

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Андронов Иван Николаевич

Ухта – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ .....	12
1.1 Магнитострикция и магнитоупругий эффект .....	12
1.2 Магнитные методы оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов .....	16
1.3 Метод дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов.....	26
1.4 Характеристики измерительного оборудования, использовавшегося при экспериментальных исследованиях.....	33
1.5 Обобщение результатов главы 1 .....	34
ГЛАВА 2 ПОЛЕВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ.....	37
2.1 Магнитометрические измерения при капитальном ремонте трубопровода диаметром 1420 мм .....	37
2.1.1 Характеристика объекта исследований .....	37
2.1.2 Результаты измерения магнитного поля на участке 1 .....	39
2.1.3 Оценка величины изменения механических напряжений в трубопроводе .....	43
2.1.4 Взаимосвязь между изменением магнитного поля и техническим состоянием трубопровода.....	44
2.1.5 Результаты измерения магнитного поля на участке 2.....	46
2.1.6 Особенности изменения магнитного поля трубопровода после пропуска внутритрубного дефектоскопа .....	49
2.2 Магнитометрические измерения при изменении внутреннего давления в трубопроводе диаметром 159 мм.....	52

2.2.1 Характеристика объекта исследований .....	52
2.2.2 Результаты измерения магнитного поля над осью трубопровода .....	53
2.2.3 Оценка величины изменения механических напряжений в трубопроводе .....	55
2.2.4 Анализ особенностей влияния изменений механических напряжений на магнитное поле для трубопроводов малого диаметра.....	56
2.3 Обобщение результатов главы 2 .....	57
<b>ГЛАВА 3 СТЕНДОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ .....</b>	<b>60</b>
3.1 Магнитометрические измерения при изменении внутреннего давления в испытательном стенде, сваренном из дефектных труб диаметром 1420 мм.....	60
3.1.1 Характеристика объекта исследований .....	60
3.1.2 Результаты измерения магнитного поля над осью стенда при разной величине избыточного внутреннего давления .....	62
3.2 Магнитометрические измерения при изменении механических напряжений в стенде диаметром 219 мм.....	76
3.2.1 Характеристика объекта исследований .....	76
3.2.2 Результаты измерения магнитного поля при изменении избыточного внутреннего давления и изгибе стенда .....	77
3.2.3 Результаты измерений магнитного поля при изгибе стенда, участки которого имеют разную намагниченность.....	84
3.2.4 Влияние намагниченности участков стенда на характер магнитного поля над осью трубы .....	94
3.2.5 Оценка механических напряжений, вызванных повышением давления и изгибом стенда .....	100
3.3 Обобщение результатов главы 3 .....	101

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	103
4.1 Методика интегральной оценки поврежденности участков подземных трубопроводов.....	103
4.1.1 Область применения .....	103
4.1.2 Общие положения .....	104
4.1.3 Порядок проведения работ по интегральной оценке поврежденности участков подземных трубопроводов.....	105
4.1.4 Пример использования методики .....	108
4.1.5 Программное обеспечение для реализации методики .....	111
4.2 Методика определения факта изменения напряженного состояния подземного трубопровода при периодических измерениях магнитного поля.....	115
4.2.1 Область применения .....	115
4.2.2 Общие положения .....	115
4.2.3 Порядок проведения работ по определению участков трубопроводов, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния .....	117
4.3.1 Область применения .....	120
4.3.2 Общие положения .....	121
4.3.3 Порядок проведения работ по определению участков с изменениями напряженного состояния для трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов .....	123
4.4 Обобщение результатов главы 4 .....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131

## ВВЕДЕНИЕ

### 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: Агинец 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.

### **Задачи**

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

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. А именно 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

### **Практическая значимость.**

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.

### **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 нагрузений, 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.

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследований, в разработке методик полевых и

стендовых экспериментальных работ, а также в проведении этих 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, 2016г.), научно-технических советах ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» и ОАО «Гипрогазцентр».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ [A1 – A14], из них 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [A15] и 3 патента на изобретение Российской Федерации [A16 – A18].

**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.

# ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

В данной главе рассмотрены работы, связанные с магнитными методами оценки напряженно-деформированного состояния стальных трубопроводов. Приведены сведения о методе дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов. Дана характеристика измерительного оборудования, использовавшегося при экспериментальных исследованиях.

## 1.1 Магнитострикция и магнитоупругий эффект

Известно, что существует взаимосвязь между магнитными характеристиками ферромагнитного объекта и его напряженно-деформированным состоянием [1]. Изменение размеров и формы тел при намагничивании называют магнитострикцией. Обратное по отношению к магнитострикции явление – изменение намагниченности ферромагнитного образца при деформации – называется магнитоупругим эффектом или эффектом Виллари.

