

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

Транспорт и хранение нефтепродуктов, нефтепродуктообеспечение

**Применение метода магнитной томографии (МТМ) для
выявления концентраторов напряжений, сопряженных с
дефектами металла, повышенными нагрузками и рисков
отказов труднодоступных технологических трубопроводов**

Авторский коллектив:
Борейко
Дмитрий
Андреевич,
канд. техн. наук

2019 г.

РЕФЕРАТ

Описание проблемы.

Контроль металла труб на всем протяжении традиционными методами является весьма сложным, дорогостоящим и малоэффективным, т. к. требует доступа к 100% поверхности трубопровода, её подготовки и других вспомогательных операций. В шурфах можно провести контроль металла максимум на 2% по длине трубопровода, что не обеспечивает и не может обеспечить реальной оценки безопасности. Кроме того, около 80% технологических трубопроводов не подлежат внутритрубной дефектоскопии.

Направление конкурса, которому соответствует работа.

Транспорт и хранение нефтепродуктов, нефтепродуктообеспечение в части диагностики технического состояния и выявления потенциально опасных зон труднодоступных технологических трубопроводов, не подлежащих внутритрубной дефектоскопии.

Объект исследования.

Любые технологические трубопроводы (подземные, надземные и др.), эксплуатирующиеся при воздействии повышенного давления и предрасположенные к возникновению дефектов и других концентраторов механических напряжений.

Цель работы.

Апробация и внедрение методики оценки рисков и обеспечения надежности трубопроводной инфраструктуры подведомственных предприятий ПАО «ЛУКОЙЛ» на основе метода магнитной томографии.

Методология проведения работы.

При проведении работ для достижения поставленной цели проведён аналитический обзор существующих методов и методик диагностирования труднодоступного трубного технологического оборудования, не подлежащего внутритрубным обследованиям; подбор, настройка и калибровка оборудования; определение оси трубопровода; бесконтактное сканирование

магнитометрическим прибором МБС-04 «СКИФ» вдоль оси трубопровода; контрольная верификация выявленных опасных аномалий.

Результаты работы и их новизна.

В результате апробации подтверждена эффективность МТМ при обнаружении зон аномального распределения магнитного поля трубопроводов, связанного с локальными комбинациями дефектов и механических напряжений.

Новизна работы заключается в применении новой методики оценки рисков катастрофического разрушения трубопроводов на основе дистанционной магнитометрической оценке их состояния.

Основные конструктивные, технологические и эксплуатационные характеристики.

Эксплуатационные характеристики (преимущества) технологии:

- не требует остановки трубопровода;
- не требует специальной подготовки трубы;
- не требует контакта с трубопроводом и изменения рабочего режима;
- не требует камер пуска-приема внутритрубных снарядов (поиска снаряда в случае застревания);
- не требует очистки трубопровода;
- не требует специализированной подготовки внутренней поверхности;
- эффективен для инспекции на предмет микротрещин в сварных соединениях на местах повышенных нагрузок в новых трубопроводах.

Область применения.

Трубопроводной инфраструктуры подведомственных предприятий ПАО «ЛУКОЙЛ».

Экономическая эффективность работы.

Экономическая эффективность от применения технологии заключается в экономии материальных и денежных ресурсов:

- на проведение земляных работ;
- на проведение дополнительных диагностических операций;
- на привлечение подрядных организаций.

Применение технологии МТМ позволяет предотвратить потенциальные затраты в случае аварийного разрушения трубопровода.

Применение метода МТМ может сократить протяженность работ по вскрытию трубопроводов и объем удаления изоляционного покрытия для дополнительного дефектоскопического контроля в процессе предремонтного обследования, что приведет также к позитивному экономическому эффекту.

Предположения о развитии объекта исследования.

Разработка системы оценки рисков и обеспечения надежности трубопроводной инфраструктуры подведомственных предприятий ПАО «ЛУКОЙЛ» на основе метода магнитной томографии (МТМ).

Разработка и внедрение в Институт дополнительного профессионального образования ФГБОУ ВО «УГТУ» курс повышения квалификации для обучения специалистов ПАО «ЛУКОЙЛ».

