



МЕТОД ТОМОГРАФИИ МАГНИТНЫХ ГРАДИЕНТОВ (МТМ-Г) ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

В данной статье рассматривается применение бесконтактного магнитометрического метода томографии магнитных градиентов (МТМ-Г) как одного из наиболее достоверных подходов к оценке целостности и технического состояния морских трубопроводов. В тексте представлен обзор существующих методов диагностики морских трубопроводов и их ограничений при эксплуатации в сложных морских условиях. Описаны физические принципы метода МТМ-Г, его отличия от традиционных и аналогичных бесконтактных методов контроля. Приведены примеры практического применения метода для диагностики подводных магистральных трубопроводов на больших и малых глубинах. Рассматриваются возможности интеграции метода с другими диагностическими технологиями для повышения точности оценки технического состояния трубопроводов.

Ключевые слова: метод томографии магнитных градиентов, МТМ-Г, диагностика морских трубопроводов, механические напряжения, бесконтактная инспекция, ТНПА, безопасность морских трубопроводов.

Авторы: Колесников Игорь Сергеевич – технический консультант, автор изобретения, патентообладатель
Воейков Денис Романович – Генеральный директор ООО «АКОРД-Технолоджи».

ВВЕДЕНИЕ

Морские подводные трубопроводы играют важную роль в транспортировке углеводородов, обеспечивая устойчивую связь между морскими месторождениями и объектами переработки. В отличие от наземных трубопроводов, они эксплуатируются в более жестких условиях внешнего воздействия, включая агрессивную морскую среду, неравномерность подводных течений, приливы/отливы, ледовые нагрузки, подвижки грунта. Кроме того, на состояние трубопроводов оказывают влияние различные эксплуатационные и природные факторы, включая коррозионные процессы, динамические нагрузки, оползневые явления, температурные границы сред, механические напряжения в области свободных провисов и многие другие. Все это может приводить к аварийным ситуациям. Поэтому своевременное техническое диагностирование и оценка целостности трубопроводов — это одна из основных задач и обязанностей операторов трубопроводов.

Для диагностики технического состояния морских трубопроводов применяются различные классические методы контроля: внутритрубная дефектоскопия, визуальные инспекции с помощью АНПА и ТНПА, гидроакустические исследования, диагностика состояния катодной защиты и контактные методы контроля (ультразвуковые, рентгеновские, вихретоковые).

Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, области применения (с соответствующими ограниче-

ниями), предназначен для выявления различного рода особенностей металла в виде дефектов с геометрическими размерами, обладает своим уровнем достоверности и точности. Но ни один из них не направлен на прямое выявление и определение истинных причин аварий трубопроводов — зон концентрации и оценку уровня действующих механических напряжений.

Известны случаи отказов на новых трубопроводах после проведения обследования классическими диагностическими методами, направленными на выявление геометрических параметров (размеров) дефектов в металле трубопровода. При этом причинами аварий не всегда служат локальные дефекты. Более того, современная нормативная база регламентирует определять уровень механических напряжений как основной критерий безопасности трубопровода. Действительно, целостность трубопроводов определяется не только наличием, количеством, расположением или размерами дефектов, поскольку дефекты с одинаковыми размерами могут представлять разную опасность в зависимости от действующих внешних нагрузок.

Например, «критические» по размерам дефекты, появившиеся на этапе строительства, могут представлять меньшую опасность, чем «допустимые» по размерам дефекты, возникшие в процессе эксплуатации на участках УПИ, нестабильных грунтов, болотистой местности, свободных провисов, в сейсмоопасных регионах. А условно «допустимые» дефекты малого размера (например стресс-коррозия) могут быть намного опаснее «крити-

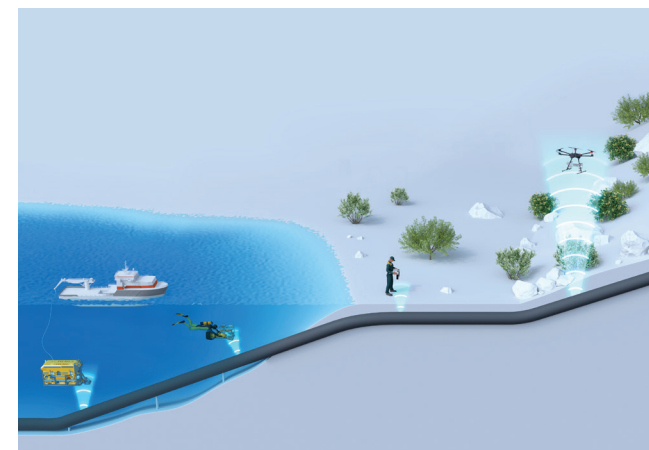


Рис. 1 Области применения МТМ-Г

ческих» дефектов потери металла, если находятся в зоне растяжений либо сложного напряженно-деформированного состояния из-за провисания из-за сложного профиля поверхности морского дна и действия боковых подводных течений.

