

На правах рукописи



МУСОНОВ ВАЛЕРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ
МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность: 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ухта – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», и Акционерном обществе «Гипрогазцентр» (г.Нижний Новгород).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»
Андронов Иван Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой радиотехники Национального исследовательского Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского
Кананов Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, начальник отдела диагностики
Управления организации работ по подготовке и переизоляции труб в заводских условиях Департамента по специальным программам АО «Краснодаргазстрой»
Касьянов Алексей Николаевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 16 июня 2016 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, д.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан 20 апреля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М.М. Бердник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из важнейших научно-технических проблем нефтегазовой отрасли является обеспечение надежного и бесперебойного функционирования систем магистрального трубопроводного транспорта. Для этого необходим периодический контроль технического состояния трубопроводов, в том числе контроль напряженного состояния металла трубопроводов. В настоящее время предложен ряд неразрушающих методов для определения технического состояния и механических напряжений в подземных трубопроводах: внутритрубная дефектоскопия, визуально-измерительный контроль, вихретоковый контроль, ультразвуковой контроль, метод коэрцитиметрии, метод шумов Баркгаузена, метод акустоупругости, рентгеновские методы. Однако использование указанных методов возможно только при наличии специального оборудования и доступа к поверхности металла трубопровода, что влечет значительные материальные и временные затраты. Применяемые методы наземной электрометрической диагностики ограничиваются оценкой изоляционного покрытия трубопровода и системы катодной защиты. Имеются сведения о применении для оценки технического состояния дистанционных методов, основанных на измерении постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта. Однако способы, применяемые в настоящее время для определения технического состояния трубопроводов, в том числе участков с повышенными механическими напряжениями по результатам магнитометрических измерений, не являются достаточно универсальными. Поэтому весьма актуальной является задача разработки обоснованных дистанционных экспресс методов оценки технического состояния, реализуемых с использованием существующего магнитометрического оборудования, которые являлись бы дополнительным инструментом к используемым методам и уменьшали затраты на диагностические работы. Такие методы могли бы способствовать решению задачи контроля технического состояния и изменения напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов в процессе эксплуатации. Вклад в развитие методов магнитного контроля трубопроводов внесли следующие ученые и специалисты: Агинея Р.В., Горошевский В.П., Гуськов С.С., Демченко Н.П., Дубов А.А., Камаева С.С., Коннов В.В., Крапивский Е.И., Кулеев В.Г., Atherton D.L. и др.

Цель работы

Совершенствование дистанционных магнитометрических методов диагностирования технического состояния подземных трубопроводов позволяющих проводить экспресс оценку с поверхности грунта.

Основные задачи работы

1. Проведение полевых (натурных) исследований для выявления основных закономерностей изменения компонент постоянного магнитного поля

измеренных над осью действующего трубопровода при изменении в нем величины механических напряжений.

2. Экспериментальные стендовые исследования влияния различных видов нагружения (внутреннее давление и изгиб) на характер изменения магнитного поля участков трубопроводов, для развития методов интерпретации результатов полевых исследований.

3. Разработка математической модели для определения механических напряжений, возникающих в трубе через величины обратимого изменения радиальной составляющей магнитного поля.

4. Разработка методик оценки технического состояния и механических напряжений в трубопроводе по результатам дистанционных измерений постоянного магнитного поля.

Научная новизна работы

1. Получен экспериментальный восходящий тренд влияния количества коррозионных дефектов, приходящихся на единицу длины трубопровода, на величину среднеквадратичного изменения напряженности магнитного поля, измеренного на поверхности грунта на участках действующих газопроводов диаметром 1420 мм (марка стали 09Г1С). Кроме того экспериментально установлено, что при изменении механических напряжений в трубопроводе изменяются составляющие постоянного магнитного поля, измеряемого на поверхности грунта над осью трубопровода. При этом в наибольшей степени изменяется вертикальная (радиальная) компонента напряженности магнитного поля. Полученные зависимости могут быть использованы при интегральной оценке технического состояния трубопровода.

2. Экспериментально установлен эффект обратимого изменения магнитного поля в процессе пульсационного изменения внутреннего давления на испытательных стендах из труб диаметром 1420 мм (09Г1С) и 219 мм (Ст20). Исследована взаимосвязь между характером изменения магнитного поля при изменении механических напряжений обусловленных внутренним давлением или изгибом. Показано, что в процессе первых нескольких механических циклов изменение магнитного поля происходит необратимо, но с повторением количества механических циклов изменения магнитного поля становятся обратимыми.

3. Экспериментально установлено, что последовательность нагружения трубы осуществляемая на испытательном стенде диаметром 219 мм (Ст20) влияет на характер изменения радиальной составляющей магнитного поля. Изгиб увеличивает необратимую составляющую магнитного поля, связанную с циклическим изменением давления, а нагружение давлением увеличивает необратимую составляющую магнитного поля связанную с циклическим изгибом. Этот эффект может использоваться для поиска участков с развивающейся деформацией изгиба на трубопроводах, в которых происходят периодические изменения внутреннего давления.

4. На основе эффекта обратной магнитострикции разработана оригинальная расчетно-экспериментальная модель, для определения механических напряжений, возникающих в трубе, через величину обратимого изменения

радиальной составляющей магнитного поля. Модель апробирована на стенде 1420 мм из стали марки 09Г1С.

Положения, выносимые на защиту

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, содержащей решение прикладной технической задачи, имеющее важное народно-хозяйственное значение. На защиту выносятся следующие положения диссертации, обладающие элементами новизны.

1. Экспериментально установлена корреляционная взаимосвязь между количеством дефектных труб на конкретном участке измерения и средним квадратичным отклонением вертикальной составляющей магнитного поля на поверхности грунта для действующего газопровода диаметром 1420 мм (марка стали 09Г1С) при изменении внутреннего давления.

2. Экспериментально установлен эффект обратимого изменения компонент магнитного поля в процессе пульсационного изменения внутреннего давления на испытательных стендах из труб диаметром 1420 мм и 219 мм изготовленных из стали марок 09Г1С и Ст20..

3. Обнаружен переходной «эффект» от обратимого изменения к необратимому, составляющих магнитного поля, при чередовании нагрузжений, вызванных изгибом и внутренним давлением в трубе испытательного стенда диаметром 219 мм (Ст20).

4. Разработана расчетно-экспериментальная модель для определения механических напряжений, возникающих в стенде изготовленном из труб диаметром 1420 мм стали марки 09Г1С при изменении внутреннего давления, через величину обратимого изменения радиальной составляющей магнитного поля.

Достоверность результатов проведенных исследований

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на:

- анализе известных достижений и теоретических положений других авторов по вопросам дистанционной магнитометрической диагностики подземных трубопроводов;
- планировании экспериментальных исследований, заключающемся в составлении плана эксперимента, обеспечения необходимого количества измерений, статистического анализа полученных результатов;
- использовании при проведении экспериментальных исследований современного и поверенного оборудования.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазоводов, баз и хранилищ в части пунктов: 1. **Напряженное состояние** и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ и 6. Разработка и усовершенствование методов

эксплуатации и **технической диагностики** оборудования насосных и компрессорных станций, **линейной части трубопроводов**.

Практическая значимость работы

На основании результатов разработана методика интегральной оценки поврежденности участков подземного стального трубопровода, которая позволяет определять участки с наибольшим количеством и величиной дефектов на обследуемом трубопроводе, что отражено в патентах РФ на изобретение: № 2538072 «Способ определения поврежденности участков подземного трубопровода, изготовленного из ферромагнитного материала»; № 2563656 «Способ определения кольцевых сварных швов подземного стального трубопровода».

Разработаны методики определения изменений напряжений на участках подземных трубопроводов, на которых периодически меняются эксплуатационные режимы (например, изменения рабочего давления). Методики позволяют определить факт изменения механических напряжений на данном участке подземного трубопровода за время между предыдущим и текущим вариациями эксплуатационного режима, что отражено в патенте РФ на изобретение № 2521714 «Способ определения механических напряжений в стальных трубопроводах».

Результаты работы используются в учебном процессе бакалавров направления подготовки 21.03.01 "Нефтегазовое дело" при проведении лабораторных и практических занятий в рамках дисциплины "Диагностика объектов транспорта и хранения газа и нефти" на кафедре "Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов" Ухтинского государственного технического университета, а также используются при подготовке учебных пособий и методических указаний по дисциплине "Оценка технического состояния трубопроводных систем" для магистров направления подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.10.00 – «Нефтегазовое дело» на кафедре «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» Нижегородского государственного технического университета.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследований, в разработке методик полевых и стендовых экспериментальных работ, в написании основного содержания статей, а также в проведении экспериментальных работ и анализе их результатов.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на XX Международной деловой встрече «Диагностика» (Оргэнергогаз, г. Будва (Черногория), 2013 г.), V Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» (ВНИИГАЗ, г. Москва, 2013 г.), IX Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2013» (УГНТУ, г. Уфа, 2013 г.), Международных семинарах «Рассохинские чтения» (УГТУ, г.

