



Управление надёжностью трубопроводов, не подлежащих внутритрубному инспектированию

Submitted 03.07.14
Accepted 15.07.14

Рассмотрены основные положения технического диагностирования трубопроводов с применением метода магнитной томографии, который обеспечивает дистанционную регистрацию комплексных механических напряжений и расчет параметров работоспособности на участках с дефектами металла. Получаемые данные служат основой для заключений экспертизы промбезопасности на опасные производственные объекты по реальному состоянию металла в условиях действующих эксплуатационных нагрузок.

I. S. Kolesnikov*, V. P. Goroshevsky*, S. S. Kamaeva*

Reliability Operations of Non-Piggable and Difficult Pipeline

The article briefly describes the main provisions of technical diagnostics of pipelines using magnetic tomography method (MTM). MTM provides remote registration of complex mechanical stresses and calculation of serviceability parameters [maximum allowable operating pressure, gamma-percentile lifetime; estimated repair factor] in areas with metal defects that ensure reliability. MTM AQUA and MTM (for subsea pipelines) are applicable including facilities not subject to the in-line inspection: field pipelines, pipelines of GCS, pumping stations and chemical [petrochemical] production; branch pipelines; bypass connections, etc. MTM data provide the basis for expert appraisal of industrial safety of hazardous production facilities by the real state of the metal under acting operational loads.

Keywords: magnetic tomography method; non-piggable and difficult pipeline; performance based integrity management program; ECDANICDA program

Сотрудники ООО НТЦ «Транскор-К», г. Москва

**КОЛЕСНИКОВ
Игорь Сергеевич**

Заместитель
генерального директора
по науке и производству,
эксперт СЭПБ 2-го уровня.



**ГОРОШЕВСКИЙ
Валериан Павлович**

Технический директор,
к. т. н., эксперт СЭПБ
2-го уровня.



**КАМАЕВА
Светлана Сергеевна**

Генеральный директор,
к. т. н., эксперт СЭПБ
2-го уровня.



Трубопроводный транспорт лидирует по объему грузопотоков, в 100 раз превосходя по этому показателю остальные виды транспорта. Насколько надежна трубопроводная инфраструктура России? В значительной части трубопроводы изношены, и их сеть нуждается в реконструкции. Ремонтно-восстановительные мероприятия согласно программам надежности должны планироваться по реальному состоянию металла, но на практике ограничиваются лишь обследованием косвенных характеристик состояния изоляционного покрытия и эффективности активной противокоррозионной защиты (ЭХЗ). Обследование состояния металла на всем протяжении объектов вплоть до последнего времени было возможно только с применением внутритрубного диагностирования (ВТД).

Более чем 1 млн. км российских трубопроводов не готовы к ВТД, и лишь немногим более 20% — главным образом газовые и нефтяные магистрали — позволяют провести обследование металла (рис. 1). Таким образом, для подавляющего большинства объектов: промышленных, распределительных, технологических, муниципальных трубо-

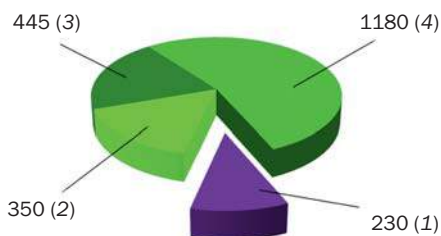


Рис. 1. Контроль металла трубопроводов в РФ:
1 — ВТД обследование газовых и нефтяных магистралей; трубопроводы, не подлежащие ВТД; 2 — нефте-газо промысловые объекты и технологические трубопроводы ГКС; 3 — газопроводы-отводы и трубопроводы газоснабжения; 4 — трубопроводы ЖКХ диаметром свыше 200 мм

проводов применение ВТД невозможно или нецелесообразно. Металл подобных трубопроводов (в зарубежной терминологии «Non-piggable & Difficult») контролируется выборочно, причем объем этого контроля (по доле от общей протяженности объекта) обычно не более 2%, что связано с высокой стоимостью шурфований для доступа к поверхности металла и, как следствие, со значительными трудозатратами программ прямого контроля внешней и внутренней коррозии (ECDANICDA program).