Подход «рвется там, где тонко» работает только при всех прочих равных. А реальное поведение трубопровода под водой в условиях действующих постоянных/переменных сдвиговых и продольных нагрузок, вызванных внешними факторами, невозможно определить без определения таких внешних воздействий. Современные методики оценки механических НДС основаны на расчетных моделях, закладываемых на этапе проектирования в виде коэффициентов запаса прочности.

Именно по этим причинам с целью качественного и полноценного технического диагностирования и оценки целостности трубопроводов был разработан и внедрен Метод Томографии Магнитных Градиентов (далее – МТМ-Г).

МЕТОД ТОМОГРАФИИ МАГНИТНЫХ ГРАДИЕНТОВ

МТМ-Г позволяет бесконтактно, в штатном режиме эксплуатации трубопровода выявлять и характеризовать зоны концентраций механических напряжений, сопряженные с наличием дефектов или напряженно-деформированным состоянием, и оценивать целостность трубопровода на основе прямой регистрации параметров изменения магнитных свойств трубопровода.

ООО «АКОРД-Технолоджи» — российская компания-разработчик магнитометров «КОРД», осуществляет техническое диагностирование ферромагнитных трубопроводов методом МТМ-Г. Конструкция магнитометров «КОРД» позволяет не только выявить зоны концентрации механических напряжений, но и выделить кольцевые и продольные составляющие механических напряжений для более детальной дальнейшей проработки и анализа. Например, оценка отдельно кольцевой составляющей влияет на определение критических и безопасных рабочих давлений трубопровода, а оценка продольных напряжений может быть критерием допустимости максимальной длины провиса морского трубопровода.

МТМ-Г подходит для всех линейных ферромагнитных трубопроводов (трубные стали, чугуны, высокопрочные чугуны с шаровидным графитом) вне зависимости от способа их укладки. Метод особенно хорошо зарекомендовал себя для технического диагностирования тех

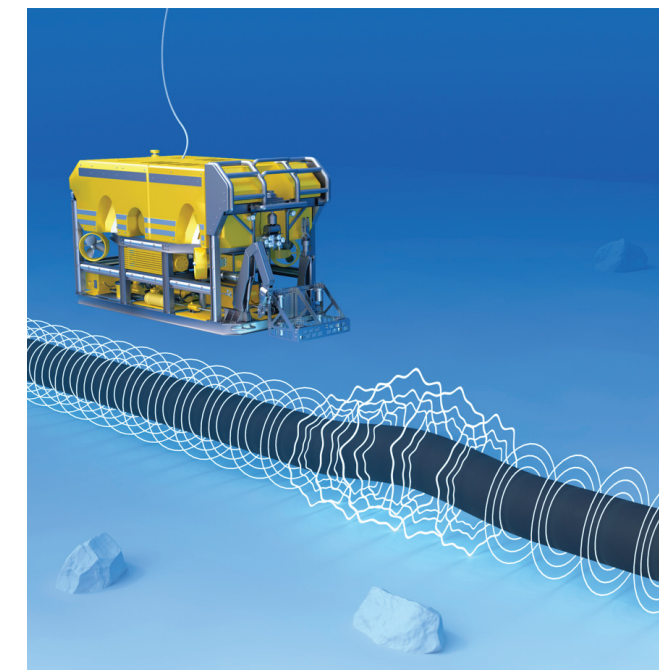


Рис. 2 МТМ-Г обследование с ТНПА

участков трубопроводов, где затруднено шурфование (водные переходы, заболоченная местность, трубопроводы морской прокладки), а также для трубопроводов, где применение стандартных средств неразрушающего контроля, включая инспекцию внутритрубными снарядами-дефектоскопами, невозможно или затруднено.

Методы, требующие вскрытия изоляции или размещения датчиков на поверхности трубы, могут потребовать изменения режима эксплуатации трубопровода, что связано с дополнительными затратами и рисками. А требование непосредственного контакта с поверхностью металла трубопровода, а также специальной подготовки поверхности для проведения НК классическими методами, 100% вскрытие на всю длину трубопровода, снятие и восстановление бетонного изоляционного покрытия, делает их использование на морских трубопроводах практически невозможным.

