

УДК 621.644

Инновационная технология «АКВА-МТМ» инспектирования и обеспечения надежности трубопроводов нефтегазовых месторождений шельфа с учетом состояния металла и механических напряжений

В.Н. Белотелов^{1*}, Л.А. Хуснутдинов¹¹ ООО «НТЦ «Транскор-К»», Российская Федерация, 111141, г. Москва, ул. Перовская, д. 31А

* E-mail: info@transkor.ru

Ключевые слова: подводные трубопроводы, надежность, метод магнитной томографии, бесконтактное обследование, критерий качества диагностирования, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА), технология АКВА-МТМ, состояние металла труб.

Тезисы. Эксплуатационная надежность подводных трубопроводов может быть обеспечена регулярно получаемыми данными о реальном техническом состоянии их металла, актуальных нагрузках и напряжениях в текущих условиях. При использовании метода магнитной томографии качество диагностирования определяется параметрами сканирования в процессе перемещении носителя оборудования вдоль оси трубопровода. В статье рассмотрены критерии и система контроля качества сканирования, достигаемого с помощью оборудования АКВА-МТМ, включая приоритетное направление – телеуправляемые необитаемые подводные аппараты.

Проблема обследования реального состояния металла подводных трубопроводов на значительных глубинах весьма актуальна, поскольку далеко не для всех объектов применимо внутритрубное обследование снарядами-дефектоскопами. Настоящая публикация посвящена методу магнитной томографии (МТМ) – инновационной технологии бесконтактного обследования на значительном удалении от оси трубопровода, применяемой на практике с 2002 г. для подземных трубопроводов¹. С 2011 г. используется модификация этой технологии для подводных объектов под торговой маркой «АКВА-МТМ®» [1, 2]. Российская разработка «АКВА-МТМ» в настоящее время занимает лидирующие позиции в мире: она применялась для обследования более 1500 км морских трубопроводов в Малайзии, Индонезии и ОАЭ и была признана победителем международного конкурса инновационных технологий «Арктические технологии» в г. Хьюстоне (США, 2012 г.) по критериям новизны, степени готовности к применению, экономического эффекта и широты применения [3].

Метод основан на физическом явлении обратной магнитострикции (эффект Виллари), отражающем пропорциональную связь между распределением уровней механических напряжений (деформаций) вдоль протяженного ферромагнитного объекта и его магнитными характеристиками. Аномалии распределения магнитного поля позволяют определить местоположение и косвенно измерить локальные механические напряжения в границах каждого участка с дефектами металла или повышенными нагрузками, которые вызывают концентрацию напряжений. Данная технология предназначена для обеспечения надежности трубопроводов, не оборудованных камерами пуска-приема или по иным причинам не подлежащих внутритрубному диагностированию. (В зарубежной практике подобные объекты описывают обычно как *англ. unpiggable & difficult pipelines.*)

Прибор для осуществления МТМ – бесконтактный сканирующий магнитометр, который в процессе сканирования должен двигаться вдоль оси трубопровода либо под управлением оператора (на суше), либо путем перемещения по заданной траектории над осью подводного объекта летающими дронами или телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА, или *англ. ROV*).

¹ См. РД 102-008-2002. Инструкция по диагностике трубопроводов бесконтактным магнитометрическим методом. – М.: ВНИИСТ, 2002.

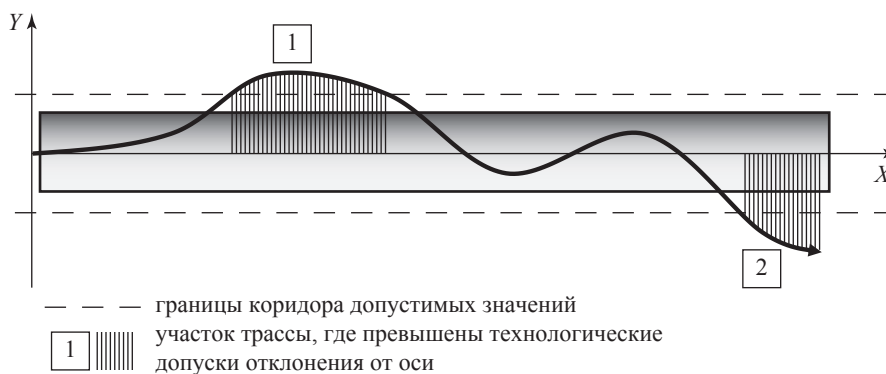


Рис. 1. Схема перемещения магнитометра [4]