Фактически диагностический сервис в этом сегменте трубопроводной отрасли остро нуждается в инновационных технологических решениях по контролю состояния металла, что позволит обосновать объемы и сроки реконструкции инфраструктуры, поскольку промедление угрожает нарастанием числа техногенных катастроф и потерь вследствие возрастающей аварийности.

Причем рынок этот стремительно растет. Из опубликованных данных Ф. Хопкинса (Международный институт нефтегазовых технологий) следует, что трубопроводная инфраструктура мира увеличилась по протяженности почти в 100 раз примерно за 50 лет. Подсчитано, что увеличение совокупной

* LLC RDC "TRANSKOR-K", Moscow, Russia

длины мировых сетей может составлять до 7% в год в течение следующих 15 лет. Как ожидается, в мире будет построено 32 тыс. км новых трубопроводов. Общая протяженность магистральных трубопроводов высокого давления по всему миру увеличится по оценкам до 3,5 млн. км. Из них 64% будут составлять системы для транспортировки газа, 19% — для перекачки нефтепродуктов, и 17% — для перевозки сырой нефти. Причем доля морских трубопроводов в Северо-Западной Европе, Азиатско-Тихоокеанском регионе и в Мексиканском заливе будет увеличиваться в год на 8 тыс. км.

Как показывают многочисленные аварии «non-rigabable & difficult» трубопроводов, их контроль и обеспечение безопасности является весьма актуальной проблемой для всего мира. В последнее десятилетие инновационными

техническими предложениями для контроля металла подобных объектов на всем протяжении явились магнитные методы, в первую очередь благодаря российским разработкам. Кроме того, прошла успешную апробацию и внедрение технология длинноволнового ультразвукового контроля.

Настоящая публикация посвящена краткому описанию метода магнитной томографии (МТМ), подтвердившего свою конкурентоспособность на мировом рынке: за 12 лет после согласования российского норматива РД 102-008-2002 (АО «ВНИИСТ») с применением запатентованных в России, США, Канаде и Европе устройств и способа МТМ было обследовано более 17 тыс. км трубопроводов в 25 странах мира. Физические основы МТМ базируются на фундаментальном открытии обратной магнитострикции — эффекте

Виллари, связывающем механические напряжения и магнитные характеристики ферромагнитных объектов [1]. Графически принцип регистрации механических напряжений по измеренным характеристикам магнитного поля протяженной ферромагнитной конструкции отражен на рис. 2, ход полевого МТМ-сканирования показан на фото (рис. 3).

Основными гарантиями МТМ являются декларируемые показатели качества — вероятность (POD) выявления аномалий напряжений, сопряженных как с дефектами металла любых типов, так и с повышенными нагрузками, обусловленными провисами, прогибами, участками общей или местной потери трубопроводом устойчивости на грунтах со слабой несущей способностью, оползневыми или сейсмическими явлениями; кроме того, вероятность (POI) правильной интерпретации степени опасности аномалий по величине характеристического параметра F . Основным ограничением метода является расстояние от оборудования МТМ до оси удаленного (подземного или подводного объекта), которое не должно превышать 15 диаметров трубы. Детально методика регистрации НДС и расчетов степени концентрации напряжений, а также гарантии и ограничения метода рассмотрены в публикациях [1, 2].