Для МТМ-Г обследования не требуется специальной подготовки трубопровода к самому обследованию (оборудование камерами запуска/приема поршня ВТД, очистки, подготовки внутренней поверхности трубопровода, внутритрубной инспекции геометрии трубопровода, специальной маркировки трассы), контакта с трубопроводом или изменения режимов эксплуатации трубопровода во время инспекции.

Таким образом, МТМ-Г позволяет:

- снижать затраты на обследование за счет отсутствия необходимости в подготовительных работах;
- обеспечивать регулярный мониторинг технического состояния трубопровода без прерывания его работы;
- проводить оперативный мониторинг без остановки трубопровода в экстренных ситуациях (диагностирование после землетрясений, оползней, скачков давления, аварий);
- проведение регулярного осмотра в рамках мониторинга оценки технического состояния.

Вышеперечисленные преимущества делают МТМ-Г



Рис. 4 Принцип выявления зон концентрации механических напряжений

эффективным инструментом для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции и предупреждения возможных рисков аварий.

ДИАГНОСТИКА МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

МТМ-Г активно применяется для диагностики различных типов морских трубопроводов, в том числе:

- глубоководных магистральных трубопроводов, где использование контактных методов ограничено;
- прибрежных и мелководных участков, подверженных динамическим нагрузкам (волновым воздействиям, приливным течениям). Фиксируются изменения напряженно-деформированного состояния, возникающие из-за колебаний и изгибов трубопровода;
- трубопроводов в районах с высокой сейсмической активностью, где важно учитывать дополнительные механические воздействия. Выявляются участки повышенных механических напряжений, вызванные подвижками грунта, оседанием или тектоническими деформациями. Это позволяет проводить диагностику после сейсмических событий и оценивать потенциальные риски повреждений.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ГРАНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Для проведения МТМ-Г диагностики используются различные носители, адаптированные под конкретные

условия эксплуатации:

- подводные телеуправляемые аппараты (ТПА/ROV) – для обследования глубоководных трубопроводов;
- водолазное оборудование – для диагностики трубопроводов на мелководье и прибрежных зонах.
- беспилотные летательные аппараты (БПЛА/UAV) – для инспекции наземных и надводных участков.
- автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА/AUV) – возможна интеграция магнитометра с автономным носителем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

На основе данных МТМ-Г обследования рассчитываются следующие параметры безопасности трубопровода по критерию предельных состояний для каждой выявленной аномалии магнитного поля:

- максимально допустимое безопасное рабочее давление $R_{без}$;
- период безаварийной работы $T_{без}$ и остаточный ресурс;
- уровень кольцевых и других (продольных, сдвиговых, комплексных) локальных напряжений S_i ; действующих в сечении трубопровода;
- коэффициент безопасного давления КБД (ERF).
- Распределение основных типов дефектов в границах аномалии МТМ-Г.

