание требуемого темпа совершения пластических сдвигов в металле трубы обеспечивается за счет повышенного запаса упругой энергии, сосредоточенной как в металле труб, так и в сжатом газе. Поэтому замедленное разрушение труб магистральных газопроводов представляет большую опасность, чем в жидкостных трубопроводах (нефте- и продуктопроводах).

Влияние малоамплитудных переменных и остаточных напряжений на коррозионное растрескивание высококачественной трубной стали

Аньцин Фу¹, Чуньён Хо¹, Хе Ли¹, Чжэнкай Се²

1 – НИИ трубной продукции КННК,
2 – Департамент науки и технологий КННК
fuanqing@cnpc.com.cn

Трубы из стали X-80 успешно использовались в проекте трубопровода Запад – Восток в Китае. При этом хорошо известно, что высокопрочная трубопроводная сталь более подвержена коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН), чем трубопроводная сталь более низкой категории прочности. Для исследования процессов КРН трубопроводной стали X-80 были использованы электрохимические измерения, испытания при постоянной скорости деформации и на коррозионную усталость.

Для изучения влияния малоамплитудных переменных нагрузок скорость роста трещины исследовалась при двух различных коэффициентах асимметрии цикла (величина R). Установлено, что скорость роста трещины напрямую связана с величиной R и приложенным напряжением. Скорость роста трещины возрастает при уменьшении величины R или увеличении уровня приложенного напряжения в растворе NS4. При $R = 0,85$, приложенном напряжении 100 и 85 % от δ_T и частоте переменного напряжения, равной 0,02 Гц, скорость роста составляла $2,23 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл и $8,3 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл, а при $R = 0,75$ и схожих прочих условиях скорость роста трещины составляла $1,98 \cdot 10^{-4}$ мм/цикл и $1,27 \cdot 10^{-4}$ мм/цикл.

Кроме того, испытания без переменных напряжений, проведенные при тех же уровнях приложенных напряжений, показали, что переменные напряжения малых амплитуд оказывают повышенное влияние на развитие трещины. Для оценки влияния остаточных напряжений восприимчивость к КРН основного металла трубопроводной стали X-80 и ее сварных швов исследовалась в среде NS4 и H_2S -содержащем растворе при наложении постоянной нагрузки и остаточных напряжений. По итогам испытаний в среде NS4 ни в основном металле, ни в сварном шве КРН не наблюдалось как при условии наложения только постоянных напряжений величиной 50 и 90 % δ_s , так и при совместном присутствии указанных постоянных и остаточных напряжений величиной 104–303 МПа, хотя коррозия стали при совместном присутствии двух видов напряжений усиливалась.

Стресс-коррозионное поведение стали также было исследовано в H_2S -содержащем растворе. КРН не было обнаружено в основном металле трубы и на сварных швах, когда уровень приложенных напряжений не превышал 70 % δ_s , а также отсутствовали остаточные напряжения. С другой стороны, когда уровень остаточных напряжений превышал величину 104 МПа, а постоянные приложенные напряжения отсутствовали, наблюдалось развитие КРН. В то же время КРН всегда обнаруживалось при условии совместного присутствия остаточных напряжений (104–303 МПа) и постоянных приложенных напряжений (50–90 % δ_s). Предрасположенность стали к КРН снижается в ряду сварной шов – зона термического воздействия – основной металл. Результаты этой работы будут полезны для понимания механизма усиления КРН высококачественной трубной стали остаточными и переменными напряжениями малой амплитуды.

Совершенствование моделей развития коррозионных дефектов для задач прогнозирования технического состояния магистральных газопроводов

Д.Н. Запевалов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
D_Zapevalov@vniigaz.gazprom.ru

Рассмотрены основные виды коррозионных воздействий, которые могут оказывать влияние на техническое состояние магистральных газопроводов (МГ).

Основой для оценки опасности коррозии являются результаты обследования технического состояния МГ, контроль внешних воздействий и средств защиты от коррозии.

Для задачи коррозионного прогноза в качестве ключевого показателя принимается скорость развития коррозионного процесса. Параметры коррозионных дефектов и их расположение существенным образом зависят от вида коррозионного воздействия, что должно учитываться при прогнозировании.

Показано, что для обеспечения достоверного прогноза коррозионного состояния МГ в условиях внешнего коррозионного воздействия необходимо определять тип приоритетного коррозионного процесса (в системе «защитное покрытие – коррозионные условия»).

Представлена оценка ряда факторов, влияющих на скорость развития и геометрические характеристики коррозионных дефектов, и параметры оценки таких воздействий. Рассмотрены методы контроля параметров состояния защитных покрытий на этапах строительства и эксплуатации.

На основе комплекса проведенных в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» экспериментальных (натурных и лабораторных) исследований продемонстрированы результаты совершенствования моделей нескольких типов коррозионных процессов.

Унифицированные подходы к расчетной оценке прочности трубопроводных конструкций с трещиноподобными дефектами

В.М. Силкин, В.П. Столов, Е.Н. Овсянников

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
V_Silkin@vniigaz.gazprom.ru

Рассматриваются подходы к оценке прочности трубопроводных конструкций с поверхностными трещиноподобными дефектами, основанные на применении расчетных моделей и критериев нелинейной механики разрушения. Для данных целей наиболее широкое применение получили двухпараметрические критерии интерполяционного типа.

Данные критерии позволяют в согласованном режиме учесть влияние на прочность конструкции двух альтернативных по форме, но связанных между собой на физическом уровне механизмов разрушения – хрупкого и вязкого. В каждом конкретном случае доминирующий тип разрушения зависит от вида и условий нагружения, параметров дефектов и основных механических свойств металла, определяемых по результатам лабораторных испытаний, включая испытания на трещиностойкость. В зависимости от конкретного сочетания параметров может реализоваться некоторый смешанный тип разрушения, зависящий от соотношения между характеристиками прочности при хрупком и вязком типах разрушения. Существующие адаптированные варианты интерполяционных критериев позволяют более точно учесть влияние дополнительных факторов, таких как влияние остаточных напряжений, наличие площадки текучести, различные ограничения на величину предельных напряжений и деформаций.

В наиболее полной форме рассматриваемые расчетные модели и критерии применены в рамках разработанной и применяемой в ПАО «Газпром» системы обеспечения надежности сварных соединений. В системе применена универсальная иерархическая структура расчетных моделей и критериев прочности сварных соединений с дефектами, адаптированная к составу исходных данных о свойствах конструкционных материалов, результатам неразрушающего контроля и данным о нагрузках и воздействиях с последующим формированием на ее основе многоуровневой системы оценки работоспособности кольцевых сварных соединений. При переходе на более высокий уровень система обеспечивает последовательное снижение консервативности оценок за счет расширения состава исходных данных и применения более точных и сложных расчетных критериев и методов. Проведен значительный объем лабораторных испытаний с целью определения требуемых характеристик основного металла и металла сварных соединений. Разработаны соответствующие методики испытаний и обработки результатов. Накопленный опыт может быть применен для оценки прочности трубопроводных конструкций с поверхностными трещиноподобными дефектами.

Приведены примеры оценки прочности на основе рассмотренных моделей в рамках унифицированного подхода.