Ухта, 2013, 2014, 2015, 2016 г.), научно-технических советах ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» и ОАО «Гипрогазцентр».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ [1 – 14], из них 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [15] и 3 патента на изобретение Российской Федерации [16 – 18].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 145 страниц текста, 71 рисунок, 16 таблиц и список литературы из 88 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, перечислены задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о научной новизне и практической значимости полученных результатов.

В первой главе рассмотрены работы, связанные с магнитными методами оценки технического и напряженного состояния стальных трубопроводов. Приведены сведения о методе дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов. Дана характеристика измерительного оборудования, использовавшегося при экспериментальных исследованиях.

К настоящему времени предложен ряд методов контроля технического состояния и механических напряжений, реализуемых путем измерения магнитных свойств материала. Известно, что магнитные свойства материала (например, форма и размеры петли гистерезиса) зависят не только от механических напряжений, но и от химического состава материала, наличия и расположения дислокаций, размеров зерен и т.п.. Сложный характер одновременного влияния различных факторов на магнитные свойства материалов в общем случае не позволяет их разграничить и определить влияние каждого. Тем не менее, в некоторых случаях имеется возможность установить корреляционную связь между определенными магнитными характеристиками и состоянием объекта контроля. Наибольшее распространение получили методы оценки напряженного состояния, основанные на измерении коэрцитивной силы, шумов Баркгаузена и магнитного поля в районе локальных намагниченных участков. Оценка технического состояния трубопроводов с поверхности грунта производится электрометрическим и магнитометрическим методами. Электрометрическая диагностика позволяет оценить состояние системы электрохимзащиты и изоляционного покрытия в том числе с использованием результатов измерений электромагнитного поля трубопровода. В публикациях имеются сведения о применении для оценки технического состояния дистанционных магнитных методов, основанных на измерении постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта.

Проведенный обзор работ показывает, что имеется принципиальная возможность оценки состояния подземных стальных трубопроводов по результатам периодических дистанционных измерений постоянного магнитного поля, поскольку магнитное поле на поверхности грунта определяется намагниченностью металла трубопровода, а намагниченность

металла изменяется при изменении механических напряжений. Разработка практически применимых количественных методов оценки напряженного состояния осложняется тем, что на изменение магнитного поля трубопроводов под нагрузкой влияет неоднородность распределения намагниченности в элементах трубопровода, а также магнитная предыстория и история изменения механических напряжений в элементах трубопровода. В реальных условиях детальная информация о распределении намагниченности трубопровода, а также об истории изменения намагниченности и механических напряжений, как правило, отсутствует. Тем не менее, имеются основания полагать, что даже в условиях недостатка исходной информации с помощью периодических магнитометрических измерений может быть проведена качественная, а иногда и количественная оценка изменения механических напряжений.

Во второй главе представлены результаты полевых магнитометрических измерений, выполненных на действующих подземных трубопроводах диаметром 1420 мм и 159 мм. Исследован характер изменения постоянного магнитного поля, создаваемого трубопроводами на поверхности грунта, при изменении напряженного состояния трубопроводов.

Магистральный газопровод «Уренгой-Центр-1» (эксплуатирующая организация – ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», Сеченовское ЛПУМГ). Наружный диаметр трубопровода 1420 мм. Толщина стенки на участках измерений – от 15,7 до 18,7 мм. Первый участок измерений расположен в районе 2454 – 2457 км. Протяженность первого участка 1700 м. Второй участок измерений расположен в районе 2462 – 2467 км. Протяженность второго участка 4000 м.

В ходе полевых работ проводились измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля в точках, расположенных на поверхности грунта над осью трубопровода. Измерения выполнялись с помощью комплекса «МАГ-01» разработки ОАО «Гипрогазцентр». Расположение координатных осей: ось x направлена вертикально вниз, ось y параллельна оси трубопровода, ось z лежит в горизонтальной плоскости. Расстояние между точками измерения вдоль оси трубы составляло 1 м.

Измерения на участке 1 проводили при наличии рабочего давления (6,3 МПа) в трубопроводе (этап 1) и при отсутствии избыточного внутреннего давления в трубопроводе (этап 2). Средняя глубина заложения трубопровода составляла 1,2 м до верхней образующей.

Результаты измерения трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода (после вычитания поля Земли) на участке 1 представлены на рисунке 1. На рисунке 2 представлены результаты расчета величины изменения вертикальной (H_x) компоненты напряженности магнитного поля. На магнитограммах указано положение кольцевых сварных швов (вертикальные линии серого цвета).

Как при рабочем, так и при нулевом давлении на магнитограммах в районе некоторых кольцевых сварных швов наблюдаются характерные чередующиеся локальные минимумы и максимумы компоненты H_x , связанные с различиями продольной намагниченности соседних труб. При изменении давления наблюдается достаточно существенное изменение магнитограмм. Изменяется форма и высота экстремумов H_x . Некоторые из экстремумов H_x исчезают, в то

же время появляются экстремумы H_x на тех участках, на которых до изменения давления экстремумов не наблюдалось. Например в районе кольцевого сварного шва с линейной координатой 395 м на этапе 1 экстремум H_x отсутствует, а на этапе 2 имеется максимум с высотой около 5 А/м.

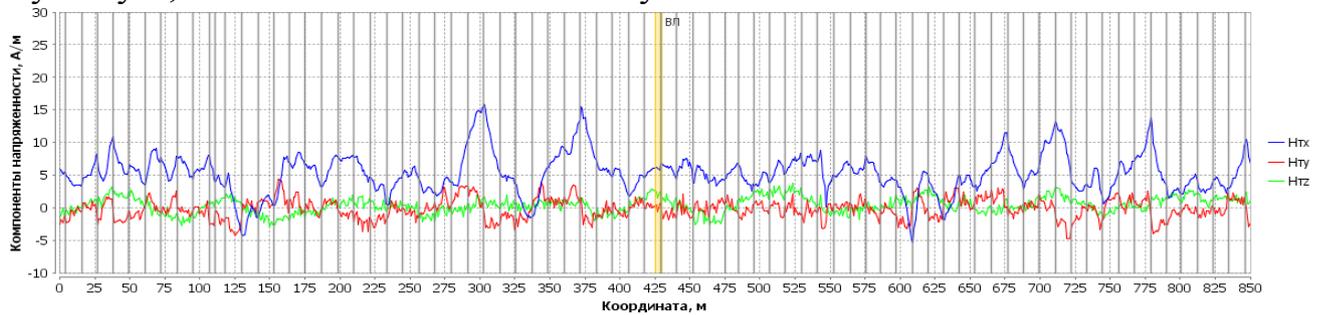


Рисунок 1 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1. Участок 0 – 850 м .