СОДЕРЖАНИЕ

1. ИНФОРМАЦИЯ О РАЗРАБОТКЕ	6
2. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ	12
3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С АНАЛОГАМИ.....	13
4. СВЕДЕНИЯ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ.....	15
5. ПАТЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	19
6. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	20
7. ИНФОРМАЦИЯ О РАЗРАБОТЧИКЕ И МЕСТЕ, ГДЕ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ С РАЗРАБОТКОЙ	21
8. СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛНИТЕЛЕ	22

1. ИНФОРМАЦИЯ О РАЗРАБОТКЕ

Диагностика технологических и вспомогательных трубопроводов выполняется в соответствии с требованиями нормативных документов и методик. Все методы неразрушающего контроля (НК) можно разделить на два вида: пассивные и активные (таблица 1).

Таблица 1 – Пассивные и активные методы неразрушающего контроля

Пассивные методы НК	Активные методы НК
Тепловой пассивный (ТК)	Визуально-измерительный (ВИК)
Акустико-эмиссионный (АЭ)	Капиллярный (ПВК)
Метод магнитной томографии (МТМ)	Ультразвуковой (УЗК)
Метод сканирования рассеяния магнитного потока (MFL)	и др.

С помощью диагностики определяют состояние стенки и состояние изоляции трубы, расположение трубопровода и оценочный прогноз безаварийной эксплуатации объекта. При этом традиционными методами НК не всегда возможно получить полную информацию о всех негативных факторах, воздействующих на конкретный трубопровод или участок трубопровода.

Контроль металла труб на всем протяжении традиционными методами является весьма сложным, дорогостоящим и малоэффективным, т. к. требует доступа к 100% поверхности трубопровода, её подготовки и других вспомогательных операций. В шурфах можно провести контроль металла максимум на 2% по длине трубопровода, что не обеспечивает и не может обеспечить реальной оценки безопасности.

Оценка реального состояния трубопроводов различного назначения в ходе их эксплуатации является актуальной задачей. Техническое состояние трубопроводов для повышения их надежности требует своевременной оценки их работоспособности, выявления локальных аварийных участков и осуществления их ремонта. Основные затруднения общепринятого способа технического диагностирования внутритрубной инспекции с применением

снарядов-дефектоскопов, связаны с невозможностью их использования на довольно обширном количестве трубопроводных систем из-за конструктивных особенностей последних.

Контроль состояния трубопроводов сфера ответственности отраслевых компаний как владельцев опасных производственных объектов (ОПО) и важный элемент политики государственной безопасности. Известно, что менее 30% трубопроводов подлежат внутритрубной диагностике. Остальные трубопроводы это промышленные объекты, газопроводы-отводы, перемычки и трубопроводы подводящих шлейфов газокompрессорных станций (ГКС), подземных хранилищ газа (ПХГ), нефтенасосных станций, нефтехимических производств, а также подводные трубопроводы, по протяженности составляющие до 70% от всей трубопроводной сети топливно-энергетического комплекса (ТЭК), в том числе и ПАО «ЛУКОЙЛ».

Компания ООО НТЦ «Транскор-К» (г. Москва) представляет решение по выявлению дефектов, техническому диагностированию, оценке безопасности трубопроводов, подлежащих и неподлежащих внутритрубной дефектоскопии метод магнитной томографии (МТМ). МТМ позволяет проводить контроль металла трубопроводов на 100% их протяженности, гарантируя при этом высокую вероятность выявления (Probability of Detection, POD) > 80 %.

Задачами метода МТМ являются:

1. Выявление аномалий НДС, сопряженных с концентраторами механических напряжений любой природы, с учетом дефектов металла и актуальных нагрузок в условиях эксплуатации.

2. Определение линейных координат и GPS-координат аномалий (участков с дефектами и повышенными локальными нагрузками).

Определение степени опасности аномалий.

Метод основан на известном физическом явлении – эффекте Виллари (обратная магнитострикция или магнитоупругий эффект). Иллюстрация эффекта представлена на рисунке 1.

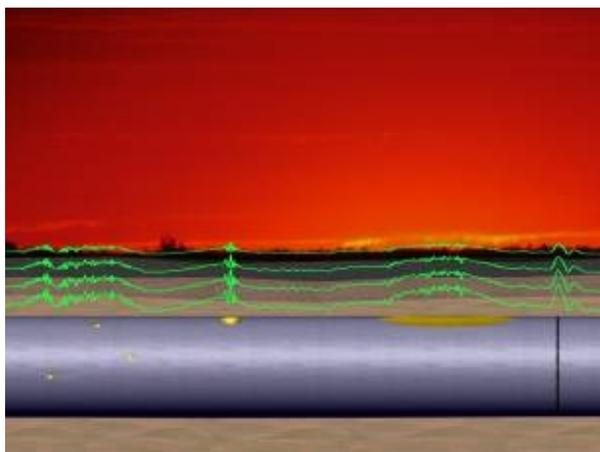


Рисунок 1 – Иллюстрация эффекта Виллари

Эффект Виллари (магнитоупругий эффект) явление обратной магнитострикции, заключающееся в изменении намагниченности магнетика под действием механических деформаций. При изменении магнитного поля трубопровода магнитометрический комплекс регистрирует различные дефекты (включая напряжения в металле, коррозию и т. д.).