Опыт эксплуатации и планирования ремонта участков газопроводов, подверженных КРН

В.А. Козляков

ООО «Газпром трансгаз Югорск»
vkozlyakov@tg.gazprom.ru

В докладе рассматриваются следующие вопросы:

- анализ и динамика изменения стресс-коррозионного состояния участков линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ) и технологических трубопроводов компрессорных станций (ТТ КС);
- анализ достоверности результатов внутритрубной диагностики ЛЧ МГ и ТТ КС по данным выполненных обследований труб при коррозионном растрескивании МГ подрядным и хозяйственным способами;
- результаты диагностики труб с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) в шурфах и на временных площадках ремонта труб неразрушающими методами контроля на участках ЛЧ МГ;
- методика планирования ремонта участков ЛЧ МГ, подверженных КРН;
- опыт эксплуатации, диагностики и ремонта труб с дефектами КРН на участках МГ в Сосьвинском и Комсомольском линейно-производственном управлении МГ.

Особенности выявления дефектов КРН различными средствами диагностирования и методами неразрушающего контроля

И.Л. Вялых¹, В.Л. Лазарев¹, Д.А. Зотов¹, Е.В. Лаптев², А.А. Стенин²

1 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

2 – ООО «НПЦ «ВТД»

V_Lazarev@vniigaz.gazprom.ru

В настоящее время подавляющее большинство дефектоскопов, входящих в состав комплексов внутритрубного технического диагностирования (ВТД) линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ), базируется на применении магнитного неразрушающего контроля (НК). Среди ручных приборов НК широко используются магнитопорошковые и вихретоковые дефектоскопы, применение которых накладывает ряд ограничений и особенностей на возможность выявления трещиноподобных дефектов и, в частности, дефектов КРН.

В качестве основных ограничений, связанных с выявлением трещин, можно отметить:

- существенное влияние геометрических параметров трещин на вероятность их выявления ручными и автоматизированными средствами НК;
- значительное влияние на вероятность выявления и идентификации дефектов КРН основных параметров автоматизированного контроля: скорость движения дефектоскопа, мощность магнитной системы, аппаратного динамического диапазона, равномерности магнитных полей рассеяния в межполюсном промежутке;
- ограничения, связанные с влиянием мешающих факторов при выявлении дефектов КРН в зонах общей коррозии, заводских и монтажных сварных соединений.

Доклад составлен на основе результатов НК в шурфах, выполненного при верификации комплексов ВТД ЛЧ МГ.

В настоящем докладе приведены:

- физические особенности магнитного, вихретокового и акустического НК, связанные с выявлением трещиноподобных дефектов;
- основные задачи, стоящие перед специалистами газотранспортных обществ ПАО «Газпром» и дефектоскопистами диагностических организаций;
- перспективные направления развития средств внутритрубного технического диагностирования ЛЧ МГ ПАО «Газпром».

Обследования газопроводов с использованием ультразвуковых технологий: практика

К. Гюнтер, Й. Стратманн, М. Штайнер

Компания «Опен Грид Юроп»
Christina.Guenther@open-grid-europe.com

Поскольку сами трещины и их рост являются основным риском для целостности газотранспортной системы, их надежное обнаружение и определение размеров имеют большое значение для оценки целостности трубопроводов, содержащих трещины. В докладе рассматривается метод обследования трубопроводов, основанный на ультразвуковых преобразователях. Основное внимание уделяется практике выполнения работ, включая процедуру обследования и ее повторного планирования.

Мониторинг напряженно-деформированного состояния газопроводов как элемент системы предупреждения их коррозионного растрескивания

Д.М. Ляпичев¹, Д.П. Никулина²

1 – АО «Газпром энергетика»,
2 – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
D.Lyapichev@oeg.gazprom.ru

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) является одной из основных причин аварий на линейной части магистральных и технологических трубопроводах компрессорных станций. Так, 23.08.2017 по причине развития дефекта КРН произошла авария на магистральном газопроводе Ямбург – Тула-1, в результате которой произошло разрушение участка газопровода длиной 33 м, выброс четырех фрагментов и сильное возгорание газа. Экономический ущерб от этой аварии превысил 38 млн руб., не считая репутационных потерь, вызванных значительным общественным резонансом.

Как показали исследования кинетики роста трещин, одним из факторов, обуславливающих ускоренный рост дефектов КРН, является повышенный уровень механических напряжений в металле стенки газопровода, в том числе напряжений, продольных оси газопровода.

Для оценки уровня напряжений в настоящее время применяются расчетные, экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы. Вследствие значительного вклада в реальное напряженное состояние металла остаточных технологических напряжений (сварочных, монтажных и т.п.) наибольшей точности позволяет достигнуть применение расчетно-экспериментального метода в режиме непрерывного мониторинга.

В работе обосновывается целесообразность применения средств мониторинга напряженно-деформированного состояния в качестве элементов системного решения по предупреждению аварийных отказов по причине ускоренного развития процесса КРН.

Эволюция требований к сталям повышенной коррозионной стойкости, эксплуатируемым в нейтральных водных средах, в том числе при контакте с грунтовыми электролитами

*И.Г. Родионова¹, А.В. Амежнов¹, О.Н. Бакланова¹, А.И. Зайцев¹,
И.В. Ряховских², Р.И. Богданов²*

1 – ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»,

2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

igrodi@mail.ru

Повышение коррозионной стойкости стальной металлопродукции в нейтральных водных средах важно не только для конструкций, работающих в атмосферных условиях, морской воде, использующихся для внутри-промысловых трубопроводов, но и для магистральных газопроводов (МГ). Это приводит к увеличению инкубационного периода появления очагов коррозии при контакте поверхности труб МГ с грунтовым электролитом и к снижению скорости анодного растворения металла в устье трещины на последующих стадиях развития коррозионного растрескивания под напряжением (КРН).

Для оценки коррозионной стойкости в водных средах трубных сталей разработана новая электрохимическая методика, в соответствии с которой критерием коррозионной стойкости является плотность тока насыщения, фиксируемого при испытаниях в модельной среде при определенном потенциале. Этот показатель зависит от химического состава, структурного состояния стали, ее загрязненности неметаллическими включениями разных типов. Результаты испытаний по методике хорошо коррелируют с реальными сроками эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов.

Испытания по методике образцов труб МГ с дефектами КРН после их эксплуатации, а также после дополнительных гидравлических натуральных испытаний показали, что критерием для прогнозирования скорости дальнейшего развития дефектов КРН и возможности дальнейшего использования таких труб может быть прирост плотности тока насыщения после гидравлических натуральных испытаний. При значении данного показателя менее $0,3 \text{ мА/см}^2$ вероятность дальнейшего развития дефектов КРН минимальна, и такие трубы МГ можно рекомендовать для дальнейшего использования в системе МГ.