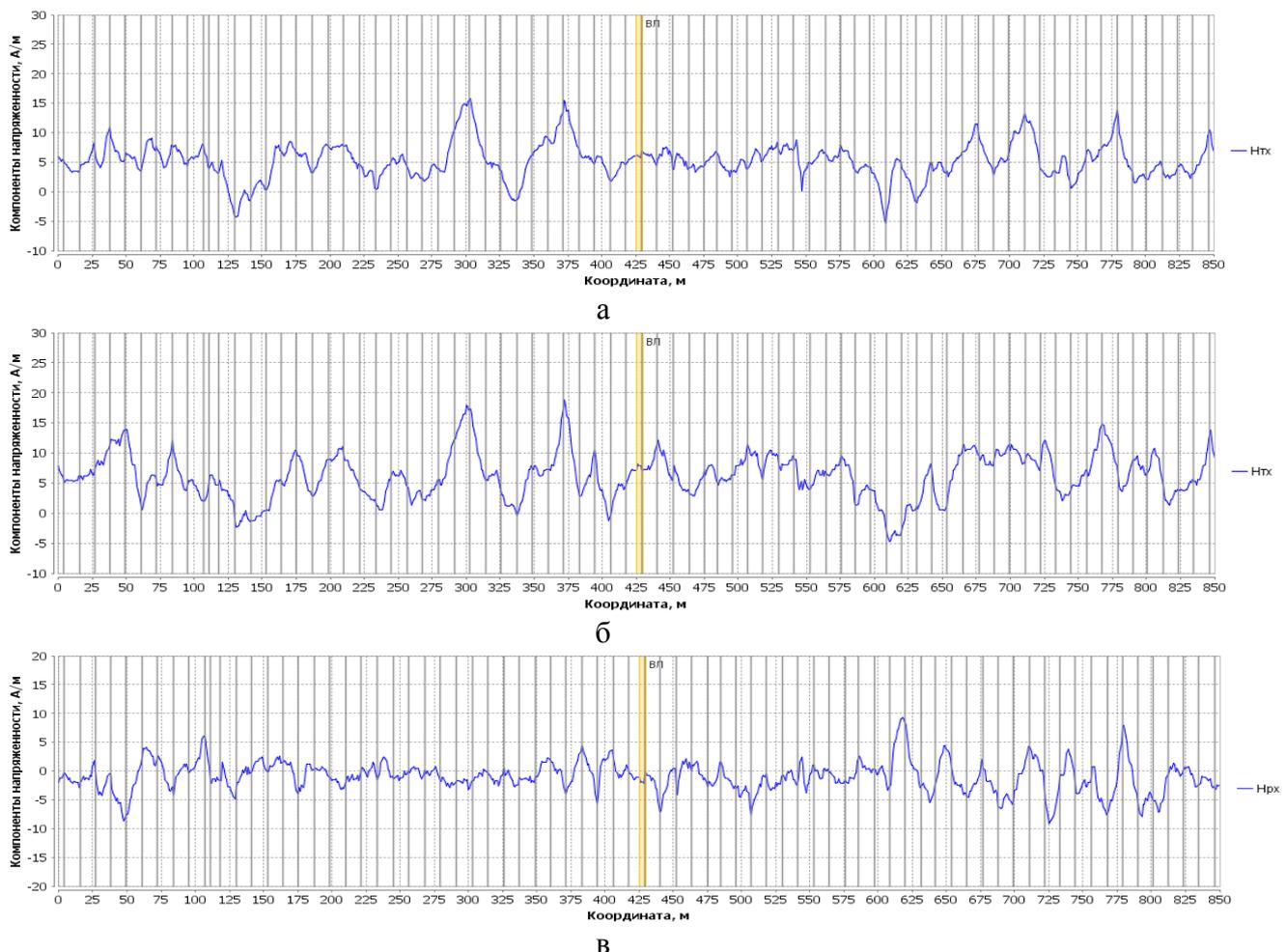


Рисунок 2 – Участки 0 – 850 м . График радиальной (H_x) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1 (а), График радиальной (H_x) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 2 (б), График разности радиальных (H_x) компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапах 1 и 2 (в)

На этапах 1 и 2 абсолютные величины компонент напряженности постоянного магнитного поля трубопровода на рассматриваемых участках

изменяются в следующих диапазонах: H_x – от – 5 до 19 А/м, H_y – от – 5 до 6 А/м, H_z – от – 5 до 7 А/м.

Абсолютная величина изменения магнитного поля при изменении механических напряжений на данном участке достигает 13 А/м для компоненты H_x , 6 А/м для компоненты H_y , 7 А/м для компоненты H_z .

Анализ результатов измерений проведен с учетом погрешностей измерения компонент напряженности магнитного поля. При расчетах считалось, что углы отклонения магнитных осей датчиков от вертикали и от оси трубопровода не превышают 2° , а ошибки определения координат блока датчиков относительно оси трубопровода не превышают 0,1 м. Абсолютные погрешности измерения компонент напряженности магнитного поля трубопровода, усредненные по участку измерения составили $\Delta H_x = 1,17$ А/м, $\Delta H_y = 1,88$ А/м, $\Delta H_z = 2,37$ А/м.

Величина изменения магнитного поля, связанного с изменением механических напряжений, существенно превышает погрешности измерения магнитного поля. Величина изменения магнитного поля отличается для разных точек измерения (как по абсолютной величине, так и по знаку). Это говорит о том, что под действием изменения механических напряжений происходят различные изменения намагниченности разных труб.

Изменение механических напряжений, произошедшее между измерениями на этапах 1 и 2: кольцевые напряжения на этапе 2 на 275 МПа меньше, чем на этапе 1, продольные напряжения меньше на 100 МПа.

Для количественной оценки изменения магнитотграмм при изменении давления проведен расчет среднеквадратичного значения разности соответствующих компонент. Для участка 0 – 1700 м $d_x = 3,21$ А/м; $d_y = 1,90$ А/м; $d_z = 1,87$ А/м. Среднеквадратичное значение разности компонент y и z сравнимы с величиной погрешностей измерений этих компонент. Поэтому наиболее информативной количественной характеристикой изменения магнитного поля на поверхности грунта является величина d_x .

Проведено сопоставление величины изменения вертикальной составляющей магнитного поля при изменении механических напряжений и степени поврежденности трубопровода. Рассмотрены участки длиной 100 м. Для каждого участка рассчитаны значения d_x . Для оценки степени поврежденности участка используется количество труб m на данном участке, подлежащих вырезке по результатам диагностического обследования, выполненного после откапывания трубопровода и снятия изоляции.

Каждому из участков длиной 100 м соответствует точка в системе координат $m - d_x$. Соответствующая диаграмма представлена на рисунке 3. Экспериментальный тренд точек показывает, что с ростом относительного числа дефектных труб (на 100 м длины) в целом возрастает среднеквадратичное изменение радиальных компонент напряженности магнитного поля трубопровода. На рисунке 3 приведена линейная аппроксимация тренда, найденная по методу наименьших квадратов.

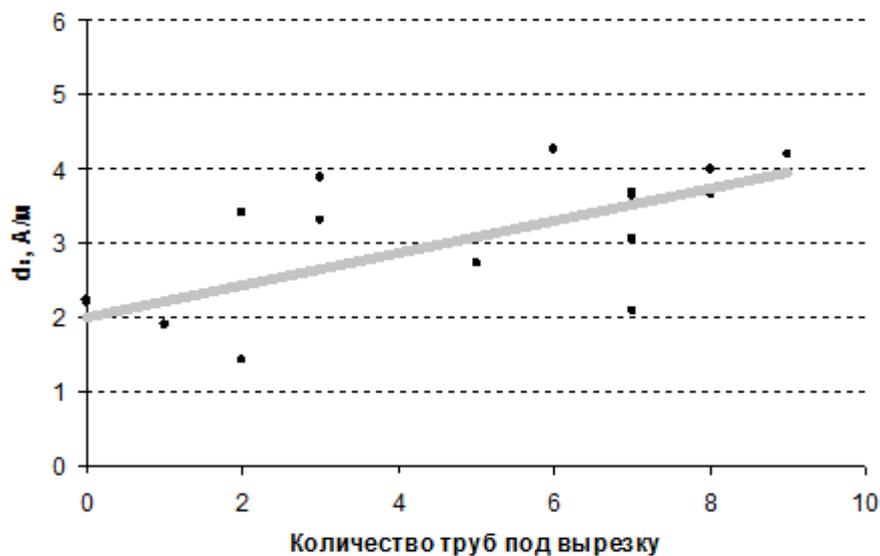


Рисунок 3 – Влияния относительного числа дефектных труб стометровых участков трубопровода на величину среднеквадратичного изменения радиальной составляющей магнитного поля

Коэффициент корреляции значений m и d_x для полученного массива для линейной аппроксимации данных равен $k=0,62$. Расчет значимости осуществлялся по критерию Стьюдента числа измерений (точек) $n=17$.

$$t = \frac{k\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-k^2}} = 3.06;$$

что превышает критическое значения коэффициента Стьюдента $t_{\alpha, n-2} = 2.13$ для доверительного интервала 0.95. Следовательно приведенная зависимость является значимой. Таким образом, можно считать, что имеется взаимосвязь между величиной изменения магнитного поля при изменении механических напряжений и поврежденностью металла подземного трубопровода.

Магнитометрические измерения на участке 2 проводились при рабочем давлении (6,3 МПа) в трубопроводе. Средняя глубина заложения трубопровода составляла 1,4 м до верхней образующей (2,1 м до оси трубопровода).

Кроме аномалий, связанных с магнитными помехами (КИПы и т. п.) наблюдались магнитные аномалии на участках с линейными координатами 440 – 500 м, 1730 – 1770 м, 2500 – 2540 м, 3520 – 3580 м, 3660 – 3690 м, 3740 – 3780 м. Установлено, что за 4 года, предшествующие проведению измерений, на этих участках трубопровода был проведен ремонт с заменой труб. Таким образом, обнаруженные аномалии магнитного поля расположены именно в тех местах, где был проведен ремонт с заменой труб.