Технология также позволяет проводить контроль подводных трубопроводов на 100% протяженности на глубинах до 200 м. В основе концепции оценки надежности методом МТМ лежит представление о том, что опасность для разрушения конструкции представляет собой локальную комбинацию дефектов и напряжений. Данный метод позволяет дистанционно зарегистрировать и выявить участки с концентраторами напряжений в металле трубы по магнитному отклику и определить степень их опасности.

Также существуют следующие ограничения по использованию МТМ:

- расстояние от магнитометра до трубопровода не более $15D$ трубы;
- диаметр трубопровода, подлежащий МТМ не менее 80 мм;
- длина трубопровода для проведения МТМ не менее 100 м;
- металлические предметы, зарытые в земле, могут создавать искажения результатов обследования;
- требуется расчистка трассы от кустарника и других препятствий на ширину 1 м для прохода оператора.

Для проведения МТМ используют бесконтактные сканирующие магнитометры МБС-04 «СКИФ». Принцип действия магнитометров основан

на измерении магнитной индукции с помощью трёх трёхкомпонентных магнитомодуляционных преобразователей (феррозондов).

В процессе движения вдоль оси исследуемого сооружения осуществляется регистрация значений магнитной индукции в зависимости от пройденного расстояния с шагом 25 см. Одновременно с этим магнитометр регистрирует информацию местонахождении наземных привязок вдоль трассы сооружения (трубопровода).

Технические характеристики прибора МБС-04 «СКИФ» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики прибора МБС-04 «СКИФ»

Показатель	Значение
Напряженность магнитного поля в Н или Ам ⁻¹	10 ⁻⁹
Диапазон уровней механических напряжений	В пределах 0,35-0,7 от σ_T
Диапазон толщин стенки ОК в интервале \approx от 5 до 90 %	$\geq 2,8$ мм (максимум не лимитирован)
Ограничения по диаметрам D трубопроводов	$56 \leq D \leq 1420$ мм и более
Диапазон скорости МТМ-обследования	2-5 м/с
Максимальное давление	Не регламентировано
Минимальное давление (для нефтепроводов)	Не регламентировано
Минимальный радиус поворота (отвода)	Не лимитировано
Минимальный внутренний диаметр	Не лимитировано
Габаритные размеры оборудования	655×150×95 мм
Масса прибора	4,7 кг
Протяженность контролируемого участка, минимум	40 м
Полнота контроля по протяженности объекта	100 %
Допустимое отклонение от оси подземного объекта по горизонтали/по вертикали	Не более 3D Не более 15D
Шаг сканирования, максимум	0,02 м
Ошибка определения продольной координаты аномалии	$\pm 1,5$ м (для средних широт)
Погрешность одометра по измерению расстояния (от точки «0» обследования)	≤ 2 %

Процесс исследований включает в себя следующие основные этапы:

1. Выявление расположения оси трубопровода под землей.
2. Сканирование трубопровода портативным магнитометром СКИФ МБС с автоматической записью данных, регистрация GPS координат.
3. Обработка данных и выбор 1-2 точек калибровки.
4. В калибровочных шурфах проводится дополнительный дефектоскопический контроль контактными методами, после чего происходит тарировка и генерируется Отчет.
5. Финальный отчет включает перечень проблемных (аномальных) участков трубопровода с привязкой к карте и указанием степени опасности.

Результаты сканирования представляются в виде карты с обозначением выявленных аномалий. В соответствии с методикой обработки и анализ данных МТМ существуют 3 ранга опасности аномалий (1, 2 и 3). На рисунке 2 визуальнo представлен процесс сканирования трубопровода, в том числе с применением квадрокоптеров.