Факторы развития и возможности мониторинга дефектов КРН на трубопроводах ООО «Газпром трансгаз Самара»

А.В. Афанасьев¹, Д.В. Савин¹, Д.Н. Бельков¹, Д.А. Мишарин²

1 – ООО «Газпром трансгаз Самара»,

2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

AV.Afanasev@samaratransgaz.gazprom.ru

Дефекты коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) глубиной до 10 % от толщины стенки трубы, согласно исследованиям ВНИИГАЗа, не оказывают влияния на надежность газопровода, если предприняты меры для предотвращения их развития. При внедрении нормативной документации, позволяющей оставлять трубы с дефектами КРН малой глубины в составе объектов Единой системы газоснабжения при капитальном ремонте, качество диагностической информации станет критически важным.

В докладе представлены итоги работы, проводившейся в ООО «Газпром трансгаз Самара» с 2012 г. Обобщены результаты исследований образцов КРН фрактографическими, металлографическими, микроскопическими методами. Приведены результаты количественной оценки циклических эксплуатационных нагрузок линейной части МГ за 11 лет. Систематизированы результаты испытаний, моделирующих работу газопровода при аналогичных нагрузках в течение 20 лет. Описаны результаты механических и усталостных испытаний пораженных КРН труб. Содержится статистический анализ распространения КРН на трубах различных производителей на примере реального участка капитального ремонта МГ. Приведены результаты численного моделирования методом конечных элементов и функции зависимости глубины трещины от ее геометрических параметров на трубах, находящихся под давлением. Использование данных функций при обследованиях в дополнение к приборным методам позволит более точно оценить глубину трещин при диагностике и стать основой средств мониторинга дефектов КРН.

**Предложения по разработке методики классификации
эксплуатируемых участков магистральных газопроводов
по предрасположенности к КРН**

С.В. Коваленко¹, В.Д. Шапиро¹, А.М. Почечуев²

1 – ООО «Газпром газнадзор»,

2 – ПАО «Газпром»

kovalenko@gaznadzor.gazprom.ru

В докладе предложен подход к проведению предварительного прогноза возможности отказов на линейной части магистральных газопроводов (МГ) по причине коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) на 3-4 года, исходя из накопленных ретроспективных данных об авариях, с учетом тренда стресс-коррозионных аварий.

Показан способ распределения прогнозируемого числа аварий по предприятиям, конструктивным элементам и причинам аварий.

Описан алгоритм первичного определения потенциально опасных участков МГ с точки зрения возможности аварий по причине КРН с применением аппарата распознавания образов, с использованием базы данных по авариям и результатов тестового шурфования.

Сформулированы предложения по классификации участков, отнесенных к потенциально опасным с точки зрения возможности аварий по причине КРН.

Прогнозирование объема замены труб при капитальном ремонте газопроводов, подверженных КРН

В.В. Подольская

ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»
V.Podolskaya@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

Недостаточная достоверность выявления и идентификации дефектов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) по данным внутритрубной диагностики (ВТД) обуславливает необходимость использования параметра «прогнозируемое количество элементов с дефектами КРН, не выявленными ВТД» при расчете показателей технического состояния и планировании ремонта участков газопроводов, подверженных КРН.

В докладе:

1. Рассмотрен опыт использования для расчета количества труб, подлежащих замене, методики определения прогнозируемого числа труб со стресс-коррозионными трещинами, изложенной в нормативно-технической документации ПАО «Газпром».

2. Предложена альтернативная методика определения прогнозируемого количества элементов, поврежденных КРН, позволяющая:

а) оптимизировать объемы дополнительного диагностического обследования на стадии, предшествующей расчету показателей технического состояния участка и выбора технологии ремонта;

б) повысить точность определения объема замены на стадии планирования капитального ремонта участков газопроводов, подверженных КРН, за счет использования геоинформационных прогнозирующих технологий.

3. Изложен опыт применения представленной методики при планировании капитального ремонта участков газопроводов, подверженных КРН, эксплуатируемых ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург».

**Концепция развития испытательного комплекса
ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Перспективные направления
современных фундаментальных и прикладных исследований
в области коррозионно-механического разрушения трубных сталей**

Р.И. Богданов, И.В. Ряховских, Р.В. Кашковский

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
R_Bogdanov@vniigaz.gazprom.ru

Проблема эксплуатации труб с дефектами коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) относится к числу наиболее актуальных в странах, обладающих протяженной системой подземных магистральных газопроводов (МГ).

Накопленный опыт эксплуатации МГ, подверженных стресс-коррозии, и обобщенный анализ современных экспериментальных исследований труб с дефектами позволяют применять кинетические модели для прогнозирования скоростей развития дефектов КРН при наличии комплекса эмпирических коэффициентов, определяющих коррозионно-механическую прочность и долговечность труб в грунтовых электролитах.

Известно, что газотранспортная система (ГТС) ПАО «Газпром» состоит из труб, выполненных из разных марок сталей и по различным техническим условиям. Поэтому для достоверного прогнозирования процесса КРН требуется организация систематических испытаний труб различного типоразмера (включая новые трубы класса прочности X80–X100) с учетом условий и сроков их эксплуатации на базе единых методик испытаний и критериев оценки коррозионно-механической прочности.

Решение указанной задачи возможно за счет организации серийных испытаний широкой номенклатуры на базе единого испытательного комплекса ПАО «Газпром». Испытательный комплекс должен включать:

- экспериментальные участки в составе действующих МГ;
- полноразмерные стенды для проведения гидравлических испытаний труб и трубных плетей с возможностью воспроизведения режимов эксплуатации МГ, приложения изгибных нагрузок, подведения коррозионной среды и наложения потенциала;
- специализированные лабораторные испытательные стенды и оборудование для проведения серийных коррозионно-механических испытаний и металлографических исследований фрагментов труб и стальных конструкций с эксплуатационными дефектами;
- вспомогательное лабораторное оборудование для исследования нормативных механических свойств, химического состава стали, оценки уровня остаточных напряжений и подготовки образцов для металлографических исследований;
- исследовательские лаборатории для проведения узкоспециализированных коррозионно-механических испытаний сталей, исследования подземной коррозии, металлофизических, рентгеноструктурных и субструктурных исследований сталей.

Оценка несущей способности и остаточного ресурса труб магистральных газопроводов с трещинами КРН по результатам полигонных испытаний в ООО «Газпром трансгаз Ухта»

С.И. Погуляев

ООО «Газпром трансгаз Ухта»
spoguliaev@sgp.gazprom.ru

Оценка несущей способности и остаточного ресурса в рамках полигонных испытаний проводилась с целью подтверждения запаса прочности и долговечности труб с трещинами коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Программа полигонных испытаний включала в себя выбор дефектных труб, проведение лабораторных испытаний, установку на трубную плетку и настройку различных датчиков, приборов и других средств измерения для изучения поведения дефектов КРН.

Для полигонных испытаний из участков действующих магистральных газопроводов были отобраны трубы диаметром 1420 мм производства Харцызского трубопрокатного завода и Mannesmann с трещинами КРН. Нагружение трубной плетки состояло из ступенчатого подъема до рабочего давления с шагом 1 МПа и многократного нагружения в режиме 0–7,4 МПа с последующим разрушением плетки. До начала полигонных испытаний в лабораторных условиях были определены механические свойства и элементный состав металла на образцах, изготовленных из дефектных труб. В процессе полигонных испытаний периодически проводился мониторинг роста трещин КРН с использованием методов неразрушающего контроля. Дополнительно велось наблюдение за деформациями металла труб с использованием методов тензометрии в зонах с различной локальной кривизной поверхности.

