

Об особенностях обнаружения стресс-коррозионных повреждений магистральных газопроводов

Н.Б. Козырев
коммерческий директор¹
kozyrev.nickolay@aprodit.ru

¹ООО «АПРОДИТ», Коломна, Россия

В статье приводятся базовые сведения по стресс-коррозионным дефектам и их отличиям от дефектов общей коррозии. Рассматриваются несколько методов внутритрубной диагностики газопроводов, с помощью которых возможно выявление дефектов КРН (CD-метод ультразвуковой дефектоскопии в водяной пробке, TFI-метод поперечного намагничивания, ЭМАП-метод электромагнитоакустического возбуждения ультразвуковых волн в стенках газопроводов), а также соответствующие внутритрубные диагностические снаряды. Более подробно рассмотрен ЭМАП-метод (метод «сухого ультразвука»), который с точки зрения автора является наиболее перспективным для взятия под контроль ситуации с авариями на магистральных газопроводах из-за стресс-коррозионных повреждений, а также для более рационального выбора участков газопроводов под вывод в капитальный ремонт. Для ЭМАП-метода рассмотрены физические основы возбуждения нескольких типов ультразвуковых волн в металлических стенках трубопроводов. Приведен краткий анализ преимуществ и недостатков нескольких видов волн и соответствующих им ЭМА-преобразователей, которые используются в настоящее время на внутритрубных снарядах для диагностики КРН-дефектов. Делаются выводы о перспективах развития каждого направления с учетом особенностей применения в газопроводах России.

Анализ статистики аварий на магистральных газопроводах (МГ) России показывает, что больше половины аварий вызвано стресс-коррозионными дефектами. Этот вид разрушения стенок трубопроводов также называют коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН). Дефекты КРН существенно отличаются от дефектов связанных с потерей металла таких, как коррозионные язвы и питтинговая коррозия. Дефекты потери металла характеризуются сравнительно гладкими краями. В то время как дефект КРН представляет собой колонию нераскрывшихся трещин глубиной 5–20% от толщины стенки трубы. КРН возникает на внешней поверхности труб. Трещины ориентированы в направлении, перпендикулярном направлению максимального растягивающего напряжения, то есть преимущественно вдоль оси трубы. В некоторый момент времени сетка поверхностных трещин сростается в одну магистральную трещину. После этого магистральная трещина достаточно быстро растет в длину. Это и приводит к разрыву трубопровода. Ведущими факторами, влияющими на процесс коррозионного растрескивания, являются: величина растягивающих напряжений; состояние изоляционного покрытия; состав и структура сплава из которого изготовлены трубы; состояние электрохимзащиты на конкретном участке трубопровода; технология и качество формовки при изготовлении труб, влияющие на уровень остаточных напряжений в околосшовной зоне; тип окружающего грунта. КРН характерно для магистральных газопроводов (МГ). В стенках труб нефтепроводов КРН встречается значительно реже.

Сочетание многих факторов влияет на образование и скорость роста стресс-коррозионных трещин в колонии. Предсказать где этот процесс приведет к аварии без проведения внутритрубной диагностики

практически невозможно. Основной целью внутритрубной диагностики (ВТД) является определение срока безопасной эксплуатации отдельных участков трубопровода, со всеми существующими на данном участке дефектами: строительными дефектами, дефектами уноса металла, а также стресс-коррозионными дефектами.

Для обнаружения любых дефектов при проведении ВТД требуется, чтобы внутренняя поверхность трубопровода была предварительно очищена от различного рода отложений и мусора. Иначе датчики внутритрубных диагностических снарядов неэффективно работают или повреждаются. Для очистки внутренней полости трубопровода используют внутритрубные чистящие скребки или поршни. На чистящих и диагностических внутритрубных снарядах необходимо устанавливать низкочастотные передатчики, чтобы имелась возможность отслеживать движение этих снарядов внутри трубопровода (через маркерные точки), а также быстро обнаруживать место нештатной остановки внутритрубного снаряда с помощью низкочастотных приемников-регистраторов (локаторов).

Анализ литературы показывает, что за последнее десятилетие число аварий МГ обусловленных стресс-коррозией превышает число аварий МГ из-за дефектов потери металла. В то же время количество записей о дефектах КРН в отчетах ВТД в сотни раз меньше, чем записей о дефектах потери металла. Это свидетельствует об очень низкой степени выявляемости стресс-коррозионных дефектов, на начальной стадии развития, когда локальная колония поверхностных трещин еще не начала сростаться в магистральную трещину.