На части участка 2 был проведен комплекс измерений, направленный на исследование влияния магнитного внутритрубного дефектоскопа на магнитное поле. На участке с линейными координатами 2200 – 3200 м относительно начала участка 2 выполнялись измерения магнитного поля три раза: при рабочем давлении до пропуска дефектоскопа, при рабочем давлении после пропуска дефектоскопа, при отсутствии избыточного внутреннего давления

после пропуска дефектоскопа. Результаты этих измерений представлены на рисунке 4.

На магнитограммах, полученных после ВТД при рабочем давлении, наблюдаются характерные квазисинусоидальные изменения компонент H_x и H_z с периодом около 500 м, связанные, очевидно, с вращением дефектоскопа и несимметричностью его магнитной системы. Если из результатов измерений вычесть вклад, связанный с вращением дефектоскопа, то диапазоны изменения компонент напряженности будут близки к соответствующим диапазонам до ВТД: H_x – от – 10 до 10 А/м, H_y – от – 5 до 5 А/м, H_z – от – 5 до 5 А/м. На магнитограммах, полученных после ВТД при отсутствии избыточного внутреннего давления, компоненты напряженности постоянного магнитного поля трубопровода изменялись в следующих диапазонах: H_x – от – 10 до 20 А/м, H_y – от – 5 до 5 А/м, H_z – от – 10 до 5 А/м.

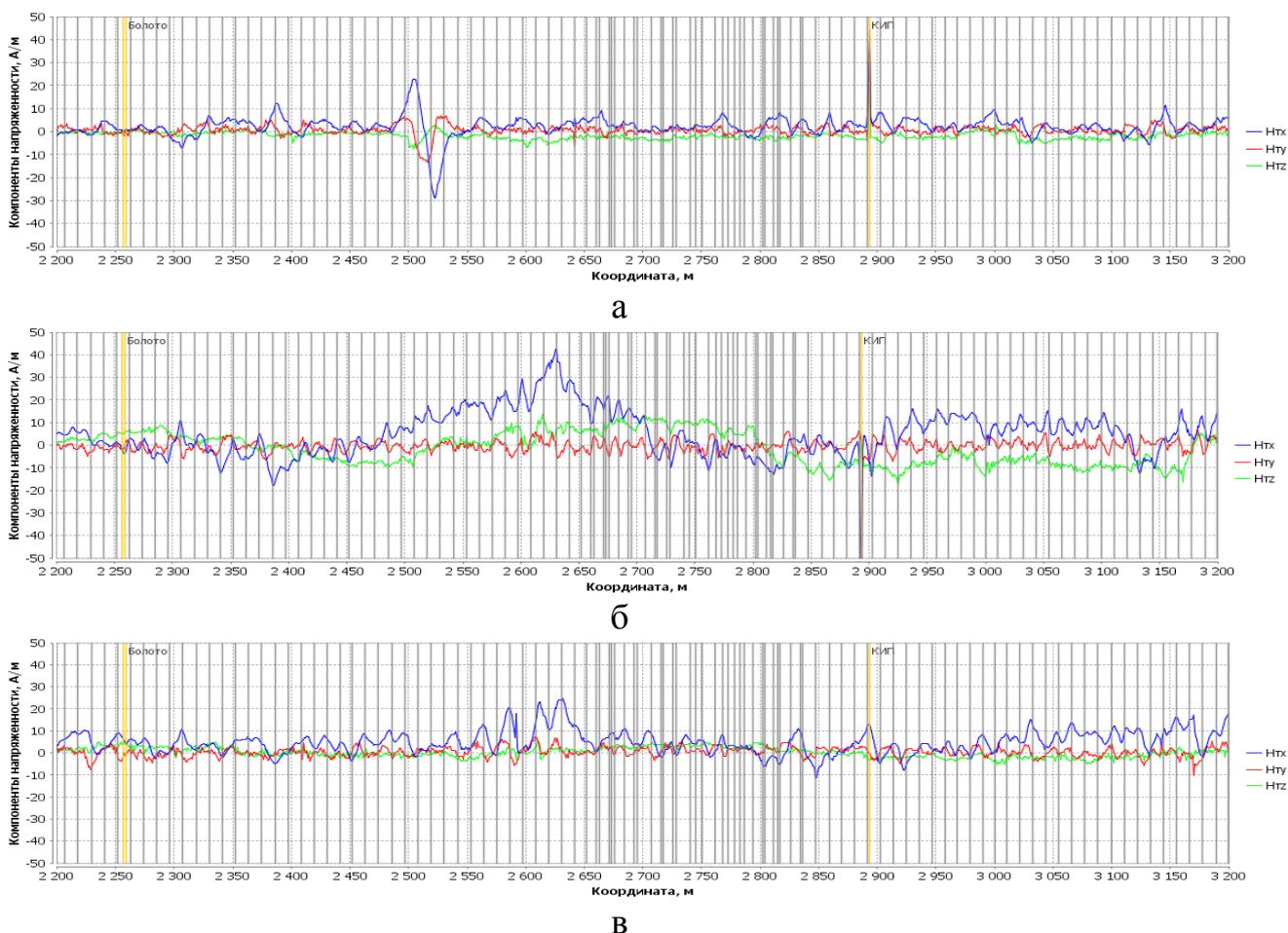


Рисунок 4 – Результаты измерения магнитного поля на участке 2200 – 3200 м до ВТД при рабочем давлении (а), после ВТД при рабочем давлении (б), после ВТД при нулевом давлении (в).

Таким образом, диапазоны изменения компонент напряженности магнитного поля во всех трех случаях (до ВТД при рабочем давлении, после ВТД при рабочем давлении, после ВТД при отсутствии избыточного внутреннего давления) примерно одинаковы. При этом в каждой точке измерения магнитное поле изменяется как после пропуска дефектоскопа, так и после изменения внутреннего давления. На магнитограммах, полученных до

ВТД при рабочем давлении, наблюдались аномалии в местах ремонта с заменой труб. После пропуска внутритрубного дефектоскопа аномалии магнитного поля на указанных участках исчезли.

Участок газопровода-отвода к ГРС с. Атюрьево в районе 13 – 14 км. Эксплуатирующая организация – ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», Торбеевское ЛПУ МГ. Наружный диаметр газопровода 159 мм. Толщина стенки на участке измерений 4 мм. Общая протяженность участка измерений 500 м.

Измерения проводились в два этапа. Этап 1 – при давлении в трубопроводе 1,0 МПа. Этап 2 – при давлении в трубопроводе 5,5 МПа. Средняя глубина заложения трубопровода составляла около 1,3 м до верхней образующей (около 1,4 м до оси трубопровода).

На рассматриваемом участке отличия магнитограмм, полученных при разном внутреннем давлении, незначительны. На участке измерений компоненты напряженности постоянного магнитного поля трубопровода изменялись в следующих диапазонах: H_x – от -5 до 7 А/м, H_y – от -4 до 2 А/м, H_z – от -2 до 4 А/м. Глубина залегания оси трубопровода изменялась от 1,00 до 1,95 м.

В ходе работы была проведена оценка абсолютных погрешностей измерений: $\Delta H_x = 0,42$ А/м, $\Delta H_y = 0,82$ А/м, $\Delta H_z = 0,81$ А/м.

Изменение механических напряжений, произошедшее между измерениями на этапах 1 и 2 $\Delta \sigma_k \approx 89$ МПа, а $\Delta \sigma_{np} \approx 45$ МПа.

Среднеквадратичное значение разности x -компонент напряженности магнитного поля при наличии и при отсутствии избыточного внутреннего давления $d_x = 0,50$ А/м, что сравнимо с величиной погрешностей измерения x -компонент напряженности магнитного поля. Таким образом, на данном участке трубопровода изменение внутреннего давления с 1,0 до 5,5 МПа практически не повлияло на магнитное поле на поверхности грунта.

Поведение магнитного поля при изменении внутреннего давления на данном участке трубопровода существенно отличается от поведения магнитного поля трубопровода диаметром 1420 мм, Такое различие может быть обусловлено рядом факторов: магнитное поле на поверхности грунта определяется намагниченностью и объемом источника магнитного поля, а также расстоянием от источника до точек измерения. Объем металла на единицу длины трубопровода диаметром 159 мм в 36 раз меньше, чем трубопровода диаметром 1420 мм, а расстояние от верхней образующей трубопровода до точек измерения примерно одинаково. Вторым фактором – различие изменений механических напряжений, связанных с изменением внутреннего давления. Если предположить, что изменение продольных механических напряжений на 45 МПа приводит к вдвое меньшему изменению намагниченности металла, чем изменение продольных механических напряжений на 100 МПа, то величина изменения магнитного поля на поверхности грунта для трубопровода диаметром 159 мм должна быть приблизительно в 60 – 80 раз меньше, чем для трубопровода диаметром 1420 мм. Таким образом, чем меньше диаметр трубопровода, тем меньше величина изменения поля на поверхности грунта при одинаковом изменении

намагниченности и при одинаковом расстоянии от точек измерения до верхней образующей.