Была экспериментально обоснована зависимость шага регистрации и записи параметров магнитного поля в процессе сканирования от диаметра и глу-

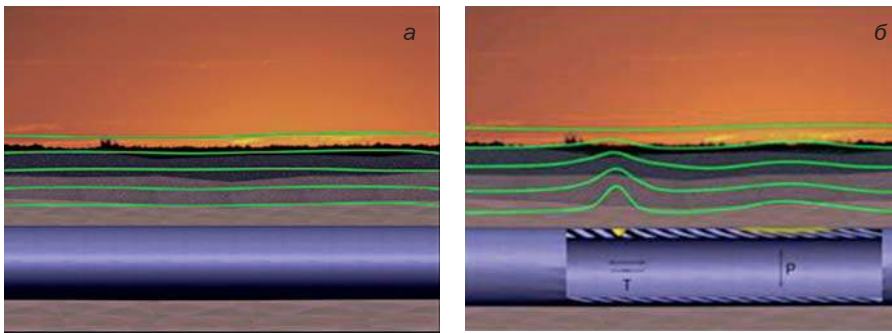


Рис 2. Виллари-эффект: распределение магнитного поля трубопровода из ферромагнитного материала (сталь, чугун) в отсутствии концентраторов напряжений (а) и при наличии концентраторов напряжений в области дефектов металла (б)



Рис. 3. Полевое МТМ-инспектирование подземных трубопроводов: Китай, Индонезия, США, Судан, Австралия, Саудовская Аравия

бины заложения трубопровода. Оценка степени опасности аномалий МТМ осуществляется по интегральному показателю F , учитывающему протяженность S магнитной аномалии, а также амплитуду и форму распределения вектора напряженности магнитного поля. Интегральный показатель F отражает величину превышения зарегистрированных значений магнитного поля над фоновыми значениями; плотность пиковых значений и характер их распределения и рассчитывается по формуле $F = (A + 1)e^{-Kt/S}$, где: A — число линий концентрации напряжения в зоне магнитной аномалии; S , м — протяженность аномалии; определяемая по количеству точек измерения параметров магнитного поля (количеству шагов сканирования); K — степень концентрации напряженности в зоне концентрации напряжения, вычисляемая по формуле

$$K = \sum_{i=1}^N (\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma)_i^{1/2}, \text{ где } \cos\alpha,$$

$\cos\beta, \cos\gamma$ — направляющие косинусы вектора концентрации напряженности; t — коэффициент, учитывающий период безаварийной работы, вычисляемый по формуле $t = \ln(P_{\text{раб}}/P_0)/(T_0 - T_3)$, где $P_{\text{раб}}$ — рабочее давление в трубопроводе на момент обследования; P_0 — проектное давление; T_0 и T_3 — даты обследования и ввода в эксплуатацию соответственно.

МТМ обладает высокой чувствительностью, в интервале механических напряжений от 30 до 85% SMYS (Specified Minimum Yield Stress — нормативное минимальное значение предела текучести) выявляется не менее 80% аномалий, обусловленных дефектами металла любых типов. Выявляются дефекты как основного металла (потеря металла по причине внешней или внутренней коррозии, эрозии; трещиноподобные дефекты любой ориентации, включая КРН; механические дефекты и изменения геометрии труб), так и дефекты сварных соединений любой природы, а также участки с повышенными нагрузками (в сейсмоактивных зонах, в условиях вечной мерзлоты, с оползневыми явлениями и т.п.). При этом селективность метода в целом невысока, и относительно природы дефектов можно лишь строить прогнозы, что не снижает перспектив применения МТМ в качестве инструмента регистрации реальных механических напряжений. Ранжирование участков трубопровода с дефектами по категориям технического состояния позволяет обосновать их вывод в ремонт или реконструкцию путем замены.

