



БЕСКОНТАКТНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Аннотация: Для обеспечения надежности и целостности трубопроводов, особенно в условиях агрессивного воздействия внешней среды, необходимо при техническом диагностировании не только определять дефекты металла и их геометрические размеры, но и проводить оценку напряженно-деформированного состояния и уровня действующих механических напряжений.

Именно для этих целей с учетом современного подхода и требований к комплексной оценке технического состояния трубопроводов был разработан и внедрен Метод Томографии Магнитных Градиентов (МТМ-Г), который позволяет без вмешательства в режим эксплуатации трубопровода провести его обследование и определить зоны концентрации механических напряжений, обусловленные повышенными нагрузками или наличием дефектов металла, охарактеризовать тип и оценить уровень механических напряжений в этих зонах, и дать оценку степени опасности для каждого участка с повышенными нагрузками.

Авторы: Воейков Денис Романович — Генеральный директор ООО «АКОРД-Технолоджи»
denis.voeikov@acord-technology.com

Колесников Игорь Сергеевич — Технический консультант, автор изобретения
igor@igsat.com

Воронков Николай Николаевич — Начальник лаборатории неразрушающего контроля
ООО «АКОРД-Технолоджи»
info@acord-technology.com

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности и целостности трубопроводов осуществляется с момента их проектирования и продолжается на протяжении всего жизненного цикла. При этом выполнив все возможные расчеты на прочность, устойчивость, усталость, предусмотрев все возможные нагрузки и влияние факторов внешней и внутренней рабочей среды на этапах проектирования и даже монтажа, особенно для подводных трубопроводов, невозможно исключить вероятность их повреждения и выхода из строя в процессе эксплуатации.

Причин таких повреждений множество: вибрация и перемещение подводных трубопроводов под действием гидродинамических факторов, механические повреждения якорями, тралями, ледовыми образованиями; развитие внешней и внутренней коррозии и коррозионное растрескивание под напряжением (КРН); потеря устойчивости и провисание в районе размывов донного грунта, пучинистость и нестабильность грунта, сейсмическая активность и ее последствия.

При этом, если появление и развитие, например коррозионных дефектов можно спрогнозировать и рассчитать, то спрогнозировать появление и развитие таких дефектов металла, как КРН в условиях транспортируемых сред различной агрессивности, трещин металла и сварных соединений на участках поперечных изгибов и продольных провисов и озвученных природных факторов – является намного более сложной задачей. К таким же слож-



Рис. 1 - Применение магнитометра «КОРД» на ТНПА рабочего класса



Рис. 2 - Применение буксируемого подводного аппарата типа «SANKI»

ным задачам можно отнести оценку опасности механических дефектов и зон напряженно-деформированного состояния, появившихся в процессе эксплуатации по причине внешних факторов. Еще более сложной задачей, учитывая возможное воздействие всего вышеперечисленного, является обеспечение целостности трубопроводов, не подлежащих техническому диагностированию внутритрубными дефектоскопами, или теми, где такой вид диагностики по каким-либо причинам затруднен или нецелесообразен.

В то же время, классический подход к оценке целостности, основанный только на определении геометрических размеров локальных дефектов, зачастую не учитывает влияние внешних факторов и условий эксплуатации. А невозможность их совокупного учета при диагностике традиционными методами может ставить под сомнение достоверность определения фактического состояния и реальной опасности дефектного участка.