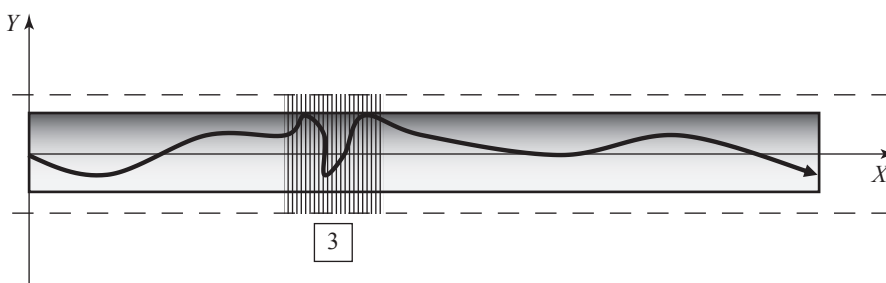


Рис. 2. Пример недопустимого движения магнитометра в допустимом коридоре: см. экспликацию к рис. 1

Важным критерием обеспечения качества сканирования является удаление дрона или ТНПА от оси трубопровода. При этом существуют технологические допуски отклонения от оси в некотором коридоре допустимых отклонений, ограниченном слева и справа максимально допустимыми значениями бокового удаления от оси, а также сверху – максимально допустимым вертикальным удалением. При нарушении этого критерия уровень фона и помех будет превосходить уровень полезного сигнала, получаемого от трубы. Эти помехи при записи магнитного поля могут быть ошибочно приняты за аномалии напряженно-деформированного состояния (НДС), обусловленные особенностями трубопровода. Пример траектории² магнитометра, где на участках 1 и 2 имел место выход за допустимые границы удаления от оси, приведен на рис. 1 [4].

Для обеспечения качества сканирования перемещение измерительной системы должно происходить максимально прямолинейно и плавно, иначе на магнитограмме появятся

артефакты, не связанные собственно с аномалиями НДС, как это имеет место на участке 3 (рис. 2). В итоге параметры работоспособности трубопровода (допустимые давление и температура) могут быть рассчитаны с недопустимыми погрешностями [2, 4, 5].

При обследовании подводных трубопроводов с помощью технологии «АКВА-МТМ» движение подводного носителя магнитометра, например ТНПА, может не обеспечивать высокого качества сканирования в случае наличия сильных подводных течений, а также ветровой и волновой нагрузок. Это влияет на величину полной суммарной динамической девиации измерительной системы от оси обследуемого объекта – соответствующий критерий авторы считают наиболее действенным для оценки прямолинейности движения ТНПА.

Иногда за качеством движения измерительной системы на ТНПА можно наблюдать и оперативно корректировать его в режиме онлайн. В то же время существуют настолько сложные природные условия, при которых ранее принятых подходов к обеспечению качества сканирования оказывается недостаточно. Так, обследование подводного магистрального нефтепровода (МН) протяженностью 9,7 км

² Для наглядности графики здесь и далее на рис. 2 иллюстрируют движение прибора в горизонтальной плоскости. \vec{X} – приоритетное направление движения (ось трубопровода).