Экспериментально установлено, что постоянное магнитное поле подземного трубопровода существенно изменяется при изменении механических напряжений в трубопроводе. В наибольшей степени изменяется вертикальная компонента напряженности магнитного поля H_x . Характер изменения магнитного поля зависит не только от действующих в данный момент механических напряжений, но и в значительной степени определяется магнитной предысторией конкретной трубы. Обнаружена взаимосвязь между величиной изменения поля при изменении механических напряжений и поврежденностью металла трубопровода. При уменьшении диаметра трубопровода уменьшается величина изменения магнитного поля на поверхности грунта при одинаковом изменении намагниченности и при одинаковом расстоянии от точек измерения до верхней образующей.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния механических напряжений на магнитное поле на специально изготовленных для этой цели двух испытательных стендов, представляющих собой участки трубопровода диаметром 1420 мм, длина ~ 25 м и диаметром 219 мм, длина ~ 10 м.

Испытательный стенд 1420 мм, представляющий собой участок трубопровода с торцевыми заглушками, в который подавалась вода под давлением. Стенд сварен из десяти катушек, вырезанных из магистральных трубопроводов.

В ходе работы были проведены измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля трубы в точках, расположенных над осью трубы. Расстояние от верхней образующей трубы до точек измерения 0,5 м, расстояние между точками измерения (вдоль оси трубы) 0,5 м. Схема расположения точек измерения с указанием координатных осей датчика представлена на рисунке 5.

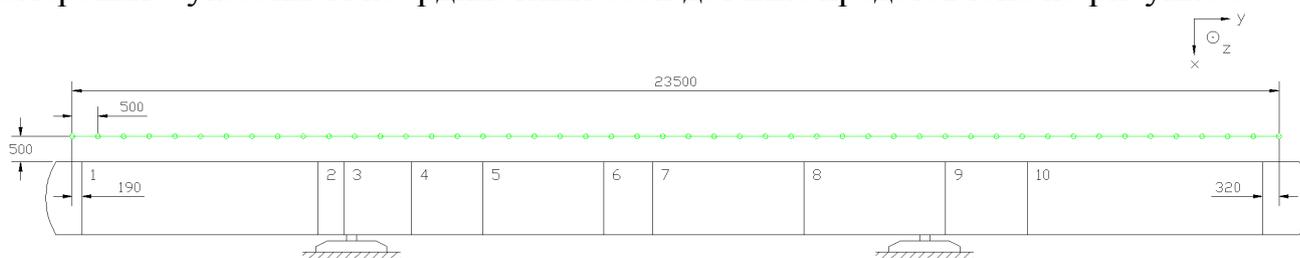


Рисунок 5 – Схема расположения точек измерения магнитного поля над осью трубы. Точки измерения обозначены зеленым цветом

Измерения магнитного поля над осью трубы выполнялись при следующих значениях избыточного внутреннего давления P : $P = 0$ (до повышения давления), $P = 3,0$ МПа (повышение давления), $P = 6,0$ МПа, $P = 3,0$ МПа (понижение давления), $P = 0$ (после понижения давления). Указанный комплекс измерений выполнялся дважды – при первом цикле изменения давления и после 10 циклов изменения давления (от 0 до 6,0 МПа).

Для количественной оценки изменения магнитного поля при изменении давления рассчитаны: минимальное и максимальное значение разности компонент напряженности (δH_{ij}) и среднеквадратичное значение разности соответствующих компонент d_j

Таблица 1 – Количественные характеристики изменения магнитограмм при изменении избыточного внутреннего давления

| $P_1 = 0$ (до повышения давления), $P_2 = 6,0$ МПа | | | | | | |
|---|------------------------------------|--------|-------|---------------------------------------|-------|-------|
| | До циклического изменения давления | | | После циклического изменения давления | | |
| j | x | y | z | x | y | z |
| $\delta H_{jmin}, \text{А/м}$ | -37,01 | -22,02 | -5,82 | -12,88 | -7,98 | -5,15 |
| $\delta H_{jmax}, \text{А/м}$ | 33,51 | 19,06 | 4,33 | 14,65 | 9,80 | 1,81 |
| $d_j, \text{А/м}$ | 18,62 | 12,09 | 1,92 | 8,39 | 5,02 | 1,55 |
| $P_1 = 0$ (до повышения давления), $P_2 = 0$ (после понижения давления) | | | | | | |
| | До циклического изменения давления | | | После циклического изменения давления | | |
| j | x | y | z | x | y | z |
| $\delta H_{jmin}, \text{А/м}$ | -22,62 | -12,82 | -1,19 | -0,89 | -0,67 | -0,98 |
| $\delta H_{jmax}, \text{А/м}$ | 17,98 | 8,20 | 2,01 | 1,20 | 1,17 | 0,83 |
| $d_j, \text{А/м}$ | 9,70 | 7,07 | 0,84 | 0,54 | 0,36 | 0,38 |

Таким образом, при изменении внутреннего давления происходит изменение постоянного магнитного поля над трубопроводом, в наибольшей степени изменяется x -компонента напряженности, а в наименьшей степени – z -компонента. Такие результаты согласуются с полученными ранее при полевых измерениях на магистральном газопроводе диаметром 1420 мм. Результаты, полученные до и после циклического изменения давления, имеют существенные количественные отличия. При одинаковом изменении внутреннего давления (от 0 до 6,0 МПа) изменение магнитного поля в первом случае (до циклики) существенно больше, чем во втором случае (после циклики), т.е. произошло необратимое изменение магнитного поля. После 10 циклов изменения давления величина необратимых изменений существенно уменьшается, магнитное поле после повышения и последующего снижения давления до нуля возвращается к исходным значениям.

В ходе экспериментальных работ выполнено измерение трех компонент напряженности магнитного поля при неподвижном блоке датчиков в процессе циклического изменения давления в испытательном стенде. Проведено 40 циклов изменения внутреннего давления от 0 до 6,8 МПа, измерения магнитного поля проводились при давлении $P = 0$, $P = 2,0$ МПа, $P = 4,0$ МПа, $P = 5,5$ МПа, $P = 6,8$ МПа. Блок датчиков устанавливался в точке с линейной координатой 15,5 м относительно начала участка измерений.

Диаграммы поведения компонент напряженности магнитного поля при изменении давления представлены на рисунках 6, 7.

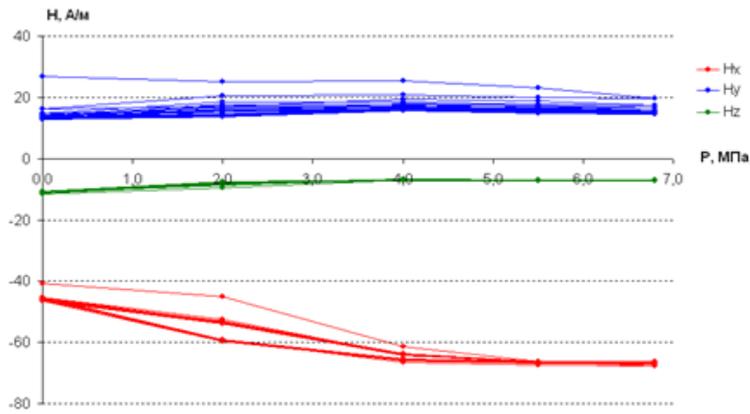


Рисунок 6 Поведение компонент напряженности магнитного поля при циклическом изменении давления в трубе. Блок датчиков 2. Циклы 1 – 10.

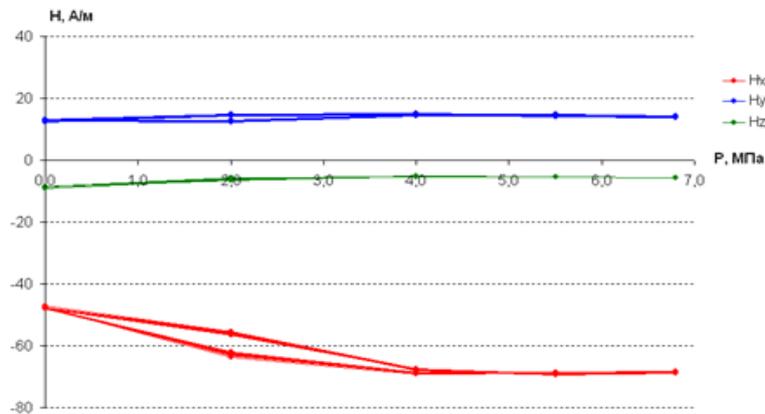


Рисунок 7 Поведение компонент напряженности магнитного поля при циклическом изменении давления в трубе. Блок датчиков 2. Циклы 11 – 40.