Для большинства трубопроводов, в том числе подводных, доступны (предусмотрены) только те диагностические методы, которые направлены на обнаружение дефектов металла. Но для всесторонней оценки целостности бывает недостаточно только выявления имеющихся дефектов, так как потенциальные риски, связанные с внешними воздействиями на трубопровод, не учитываются, либо ограничены применением коэффициентов допуска при проектировании, не всегда отражающими реальное поведение трубопровода. Комплексный подход к обеспечению безопасности трубопровода не должен основываться только на знании, о наличии и размерах дефектов или длин участков провисания. При комбинированном воздействии внешних нагрузок в виде перечисленных внешних факторов появление и развитие дефектов в стенках труб могут происходить непредсказуемо, а даже незначительные дефекты в таких зонах представляют большую опасность, чем дефекты большего размера на разгруженных участках. Для понимания фактического поведения трубопровода в процессе эксплуатации необходимо использовать методы оценки напряженно-деформированного

состояния, и не только расчетные, но и основанные на анализе уровней действующих нагрузок в реальном времени. Этого требует и российская, и зарубежная нормативная база.

Что касается технического диагностирования не подлежащих ВТД трубопроводов, то для таких, в большинстве своем, предусмотрена процедура выборочного (случайного) шурфования трубопровода (2 шурфа на километр, но не менее 2 шурфов на участок и т.п.). Результаты проведенного в таких шурфах неразрушающего контроля в дальнейшем служат основой для составления заключения о техническом состоянии всего трубопровода (не обследованного), что с трудом можно назвать объективным подходом и комплексным техническим диагностированием.

МЕТОД ТОМОГРАФИИ МАГНИТНЫХ ГРАДИЕНТОВ

Для определения уровня механических напряжений и оценки зон напряженно-деформированного состояния на трубопроводах могут применяться средства бесконтактной магнитометрической диагностики (БМД). Изначально разработанные для диагностики сухопутных трубопроводов, не подлежащих внутритрубному обследованию (ВТД), или на которых применение ВТД затруднено или нецелесообразно, теперь БМД может быть использована и для комплексной диагностики подводных трубопроводов, совместно с существующими диагностическими методами, зачастую не заменяя, а дополняя их. Одним из таких методов, значительно расширяющим возможности магнитометрии в ее классическом понимании, является новый Метод Томографии Магнитных Градиентов (МТМ-Г).

МТМ-Г – это запатентованная в РФ технология, доступная для комплексного обследования подводных и сухопутных трубопроводов в любых условиях и на любых глубинах. Разработанные ООО «АКОРД-Технолоджи» для работы по этому методу магнитометры «КОРД» позволяют выявить и идентифицировать зоны концентрации механических напряжений, а программные алгоритмы позволяют с высокой точностью охарактеризовать все напря-

женные участки и оценить целостность трубопровода с учетом распределения действующих нагрузок, что наиболее важно в условиях морской среды и/или нестабильный грунтов.

Силами специалистов компании «АКОРД-Технологии» уже были обследованы более 1100 км подводных и 300 км сухопутных трубопроводов различного назначения, включая 6 подводных магистральных газо- и нефтепроводов длиной от 80 до 240 километров с применением магнитометров «КОРД» устанавливаемых на различные подводные и сухопутные носители.

Для диагностирования трубопроводов на больших глубинах магнитометры «КОРД» устанавливаются на ТНПА рабочего или инспекционного класса, в зависимости от подводных условий. Бесконтактное обследование выполняется по всей длине трубопровода (от райзера до манифольда, между манифольдами), в том числе заглубленного, с применением трассопоискового оборудования в реальном времени (рис. 1).

На малых глубинах, где применение ТНПА невозможно по причине ограничений судна-носителя, в условиях нулевой видимости или сильных течений обследование МТМ-Г может быть выполнено с применением буксируемого подводного аппарата типа «SANKI» (рис. 2).

В «хороших» условиях мелководья, обследования может быть выполнено с применением подводного буксировщика и водолазов (рис. 3).

Прибрежные и сухопутные участки трубопроводов обследуются магнитометром КОРД в наземном исполнении (рис. 4).

Таким образом, различные модификации магнитометра позволяют провести непрерывное, сплошное обследование трубопровода от места добычи в море до приемной станции на берегу.

Результаты диагностирования трубопроводов данным методом регулярно подтверждаются шур-

фованием на наземных участках, проведенными ремонтами, сравнением с результатами предыдущих инспекций в рамках мониторингового обследования.