(в общем коридоре с магистральными газопроводами ПАО «Газпром») через пролив Невельского потребовало применения изобретенных способа и устройства обеспечения качества регистрации данных с помощью специального буксируемого тела, на котором был смонтирован магнитометр для подводного сканирования, с принципиально новой системой обеспечения режима сканирования путем задействования подводных течений в качестве элементов стабилизации плавности хода. Пролив Невельского, по свидетельству специалистов по навигации, является вторым в мире по сложности производства работ, уступая лишь Гибралтару (рис. 3). Работу затрудняли сильнейшие, зачастую разнонаправленные подводные течения скоростью до 7 м/с (как зафиксировано в процессе работы), ветер скоростью до 38 м/с (рабочими условиями считается скорость ветра до 10 м/с), постоянное волнение амплитудой до 1 м, что в условиях Сахалина является нормой даже в относительно спокойный сезон ранней осени. Условия работы также включали нерегулярные приливы и отливы (два цикла в сутки) с разницей уровней до 2,5 м, что затрудняло, во-первых, выход в море и проход по бухте, а во-вторых, сам процесс сканирования, поскольку при этом требуется

выдерживать равномерное удаление прибора от оси трубопровода, а ориентироваться по глубине погружения прибора крайне сложно.

Качество движения магнитометра, смонтированного на системе SmartBat, оценивали по величине полной суммарной девиации S , определяя полезную длину участка регистрации данных магнитометром и учитывая «лишней» пройденный регистрирующей системой путь L , по следующему отношению:

$$S = \frac{L}{X} 100 \% = \frac{\sum (|\Delta x| + |\Delta y| + |\Delta z|) - X}{X} 100 \%, \quad (1)$$

где X – полезная длина объекта обследования.

Например, пусть над трубопроводом длиной 500 м магнитометр передвигался строго вдоль оси первые 100 м, затем постепенно сошел с оси, отклонившись на 1 м на протяжении следующих 50 м, затем вернулся на ось на следующих 50 м, после чего совершил аналогичные маневры, отклонившись от оси на 1 м и вернувшись обратно на третьей сотне метров, и таким же образом отклонился на 1,5 м на четвертой сотне метров (опустим здесь вопрос о допустимости такого маневра по другим критериям, например максимального удаления от оси), а затем на пятой сотне метров снова

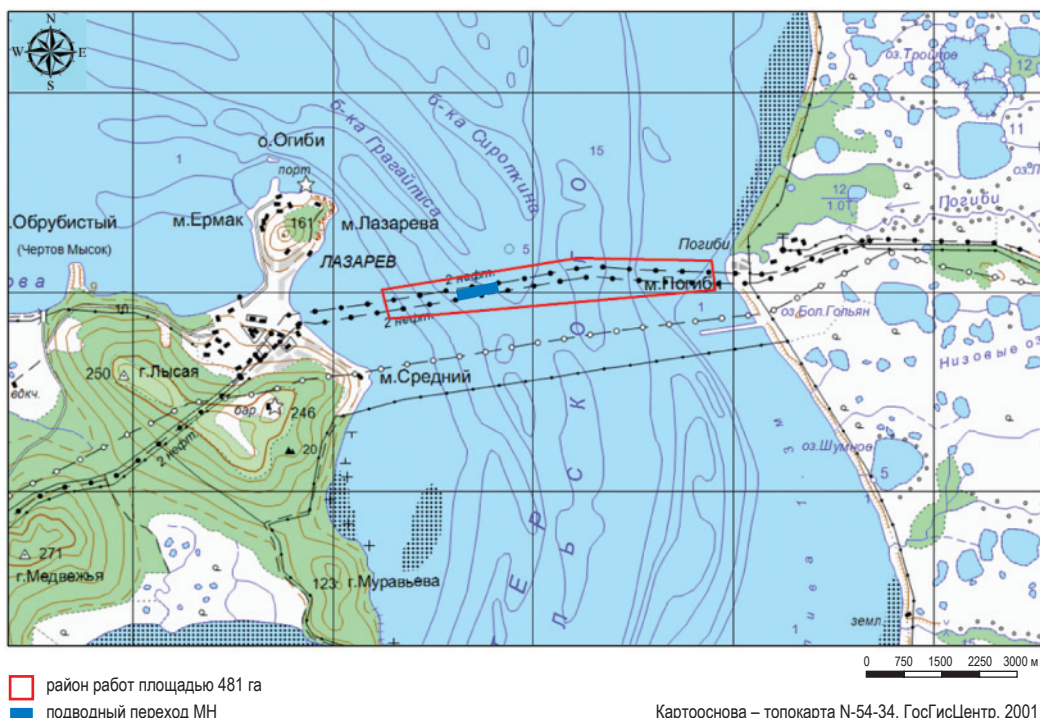


Рис. 3. Район работ по обследованию подводного перехода МН через пролив Невельского