Анализ кривых на рисунках 6–7 показывает следующее: величина компоненты вектора напряженности магнитного поля H_x существенно изменяется в процессе бароциклирования. Причем в первом такте нагружения ее изменение по модулю достигает 28 А/м. Последующее бароциклирование приводит к обратимому изменению компоненты H_x с амплитудой около 20 А/м которое наблюдается в виде петли Гистерезиса. Обратимый характер изменения H_x можно понять, если учесть, что в процессе нагружения давлением в металле стенки трубы создается плоское напряженное состояние. Пропорциональная связь между напряжениями σ_k , σ_{np} и внутреннем давлением – Р позволяет представить режим бароциклирования в виде пульсационных механоциклов.

Из обобщенного закона Гука, с учетом конкретного вида напряженного

состояния следует: $\sigma_y = \sigma_{11} = \sigma_{np} = \frac{\sigma_k}{2}$; $\sigma_x = \sigma_{22} = 0$; $\sigma_z = \sigma_{33} = \sigma_k$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu\sigma_z] = \frac{1}{E} [\sigma_k / 2 - \mu\sigma_k] = \sigma_k (0.5 - \mu) = 0.21 \frac{\sigma_k}{E} \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [-\mu(\sigma_z + \sigma_y)] = -\frac{\mu}{E} \left[\frac{3\sigma_k}{2} \right] = -0.44 \frac{\sigma_k}{E} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu\sigma_y] = \frac{\sigma_k}{E} (1 - 0.5\mu) = 0.85 \frac{\sigma_k}{E} \quad (3)$$

В области упругих деформаций связь между вектором намагниченности, (тензором первого ранга) ΔJ_i , и тензором второго ранга ε_{ij} может быть представлена в виде:

$$\Delta J_i = a_{ijk} \varepsilon_{jk} \quad (4)$$

где a_{ijk} – компонента тензора третьего ранга, в (4) используется правило суммирования по повторяющимся индексам. В развернутом виде формула (4) принимает вид

$$\Delta J_1 = a_{111} \varepsilon_{11} = 0.21 a_{111} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (5)$$

$$\Delta J_2 = a_{222} \varepsilon_{22} = -0.44 a_{222} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (6)$$

$$\Delta J_3 = a_{333} \varepsilon_{33} = 0.85 a_{333} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (7)$$

Предполагая, что измеренные опытные значения изменений магнитного поля пропорциональны изменению напряженности и некоторой радиально симметричной функции $f(r)$, где r – расстояние от оси трубы до точки измерения компонент магнитного поля, имеем:

$$\Delta H_y = \Delta H_1 = f(r) \Delta J_1 = f(r) a_{111} \varepsilon_{11} = 0.21 f(r) a_{111} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (8)$$

$$\Delta H_x = \Delta H_2 = f(r) \Delta J_2 = f(r) a_{222} \varepsilon_{22} = -0.44 f(r) a_{222} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (9)$$

$$\Delta H_z = \Delta H_3 = f(r) \Delta J_3 = f(r) a_{333} \varepsilon_{33} = 0.85 f(r) a_{333} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (10)$$

Анализ кривых на рис. 15-16 показывает, что величина ΔH_x в установившемся цикле достигает 20 А/м, в то время как ΔH_y – 2 А/м, а ΔH_z – 1.5 А/м. Что позволяет записать соотношения:

$$\Delta H_y = 0.04 f(r) a_{222} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (11)$$

$$\Delta H_x = -0.44 f(r) a_{222} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (12)$$

$$\Delta H_z = 0.03 f(r) a_{222} \frac{\sigma_\kappa}{E} \quad (13)$$

Этот факт свидетельствует о том, что наибольшее изменение магнитного поля за цикл реализуется в направлении, параллельном радиальной оси и по этому, для практического определения изменения компонент магнитного поля можно вполне ограничиться применением одной единственной формулы (12). Соотношение (12) удовлетворительно описывают величины изменения компонент магнитного поля при механоциклировании по осевым и кольцевым значениям напряжений. В формуле учтено, что наибольшее значение изменения магнитного поля реализуется в направлении оси x . Ключевой в ней является параметр a_{222} являющейся компонентой тензора третьего ранга

Описанный выше метод измерения компонент магнитного поля позволяет эмпирически определить количественно величину компоненты тензора a_{222} .

Принимая в (12) $f(r) = \frac{1}{r}$ получаем:

$$a_{222} = \frac{|\Delta H_y| Er}{0.44 \sigma_k} \quad (14)$$

Таким образом формулу (14) можно считать расчетной для определения изменения напряженности магнитного поля в радиальном направлении на произвольном расстоянии от оси трубопровода. Для практического использования её целесообразно записать в виде:

$$\sigma_k = \frac{|\Delta H_y| Er}{0.44 a_{222}} \quad (15)$$

В целом можно отметить, что бароциклирование приводит к стабилизации значений H_x в первых десяти циклах, а величин H_y и H_z уже в первых 2-х циклах. При последующем бароциклировании названные величины практически не изменяются, по этому их можно рассматривать как механические параметры, определяющие степень механоциклического воздействия на материал трубопровода. Как уже говорилось выше, из названных параметров наиболее значимую роль играет величина H_x , по изменению которой можно судить об изменении кольцевых напряжений - σ_k в трубопроводе.

Описанный выше метод измерения компонент магнитного поля в процессе бароциклирования труб отраженный в формулах (11-13) дает основание, что выражения (12,15) могут быть использованы для определения напряженного состояния металла магистральных трубопроводов в полевых условиях с поверхности грунта при проведении магнитометрических измерений.

Производились магнитометрические измерения при изменении механических напряжений в стенде диаметром 219 мм. Объектом исследования является испытательный стенд, представляющий собой трубу, закрепленную на двух опорах. Длина стенда 10,5 м, наружный диаметр 219 мм. Предусмотрено два способа изменения напряженного состояния металла стенда – изменение внутреннего давления воды в стенде и изгиб стенда с помощью домкрата, установленного в центральной части стенда. Измерения выполнялись в два этапа. Первый этап включал измерения магнитного поля при изменении механических напряжений путем изменения внутреннего давления и изгиба. Второй этап включал измерения магнитного поля при изменении механических напряжений путем изгиба, а также при изменении намагниченности участков стенда.

Цель первого этапа измерений – экспериментальное исследование влияния деформации изгиба на величину необратимого изменения магнитного поля при изменении внутреннего давления в стенде.

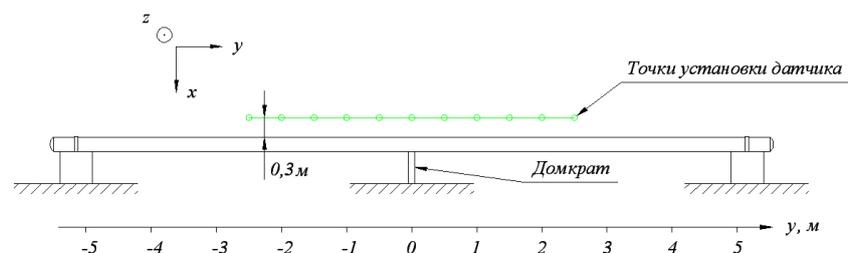


Рисунок 8 – Схема расположения точек измерения магнитного поля на первом этапе измерений. Точки измерения обозначены зеленым цветом

Измерения постоянного магнитного поля проводились при следующих значениях избыточного внутреннего давления P : $P = 0$ до повышения давления, $P = 5,0$ МПа, $P = 0$ после понижения давления. Такой комплекс измерений проводился три раза – на первом цикле изменения давления от нуля до 5,0 МПа и снова до нуля, после 5 циклов изменения давления от нуля до 5,0 МПа и снова до нуля, после изгиба трубы с помощью домкрата, установленного в точке с линейной координатой $y = 0$ (прогиб трубы $l = 40$ мм).