При этом необходимо отметить, что подход МТМ-Г к оценке целостности трубопроводов в корне отличается от классического понимания тем, что в ходе обследования регистрируются изменения в магнитном поле трубопровода, вызванные изменением механических напряжений. Такие зоны концентрации напряжений могут быть обусловлены совокупностью факторов, в том числе наличием дефектов, но не ограничиваться ими, а оценка их степени опасности проводится в отношении предельно допустимых параметров, определяемых проектом. Учитывая условия, особенности и разнообразие причин возникновения аномалий магнитного поля, вызванных изменениями механических напряжений, сравнивать результаты диагностики трубопроводов классическими методами и МТМ-Г с позиции выявления всех дефектов или обнаружения всех сварных соединений представляется некорректным. Подход МТМ-Г, основанный на оценке именно действующих механических напряжений, полностью соответствует современным требованиям в области обеспечения безопасности трубопроводов.

Ключевым отличием МТМ-Г от подобных бесконтактных и иных классических методов диагностики является оценка опасности аномалии механических напряжений, а не отдельного дефекта. При этом такая аномалия быть вызвана, как только напряженно-деформированным состоянием, так и одиночным дефектом, или скоплением дефектов (кластером), и их сочетанием с повышенными нагрузками. В связи с этим в декларации качества МТМ-Г отсутствует понятие «дефект» в его классическом понимании. МТМ-Г определяет величину отклонения напряжений в области выявленной аномалии от средних фоновых значений, которые характеризуют состояние трубопровода в условно безаномальной зоне. Любое изменение механических напряжений от средних фоновых значений (например, вызванное потерей металла) будет изменять магнитное поле.

Экспериментально установлено, что чувствительность магнитометров «КОРД» позволяет зафиксировать магнитную аномалию при отклонении механических напряжений от фона более чем на 0.5% SMYS и сохранять доверительный уровень 95% на всем диапазоне напряжений в упругой зоне.

Эффективность МТМ-Г и его способность выявлять потенциально опасные участки и оценивать их степень опасности неоднократно доказана натурными и стендовыми испытаниями, проведенными обследованиями, в том числе после землетрясений и на участках нестабильных грунтов, прибрежных зонах морей. Технические отчеты обследований заверены международными экспертными организациями такими, как DNV и IRMS.

В отличие от других бесконтактных методов, основанных на аналогичных принципах, про-

граммные алгоритмы МТМ-Г позволяют выделить кольцевую составляющую из общих комплексных напряжений, и проанализировать ее отдельно. Величина потери металла имеет корреляцию с эквивалентом кольцевых напряжений, т.е. изменение толщины стенки при всех прочих равных и одинаковом давлении будет изменять кольцевые напряжения. Следовательно, регистрация таких изменений в кольцевых напряжениях может позволить оценить величину потери металла. Эту зависимость можно использовать при определенных условиях и допущениях. При этом рассчитанный коэффициент концентрации напряжений (SCF) указывает во сколько раз кольцевые напряжения в области аномалии превышают фоновые значения, взятые для безаномальных участков.

Используя такую зависимость, в отчетах МТМ-Г для каждой аномалии может быть произведена оценка потери металла, но т.к. это не прямые измерения, а результат обратного пересчета от фактических кольцевых напряжений при определенных условиях, то к этому показателю применяется допуск определенный допуск (% от номинальной толщины стенки).

Также МТМ-Г позволяет выявить изменение продольных напряжений как суммарный момент действия сил, действующих в сечении трубопровода в продольном направлении. За счет этого становится возможной оценка его состояния в условиях оползней, промывов донных грунтов, сейсмической активности, волновых нагрузок и циклических температурных изменений.