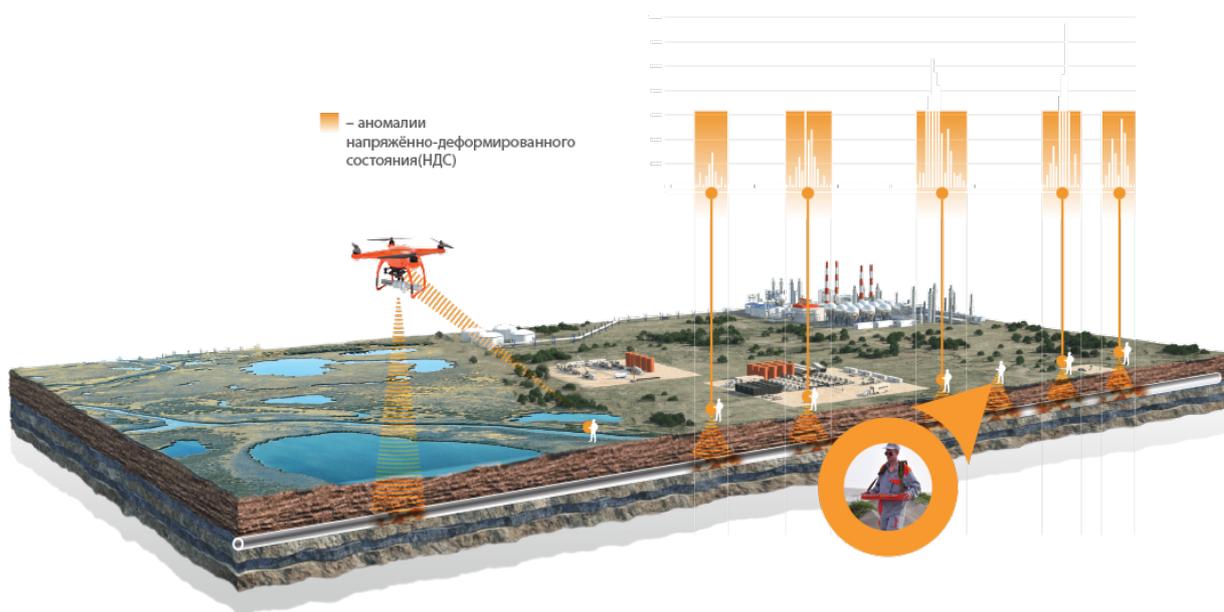


Рисунок 2 – Процесс сканирования подземного трубопровода

Для технологических трубопроводов, помимо потери герметичности, характерны следующие категории предельных состояний:

- разрыв трубопровода под действием внутреннего давления с раскрытием стенки трубопровода при действии кольцевых напряжений;

- местная потеря устойчивости стенки трубы (местное смятие) при общем изгибе трубопровода в зоне действия сжимающих продольных напряжений (для предотвращения необходимо ограничивать уровень деформаций в сечении, путём снижения как относительных, так и абсолютных значений изгибающих (или комплексных) напряжений);
- гофрообразование по телу трубы;
- усталость и образование трещин в кольцевых и продольных сварных швах, зонах термического влияния, по телу трубы;
- потеря сплошности под действием внутренних напряжений, возникающих от внешних нагрузок;
- коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

На рисунке 3 представлена информация об эффективности МТМ.



Рисунок 3 – График достоверности определения опасных участков методом магнитной томографии (МТМ)

Согласно графику метод магнитной томографии позволяет выявить любое из этих состояний по критерию недопустимых напряжений в интервале 30...85% от предела текучести σ_t (SMYS) на участках аномалий напряженно-деформированного состояния (НДС), связанных с концентраторами механических напряжений.

2. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ

Экономическая эффективность от применения технологии заключается в экономии материальных и денежных ресурсов:

- на проведение земляных работ;
- на проведение дополнительных диагностических операций;
- на привлечение подрядных организаций.

Применение технологии МТМ позволяет предотвратить потенциальные затраты в случае аварийного разрушения трубопровода, а также сократить протяженность работ по вскрытию трубопроводов и объем удаления изоляционного покрытия для дополнительного дефектоскопического контроля в процессе предремонтного обследования, что приведет также к позитивному экономическому эффекту.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С АНАЛОГАМИ

Преимущества МТМ по сравнению с другими методами неразрушающего контроля заключаются в следующем (таблица 3):

- не требует остановки трубопровода;
- не требует специальной подготовки трубы;
- не требует контакта с трубопроводом и изменения рабочего режима;
- не требует камер пуска-приема внутритрубных снарядов (поиска снаряда в случае застревания);
- не требует очистки трубопровода;
- не требует специализированной подготовки внутренней поверхности;
- эффективен для инспекции на предмет микротрещин в сварных соединениях на местах повышенных нагрузок в новых трубопроводах.