В настоящее время определение дефектов КРН при проведении ВТД стальных трубопроводов возможно следующими тремя методами:



Рис.1 — ЭМАП-дефектоскоп RoCD2 34"/36" компании РОЗЕН

1. TFI-метод. Метод регистрации утечек магнитного потока при поперечном намагничивании участка трубы.
2. CD-метод. Он заключается в сплошном ультразвуковом сканировании стенки трубы с помощью пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). В этом методе ультразвуковые волны, излученные бортовыми ПЭП, заводятся в стенку трубопровода через слой окружающей внутритрубной среды. Для работы по этому методу требуется внутритрубный ультразвуковой дефектоскоп, который перемещается в жидкости. При этом для диагностики газопроводов создается так называемая подвижная водяная пробка с помощью дополнительных поршней-разделителей двигающихся впереди и сзади дефектоскопа.
3. ЭМАП-метод. Этот метод заключается в возбуждении ультразвуковых волн непосредственно в стенке трубы с помощью бесконтактных электромагнитноакустических преобразователей (ЭМАП), расположенных на внутритрубном ЭМАП-дефектоскопе (рис. 1). Такой дефектоскоп может перемещаться в газовой среде. Поэтому этот метод также называют методом «сухого ультразвука». Хотя ЭМАП так же хорошо работает и в жидкой среде.

Про первые два из упомянутых методов можно отметить следующее:

TFI-метод поперечного намагничивания не выявляет достоверно неглубокие (до 15% толщины стенки трубопровода) стресс-коррозионные трещины, из-за того, что чувствительные к изменению магнитного поля датчики при внутритрубной диагностике находятся, по определению, внутри трубы, а стресс-коррозионные трещины всегда образуются на внешней поверхности

трубопровода. То есть при внутритрубной диагностике между датчиками, регистрирующими вытеснение магнитного поля в месте расположения дефекта и самим дефектом находится слой металла почти равный номинальной толщине стенки трубопровода. При этих условиях изменения магнитного поля, регистрируемые датчиками внутритрубного дефектоскопа, носят очень размытый характер. Регистрируемый сигнал от внешней трещины глубиной 10–15% сопоставим по амплитуде с уровнем шума, который регистрируется этими датчиками из-за шероховатости внутренней поверхности трубопровода. Из-за этого фундаментального недостатка TFI-метода он не оправдывает тех надежд, которые еще недавно возлагались на него с точки зрения мониторинга стресс-коррозионных повреждений магистральных газопроводов.

CD-метод ультразвукового обследования в водяной подвижной пробке оказался экономически нерентабелен из-за потерь связанных с выведением участка газопровода из эксплуатации на длительный срок для осушки после проведения ВТД этим методом. В газовой среде этот метод применяться не может в силу значительно большего коэффициента отражения ультразвуковой волны от границы газ-металл по сравнению с границей нефть-металл или вода-металл. Поэтому для диагностики МГ этим методом приходится создавать подвижную «водяную пробку», а потом выполнять осушку газопровода.

В связи с недостатками TFI и CD-методов, ЭМАП-метод (метод сухого ультразвука), при его использовании на внутритрубном дефектоскопе, является наиболее перспективным направлением повышения достоверности обнаружения и ранжирования стресс-коррозионных повреждений

газопроводов. В связи с интенсивным развитием электроники в последнее десятилетие сложились благоприятные условия для применения этого метода во внутритрубной диагностике. И в настоящее время у ведущих компаний, занимающихся разработкой внутритрубных ЭМАП-дефектоскопов (PII, ROSEN, СПЕЦНЕФТЕГАЗ и некоторые другие) уже сменилось несколько поколений таких внутритрубных приборов.

ЭМАП-метод более чем другие магнитные методы (TFI, MFL) зависит от дефектов геометрии внутренней поверхности трубопровода. Следует отметить, что ЭМАП бывают магнитострикционными и лоренцовскими. В магнитострикционных преобразователях ультразвуковые волны возбуждаются за счет локальных деформаций сжатия или растяжения, возникающих в металлах при циклическом изменении напряженности магнитного поля в толще металла в этих местах. Амплитуда ультразвуковых колебаний в металле, вызванных магнитострикционным эффектом сильно зависит не только от напряженности магнитного поля, проникающего на некоторую глубину в толщу металла, но и от электрической проводимости металла, а также от его магнитной проницаемости. Эти характеристики могут существенно для ЭМАП метода изменяться даже в пределах конкретной 12 метровой трубы. Существенное влияние оказывает также остаточная намагниченность металла. По этим причинам магнитострикционные ЭМАП имеют в настоящее время очень ограниченное применение в ВТД.