Таблица 2 – Количественные характеристики изменения магнитограмм при изменении избыточного внутреннего давления

| $P_1 = 0$ (до повышения давления), $P_2 = 5,0$ МПа | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| j | До циклического изменения давления | | | После циклического изменения давления | | | После изгиба трубы | | |
| | x | y | z | x | y | z | x | y | Z |
| $\delta H_{jmin},$ А/м | -0,37 | -0,50 | -0,47 | -0,42 | -0,05 | -0,16 | -0,94 | -0,16 | -0,26 |
| $\delta H_{jmax},$ А/м | 0,57 | 0,33 | 0,11 | 0,62 | 0,44 | 0,11 | 1,41 | 1,11 | 0,31 |
| $d_j,$ А/м | 0,33 | 0,24 | 0,21 | 0,36 | 0,20 | 0,10 | 0,95 | 0,50 | 0,16 |
| $P_1 = 0$ (до повышения давления), $P_2 = 0$ (после понижения давления) | | | | | | | | | |
| j | До циклического изменения давления | | | После циклического изменения давления | | | После изгиба трубы | | |
| | x | y | z | x | y | z | x | y | Z |
| $\delta H_{jmin},$ А/м | 0,00 | -0,62 | -0,36 | -0,21 | -0,06 | -0,31 | -0,78 | -0,27 | -0,11 |
| $\delta H_{jmax},$ А/м | 0,26 | 0,00 | 0,16 | 0,06 | 0,06 | 0,16 | 0,89 | 0,61 | 0,21 |
| $d_j,$ А/м | 0,11 | 0,31 | 0,19 | 0,07 | 0,04 | 0,15 | 0,65 | 0,31 | 0,12 |

Абсолютные погрешности измерения компонент магнитного поля стенда, усредненные по участку измерения: $\Delta H_x = 0,26$ А/м, $\Delta H_y = 0,38$ А/м, $\Delta H_z = 0,49$ А/м.

Результаты измерений при $P = 0$ (до повышения давления) и при $P = 0$ (после понижения давления) до изгиба практически совпадают из-за того, что на данном испытательном стенде ранее проводились работы, связанные с циклическим изменением давления, различия результатов измерений, выполненных при первом цикле изменения давления и после пяти циклов изменения давления, незначительны. После изгиба наблюдается необратимое изменение компонент магнитного поля при изменении давления ($d_x = 0,65$ А/м).

Цель второго этапа измерений – экспериментальное исследование влияния различия продольной намагниченности соседних участков стенда на постоянное магнитное поле и на изменение этого поля при деформации изгиба.

Изгиб трубы производился с помощью домкрата, установленного в точке с линейной координатой $y = 0$. Измерения постоянного магнитного поля проводились при следующих значениях прогиба трубы l : $l = 0$ до изгиба, $l = 40$ мм, $l = 0$ после снятия нагрузки. Затем проводились 10 циклов изменения нагрузки, при этом датчик устанавливался в точке с линейной координатой $y = 0$, измерения магнитного поля проводились при $l = 0$ и при $l = 40$ мм. После этого снова проводились измерения магнитного поля над осью трубы при $l = 0$ до изгиба, при $l = 40$ мм и при $l = 0$ после снятия нагрузки. Такой комплекс измерений проводился три раза – при исходной намагниченности трубы, после создания однородной продольной намагниченности на участке трубы с линейными координатами от -3 до 3 м, после создания неоднородной продольной намагниченности на участке трубы от -3 до 3 м (при этом вектора намагниченности соседних участков длиной 1,5 м были направлены навстречу друг другу).

После изменения намагниченности трубы существенно изменяется характер поведения магнитного поля при деформации. В этом случае при первом изменении прогиба существенно меняется магнитное поле (для однородной намагниченности изменение H_x достигает 9,8 А/м, для неоднородной намагниченности изменение H_x достигает 25,9 А/м). Эти изменения являются необратимыми. После десяти циклов изменения прогиба изменения магнитного поля носят обратимый характер, величина этих изменений существенно меньше, чем величина необратимых изменений при первом изменении нагрузки (для однородной намагниченности изменение H_x достигает 1,3 А/м, для неоднородной намагниченности изменение H_x достигает 1,2 А/м).

Таблица 3 – Количественные характеристики изменения магнитограмм при изменении прогиба трубы

| | | | | | | | |
|----------------------------|--|------------------------------------|-------|------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| Исходная намагниченность | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 40$ мм | | | | | | |
| | | До циклического изменения нагрузки | | | После циклического изменения нагрузки | | |
| | j | x | y | z | x | y | z |
| | δH_{jmin} , А/м | -0,52 | -0,44 | -0,25 | -0,31 | -0,50 | -0,72 |
| | δH_{jmax} , А/м | 0,63 | 0,67 | 1,19 | 0,47 | 0,51 | 0,57 |
| | d_j , А/м | 0,34 | 0,36 | 0,55 | 0,21 | 0,33 | 0,31 |
| | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 0$ (после снятия нагрузки) | | | | | | |
| | | До циклического изменения нагрузки | | | После циклического изменения нагрузки | | |
| | j | x | y | z | x | y | z |
| | δH_{jmin} , А/м | -0,31 | -0,11 | -0,05 | -0,16 | -0,06 | -0,21 |
| δH_{jmax} , А/м | 0,42 | 0,22 | 1,39 | 0,10 | 0,16 | 0,77 | |
| d_j , А/м | 0,19 | 0,10 | 0,56 | 0,06 | 0,06 | 0,24 | |
| Однородная намагниченность | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 40$ мм | | | | | | |
| | | До циклического изменения нагрузки | | | После циклического изменения нагрузки | | |
| | j | x | y | z | x | y | z |
| | δH_{jmin} , А/м | -9,75 | -6,53 | -0,26 | -1,10 | -0,95 | -0,36 |
| | δH_{jmax} , А/м | 9,59 | 4,13 | 0,78 | 1,25 | 0,72 | 0,46 |
| | d_j , А/м | 6,57 | 3,01 | 0,29 | 0,77 | 0,46 | 0,22 |
| | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 0$ (после снятия нагрузки) | | | | | | |
| | До циклического изменения | | | После циклического изменения | | | |

| | нагрузки | | | нагрузки | | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|
| | j | x | y | z | x | y | z | |
| | $\delta H_{jmin}, A/M$ | -10,01 | -5,97 | -0,31 | -0,26 | -0,06 | -0,46 | |
| | $\delta H_{jmax}, A/M$ | 9,49 | 3,74 | 0,31 | 0,31 | 0,17 | 0,26 | |
| | $d_j, A/M$ | 6,29 | 2,89 | 0,18 | 0,14 | 0,08 | 0,23 | |
| Неоднородная намагниченность | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 40$ мм | | | | | | | |
| | | До циклического изменения нагрузки | | | После циклического изменения нагрузки | | | |
| | | j | x | y | z | x | y | z |
| | | $\delta H_{jmin}, A/M$ | -25,81 | -14,22 | -0,62 | -1,20 | -1,06 | -0,46 |
| | | $\delta H_{jmax}, A/M$ | 17,89 | 9,02 | 0,82 | 0,94 | 0,73 | 0,31 |
| | | $d_j, A/M$ | 8,99 | 5,22 | 0,31 | 0,57 | 0,47 | 0,22 |
| | | $l_1 = 0$ (до изгиба), $l_2 = 0$ (после снятия нагрузки) | | | | | | |
| | | | До циклического изменения нагрузки | | | После циклического изменения нагрузки | | |
| | | j | x | y | z | x | y | z |
| | | $\delta H_{jmin}, A/M$ | -25,55 | -13,77 | -0,93 | -0,21 | -0,16 | -0,52 |
| | | $\delta H_{jmax}, A/M$ | 17,62 | 9,46 | 0,67 | 0,16 | 0,17 | 0,26 |
| | | $d_j, A/M$ | 9,05 | 5,22 | 0,35 | 0,09 | 0,09 | 0,23 |

Результаты измерений свидетельствуют о том, что при деформации изгиба наблюдаются изменения постоянного магнитного поля трубы, что позволяет определить факт изменения механических напряжений при периодических дистанционных магнитометрических измерениях. Изменение намагниченности металла трубы также приводит к существенному повышению необратимой составляющей изменения магнитного поля при первом изменении механических напряжений.

Изменение продольной намагниченности участков стенда осуществлялось с помощью специально изготовленного намагничивающего устройства. Намагничивающее устройство представляет собой катушку (соленоид) из провода наружным диаметром ~ 2 мм. Длина соленоида $L = 1000$ мм, диаметр $D = 238$ мм, количество витков $N = 481$.

Величина продольных и кольцевых механических напряжений, связанных с изменением внутреннего давления в испытательном стенде при изменении внутреннего давления в испытательном стенде от 0 до 5,0 МПа кольцевые механические напряжения изменяются на 105 МПа, а продольные механические напряжения изменяются на 51 МПа. По результатам прочностных расчетов, величина изменения продольных механических напряжений в точке, расположенной на верхней образующей трубы непосредственно над точкой приложения усилия домкрата, при прогибе $l = 40$ мм составляет около 130 МПа. Для материала трубы (сталь 20) предел текучести $\sigma_{0,2} = 230$ МПа. Таким образом, можно считать, что изменение НДС стенда в ходе данных экспериментальных работ происходило в области упругих деформаций.