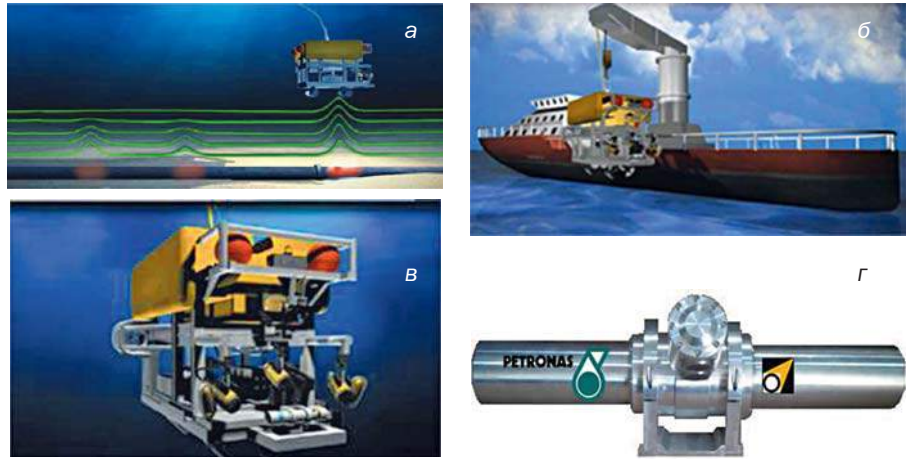


Рис. 4. Развертывание AQUA MTM® инспектирования (а): с участием корабля (б); подводного управляемого робота (ROV) (в); и комплекса с магнитометром АКВА СКИФ (г)

Общепринятая оценка риска эксплуатации объектов с дефектами металла базируется на расчетах прочности, трещиностойкости, механики разрушения и т.п. путём расчета локальных напряжений в дефектных областях по геометрическим размерам дефектов. Поскольку МТМ позволяет непосредственно регистрировать механические напряжения в условиях эксплуатации, что важно, например, для подводных трубопроводов, условий слабой несущей способности грунтов (зоны вечной мерзлоты), повышенной сейсмоактивности, где возможны разрушения трубопроводов по причине потери устойчивости, программы управления надёжностью можно строить на основе данных МТМ без необходимости расчетов геометрических размеров отдельных дефектов.

С 2012 г. после победы на конкурсе инновационных технологий «Arctic Technology» (Хьюстон, США) начато успешное применение совместной российско-малайской разработки с национальной компанией PETRONAS модификации AQUA MTM®. В Малайзии, Индонезии и ОАЭ обследовано уже более 300 км объектов шельфа (рис. 4).

Технология AQUA MTM® в перспективе будет востребована для повышения надёжности таких экспортных ма-

гистралей, как российские подводные «Потоки», а также многочисленных трубопроводов шельфовой добычи нефти и газа, протяженность которых стремительно увеличивается.

Концепция риск-менеджмента по данным МТМ (AQUA MTM) отражена на схеме (рис. 5). Согласно традиционному подходу параметры безопасности трубопровода (безопасное рабочее давление P_{safe} , период безопасной работы T_{safe} , коэффициент безопасного давления КБД или ERF) вычисляются на основе величины локальных механических напряжений S_i и коэффициента концентрации напряжений SCF. По данным ВТИ на основе косвенных измерений геометрических параметров дефектов параметр S_i вычисляется для каждого типа дефектов согласно общепринятым методикам: СНиП 2.06-0.5-85; ASME BG 31, API, DNV, FEM.

По данным МТМ коэффициент SCF вычисляется на основе результатов косвенной регистрации величины S_i — локальных комплексных механических напряжений (включая продольные, кольцевые, сдвиговые и остаточные) для каждого сечения трубопровода.