Таблица 3 – Сравнение методов неразрушающего контроля

Дефекты, повреждения	Поверхностная инспекция	Гидротестирование	Акустическое исследование	Геотехническое исследование	Катодная защита	Линейная инспекция	Метод МТМ
Вандализм	+	–	–	–	–	–	+/-
Внешнее разрушение (ECDA)	–	+	+	–	–	+	+
Внутреннее разрушение (ICDA)	–	+	+/-	–	–	+	+
Усталость материала	–	+/-	–	–	–	+	+
Повреждение изоляционного покрытия	–	–	–	–	+	–	–
Производственные дефекты	–	+	–	–	–	+	+
Движение грунта	–	–	–	+	–	–	+

Метод магнитной томографии по сравнению с другими методами неразрушающего контроля имеет следующие положительные факторы:

- нет необходимости останавливать эксплуатацию трубопровода;

– в связи с возрастанием темпа строительства нефте- и газопроводных сетей данная технология имеет перспективы;

– по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, технология МТМ показала наибольшую эффективность, а в случаях с трубопроводами, не оборудованными камерами пуска-приёма, остаётся вне конкуренции.

4. СВЕДЕНИЯ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

МТМ прошел успешную промышленную апробацию на трубопроводах, в том числе не подлежащих внутритрубному обследованию, протяженностью более 20 тысяч км с глубиной залегания до 8 м.

В рамках научной апробации технологии МТМ совместно с ООО «ЛУКОЙЛУхтанефтепереработка» и ФГБОУ ВО «УГТУ» проведено инспектирование на противопожарном водопроводе В2-6, технические характеристики которого представлены в **таблице 4**.

Таблица 4 – Технические характеристики противопожарного водопровода В2-6 ООО «ЛУКОЙЛУхтанефтепереработка»

Параметр	Значение
Номинальный диаметр	426 мм
Длина	1 281 м
Марка стали	Сталь 20
Толщина стенки труб	7 мм
Рабочее давление	0,65 МПа
Разрешенное давление	0,5 МПа
Срок ввода в эксплуатацию	2004 год
Продукт	Пожарная вода
Предел текучести	147 МПа

Целью работ являлось определение технического состояния и рисков перехода трубопровода в предельное состояние. Дополнительными основаниями проведения исследований являлась проверка участка трубопровода, на котором в марте 2017 г. была обнаружена потеря герметичности по причине язвенной коррозии.

Технология ремонта, примененная для устранения причины аварии – установка бандажа в виде приваренной по диаметру трубы металлической пластины. Таким образом, непосредственно дефекты на данном участке устранены не были.

Для каждого из выявленных участков с аномалиями рассчитан Риск-Фактор (F) в соответствии со Спецификацией МТМ и РД 102-008-2002. Все участки с аномалиями были ранжированы по уровню НДС в условиях фактической нагрузки (рабочее давление, изменение температуры, потеря устойчивости и т. д.). В соответствии с методикой обработки и анализ данных МТМ существуют 3 ранга опасности аномалий (1, 2 и 3). Ранг аномалии по уровню НДС определяет величину коэффициента безопасного давления (КБД) или расчетного ремонтного фактора (ERF). В соответствии с нормативом DNV APR 101 если КБД > 1 (ранг 1), то условия прочности для участка не соблюдаются и участок с аномалией не способен эксплуатироваться при рабочем давлении. Участки, предлагаемые в ремонт на основании данных МТМ, отражены в **таблице 5**.

Таблица 5 – Ведомость аномалий первого ранга опасности

№ аномалии	GPS-координаты		Ранг опасности	Риск-Фактор (F)	Длина, м	Время безопасной эксплуатации, Т _{без} , Г
	Долгота	Широта				
1	N63°34'36.960"	E53°44'19.472"	1	0,059	6,0	1
2	N63°34'38.308"	E53°43'57.123"	1	0,191	4,1	3
3	N63°34'39.950"	E53°43'53.890"	1	0,194	3,7	3

Результаты сканирования представляются в виде карты с обозначением выявленных аномалий. Результаты сканирования противопожарного трубопровода представлены на **рисунке 4**.



Рисунок 4 Результаты сканирования противопожарного трубопровода В2-6

Судя по схеме, представленной на **рисунке 4**, при сканировании методом МТМ заведомо известного дефектного участка, на котором в марте 2017 г. произошла потеря герметичности, обнаружена аномалия первого ранга (аномалия 1 из **таблицы 5**), для которой время безопасной эксплуатации оценочно составило 1 год. На основании полученных результатов ООО «ЛУКОЙЛУхтанефтепереработка» будут запланированы работы по шурфовке участков в области обнаруженных аномалий первого ранга в соответствии с координатами и схемой.