Вывод о фактической несущей способности и действительном остаточном ресурсе труб с трещинами КРН основывается на анализе результатов мониторинга глубин трещин, прочностных расчетов и характера разрушения трубы.

**Реализация технологии консервации коррозионного растрескивания
под напряжением на магистральных газопроводах
ООО «Газпром трансгаз Чайковский»**

А.А. Шкапенко¹, Д.А. Мишарин²

1 – ООО «Газпром трансгаз Чайковский»,
2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
shkapenkoaa1@ptg.gazprom.ru

Общая протяженность магистрального газопровода (МГ) ООО «Газпром трансгаз Чайковский» составляет свыше 10 тыс. км, большинство из которых построены в 70-80-е годы прошлого века и имеют пленочное защитное покрытие. Постепенная деградация указанных защитных покрытий, их отслоение и проникновение грунтового электролита к поверхности трубной стали привели к тому, что к настоящему времени Общество вынуждено эксплуатировать газопроводы в условиях поврежденности стресс-коррозией.

Несмотря на тот факт, что действующая в ПАО «Газпром» нормативно-техническая документация запрещает эксплуатацию труб со стресс-коррозионными повреждениями, большинство из них долгое время остаются в эксплуатации, так как имеющиеся на них мелкие трещины не выявляются при проведении плановой внутритрубной диагностики (ВТД). При этом стресс-коррозионные трещины, находящиеся ниже порога чувствительности средств ВТД, не оказывают влияния на прочностные и ресурсные характеристики труб, что неоднократно было доказано в ходе экспериментальных работ на базе Инженерно-технического центра Общества. Анализ результатов экспериментальных работ совместно с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» позволил перейти к реализации трассовой технологии консервации коррозионного растрескивания под напряжением на действующем МГ Общества.

В течение трех лет в Обществе успешно эксплуатируется участок МГ, содержащий в своем составе трубы со стресс-коррозионными повреждениями глубиной около 10 % от толщины стенки. Участок переизолирован инновационным покрытием, снижающим риск образования новых повреждений в случае его нарушения. Эффективность технологии подтверждена успешной реализацией двухгодичной программы испытаний ООО «Газпром ВНИИГАЗ», результатами трассовых обследований и данными ВТД.

Оценка склонности к хрупкому разрушению конструкционных сталей

А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, Нго Нгок Ха

НИТУ «МИСиС»
AVKudrya@misis.ru

Обычно оценка склонности к хрупкому разрушению конструкционных сталей включает в себя определение их трещиностойкости (с использованием критериев механики разрушения) и хладноломкости. При этом важно оценить роль структурной неоднородности металла, неизбежной практически для любой промышленной технологии получения металлопродукции.

Успешное решение данной задачи неразрывно связано с развитием методов наблюдения и измерения неоднородности структур и разрушения. С этой целью апробированы процедуры построения сериальных кривых по Н.Н. Давиденкову (в том числе при ограниченном числе образцов и естественном рассеянии результатов измерений) для объективной оценки малых различий в положении сериальных кривых, исходя из принципа максимума правдоподобия. Для привязки параметров хладноломкости к структуре апробирован локальный метод оценки температуры вязкохрупкого перехода по измерениям акустической эмиссии при разрушении на микрообразцах, габариты которых соизмеримы с масштабом неоднородности структур.

Определение трещиностойкости материалов с высокой пластичностью проводили по величине критического раскрытия трещины δ_c (CTOD), методика оценки которой основывалась на измерении геометрии раскрытия трещины, кинетики ее распространения и строения изломов.

Показано, что в сочетании с количественными измерениями морфологии структур предложенные методы определения склонности к хрупкому разрушению позволяют получить объективные оценки качества металлопродукции, прогноза ее надежности работы в конструкции.

Создание образцов с заданным распределением остаточных напряжений для исследования коррозионных свойств материалов

А.С. Куркин, С.В. Тихонов

МГТУ имени Н.Э. Баумана
stihonov86@mail.ru

Экспериментальные методики испытаний материалов на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) требуют специализированных средств нагружения для поддержания в образцах, находящихся под воздействием коррозионных сред, необходимого уровня напряжений на протяжении всего длительного периода испытаний. Это снижает доступность методик испытаний в условиях заводских лабораторий и возможность получения необходимого объема данных для статистической обработки, а также повышает стоимость и трудоемкость исследований.

Возможность изготовления модельных образцов с заданным напряженным состоянием (в том числе двухосным), не требующих нагружения в процессе испытаний, позволяет существенно упростить методики испытаний материалов на КРН. Такой образец может быть получен путем обработки краев заготовки различными способами: обкаткой роликами или проковкой, а также локальным нагревом и наплавкой материала, отличающегося по свойствам от основного материала образца.

Выбор на основе компьютерного моделирования сочетания этих приемов позволяет создавать на участке поверхности в центре образца (в месте контакта с коррозионной средой) любое заданное напряженное состояние. Важно, что исследуемая область образца не подвергается воздействию и сохраняет исходные свойства. Методика применима как для плоских образцов, так и для сегментов труб.

О влиянии кристаллографической текстуры и остаточных напряжений на развитие трещин КРН в трубах магистральных газопроводов

*Ю.А. Перлович¹, М.Г. Исаенкова¹, О.А. Крымская¹, Н.С. Морозов¹,
Р.А. Минушкин¹, И.В. Ряховских²*

1 – НИЯУ «МИФИ»,
2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
OAKrymskaya@mephi.ru

Проведенные ранее предварительные исследования фрагментов труб магистральных газопроводов (МГ) показали наличие связи между неоднородностью кристаллографической текстуры труб и их склонностью к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН). Показано значительное снижение скорости развития трещин КРН при достижении слоя с резко отличающейся кристаллографической ориентацией зерен, в пределах которого параметры текстуры значительно изменяются.

Другим фактором, оказывающим существенное влияние на образование и начальное развитие трещин КРН, является уровень остаточных (технологических) напряжений в приповерхностном слое трубы, который может превышать уровень эксплуатационных напряжений, обусловленных рабочим давлением газа. При этом в настоящее время расчет остаточного ресурса труб осуществляется без учета изменения напряжений по толщине стенки трубы, хотя известно, что по мере удаления от внешней поверхности величина растягивающих остаточных напряжений снижается.

В выполненной работе на основе рентгеновских данных, полученных для труб диаметром 1420×16,5 мм (сталь класса прочности Х70) после длительной эксплуатации в составе МГ, определены количественные параметры текстуры и ее неоднородности по толщине стенки труб, оказывающие влияние на их склонность к КРН. Также предложена методика оценки распределения остаточных тангенциальных (окружных) напряжений по толщине стенки труб рентгеновским $\sin^2\psi$ -методом.

По результатам полученных данных разработаны предложения по учету влияния количественных параметров текстуры и остаточных напряжений при прогнозировании ожидаемых скоростей развития стресс-коррозионных трещин.