Для установления степени корреляции данных МТМ с результатами вычислений по принятым методикам было

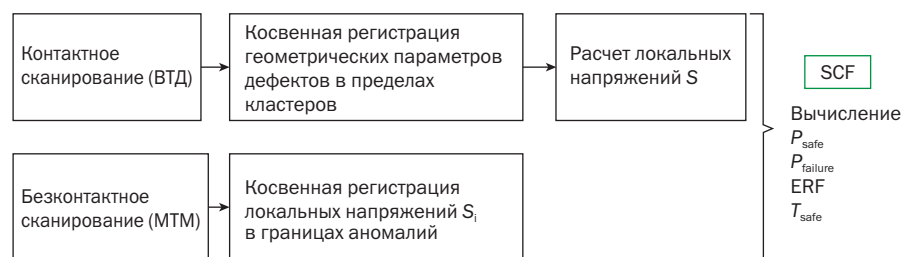


Рис. 5. Вычисление параметров безопасности трубопроводов по данным геометрических размеров дефектов после ВТД и по результатам МТМ

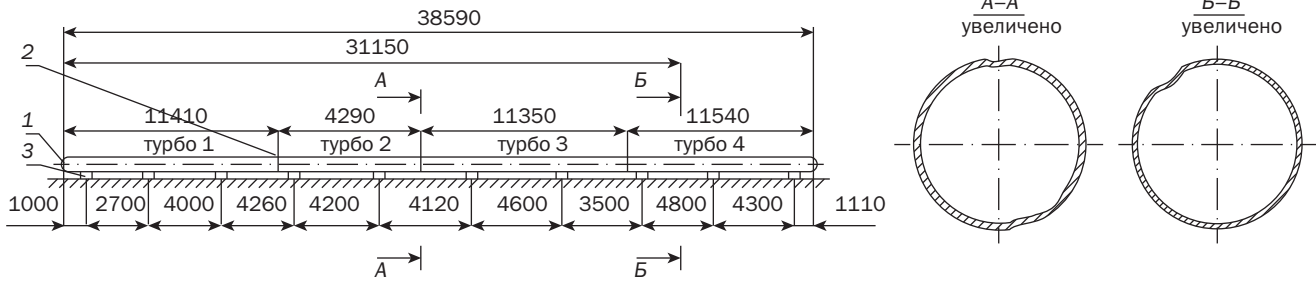


Рис. 6. Эскиз экспериментальной установки — полномасштабного стенда для натуральных испытаний [8]

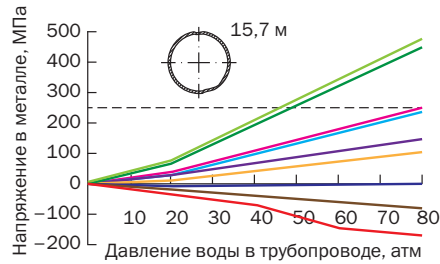


Рис. 7. Ход эксперимента по регистрации напряжений в зоне аномалии МТМ, сопряженной с дефектом металла «вмятина»; 15,7 м — линейная координата дефектного сечения (со вмятиной) в зоне магнитной аномалии [8]

проведено сравнение итоговых показателей (параметров работоспособности) в аномальных зонах с различными типами дефектов. Подобные широкомасштабные проекты были осуществлены на специальных натуральных полигонах НТЦ «Транскор-К» \ВНИИСТ и PETRONAS (Малайзия). Для детального выяснения причин, обуславливающих появления аномалий МТМ, была проведена серия экспериментов по регистрации напряжений в ходе ступенчатого нагружения плетей сварного трубопровода протяженностью 40–109 м с искусственными дефектами металла (рис. 6, 7).

Помимо выявления аномалий МТМ была проведена тензометрия на участках с дефектами, металлографическая экспертиза и численный анализ методом конечных элементов. Максимальные из приложенных напряжений в области некоторых аномалий превысили предел текучести материала труб, что отражено на зависимостях величин напряжений по данным МТМ (рис. 7, кривые 2–4 и 2–7). В данных областях при повышении внутреннего давления переход в область пластической деформации показали также и тензорезисторы.