Данные МТМ-Г позволяют рассчитывать параметры

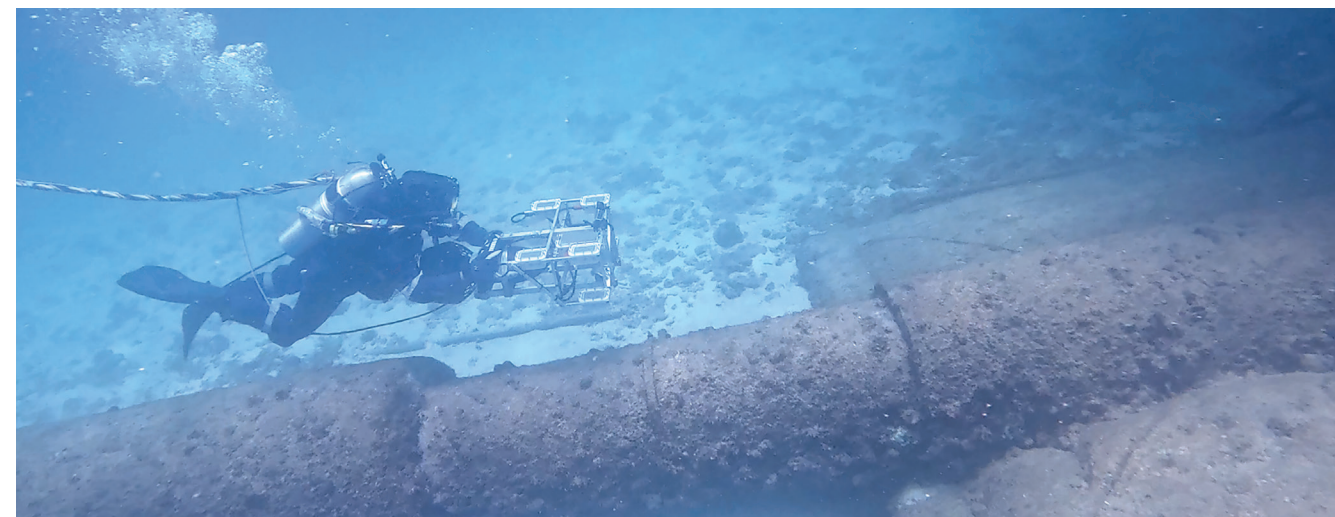


Рис. 5 МТМ-Г обследование 36" газопровода компании ADNOC (ОАЭ, Персидский залив)

безопасности ферромагнитных трубопроводов на основе определения абсолютных величин фактически действующих максимальных механических напряжений в границах аномалии (дефектного участка).

Расчет параметров безопасности трубопровода по данным МТМ-Г основан на определении характеристических параметров величины концентрации механических напряжений (SCF) в кольцевом и других направлениях. В ходе МТМ-Г обследования регистрируются значения магнитной индукции, определяется магнитный момент в поперечном сечении трубопровода, связанный с механическим напряжением в границах аномалии и оценивается коэффициент концентрации напряжений ККН (SCF) как величина отклонения величины напряжений в области аномалии от средних фоновых значений.

ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ДАННЫХ

МТМ-Г характеризуется высокой чувствительностью к изменениям магнитного поля, вызванным механическими напряжениями, что позволяет фиксировать минимальные отклонения в напряженно-деформированном состоянии трубопровода.

Ключевые параметры, определяющие точность метода:

- Чувствительность к изменениям механических напряжений на уровне 0,5% от предела текучести.
- Высокая достоверность выявленных аномалий, подтвержденная практическими испытаниями и многократной верификацией в шурфах.
- Возможность автоматизированного анализа данных, обеспечивающего объективную оценку состояния трубопровода.

МТМ-Г является одним из инструментов комплексной диагностики морских трубопроводов, направленным на предупреждение и выявление истинных причин потенциальных аварий, обеспечивающим высокую достоверность результатов обследования, прогнозирования и оценки потенциальных рисков.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Метод МТМ-Г в 2025 году применяется для диагности-

ки подводных магистральных трубопроводов в различных регионах, включая глубоководные участки и сложные прибрежные зоны.

Начиная с 2020 года ООО «АКОРД-Технолоджи» провело диагностику более 1100 км морских трубопроводов в различных акваториях Индии, Малайзии, Саудовской Аравии, Египта и ОАЭ.

Аудит технических отчетов был проведен DNV, IRMS, а также другими экспертными организациями. В ряде проектов по результатам МТМ-Г успешно проведены ремонтно-восстановительные работы трубопроводов, в том числе морских.

Так, например, трубопровод компании SOPC (Суэц, Египет). Верификация подтвердила наличие опасных зон КН, обусловленных наличием продольных трещиноподобных дефектов с выходом на монтажное сварное соединение, дефекты потери металла на внутренней стенке трубопровода DN24", причем совокупность дефектов подтверждена на участке холодного изгиба, выходящего за рамки допустимого в условиях мелководья и сильных морских отливных/приливных течений.

Результаты МТМ-Г обследования трубопровода компании Rashpetco (СП Shell и Petronas) в Египте (глубины от 60 до 90 метров), использовались оператором для составления плана-графика капремонтов на основе ранжирования выявленных аномалий. Результаты МТМ-Г обследования трубопроводов компаний ONGC и Reliance были основанием для замены дефектных секций.

В ОАЭ результаты МТМ-Г обследования подводного газопровода DN36" компании ADNOC на глубинах 5–7 метров были подтверждены ВТД и последующим НК.

Кроме того, неоднократно проведено сплошное обследование магистральных трубопроводов от места подводной добычи до НПЗ, перекрывая все три зоны заложения – глубоководную, мелководную и сухопутную, обеспечивая обследование 100% длины без пропусков.

Наш опыт непосредственного взаимодействия с владельцами/операторами трубопроводов демонстрирует, что МТМ-Г существенно расширяет возможности оценки технического состояния морских трубопроводов, не заменяя, а дополняя существующие подходы к оценке целостности данными о фактическом распределении напряженно-деформированных участков конструкции и степени их опасности.