Методика оценки агрессивности грунтов, провоцирующих коррозионное растрескивание под напряжением

*В.Э. Игнатенко¹, А.И. Маршаков¹, И.В. Ряховских², Р.И. Богданов²,
А.Б. Арабей³*

1 – ИФХЭ РАН,
2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
3 – ПАО «Газпром»
Basil148@mail.ru

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) трубных сталей относится к числу наиболее актуальных проблем эксплуатации магистральных газопроводов. Характер КРН трубных сталей в условиях эксплуатации газопроводов определяется, в числе других факторов, составом коррозионной среды. Основными компонентами грунтового электролита являются анионы сульфата, хлорида, карбоната (бикарбоната), нитрата и катионы кальция, магния, щелочных металлов, гумусовые кислоты, сероводород и другие соединения.

Учитывая разнообразный состав грунтового электролита, проведена классификация его компонентов по их действию на скорости электрохимических реакций, которые протекают в трещине. Изучено влияние компонентов грунтового электролита на скорости анодного растворения металла, его наводороживания и скорости роста трещины в трубной стали Х70. Фоновой средой служили цитратный буферный раствор с рН 5,5, боратный буферный раствор с рН 7,0 и раствор NS-4, моделирующий подпленочный электролит.

Показано, что рост трещины ускоряется в растворах с добавками компонентов, которые являются активаторами анодного растворения металла, и тормозится в присутствии ингибиторов анодного растворения. Выделены наиболее влияющие на КРН компоненты и параметры грунтового электролита.

Разработана методика оценки агрессивности грунтов, провоцирующих КРН трубных сталей. В соответствии с ней проводятся обследования грунта на участках газопровода в шпурах с применением диагностических зондов. Измеряются электрохимические характеристики трубной стали, степень аэрации грунта, наводороживающая способность грунта и химический состав грунтового электролита.

Каждый измеряемый параметр подвергается оценке на степень его влияния на процесс КРН в соответствии с разработанными критериями. Проводится балльная оценка вероятности развития КРН в каждой точке диагностики. По результатам обследования проводится ранжирование участков газопровода по вероятности возникновения КРН.

Оценка остаточных напряжений в сварных швах с точки зрения их влияния на коррозионное растрескивание под напряжением газопроводов

В.В. Бровко¹, Д.А. Мишарин²

1 – ФГАУ «НУЦСК при МГТУ имени Н.Э. Баумана»,

2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

vvbrovko@mail.ru

Основной особенностью остаточных напряжений сварных швов, коренным образом влияющих на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), является их неоднородность и разнонаправленность. Это проявляется практически по всем направлениям сечения сварного шва, что с учетом расположения сварных швов относительно основных направлений эксплуатационных напряжений способно как стимулировать КРН в зоне растягивающих остаточных напряжений, так и, наоборот, приводить к замедлению развития КРН при достижении трещиной слоев (зон) металла со сжимающими остаточными напряжениями.

В докладе приведены некоторые расчетные и экспериментальные оценки, доказывающие необходимость учета остаточных напряжений сварных швов при изучении КРН на поверхности газопроводов. Представлен прогноз по типам и участкам сварных соединений газопроводов с точки зрения возможного влияния остаточных напряжений на КРН.

Особенности коррозионного разрушения магистральных газопроводов под отслоившимся изоляционным покрытием

Р.В. Кашковский, И.В. Ряховских

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
R_Kashkovskiy@vniigaz.gazprom.ru

Согласно официальным данным? около 80 % магистральных газопроводов (МГ) ПАО «Газпром» эксплуатируются сверх нормативных сроков службы защитных покрытий. В связи с этим все большее влияние на надежность МГ оказывают деградиационные процессы, протекающие под отслоившимся защитным покрытием, в местах доступа подпленочного электролита к оголенной поверхности труб. Указанные процессы включают общую и локальную коррозию при потенциале свободной коррозии либо потенциале недозащиты, коррозионное растрескивание под напряжением и микробиологическую коррозию, причем последняя может снижать эффективность электрохимической защиты газопроводов и усиливать общую коррозионную агрессивность грунтовых электролитов.

В докладе представлены к обсуждению основные механизмы и закономерности коррозионного разрушения МГ под отслоившимся покрытием, результаты собственных исследований биокоррозионного воздействия среды на сталь и способов ее снижения, а также перспективные направления деятельности в области профилактики подпленочной коррозии МГ.

По результатам проведенных исследований предлагается организовать комплекс мероприятий, направленных на прогнозирование и предотвращение процессов коррозионного разрушения МГ, включая проведение необходимых исследований, разработку новых технических решений и совершенствование нормативного управления в области обеспечения безопасности транспорта газа.

Экспериментальное определение скорости развития локальных коррозионных повреждений на поверхности трубных сталей в растворах, имитирующих грунтовый электролит

*А.А. Рыбкина¹, Н.А. Гладких¹, М.А. Петрунин¹, А.И. Маршаков¹,
И.В. Ряховских², Р.И. Богданов², А.Б. Арабей³*

1 – ИФХЭ РАН,
2 – ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
3 – ПАО «Газпром»
aa_rybkina@mail.ru

Известно, что начальной стадией коррозионного растрескивания под напряжением трубной стали может быть образование локальных коррозионных повреждений (питтинг, язвы и др.), которые служат концентраторами напряжений на поверхности трубы. Целью работы являлось экспериментальное определение скорости развития локальных коррозионных повреждений на поверхности образцов трубных сталей производства Харцызского трубного завода (ХТЗ) и Mannesman класса прочности Х70 в синтетических грунтовых электролитах NS4, С2, NOVATW с рН, близким к нейтральному.

Микроскопические исследования показали, что начальной стадией возникновения локальных коррозионных дефектов на поверхности стали при потенциале свободной коррозии является зарождения узкой канавки вокруг неметаллического включения. С течением времени происходит расширение и углубление канавки одновременно с постепенным разрушением включения. Особенно ярко это проявилось в растворах NS4 и С2, где дефекты максимального размера наблюдались на включениях цементита. Надо отметить, что для раствора NOVATW наличие включений не является обязательным условием возникновения питтинга.

Во всех растворах в первые 2–4 суток происходит увеличение числа дефектов на единице поверхности металла, в дальнейшем число дефектов стабилизируется и наблюдается рост их геометрических размеров.

В разные периоды испытаний оценили размер среднего диаметра локального дефекта. Максимальные дефекты наблюдаются на образцах стали ХТЗ в растворе NOVATW – 35 мкм. Глубина питтингов в начальный период испытаний одинакова для обеих исследуемых сталей и составляет $\approx 1/2$ высоты включений. Скорость роста питтингов уменьшается со временем и через 24 суток составляет от 0,16 до 0,33 мм/год в зависимости от стали и состава электролита.

Показано, что при потенциалах коррозии размер зарождающегося на поверхности стали коррозионного дефекта определяется суперпозицией двух факторов – природой неметаллических включений и составом коррозионной среды.

Полученные данные по скоростям роста питтингов на трубной стали Х70 производства ХТЗ и Mannesman использованы при разработке расчетной модели коррозионного растрескивания под напряжением стальных газопроводов.