Компьютерное моделирование напряженного состояния трубопровода численными методами (методом конечных элементов), выполненное в лаборатории механики Санкт-Петербургского Государственного Политехнического

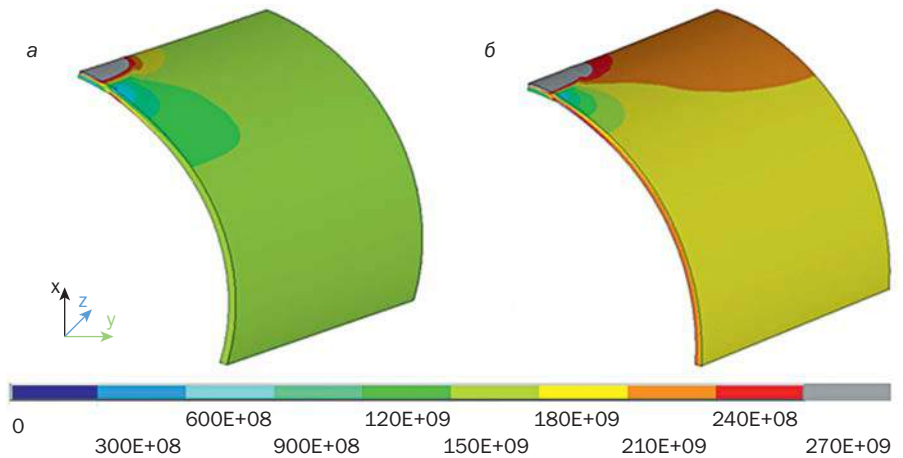


Рис. 8. Результаты численного моделирования (FEM) механических напряжений в областях аномалий МТМ: а — 6 МПа; б — 8 МПа

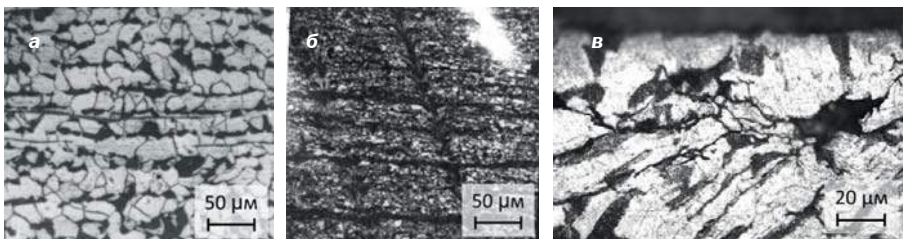


Рис. 9. Результаты металлографической экспертизы шлифов из областей аномалий МТМ: а — вытянутые неметаллические включения; б — искажения структуры, связанные с локальной пластической деформацией; в — микротрещины

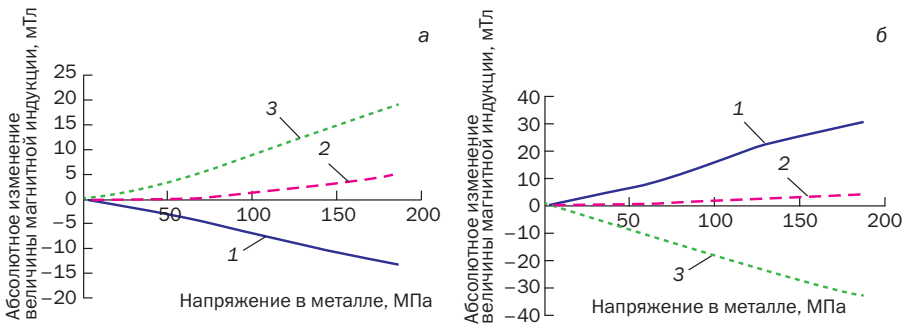


Рис. 10. Связь магнитных характеристик с величинами механических напряжений (проявление эффекта Виллари) для трехкомпонентных датчиков а) и б), установленных в непосредственной близости от поверхности трубопровода в трёх ортогональных компонентах: 1 — X; 2 — Y; 3 — Z [8]

Университета, полностью подтвердило как данные тензометрии, так и данные МТМ. На рис. 8 показаны области магнитных аномалий, где серый цвет соответствует максимальной концентрации

напряжений и областям пластической деформации.