Внутренние методики и алгоритмы, применяемые при анализе магнитных данных, позволяют не только дать оценку степени опасности выявленной аномалии, т.е. ранжировать, но и рассчитать параметры безопасной эксплуатации каждого отдельного участка, необходимые для формирования программ обслуживания, мониторинга или ремонта. К таким параметрам относятся коэффициент концентрации напряжений (SCF), безопасное рабочее давление (Рбез), коэффициент безопасного давления (КБД, ERF) и другие.

Примеры реальных работ и контрольное шурфование выявленных аномалий с целью определения соответствия фактического состояния трубы степени опасности аномалии, определенной МТМ-Г также доказывают эффективность и практичность применения этого метода.

Так, например, по результатам обследования в 2021 году 24" подводного трубопровода в Суэцком заливе (Египет) на глубинах до 15м, в прибрежной зоне и на береговом участке, были выявлены несколько аномалий разной природы 1 и 2 степени опасности. Участок был заменен новым, а на вырезанной части был проведен неразрушающий контроль, который подтвердил наличие трещин, примыкающих к сварному соединению, наличие напряженно-деформированного состояния в виде упругопластического изгиба в вертикальной и горизонтальной плоскости, а также внутренней коррозии. Прогноз по коррозии МТМ-Г по результатам



Рис. 4 - Прибрежные и сухопутные участки трубопроводов обследуются магнитометром КОРД в наземном исполнении

анализа изменений кольцевых напряжений – 35%, фактическая потеря металла – 40% (с учетом 2-х лет разницы между инспекцией и верификацией).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях консервативности отрасли и отсутствия гибкости отечественной нормативной базы в части выбора, внедрения и применения альтернативных способов диагностики трубопроводов, особенно тех, где применение ВТД не предусмотрено, невозможно или затруднено, вопрос обеспечения их безопасности и целостности является наиболее острым. В то же время, известны случаи аварий и отказов трубопроводов, в том числе новых, спустя некоторое время после обследования классическими методами, направленными на выявление и определение размеров дефектов. Причинами таких аварий далеко не всегда были локальные дефекты. Подход «рвется там, где тонко» работает только при всех прочих равных, а ремонты по результатам обследований классическими методами не всегда проводятся именно на тех участках, где следует. Поэтому для полноценного обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов, для планирования ремонтных работ, изменения режимов транспортировки продукта необходимо знать и учитывать действующие нагрузки, выявить и оценить которые поможет Метод Томографии Магнитных Градиентов и магнитометры «КОРД».

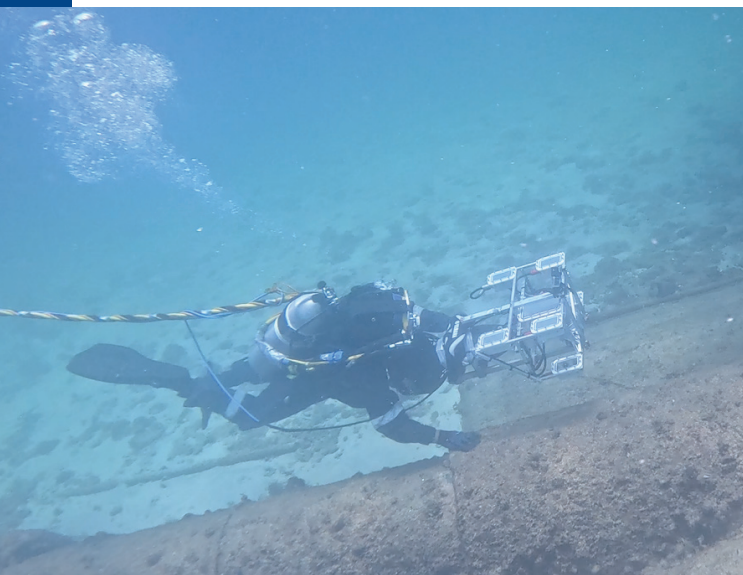


Рис. 3 - Обследование с применением подводного буксировщика и водолаза