Создание сверхпрочных композитных муфт для восстановления и поддержания эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов (ЛЧ МГ) высокого давления

М.М. Смирнов

ООО «НПО «Центротех»
MikMiSmirnov@rosatom.ru

В докладе рассматривается комплексная композитная система на основе высокопрочного углеволокна и эпоксипуретанового связующего, необходимая для ремонта и продления сроков эксплуатации магистральных газопроводов диаметром до 1420 мм (включительно).

ООО «НПО «Центротех» разработана специальная система КСУМТ-ВВК-01/02 для восстановления прокорродировавших и изношенных магистральных и промышленных трубопроводов в эксплуатации под воздействием давления транспортируемой среды, а также на иных объектах, допускающих применение систем комплексного упрочнения, для технологических трубопроводов компрессорных станций независимо от срока их эксплуатации. КСУМТ-ВВК-01/02 целесообразно применять для ремонта в тех случаях, когда полная остановка транспортировки продукта является невозможной или нетехнологичной в определенный период времени либо когда применение других методов ремонта невозможно по различным причинам (обводненная местность, низкие температуры до -50°C , нехватка новых труб, нельзя проводить огневые работы, невозможно или очень проблематично доставить металлокомпозитную муфту, недостаточно свойств у используемых в настоящее время полимерных композиционных упрочнений).

Оценка показателей надежности трубопроводных конструкций с трещиноподобными дефектами

Е.Н. Овсянников, В.М. Силкин, В.П. Столов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
E_Ovsiannikov@vniigaz.gazprom.ru

Важнейшим условием эффективной работы линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ) является обеспечение надежности. Проблемы надежности ЛЧ охватывают широкий круг вопросов, включающий анализ условий возникновения повреждений и разработку конструктивных мероприятий по их предотвращению, статистический анализ показателей надежности и методы расчета и прогнозирования показателей надежности участков и составляющих их элементов. В настоящее время в ПАО «Газпром» для планирования сроков диагностирования и ремонта ЛЧ используются как детерминистические, так и вероятностные подходы. Вероятностные подходы, основанные на оценке и нормировании риска события, ассоциированного с нарушением герметичности и конструкционной целостности газопровода, позволяют учесть случайные факторы для более обоснованной оценки его технического состояния.

В докладе на основе физико-статистического подхода рассмотрена расчетная модель прогнозной оценки показателей надежности локальных дефектных участков, расположенных в пределах ЛЧ МГ.

Характерной особенностью разработанной методики является комплексность подхода к оценке и обоснованию допустимых уровней дефектности эксплуатируемых участков МГ. Предложенный подход предусматривает совместное использование детерминистических физико-математических моделей оценки несущей способности с учетом влияния различного рода дефектов и вероятностной модели «нагрузка – сопротивление» для оценки текущего уровня надежности (вероятности безотказной работы), на основе которого выбирается оптимальная стратегия последующей эксплуатации и технического обслуживания обследуемого участка.

В рамках совместного использования основных положений механики разрушения и механики поврежденной среды предложена новая инженерная модель оценки несущей способности труб большого диаметра с продольными трещинами. Приведены результаты сравнений с известными экспериментальными данными, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Гибридные металлокомпозитные трубы для газопроводов, подверженных растрескиванию под напряжением

В.И. Хоменко, Е.М. Щеголев, Е.Т. Усенов, О.Д. Никитин

Российский союз нефтегазостроителей
Khomenko_v@mail.ru

Современные высоконапорные газопроводы (10–25 МПа), как правило, сооружаются из высокопрочных трубных сталей и являются весьма металлоемкими и дорогостоящими сооружениями, выход из строя которых приводит к существенным экологическим и экономическим потерям. Поэтому при огромном объеме строительства и необходимости в осуществлении широкомасштабного капитального ремонта старых магистральных газопроводов больших диаметров, в том числе подверженных растрескиванию под напряжением (КРН), актуальной задачей становится увеличение срока безаварийной работы трубопроводов.

Известно, что напряженное состояние металла труб в значительной мере оказывает влияние на его коррозионную стойкость, и в частности на КРН. В связи с этим снижение максимальных напряжений в теле труб при возрастающих рабочих давлениях становится актуальной задачей, одно из решений которой лежит в плоскости изменения конструкции трубы.

В трубе при внутреннем давлении осевые и кольцевые напряжения отличаются приблизительно в два раза, и поэтому следует использовать материал с прочностью в кольцевом направлении большей (там больше напряжение), чем в осевом.

Также целесообразно применять конструкцию трубы, состоящую из металлической основы, воспринимающей осевые нагрузки, и поверхностного слоя из композитных материалов, обеспечивающего восприятие кольцевых нагрузок, создающего упрочнение и защиту трубы от коррозии, т.е. гибридные металлокомпозитные трубы. Такая конструкция трубы приводит к уменьшению металлоемкости трубопровода на 35–40 % и существенному снижению кольцевых напряжений (ниже пороговых значений) в металлической части трубопровода, что обеспечивает высокую коррозионную стойкость, в том числе и от КРН.

В докладе рассматриваются композитные материалы, обеспечивающие создание такой конструкции трубы, приводятся параметры толщин композитного покрытия и металлической трубы в зависимости от рабочего давления в трубопроводе, демонстрируется технология нанесения композитных материалов на поверхность труб и содержатся результаты предварительного экономического эффекта от применения таких труб.

Оценка влияния природных факторов аварий КРН на основе геопространственного моделирования и анализа

Л.В. Власова

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
L_Vlasova@vniigaz.gazprom.ru

В различных методах оценки и прогноза стресс-коррозионного состояния магистральных газопроводов (МГ) природные факторы (факторы среды) учитываются наряду с факторами напряженно-деформированного состояния трубопровода и материала труб. Широкое разнообразие природных факторов, недостаточная изученность их вклада в аварийность по причине коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) обуславливают целесообразность построения модели (или подмодели) природных факторов.

В докладе рассматриваются методические подходы к выявлению потенциально опасных по природным факторам участков для КРН аварий на базе картографической модели и геопространственного анализа на примере зоны ответственности ООО «Газпром трансгаз Югорск». Модель включает геопространственные данные по МГ (выполнены по космоснимкам высокого разрешения), местоположению аварий КРН (1990–2017 гг.) и цифровые слои по природным факторам (более 40).

Представлена реализация алгоритма анализа:

- изучение связей расположения аварий КРН с природными факторами (карты, таблицы, гистограммы приуроченности аварий к факторам);
- выбор наиболее значимых признаков и их критериев, присвоение весов, исходя из модели опасного участка (статистическая и экспертная оценки);
- построение серии карт, отражающих распределение каждого из выбранных признаков и их критериев с учетом их весов;
- сложение полученных карт и построение прогнозных карт;
- установление порога принятия решений и классификация, определение потенциально опасных участков.

Информационная система анализа данных внутритрубной диагностики IntroScan как элемент системы повышения эффективности технического диагностирования технологических трубопроводов компрессорных станций

С.Ю. Ворончихин

ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи»
s.voronchikhin@introscan.ru

С увеличением срока эксплуатации технологических трубопроводов компрессорных станций (ТТ КС) требуется разработка системы специальных мероприятий по обеспечению заданного уровня технического состояния и надежности. Важной составляющей такой системы является наличие достоверной информации о текущем техническом состоянии эксплуатируемого объекта, в том числе полученной по результатам внутритрубной технической диагностики (ВТД).