Для полноты экспериментальных данных было проведено металлографическое исследование образцов, ото-

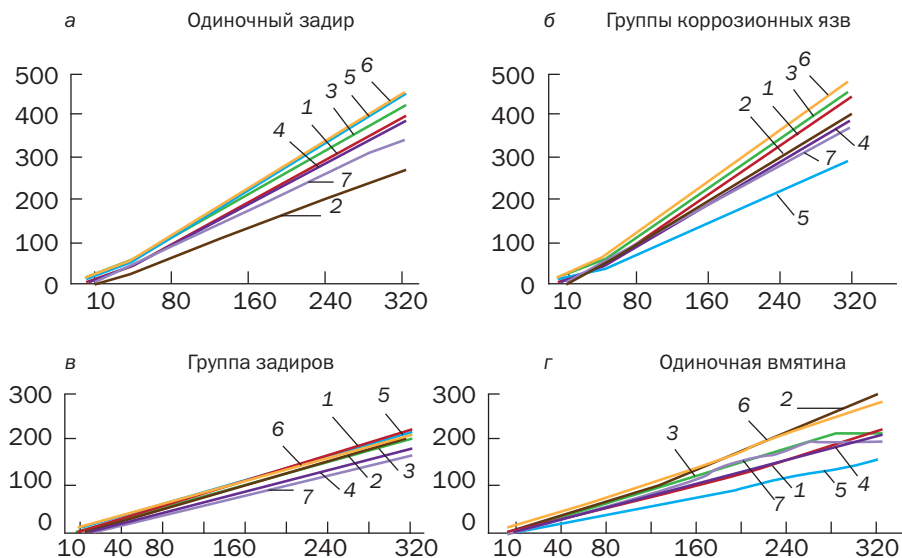


Рис. 11. Корреляция параметров работоспособности дефектных участков по данным МТМ и по общепринятым методикам: 1 — МТМ, 2 — STRAIN, 3 — ASME B31.G, 4 — DNV RP F101(A), 5 — DNV RP F101(B), 6 — API RP 579, 7 — FEM

бренных от областей аномалий действующих трубопроводов. Было зарегистрировано отклонение в микроструктуре, практически не выявляемое при традиционном НК (рис. 8). Выявлена не только пластическая деформация, но и зародившиеся в результате внутренние микротрещины ([5], рис. 9). Поверхности микротрещин в рентгенографической интерпретации представляли собой результат сочетания высоких напряжений (416 МПа) и высокой плотности дислокаций ($2,3 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$).

Полученные данные о взаимозависимости магнитных величин с механическими напряжениями в условиях полигона отражены на рис. 10. Подтверждается весьма высокая корреляция изменений магнитной индукции с ростом кольцевых напряжений в металле труб — показаны уравнения линейных аппроксимаций и среднеквадратичное отклонение.

Проведенные металлографические исследования и рентгеноструктурный анализ подтвердили выявленные закономерности изменения структуры в локальных зонах концентрации напряжений в областях аномалий МТМ как в условиях полигона, так и для металла, отобранного от действующего трубопровода.

По результатам экспериментов на полигоне Малазийской нефтяной компании PETRONAS разработаны и переданы на рассмотрение в ASME дополнения к своду законов нормативной документации по безопасности трубопроводно-

го транспорта Американского общества инженеров-механиков [4].

Результаты 12-летних исследований и база данных по полевым работам были использованы при разработке национальных стандартов, регламентирующих термины и определения, а также общие положения метода магнитной томографии. Полномасштабные программы по верификации проведены в США, Великобритании, а также регионе АСЕАН [5, 6].

С целью валидации качества МТМ-инспектирования разработана специальная «Процедура верификации», включенная в качестве рекомендуемого предложения в проект национальных стандартов (ГОСТ) «Техническое диагностирование методом магнитной томографии» (размещены к обсуждению на портале РОССТАНДРТ). Основные положения процедуры изложены в публикации [7]. В качестве иллюстрации итогов двух из проведенных верификаций представлена таблица для результатов на промышленном нефтепроводе (Индонезия).