В лоренцовских ЭМАП ультразвуковые волны возбуждаются за счет силы Лоренца, которая действует на свободные электроны в металлах, когда вихревые поверхностные токи находятся в области постоянного



ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ДИАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Автоматизация
процессов
обслуживания и
диагностики
трубопроводов



• Передатчики и
локаторы 22Гц



• Акустические
локаторы



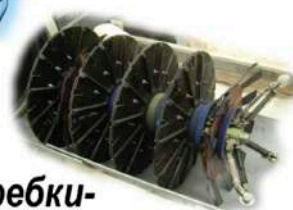
• Очистные
скребки



• Скребки-
калибры



• Профилемеры



ООО «Апродит» 140402, Московская обл., г. Коломна, Окский проспект, 40
Тел.: 8(916)33-25-945, факс: 8(4966)15-48-87, mail@aprodit.ru, www.aprodit.ru

магнитного поля. Причем магнитное поле должно быть перпендикулярно направлению вихревого тока. Таким образом, направление поверхностного вихревого тока, линии магнитного поля и сила Лоренца взаимно перпендикулярны друг другу и образуют правую тройку.

Частоты, которые используются в ЭМАП, лежат в диапазоне от 100 кГц до нескольких МГц. При частоте 200 кГц длина ультразвуковой волны в стали составляет порядка 10 мм. Лоренцовские преобразователи сконструированы так, что вихревые токи находятся в зоне сильного постоянного магнитного поля. Причем, в ВТД постоянное магнитное поле создается постоянными магнитами.

Большим преимуществом лоренцовских ЭМАП является их гораздо меньшая зависимость от магнитной проницаемости и электропроводности металла труб, а также от состояния поверхности металла и остаточной намагниченности конкретного участка трубопровода.

В ЭМАП-методе для ВТД, применяются сдвиговые ультразвуковые волны двух различных поляризаций. То есть при прохождении такой волны колебания атомов кристаллической решетки перпендикулярны направлению распространения волны. Колебания атомов могут происходить в направлении перпендикулярном поверхности - тогда говорят о вертикальной поляризации, которую обозначают SV (от англ. Shear Vertical). А при колебаниях атомов параллельно поверхности, говорят о горизонтальной поляризации, которую обозначают SH (от англ. Shear Horizontal). Следует отметить, что для обнаружения продольных стресс-коррозионных трещин SH или SV-волна должны распространяться в окружном (не осевом) направлении по стенке трубопровода.

В настоящее время в ВТД используются как вертикально (SV), так и горизонтально (SH) поляризованные ультразвуковые волны. Причем решающих преимуществ одной поляризации над другой нет. Компании РОЗЕН и российская компания СПЕЦНЕФТЕГАЗ традиционно используют SV-волны. А компания PII, подразделение General Electric, и российская компания ТРИСТАН остановили выбор на SH-волнах.

SH-волны имеют меньшую дисперсию. То есть фронт такой волны практически не размывается с удалением от источника или после отражения от дефекта. Также скорость распространения SH-волны практически не зависит от толщины стенки трубы. Это упрощает алгоритмы обработки сигналов и повышает достоверность обнаружения и распознавания дефектов. Основным недостатком конструкции ЭМАП с горизонтальной поляризацией следует признать необходимость расположения RF-катушки, по которой должны пропускаться импульсные токи величиной до 100 ампер, в узком зазоре между мощным постоянным магнитом и стенкой трубопровода. RF-катушка может быть легко повреждена в те моменты, когда магнит проходит над кольцевым сварным швом или над дефектом геометрии внутренней поверхности трубопровода (нестыковка кромок, вмятины, остатки электродов и т.п.). За счет подбора специальных износостойких защитных пленок для RF-катушки компания PII добилась определенных успехов в обследованиях

газопроводов в США и Европе.

В лоренцовских ЭМАП с вертикально поляризованной сдвиговой SV-волной силовые линии магнитного поля параллельны поверхности. Поэтому RF-катушки в таких лоренцовских ЭМАП-дефектоскопах располагаются между полюсами постоянных магнитов или между металлическими щетками, через которые магнитное поле вводится в стенку трубопровода. Поэтому излучающая RF-катушка в этих ЭМАП не зажата в узком зазоре между магнитом и стенкой трубопровода, а лишь прижимается с некоторым минимальным усилием к внутренней поверхности. Это кардинально повышает живучесть и надежность работы всего дефектоскопа при движении по трубопроводу.

Общая компоновка ЭМАП-дефектоскопа с ультразвуковой SV-волной очень похожа на компоновку магнитного дефектоскопа с продольным или поперечным намагничиванием стенки (на MFL или TFI-дефектоскоп). Только вместо магнитных датчиков Холла или магниторезистивных датчиков, между полюсами магнитов располагаются RF-катушки, которые излучают и принимают ультразвуковые волны, распространяющиеся в стенке трубопровода. Намагничивание стенки трубы производится постоянными магнитами. Намагничивать стенку до насыщения в ЭМАП-методе не требуется.