Разработана информационная система, позволяющая увеличить эффективность действующей системы оценки технического состояния ТТ КС, обеспечивающая:

- сбор, хранение, архивирование и первичную обработку данных технического диагностирования ТТ КС с применением автоматизированных диагностических комплексов;
- автоматическое распознавание и определение геометрических размеров аномалий и элементов конструкции технологических трубопроводов компрессорных станций по данным ВТД;
- верификацию, оценку качества данных технического диагностирования автоматизированными диагностическими комплексами;
- поиск и визуализацию информации с применением многослойной информационной модели объекта, где каждый слой представляет собой набор данных определенного типа (проектная и исполнительная документация, результаты диагностики, результаты оценки технического состояния и пр.), а объект – пространственную модель.

**Состояние внедрения системы идентификации коррозионного
растрескивания под напряжением объектов
ООО «Газпром трансгаз Москва»**

А.Б. Измайлов, М.Ю. Патикин

филиал ООО «Газпром трансгаз Москва» –
Инженерно-технический центр
izmailov@gtm.gazprom.ru

Оперативность и своевременность принятия оперативных управленческих решений при выявлении трещиноподобных дефектов на магистральных газопроводах и технологических трубопроводах компрессорных станций в значительной степени зависит от качества выполненных работ по ключевым направлениям:

- идентификация трещиноподобных дефектов как дефектов коррозионного растрескивания под напряжением;
- оценка опасности обнаруженных дефектов;
- назначение необходимых дополнительных диагностических обследований;
- назначение метода ремонта;
- проведение стендовых и натурных испытаний труб.

Для решения данной задачи в ООО «Газпром трансгаз Москва» проводятся работы по внедрению и сопровождению Системы идентификации коррозионного растрескивания под напряжением линейной части магистральных газопроводов и технологических трубопроводов компрессорных станций. Система оптимизирует процесс управления техническим состоянием и целостностью газотранспортной системы.

В докладе рассматриваются актуальность, цели внедрения Системы в Обществе, ее структура и функционал. Выполнено обобщение результатов основных этапов внедрения.

Сравнительный анализ результатов работ подрядных организаций по обнаружению и идентификации стресс-коррозионных дефектов на участках ЛЧ МГ ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» по результатам ВТД

Р.Н. Юнусов, В.А. Зазнобин, С.А. Смирнов

ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»
Zaznobin-VA@vtg.gazprom.ru

В ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» эксплуатируется 5953 км магистральных газопроводов (МГ), на которых внутритрубная диагностика (ВТД) проводится на постоянной основе.

В докладе приведены результаты анализа отчетов по ВТД трех подрядных организаций: ЗАО «Газприборавтоматикасервис», АО «Газпром оргэнергогаз», НПЦ «ВТД», проводивших обследования на газопроводах ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» в 2012–2018 гг. Произведена оценка достоверности обнаружения стресс-коррозионных дефектов по отчетам ВТД подрядных организаций при диагностике.

Содержится краткий обзор результатов проведенных на базе ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» сравнительных испытаний оборудования для внутритрубного технического диагностирования МГ ПАО «Газпром». Рассмотрены результаты оценки соответствия средств ВТД требованиям нормативных документов, проведенной специалистами Инженерно-технического центра в 2018 г. на специализированном стенде в г. Богородске.

Данные стендовых и натурных испытаний соответствуют результатам анализа и оценки сходимости отчетов ВТД подрядных организаций и наружных обследований в шурфах стресс-коррозионных дефектов.

Обследование стресс-коррозионных участков трубопроводов с применением роботизированного диагностического комплекса IntroScan

А.В. Митуркин

ООО «ЭНТЭ»
a.miturkin@ente-ltd.ru

С увеличением сроков эксплуатации и неуклонным старением системы трубопроводного транспорта природного газа возрастает вероятность ее отказов по причине развития эксплуатационных дефектов труб: коррозии, стресс-коррозии и пр. Для обеспечения безопасной эксплуатации технологических трубопроводов нефтегазовых объектов, а также повышения эффективности формирования стратегических программ управления трубопроводным транспортом в целом необходимо наличие актуальной и объективной информации о фактическом техническом состоянии эксплуатируемых элементов системы (труб, деталей). Данную задачу можно решить, применяя современные средства внутритрубной диагностики (ВТД).

Для решения задачи по ВТД сложных по конфигурации трубопроводных систем без нарушения их целостности и с минимальными подготовительными мероприятиями по очистке внутренней полости трубопровода от загрязнений ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи» разработан внутритрубный роботизированный диагностический комплекс A2072 IntroScan (Сканер) для контроля технологических трубопроводов компрессорных станций, включающий в себя набор устройств, инструментов и оборудования.

По результатам опытно-промышленной эксплуатации установлено, что выявляемость дефектов глубиной свыше 10 % от толщины стенки обследованной детали с применением Сканера составила 91 %, в том числе стресс-коррозионных дефектов, что соответствует нормативным требованиям ПАО «Газпром».

Высокая степень автоматизации процессов ВТД и информативности результатов контроля позволяют в кратчайшие сроки принять обоснованные решения о дальнейшей эксплуатации обследуемого объекта, а также обеспечить заданный уровень надежности и безопасной эксплуатации контролируемого объекта.

Прогнозирование стресс-коррозионной поврежденности участков магистральных газопроводов на основе нелинейных методов оптимизации и алгоритмов нейронных сетей

Д.А. Мишарин, И.В. Ряховских, Р.И. Богданов, Я.С. Чудин, В.А. Петрухин

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
d_misharin@vniigaz.gazprom.ru

Мировой научный опыт исследования процесса коррозионного растрескивания под напряжением металла труб указывает на многостадийность и многофакторность данного явления, а также существенную избирательность как в отношении поврежденности отдельных труб, так и кинетики процесса на различных участках газопроводов, в связи с чем перспективной задачей представляется прогнозирование стресс-коррозионной поврежденности участков магистрального газопровода (МГ). Существующие методики прогнозирования, базирующиеся на экспертных и балльно-факторных методах анализа данных, обладают высокой субъективностью и не обеспечивают требуемую точность и воспроизводимость результатов прогноза.

По мере развития компьютерных технологий все чаще в смежных отраслях науки для решения сложных многофакторных задач применяются технологии искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа данных. Показано, что многослойная нейронная сеть (персептрон), обучаемая по принципу обратного распространения ошибки методом стохастического градиентного спуска по модификации Adam, способна производить прогноз стресс-коррозионной поврежденности участков МГ с точностью до 90 % за счет учета до 25 различных факторов, учитывающих параметры трубопровода, характеристики грунта и геотехнические особенности трассы пролегания МГ.

В докладе предлагаются оптимальная архитектура нейросетевой модели и наилучший нелинейный алгоритм расчета весовых коэффициентов нейронов сети с точки зрения максимизации скорости решения задачи и получения точности прогноза. Прогнозирование стресс-коррозионного состояния МГ с учетом данных внутритрубной диагностики и вновь разработанной модели обеспечит точное планирование объемов материально-технических ресурсов, необходимых для выборочного и капитального ремонта МГ.