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. — М.: Наука, 1971. — 1032 с.
2. РД 102-008-2002. Инструкция по диагностике технического состояния бесконтактным магнитометрическим методом. — М.: МИНЭНЕРГО РФ (АО ВНИИСТ), 2002. — 49 с.
3. Горошевский В.П., Камаева С.С., Колесников И.С. «Видящие» сквозь землю. — Наука в России. 2003. № 6 (138). С. 13–15.
4. Камаева С., Goroshevskiy V., Kolesnikov I. ASME-MTM (AQUA MTM) Correlation: Burst Strength Prediction Using MTM Inspection Data.

Conference Proceedings “Mechanical Design Technical Committee” B31 Code Week, Sep. 17-21, 2012, Norfolk, Virginia, USA, p. 1176, <http://files.asme.org/Events/B31CodeWeek/32573.pdf>

5. Janega G., Grigil V., Kolesnikov I. NYSEARCH's validation program of Transkor's magnetic tomography method of pipe inspection. — Pipeline & Gas Journal. 2011. V. 238. No. 6. P. 22–23.

6. Martin P. Magnetic Tomography Method (MTM) Pipeline Inspection System: Evaluation & Validation. — In: Innovation Funding Incentive / Gas Transmission R&D Programme Detailed Report 2011/2012, p. 332–336.

7. Методика «Трансфор-К» позволяет оценить эффективность инспектирования трубопроводов. Новые технологии кратко / Редакционная статья. — Нефть и Газ ЕВРАЗИЯ. 2011. № 7–8. С. 14–15.

8. Воробьев Я.В. Материаловедческое обоснование применимости магнитной томографии металла для диагностирования ферромагнитных трубопроводов / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. к. т. н. — М.: ФГБОУ ВПО Московский Гос. вечерний металлургический институт, 2012.

References

1. Vonsovsky C.V. *Magnetizm* [Magnetism]. Moscow, Nauka, 1971, 1032 pp. (in Russ.).
2. RD 102-008-2002. *Instruktsiya po diagnostike tehniceskogo sostoyaniya beskontaktnym magnitometricheskim metodom* [Regulatory Document no. 102-008-2002. Instruction on diagnostics of technical state by a contactless magnetic tomography method]. Moscow, RF Ministry of Energy (JSC VNIIST), 2002, 49 pp. (in Russ.).
3. Goroshevskiy V.P., Kamaeva S.S., Kolesnikov I.S. *SCIENCE in Russia*, 2003, no. 6 (138), C. 13–15.
4. Kamaeva S., Goroshevskiy V., Kolesnikov I. ASME-MTM (AQUA MTM) Correlation: Burst Strength Prediction Using MTM Inspection Data. Conference Proceedings “Mechanical Design Technical Committee” B31 Code Week, Sep. 17-21, 2012, Norfolk, Virginia, USA, pp. 1176, <http://files.asme.org/Events/B31CodeWeek/32573.pdf>
5. Janega G., Grigil V., Kolesnikov I. NYSEARCH's validation program of Transkor's magnetic tomography method of pipe inspection. Pipeline & Gas J., 2011, v. 238, no. 6, pp. 22–23.
6. Martin P. *Magnetic Tomography Method (MTM) Pipeline Inspection System: Evaluation & Validation*. — In: Innovation Funding Incentive / Gas Transmission R&D Programme Detailed Report 2011/2012, pp. 332–336.
7. *The pipeline inspection efficiency evaluation by Transkor-K's procedure*. New technologies briefly / Editing paper. Oil&Gas Eurasia, 2011, no. 7, pp. 14–15.

Статья получена 3 июля 2014 г.,
в окончательной редакции — 15 июля