В магнитном поле, напряженность которого не превышает значение, соответствующее техническому магнитному насыщению ферромагнитного образца, намагничивание образца обусловлено процессами смещения границ между доменами и поворота магнитных моментов доменов по полю. Эти процессы приводят к изменению равновесных расстояний между узлами кристаллической решетки, т. е. к деформации образца. При данном механизме магнитострикции происходит в основном изменение формы образца, при этом его объем практически не изменяется (линейная магнитострикция). Величина относительного изменения размеров образца при линейной магнитострикции зависит от величины и направления намагниченности  $J$  (т. е. анизотропна). Для расчета линейной

магнитострикции в монокристалле с кубической симметрией, намагниченном до насыщения, используется следующее соотношение [2]:

$$\frac{\Delta l}{l} = a_1 \sum_{i=1,2,3} \left( s_i^2 \beta_i^2 - \frac{1}{3} \right) + 2a_2 \sum_{i \neq j} s_i s_j \beta_i \beta_j, \quad (1.1)$$

где  $\Delta l/l$  – относительное удлинение образца,  $s_i$ ,  $s_j$  и  $\beta_i$ ,  $\beta_j$  – направляющие косинусы вектора  $\mathbf{J}$  и направления измерения (относительно ребер кубической элементарной ячейки),  $a_1$  и  $a_2$  – константы анизотропии магнитострикции:

$$a_1 = \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta l}{l} \right)_{[100]}, \quad a_2 = \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta l}{l} \right)_{[111]}, \quad (1.2)$$

где  $(\Delta l/l)_{[100]}$  и  $(\Delta l/l)_{[111]}$  – значения удлинения образца соответственно в направлении ребра и диагонали элементарной ячейки кристалла.

Результаты экспериментальных исследований линейной магнитострикции в поликристаллических ферромагнетиках свидетельствуют о том, что величина и знак удлинения существенно зависят от величины магнитного поля, от намагниченности, от структурных особенностей ферромагнетиков (наличия и типа примесей, магнитной текстуры, вида термической и холодной обработки образца). В качестве примера на рисунке 1.1 приведены зависимости продольной магнитострикции (т. е. величины удлинения в направлении поля) поликристаллических образцов железа, никеля, кобальта и сплава 54% Pt, 46% Fe от напряженности магнитного поля.

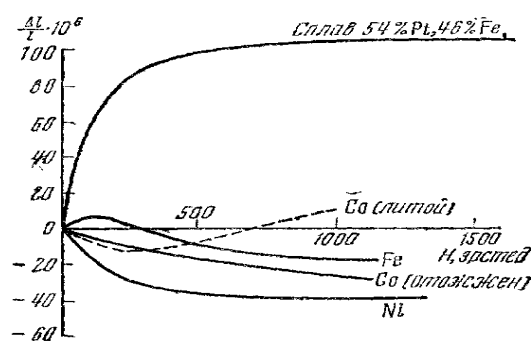


Рисунок 1.1 – Зависимость продольной магнитострикции железа, никеля, кобальта и сплава 54% Pt, 46% Fe (поликристаллические образцы) от напряженности магнитного поля [1]

Для железа продольная магнитострикция в слабом магнитном поле имеет положительный знак (образец удлиняется), в более сильном поле знак меняется на отрицательный (образец укорачивается). Для никеля продольная магнитострикция имеет отрицательный знак при всех значениях поля. Для кобальта в зависимости от термообработки магнитострикция изменяет не только величину, но и знак. Для некоторых сплавов (например, для сплава 54% Pt, 46% Fe) магнитострикция может в несколько раз превышать магнитострикцию никеля.

Для описания магнитострикции в поликристаллах необходимо учитывать возможные положения отдельных монокристаллов по отношению к направлению вектора  $J$  и направлению измерения относительного удлинения. Кроме того, необходимо учитывать магнитное взаимодействие между отдельными кристаллитами. Аналитические выражения для величины относительного удлинения при намагниченности, меньшей, чем намагниченность насыщения, могут быть получены только для отдельных частных случаев, при этом полученные выражения являются весьма приближенными [1].

Изменение напряженно-деформированного состояния приводит к изменению магнитных свойств ферромагнетиков. Ферромагнетики, которые при намагничивании сокращаются в размерах (т. е. обладают отрицательной магнитострикцией), при растяжении уменьшают свою намагниченность (отрицательный магнитоупругий эффект). Растяжение ферромагнетиков с положительной магнитострикцией приводит к увеличению их намагниченности (положительный магнитоупругий эффект). При сжатии знак магнитоупругого эффекта меняется на обратный. Магнитоупругий эффект в областях смещения и вращения объясняется тем, что при действии механических напряжений изменяется доменная структура ферромагнетика (векторы намагниченности  $J$  доменов меняют свою ориентацию без изменения абсолютной величины) [3].