Установлено, что при изменении избыточного внутреннего давления происходят изменения постоянного магнитного поля. При периодическом изменении механических напряжений на протяжении первых нескольких циклов изменения магнитного поля являются необратимыми, после 10 циклов изменения можно считать обратимыми. Имеет место характерный гистерезис – кривая изменения магнитного поля при увеличении механических напряжений

не совпадает с кривой изменения магнитного поля при уменьшении механических напряжений. При деформации изгиба наблюдаются изменения постоянного магнитного поля, что позволяет определить факт изменения механических напряжений, связанных с изгибом, при периодических дистанционных магнитометрических измерениях. Изменение намагниченности металла трубы приводит к существенному повышению необратимой составляющей изменения магнитного поля при первом изменении механических напряжений. Получено экспериментальное подтверждение того, что наблюдаемые на магнитограммах реальных трубопроводов в районе кольцевых сварных швов экстремумы компоненты H_x и переходы через ноль компоненты H_y связаны с различиями продольной намагниченности соседних участков трубопровода. Разработана оригинальная математическая модель для определения механических напряжений, возникающих в трубе по величине обратимого изменения радиальной составляющей магнитного поля.

В четвертой главе представлен ряд методик оценки технического состояния подземных трубопроводов, разработанных на основании результатов проведенных исследований. Предложенные методики реализуются путем сравнения результатов периодических измерений постоянного магнитного поля подземного трубопровода, выполненных с поверхности грунта.

Методика интегральной оценки поврежденности участков подземных трубопроводов. В данной методике представлен порядок действий, необходимых для интегральной оценки поврежденности участков подземного трубопровода с помощью проведения магнитометрических измерений с поверхности грунта, то есть без проведения работ по откапыванию трубопроводов. Методика может применяться для трубопроводов, изготовленных из ферромагнитного материала и имеющих систему электрохимической защиты.

Методики определения факта изменения напряженного состояния подземного трубопровода при периодических измерениях магнитного поля. В двух методиках представлен порядок действий, необходимых для определения факта изменения напряженного состояния подземного трубопровода с помощью проведения измерений постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта, то есть без проведения работ по откапыванию трубопровода. Методики могут применяться для трубопроводов, изготовленных из ферромагнитного материала и имеющих систему электрохимической защиты. Определение факта изменения напряженного состояния трубопровода осуществляется с помощью проведения измерений постоянного магнитного поля на исследуемом участке трубопровода через определенный промежуток времени.

Основной отличительной особенностью всех трех предложенных методик является то, что для их реализации не требуется выполнять работы по откапыванию трубопроводов. Все необходимые измерения осуществляются с поверхности грунта.

Выводы

1. Путем сравнения результатов периодических магнитометрических измерений могут быть определены участки подземных трубопроводов, на

которых происходят измерения механических напряжений, и произведена интегральная оценка дефектности металла.

2. Разработана расчетно-экспериментальная модель для определения механических напряжений.

3. Разработаны методики для диагностики подземных стальных трубопроводов, позволяющие с поверхности грунта оценить техническое состояние и механические напряжения.

4. Научно подтверждена возможность использования магнитометрических измерений в качестве экспресс метода для оценки технического состояния и определения механических напряжений на участках магистральных газопроводов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Пужайло, А.Ф. Оценка точности измерения компонент магнитного поля при магнитометрических обследованиях подземных трубопроводов с поверхности грунта / А.Ф. Пужайло, С.С. Гуськов, С.В. Савченков, В.В. Мусонов, Р.В. Агинеи // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 4. – С. 28 – 32.

2. Савченков, С.В. Экспериментальные исследования изменения магнитного поля трубопровода в зонах поверхностных дефектов / С.В. Савченков, В.В. Мусонов, С.С. Гуськов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 5. – С. 38 – 42.

3. Агинеи, Р.В. Моделирование магнитных аномалий при проведении магнитометрического контроля трубопроводов с поверхности грунта / Р.В. Агинеи, С.С. Гуськов, В.В. Мусонов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 1. – С. 40 – 45.

4. Гуськов, С.С. Локализация кольцевых сварных швов трубопроводов на основании результатов наземных магнитометрических обследований / С.С. Гуськов, Р.В. Агинеи, Е.А. Спиридович, В.В. Мусонов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 4. – С. 24 – 27.

5. Гуськов, С.С. Способ дистанционного поиска кольцевых сварных швов подземных трубопроводов / С.С. Гуськов, Е.А. Спиридович, В.В. Мусонов, Р.В. Агинеи, Р.А. Садртдинов // Газовая промышленность. – 2013. – № 10. – С. 22 – 25.

6. Гуськов, С.С. Особенности изменения магнитного поля при вариациях давления газа в подземном трубопроводе / С.С. Гуськов, Р.В. Агинеи, В.В. Мусонов, Е.А. Спиридович // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 5. – С. 60 – 66.

7. Андронов, И.Н. Эффект обратной магнитострикции в трубных сталях, инициированный циклическими изменениями механических напряжений / И.Н. Андронов, В.В. Мусонов, А.Ф. Пужайло // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 8. – Т. 80. – С. 47 – 51.

8. Андронов, И.Н. Эффект обратной магнитострикции в трубной стали при двухосном механоциклировании / И.Н. Андронов, В.В. Мусонов // Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 2061 – 2062.

В других изданиях:

9. Мусонов, В.В. Разработка методик интерпретации результатов магнитометрической дистанционной диагностики металла трубопровода / В.В. Мусонов, С.С. Гуськов, Р.В. Агинеи, Е.А. Спиридович // XX Международная деловая встреча «Диагностика». – М.: Оргэнергогаз, 2013.

10. Мусонов, В.В. Исследование изменения магнитных свойств элементов трубопровода в результате бароциклирования / В.В. Мусонов, И.Н.

Андронов // Международный семинар «Рассохинские чтения». – Ухта: УГТУ, 2013.

11. Гуськов, С.С. Использование результатов дистанционных магнитометрических обследований трубопроводов для определения положения кольцевых сварных швов / С.С. Гуськов, Е.А. Спиридович, В.В. Мусонов // V международная научно-техническая конференция «Газотранспортные системы: настоящее и будущее». Тезисы докладов. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – С. 127.

12. Гуськов, С.С. Особенности изменения магнитного поля на поверхности грунта при изменении внутреннего давления в подземном трубопроводе / С.С. Гуськов, В.В. Мусонов, С.В. Савченков // IX международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2013». Материалы конференции. – Уфа: УГНТУ, 2013. – С. 49 – 51.

13. Мусонов, В.В. Интегральная оценка поврежденности металла подземного трубопровода по результатам дистанционной магнитометрической диагностики / В.В. Мусонов, С.С. Гуськов // Международный семинар «Рассохинские чтения». – Ухта: УГТУ, 2014.

14. Мусонов, В.В. Экспериментальная оценка влияния напряженно-деформированного состояния металла трубопровода на результаты измерения магнитного поля / В.В. Мусонов // Международный семинар «Рассохинские чтения». – Ухта: УГТУ, 2015.

15. Программа для визуализации и обработки результатов магнитометрических обследований подземных трубопроводов «PMFViewer»: св-во о гос. рег. программы для ЭВМ 2014611260 / Пужайло А.Ф., Гуськов С.С., Мусонов В.В., Савченков С.В., Агинеи Р.В.; заявитель и правообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2013661224; заявл. 03.12.2013; дата регистрации 29.01.2014.

16. Способ определения механических напряжений в стальных трубопроводах: пат. 2521714 Рос. Федерация: МПК G01L1/12 / Агинеи Р.В., Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Мусонов В.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2013105353/28; заявл. 07.02.2013; опубл. 10.07.2014.

17. Способ определения положения кольцевых сварных швов подземного трубопровода: пат. 2563656 Рос. Федерация: МПК G01V3/11, G01N27/83 / Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Агинеи Р.В., Спиридович Е.А., Мусонов В.В., Гуськов С.С.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2014149824; заявл. 09.12.2014; опубл. 26.08.2015.

18. Способ определения поврежденности участков подземного трубопровода, изготовленного из ферромагнитного материала: пат. 2538072 Рос. Федерация: МПК G01N27/83 / Агинеи Р.В., Пужайло А.Ф., Мусонов В.В., Гуськов С.С., Спиридович Е.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2013143808; заявл. 27.09.2013; опубл. 10.01.2015.

Подписано в печать 11.04.16. формат бумаги 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тир. 100 экз. зак. 213.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ. 603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24.