Компания РОЗЕН использует для намагничивания магнитные блоки с плавающим подвесом. А компания СПЕЦНЕФТЕГАЗ использует магниты с металлическими щетками. За последние пятнадцать лет совершенствования на магнитных дефектоскопах обе конструкции хорошо себя зарекомендовали с точки зрения надежности работы в российских газопроводах.

Основным недостатком ЭМАП-дефектоскопов SV-волной является зависимость скорости распространения такой волны от толщины стенки трубопровода (дисперсия ультразвуковых волн). Это усложняет алгоритм обработки сигнала и интерпретацию отраженных от дефектов сигналов.

В настоящее время на прямых участках газопроводов внутритручными ЭМАП-дефектоскопами обнаруживаются нераскрывшиеся продольные трещины с площадью боковой поверхности 40-100 мм² при глубине трещины 1-2 мм. Такой чувствительности уже вполне достаточно для мониторинга стресс-коррозионных повреждений на ранней стадии развития дефектов КРН.

Быстрому внедрению ЭМАП-дефектоскопов для регулярных обследований газопроводов мешает их более высокая стоимость по сравнению с магнитными дефектоскопами, а также недостаточное время автономной работы от бортовых аккумуляторов. Поэтому для обеспечения достаточного запаса хода и диагностирования линейных участков магистральных газопроводов длиной до 150-200 км в ЭМАП-дефектоскопах приходится либо увеличивать количество аккумуляторов, что связано с увеличением веса и, что, как следствие, снижением проходимости и надежности, либо уменьшать количество бортовых ЭМАП, что приводит к снижению качества обследования.

Для дальнейшего совершенствования ЭМАП-дефектоскопов очень актуальна задача получения электроэнергии на борту

внутритрубоного снаряда. Разработка такой техники с учетом соблюдения всех требований взрывобезопасности и надежности вполне возможна на современном уровне развития силовой электроники и электроприводов. Требуются специальные программы и финансирование проектов по совершенствованию ЭМАП-дефектоскопов. Развитие таких проектов приведет к повышению достоверности обнаружения стресс-коррозионных повреждений и повышению качества плановой внутритрубой диагностики газопроводов ЕСГ России. Что как следствие, приведет к более рациональному планированию капитальных ремонтов участков газопроводов и снижению аварийности.

Полный текст данной статьи можно прочитать на сайте ООО «АПРОДИТ» (www.aprodit.ru).

Список используемой литературы

1. Велиулин И.И., Лубенский С.А., Велиулин Э.И., Решетников А.Д. Анализ причин разрушения газопроводных труб большого диаметра в различных регионах России. М.: МАКС Пресс, 2012. 230 с.
2. Варламов Д.П., Канайкин В.А., Матвиенко А.Ф., Стеклов О.И. Мониторинг дефектности и прогноз состояния магистральных газопроводов России. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 254 с.
3. Лопатин А.С., Егоров С.И. Методы и средства диагностики линейной части магистральных газопроводов: учебное пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2009. 119 с.
4. Binash, G., Grunberg, G., Saurenbach, F., Zinn, W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. Physics, Rev. B, 1989, pp. 4828-4830.
5. Thomas Beuker, Stefan Klein, Jim Marr, Richard Kania. EMAT technology as part of an integrative analysis process - mitigation of SSC and coating issues. Available at: www.rosen-group.com (accessed June 2013).
6. TEMATE Ti-P Система для контроля коррозии трубопроводов и резервуаров. Рекламные материалы компании Innerspec Technologies, Inc. (www.innerspec.com), 2009.
7. Jeff Aron, Jeff Jia, Bruce Vance, Wen Chang. Development of an EMAT in-line inspection system for detection, discrimination, and grading of stress corrosion cracking in pipelines. DOE Award Number: DE-FC26-01NT41154 (Tuboscope Pipeline Services), 2005.
8. Remo Ribichini. Modelling of electromagneticacoustic transducers. A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy, 2011.
9. Сметанин Ф.Е., Созонов П.М., Мельник В.И., Бондарев Ю.А. Сравнительный анализ дефектов, выявленных внутритрубой дефектоскопией и экспертным обследованием в шурфах // Диагностика, 2001. Т. 2. Часть 1.
10. Салюков В.В., Петров Н.Г., Муханов Н.А., Халиков Р.Р. Оценка достоверности результатов внутритрубой инспекции // Диагностика, 2001. Т. 2. Часть 2.