На рисунке 1.2 показаны зависимости намагниченности железа от приложенных растягивающих напряжений для различных магнитных полей. Из этих кривых видно, что для каждого заданного поля существует определенная нагрузка, при которой происходит наибольшее возрастание намагниченности.

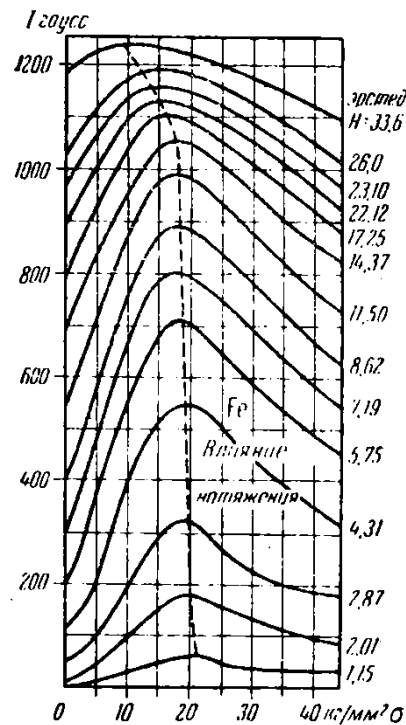


Рисунок 1.2 – Зависимости намагниченности железа от приложенных растягивающих напряжений для различных магнитных полей [3]

Аналитический расчет магнитоупругого эффекта возможен лишь в некоторых частных случаях при использовании ряда упрощающих предположений. Например, для образца с положительной магнитострикцией и большими внутренними механическими напряжениями  $\sigma_0$ , находящегося под действием внешнего сжимающего напряжения  $\sigma$  (линейное напряженное состояние) при режиме намагничивания, соответствующем линейному участку кривой намагничивания, относительное изменение намагниченности  $\eta$  вдоль оси приложения нагрузки определяется соотношением [4]

$$\eta = \frac{J - J_0}{J_0} = \frac{\cos(\varepsilon_0 + \varepsilon)}{\cos \varepsilon_0} - 1, \quad (1.3)$$

где  $J$  – проекция вектора намагниченности на ось приложения нагрузки при напряжении  $\sigma$ ,  $J_0$  – проекция вектора намагниченности на ось приложения нагрузки при напряжении  $\sigma = 0$ , а величины  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  определяются соотношениями

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sigma/\sigma_0 \sin 2\varepsilon_0}{1 - \sigma/\sigma_0 \cos 2\varepsilon_0}, \quad \varepsilon_0 = \arccos \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – половина угла, внутри которого равновероятно распределены вектора самопроизвольной намагниченности доменов. При этом предполагается, что направление преимущественного распределения этих векторов совпадает с направлением оси приложения нагрузки.

Таким образом, влияние механических напряжений на магнитные свойства ферромагнетиков зависит от особенностей структуры материала и существенно различается для разных ферромагнитных металлов и сплавов. Кроме того, изменение магнитных свойств под нагрузкой определяется не только величиной, но и характером изменений намагничивающего поля и механических напряжений (историей изменения намагниченности и историей изменения нагрузки).

## **1.2 Магнитные методы оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов**

К настоящему времени предложен ряд методов контроля 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. [5]. Сложный характер одновременного влияния (часто в противоположных направлениях) 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 напряженно-деформированным состоянием объекта контроля.

Наибольшее распространение получили методы оценки напряженно-деформированного состояния, основанные на измерении коэрцитивной силы, шумов Баркгаузена и магнитного поля в районе локальных намагниченных участков.

Коэрцитивная сила – напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного до насыщения ферромагнетика (рисунок 1.3). Для данного магнитного материала значение коэрцитивной силы в значительной мере зависит от способа обработки образца, а также от внешних условий, например, температуры.

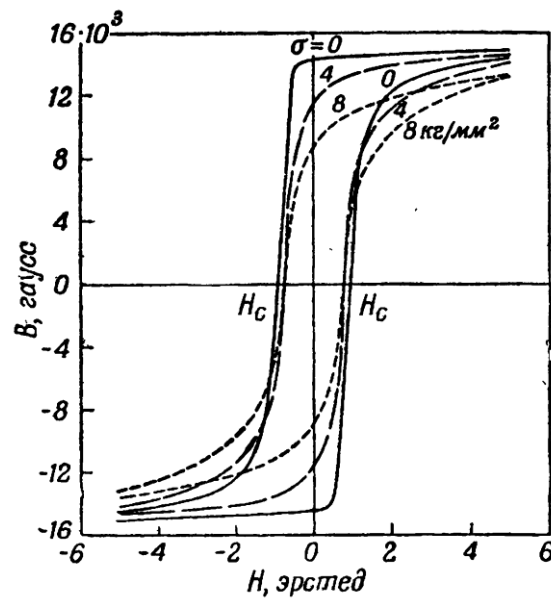


Рисунок 1.3 – Изменение петли магнитного гистерезиса железа под действием постоянного натяжения.  $H_c$  – коэрцитивная сила [6]