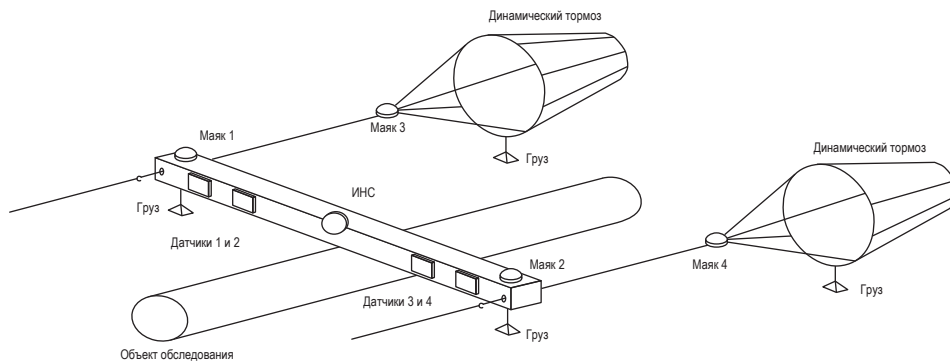


Рис. 4. Принципиальная схема системы стабилизации перемещения магнитометра (SmartBat) при сканировании поля трубопровода: ИНС – инерциальная навигационная система

двигался строго по оси. Тогда суммарная длина «лишнего» пути будет рассчитана как

$$L = |0,5| + |-0,5| + |1| + |-1| + |1,5| + |-1,5| = 6 \text{ м}, \quad (2)$$

а полная суммарная девиация вычислена как

$$S = (6 / 500) \cdot 100 \% = 1,2 \%. \quad (3)$$

В то же время динамическая девиация на первом и последнем 100-метровых участках будет равна нулю (0 %), на 2-м, 3-м и 4-м участках составит 1; 2 и 3 % соответственно

На рис. 4 показана принципиальная схема системы обеспечения стабильности перемещения регистрирующей системы SmartBat. Гидростабилизаторы системы дополнительно снабжены средствами изменения плавучести, обеспечивающими в совокупности требуемую плавучесть задней части конструкции, необходимую для обеспечения максимально приближенного к горизонтальному положению буксируемого тела, выполненного в виде жесткой рамы со смонтированными на ней регистрирующим физическое поле магнитометром в защитном водонепроницаемом корпусе, а также средствами изменения плавучести, защиты, обеспечивающими сохранность всех приборов регистрации, освещения и т.п.

Помимо обследования с помощью подводных аппаратов, используемых в качестве носителей, в 2017 г. на объектах АО «АЛРОСА-Газ» осуществлено первое в мировой практике обследование технического состояния подводных переходов магистрального газопровода через р. Вилюй с применением МТМ на дроне (октокоптере). Уникальность и сложность работы потребовали целого комплекса инновационных решений, ранее нигде в мире



Рис. 5. Общий вид МБС-04 «СКИФ» на октокоптере 12Р-Ф (а) и сканирование подводных переходов газопровода АО «АЛРОСА-Газ» методом магнитной томографии (б)

не реализованных. Фактором, затрудняющим использование традиционных подходов к обследованию газопроводов, не оборудованных на протяженных участках водных переходов камерами пуска-приема снарядов-дефектоскопов, являлось очень сильное течение р. Вилюй после гидроэлектростанции. Зеркало реки в русловой части не замерзает на расстоянии около 10 км от Вилюйской ГЭС даже в условиях якутской зимы. В подобных