МТМ прошла успешную промышленную апробацию на трубопроводах, в том числе не подлежащих внутритрубному обследованию, протяженностью более 20 тысяч километров с глубиной залегания до 8 м (**таблица 6**).

Таблица 6 – Промышленная апробация метода магнитной томографии

Заказчик	Страна	Кол-во контрольных точек	Достоверность, %
ПАО «ГАЗПРОМ»	Россия	137	>83
ОАО «ТНК-ВР»	Россия	39	90
ПАО «Транснефть»	Россия	8	87
Sinopec Corp.	Китай	29	95

Заказчик	Страна	Кол-во контрольных точек	Достоверность, %
ПАО «ЛУКОЙЛ»	Россия	43	95
Chevron Corp.	Индонезия	45	92
National Greed	Великобритания	39	89
PETRONAS	Малайзия	145	>87

В компании «PETRONAS» (Малайзия) технология МТМ также прошла апробацию на натурном стенде трубопровода $D = 200$ мм и протяжённостью 109 м. В результате данные МТМ совпали с результатами расчетов по международным стандартам оценки опасности дефектов (DNV, ASME, API). Значения коэффициентов корреляции варьировались от 90 до 97%, что подтвердило эффективность МТМ в качестве инструмента по оценке рисков системы RBI (Risc Based Inspections).

Также получены многочисленные отзывы и рекомендации по результатам апробации технологии на отечественных и зарубежных предприятиях.

5. ПАТЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На технологию бесконтактного диагностирования подземных трубопроводов МТМ имеются следующие патенты:

1. № 2264617 «Способ бесконтактного выявления местоположения и характера дефектов металлических сооружений и устройство для его осуществления» (Горошевский В. П., Камаева С. С., Колесников И. С.) / МПК: 7G 01N 27/82 A, 7G 01V 3/08 B.

2. № 2300790 «Способ бесконтактного определения оси токопроводящего объекта, погружённого в среду, и устройство для его осуществления» (Ивлев Л. Е., Камаева С. С., Отрадных К. О.) / МПК: G 01 V 11 00.

6. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Методика МТМ весьма эффективна как инструмент для обследования и детектирования технологических трубопроводов в нефтегазовой отрасли. Учитывая возрастание темпов строительства нефте- и газопроводных сетей по всему миру, технология отечественной разработки имеет большие перспективы внедрения.

2. Метод показал свою эффективность и имеет явные преимущества по сравнению с внутритрубной диагностикой, а в случаях с трубопроводами, не оборудованными камерами пуска-приема, остается вне конкуренции.

3. Новому методу предстоит пройти более широкую апробацию, совершенствование и внедрение.

ФГБОУ ВО «УГТУ» и ООО НТЦ «Транскор-К» продолжают совместную работу по апробации метода на площадках нефтегазовых предприятий Республики Коми.

7. ИНФОРМАЦИЯ О РАЗРАБОТЧИКЕ И МЕСТЕ, ГДЕ МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ С РАЗРАБОТКОЙ

Научно-технический центр «Транскор-К» является разработчиком и правообладателем технологии МТМ.

Компания создана в 2001 году, зарегистрирована в соответствии с законодательством Российской Федерации в форме Общества с Ограниченной Ответственностью. Созданы совместные предприятия в Малайзии и Китае.

Головной офис компании расположен в Москве, Перовская ул. 31 А.

За 16 лет накоплен опыт инспектирования более 17 тыс. км трубопроводов: Узбекистан, Сирия, Хорватия, Украина, Азербайджан, Великобритания, Франция, Аргентина, Бразилия, Колумбия, Саудовская Аравия, Малайзия, Индонезия, Китай, Канада, США, Австралии.

Коллектив компании – 3 директора-учредителя, 15 специалистов-экспертов с высшим инженерным образованием, 5 – персонал офиса, 20 – операторов. 7 сотрудников имеют ученые степени в областях технических и физико-математических наук.

Официальный сайт <https://transkorworld.com>.

8. СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПОЛНИТЕЛЕ

Исполнитель: Борейко Дмитрий Андреевич

Дата рождения: 25 июня 1989.

Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет».

Должность: заведующий кафедрой Машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности.

Ученая степень: кандидат технических наук.

Служебный адрес: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

Домашний адрес: 169311, Республика Коми, г. Ухта, ул. Оплеснина, д. 6, кв. 8.

Телефон: 8 (904) 105-45-09.