Особенности коррозионного растрескивания под напряжением в сероводородных средах. Трубная продукция для месторождений газа, содержащих сероводород

М.В. Симаков, К.Б. Конищев, А.С. Чабан, А.М. Семёнов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
K_Konischev@vniigaz.gazprom.ru

Одновременное воздействие сероводорода и напряжений на металл труб приводит к образованию трещин. Такой вид коррозии называется сульфидным коррозионным растрескиванием под напряжением (СКРН). Механизм СКРН связан с наличием пленки сульфида железа в устье трещины. В зависимости от условий ее формирования она может выполнять как защитную роль, так и катализировать СКРН. В процессе коррозии в сероводородных средах на поверхности металла труб может адсорбироваться атомарный водород, который проникает вглубь и способствует разрушению стенки трубы с образованием трещин при напряжениях меньше предела текучести. Такой вид коррозионного воздействия относят к водородному охрупчиванию. Представлены основные месторождения газа, содержащие сероводород, с указанием термобарических условий. Обоснована методология проведения испытаний различными способами металла труб на сопротивление СКРН. В рамках научно-технического сотрудничества между ПАО «Газпром» и отечественными заводами – изготовителями трубной продукции для месторождений, содержащих коррозионно-агрессивные компоненты (сероводород и диоксид углерода) было освоено производство насосно-компрессорных труб из коррозионно-стойкого сплава 110CrNi. Освоенная трубная продукция отечественного производства показала ряд конкурентных преимуществ относительно зарубежных аналогов.

Повышение ресурса усиленных патрубков (велдолетов) на основе компьютерного моделирования их усталостной прочности

М.А. Пономарёв, А.С. Куркин

МГТУ имени Н.Э. Баумана
rammdrum@gmail.com

Тройниковые соединения – одни из наиболее нагруженных участков трубопроводной сети из-за концентрации напряжений по контуру отверстия магистральной трубы. Перспективным средством усиления тройникового соединения является применение усиленных патрубков (велдолетов). Существующие методы подбора параметров конструкций велдолетов основаны на достаточно грубых аналитических зависимостях, которые не учитывают важные особенности поведения конструкций. В конечном итоге это приводит к неудачному выбору конструктивных параметров, что выражается в снижении ресурса.

Применение компьютерного моделирования позволяет оценить общие закономерности деформирования конструкции под действием эксплуатационных нагрузок. Выявление общих закономерностей деформирования требует использования обобщенной компьютерной модели тройникового соединения. В результате такого анализа выделены наиболее существенные факторы концентрации напряжений для различных соотношений диаметров магистральной трубы и диаметра отвода. На основании выявленных факторов были даны рекомендации по усилению конструкций велдолетов. Полученная методика позволила значительно снизить концентрацию напряжений в велдолетах, массу конструкции и обосновать рациональную форму сварного углового шва, соединяющего велдолет с магистральной трубой.

Компьютерное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Workbench 18.2 в упругопластической постановке. Результатами исследования являются: выявленные механизмы деформирования велдолетов, рекомендации по их усилению в зависимости от соотношения диаметров отвода и магистральной трубы, рекомендованный модельный ряд типоразмеров велдолетов.

Мониторинг переходной активности суперсистемы «литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера» для прогнозирования землетрясений в зонах магистральных газопроводов

Е.Л. Логинов, А.А. Шкута

ФГБУН «Институт проблем рынка РАН»
loginovel@mail.ru

Динамика мониторинга метастабильных состояний геосреды в рамках выявления комплексной структуры факторов, определяющих сейсмическую активность в зонах магистральных газопроводов (МГ), позволяет выделить набор характеристик когерентно-резонансных ансамблей колебательных мод как части некоей переходной активности суперсистемы «литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера». Создается возможность прогноза выхода геосреды за пределы квазиустойчивых состояний в зависимости от неоднородности параметров колебаний с их определенной пространственной конфигурацией в зонах МГ. При этом хаотические пиковые проявления сейсмической активности могут быть представлены как внешние проявления комплексной синхронизации квазигармонических колебаний. Оценка вероятности критической динамики геосреды может быть реализована исследованием динамики функциональных взаимосвязей различных геофизических факторов на основе комплексного анализа данных, включая вертикальный и горизонтальный профили температуры и влажности, электронной концентрации, локальные параметры ионосферной плазмы, потоков инфракрасного излучения и пр.

Новизна заявленного подхода состоит в рассмотрении землетрясений, когда хаотические пиковые проявления сейсмической активности представляются как внешние проявления синхронизации квазигармонических колебаний. Предусматривается моделирование результатов комплексного мониторинга агрегированных территорий в зонах магистральных газопроводов.

Перспективы механохимической концепции для понимания и предотвращения коррозионного растрескивания магистральных газопроводов

Э.М. Гутман

Университет имени Бен-Гуриона в Негеве
gutman@bgu.ac.il

Целью каждого исследования стресс-коррозии является разработка теоретической основы для количественного прогнозирования и качественной диагностики случаев растрескивания и разрушения под воздействием напряжений и окружающей среды.

Однако, как было показано в наших недавних исследованиях, даже старые, устоявшиеся концепции, такие как механизм разрыва пленки (описанные Паркинсом, Фордом и Андерсеном), могут содержать противоречия и несоответствия. Экспериментальные данные и теоретические основы предполагают, что единый механизм не может объяснить весь спектр процессов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), а создание новых механизмов – это бесконечный процесс их развития, отторжения и т.д. Однако это не говорит о том, что конкретная теория обязательно является неверной. Представляется, что более реалистичным методом на сегодняшний день является разделение КРН на отдельные существенные явления и изучение данных явлений в отдельности с расчетом использования полученных результатов для предотвращения коррозионного растрескивания. Такие существенные явления – это механохимические и хемомеханические эффекты, развивающиеся в вершине стресс-коррозионных трещин при синергетическом взаимодействии между ними. Основываясь на этом, мы предложили автокаталитический механизм разрушения в вершине трещины в процессе коррозионного растрескивания и коррозионной усталости.

Поскольку так называемое коррозионное растрескивание в средах с околонеutralным pH на магистральных газопроводах де-факто имеет транскристаллитный тип трещин и продукты коррозии, обнаруживаемые внутри трещин, то такой вид коррозионного растрескивания полностью укладывается в механохимическую концепцию. Следовательно, представляется актуальным систематическое изучение механохимических эффектов в вершине трещины при КРН трубных сталей, а также разработка методического комплекса по проведению таких экспериментальных исследований.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР

**ГАЗОВАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

КУРАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Организационные вопросы	Кашковский Роман Владимирович	8 (925) 050-43-51
Вопросы по договорам и оформлению участия	Демьянов Кирилл Александрович	8 (916) 693-40-85

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, стр. 1, пос. Развилка,
с/п Развилковское, Ленинский р-н, Московская область, РФ, 142717.

Тел.: +7 (498) 657-42-06, Факс: +7 (498) 657-96-05

vniigaz@vniigaz.gazprom.ru; vniigaz.gazprom.ru