Результаты сравнительных испытаний технологий бесконтактной магнитометрической диагностики

Прибор	Метод диагностики	Кол-во подрядчиков	POD, %
МБС-04 «СКИФ»	Магнитная томография	1	75,71
КМД-01М	Измерение вектора магнитной индукции в четырех точках пространства посредством тонкопленочного магниторезистивного преобразователя	2	15,71
«Зонд-скан»	Индукционно-магнитометрическое сканирование	3	7,14

условиях обычное сканирование магнитометрами бесконтактными сканирующими МБС-04 «СКИФ» со льда или с катера оказалось неосуществимым, поскольку максимальная девиация от оси была существенно меньше заявленного производителем приборов ограничения, хотя чувствительность прибора достаточна для работы на глубинах до 15 м. Обследование выполнялось в условиях температуры минус 45 °С при значительной скорости течения реки, исключающей равномерное передвижение водолазов или судов строго над осью подводного трубопровода. С целью преодоления указанных трудностей специально модифицированный магнитометр был интегрирован на дрон 12Р-Ф, выполняющий полетное задание по GPS-координатам маршрута в режиме автопилотирования на заданной высоте над зеркалом воды с заданными ограничениями скорости полета согласно лимитирующим требованиям системы МБС-04 «СКИФ» (рис. 5).

Общими показателями качества для любых методов неразрушающего контроля (НК), согласно стандартам международных организаций³ (например, Форума операторов трубопроводов – *англ.* The Pipeline Operators Forum), являются критерии выявляемости и правильной оценки степени опасности дефектов металла. Такими показателями для всех методов служат вероятность выявления и вероятность правильной интерпретации

степени опасности дефектов металла. В частности, норматив POF регламентирует расчеты вероятностей выявления (*англ.* probability of detection – POD) и интерпретации (*англ.* probability of interpretation – POIn) степени опасности аномалий – последняя в процентах от максимума (100 %). Также используется показатель итоговой достоверности метода НК, %, как произведение двух вышеуказанных величин.

Данные показатели наряду с объемом контроля металла трубопровода по протяженности объекта, %, позволяют обоснованно выбирать лучшую технологию и подрядчика из числа участвующих в конкурсных торгах на диагностический сервис, тем самым повышая уровень надежности подводных объектов. В качестве иллюстрации можно привести сводную таблицу результатов сравнительных испытаний вслепую трех разных технологий бесконтактного магнитометрического обследования. Испытания проводились согласно РД 102-008-2002 и ГОСТам⁴ на специальном натурном полигоне АО «АЛРОСА-Газ». Испытательный стенд длиной 110 м был смонтирован из дефектных труб магистрального газопровода Таас-Юрях – Мирный – Светлый и уложен под землю на проектную глубину 1,4 м. Использовались трубы диаметром 325 мм со стенками толщиной 6...8 мм, изготовленные из стали марок СтЗсп, 10, 20. Гидроиспытания стенда проводили под давлением 0,5 МПа.

В заключение следует отметить, что количественные показатели качества, позволяющие контролировать сканирование, и итоговые параметры достоверности технического

³ См. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. Quality management systems. Requirements. – М.: Стандартинформ, 2015; ASTM E1212. Standard Practice for Quality Management Systems for Nondestructive Testing Agencies. – 2009. ASTM E 1212. Стандартная практика организации и технического обслуживания систем контроля качества для организаций, занимающихся неразрушающим контролем (ASTM E1212, Standard Practice for Quality Management Systems for Nondestructive Testing Agencies); Specifications and requirements for intelligent pig inspection of pipelines. Version 2009. Pipelines Operators Forum.

⁴ См. ГОСТ Р ИСО 11843-1-2007. Статистические методы. Способность обнаружения. Ч. 1: Термины и определения»; ГОСТ Р ИСО 11843-1-2007. Статистические методы. Способность обнаружения. Ч. 2: Методология в случае линейной калибровки.

диагностирования являются удобным инструментом обеспечения не только эффективности контроля металла, но и расчета параме-

тров прогнозирования надежности по методологии риск-ориентированного инспектирования (RBI).

Список литературы

1. Колесников И.С. Управление целостностью трубопроводов, не подлежащих внутритрубному инспектированию / И.С. Колесников, В.П. Горошевский, С.С. Камаева // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 3 (65). – С. 59–63.
2. Колесников И.С. Определение разрывной прочности на основании данных инспектирования МТМ (AQUA МТМ) / И.С. Колесников, В.П. Горошевский, С.С. Камаева // Материалы Нормативной недели Американского института инженеров-механиков (ASME), 17–21 сентября 2012 г. – Норфолк, Вирджиния, 2012.
3. AQUA-MTM // Spotlight of Arctic Technology, 3–5 декабря 2012. – Хьюстон, Техас, 2012.
4. Белотелов В.Н. Критерий качества движения магнитометра в процессе сканирования трубопровода по методу магнитной томографии / В.Н. Белотелов, В.П. Горошевский, А.А. Маслов // Путь науки. – 2017. – № 6 (40). – С. 18–21.
5. Колесников И.С. Предотвращение потерь с помощью усовершенствования методов инспектирования, метод магнитной томографии (МТМ). Дистанционная технология неразрушающего контроля подземных и подводных трубопроводов = Magnetic tomography method a remote NDE technology for buried & subsea pipelines / И.С. Колесников // Proc. of 2013 API Inspection Summit.

Innovative technology AQUA-MTM for inspection and reliability support of pipelines at the oil-gas offshore fields on account of metal conditions and mechanical stresses

V.N. Belotelov^{1*}, L.A. Khusnutdinov¹

¹ Research and Development Center TRNANSKOR-K, Bld. 31A, Perovskaya street, Moscow, 111141, Russian Federation

* E-mail: info@transkor.ru

Abstract. Serviceability of subsea pipelines can be provided with regular information about real technical conditions of pipe metal, actual real-time loads and stresses. When a magnetic tomography method is used, quality of diagnostics is determined by the characteristics of scanning while the carrier of equipment is moving along an axis of a pipeline. The article reveals quality standards of scanning executed by means of the AQUA-MTM instruments including a top-priority remotely operated vehicles, and a quality control system.

Keywords: subsea pipelines, reliability, magnetic tomography method, noninvasive inspection, quality standard of criterion diagnostics, remotely operated vehicle (ROV), AQUA-MTM technology, pipe metal condition.

References

1. KOLESNIKOV, I.S., V.P. GOROSHEVSKIY, S.S. KAMAYEVA. Integrity control of pipelines not subject to inline inspection [Upravleniye tselostnostyu truboprovodov, ne podlezhashchikh vnutritrubnomu inspektirovaniyu]. *V mire nerazrushyushchego kontrolya*. 2014. no. 3 (65), pp. 59–63. ISSN 1609-3178. (Russ.).
2. KOLESNIKOV, I.S., V.P. GOROSHEVSKIY, S.S. KAMAYEVA. ASME-MTM (AQUA MTM) Correlation: Burst Strength Prediction Using MTM Inspection Data. In: *Proc. of ASME Code Week, 17–21 September 2012*. Norfolk, Virginia, USA.
3. AQUA-MTM. In: *Proc. of Spotlight of Arctic Technology, 3–5 December, 2012*. Texas, Houston, 2012.
4. BELOTELOV, V.N., V.P. GOROSHEVSKIY, A.A. MASLOV. Performance measure of magnetometer motion at pipeline inspection by means of magnetic tomography [Kriteriy kachestva dvizheniya magnitometra v protsesse skanirovaniya truboprovoda po metody magnitnoy tomographii]. *Put Nauki = The Way of Science*. 2017, no. 6 (40), pp. 18–21. ISSN 2311-2158. Available from: http://scienceway.ru/d/706321/d/the_way_of_science_no_6_40_june.pdf
5. KOLESNIKOV, I. Magnetic tomography method a remote NDE technology for buried & subsea pipelines. *2013 API Inspection Summit Proc.*