Рассмотрим некоторые результаты исследований, посвященные развитию коэрцитиметрического метода оценки напряженно-деформированного состояния стальных трубопроводов. В работе [7] проведены исследования влияния упругих и пластических деформации на анизотропию коэрцитивной силы трубных сталей (15ХСНД, 25ХСНД, Х70,

09Г2С, 3017ГС). Показано, что разность значений коэрцитивной силы  $\Delta H_c$ , измеренной вдоль и поперек оси растяжения, может использоваться для практического определения действующих напряжений  $\sigma$ . Получены градуировочные кривые  $\Delta H_c(\sigma)$  для разных сталей. Показано, что чувствительность к упругим напряжениям зависит от химического состава сталей и зазора между датчиком и исследуемым металлом. В работе [8] показано, что при приложении внешних упругих напряжений  $H_c$  испытывает значительные изменения на пластически деформированных участках. Следовательно, по результатам измерения коэрцитивной силы можно достаточно достоверно определять участки пластической деформации в конструкциях, допускающих разгрузку и контролируемое нагружение (в том числе в нефте- и газопроводах). В работе [9] исследовано влияние двухосных упругих деформаций на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность образцов из сталей 09Г2С и Ст3. Показано, что при упругих деформациях вида «растяжение-сжатие» коэрцитивная сила в направлении сжатия по мере роста нагрузки монотонно возрастает, а при деформациях вида «растяжение-растяжение» практически не изменяется. Локальная остаточная намагниченность уменьшается при всех рассмотренных видах двухосных упругих деформаций. Обсуждается возможность использования коэрцитиметрического метода для оценки напряженного состояния сложнодеформированных изделий из углеродистых сталей. Работа [10] посвящена исследованию влияния усталостного нагружения на структуру и свойства трубных сталей X60 и 09Г2С. Определены величины накопленной пластической деформации в зависимости от амплитуды напряжений и количества циклов нагружения при растяжении. Представлены результаты изменений коэрцитивной силы на различных этапах нагружения, а также результаты исследований микроструктуры. В работе [11] проведены лабораторные модельные эксперименты для исследования зависимости магнитных характеристик трубной стали от механических напряжений при простых и

комбинированных способах нагружения. Подтверждена возможность и целесообразность использования коэрцитивной силы в качестве измеряемой характеристики при оценке механических напряжений.

Большой вклад в совершенствование методов оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов по результатам измерения коэрцитивной силы внесли ученые Ухтинского государственного технического университета и сотрудники Ухтинского филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [12 – 29]. В частности, в работах [12 – 18] представлены результаты исследований, направленных на адаптацию коэрцитиметрического метода к особенностям трубопроводов: двухосному напряженному состоянию стенок труб, различиям структуры металла, наличию изоляционного покрытия. Установлены критерии оценки напряженно-деформированного состояния газонефтепроводов коэрцитиметрическим методом.

В работах [19 – 24] исследуются зависимости коэрцитивной силы металла трубопроводов от величины механических напряжений в условиях плоского напряженного состояния. На основе экспериментальных исследований разработана методика проведения коэрцитиметрического контроля трубопроводных конструкций, позволяющая выявлять наиболее опасные участки и тем самым предотвращать возможное возникновение аварийных ситуаций. Предложена методика интерпретации результатов измерения коэрцитивной силы при оценке сложнопластического состояния стенок газопроводов с приемлемой для инженерных расчетов точностью. Приведены примеры реализации методики на трубопроводах компрессорных станций. На основании результатов проведенных исследований предложен способ определения механических напряжений в стальных конструкциях [25].

В работах [26 – 29] исследованы изменения коэрцитивной силы и анизотропии коэрцитивной силы стали 14ХГС в лабораторных условиях при одноосном растяжении, сжатии и плосконапряженном состоянии. Показано,

что на характер зависимости коэрцитивной силы и ее анизотропии от интенсивности напряжений существенное влияние оказывает вид напряженного состояния. Предложен метод анализа плосконапряженного состояния трубопроводов с помощью лепестковых диаграмм коэрцитивной силы.

Эффект Баркгаузена – скачкообразное изменение намагниченности ферромагнетиков при непрерывном изменении внешнего магнитного поля [3, 6]. Имеющиеся в ферромагнетике включения, дислокации, механические напряжения препятствуют перестройке доменной структуры. Когда граница домена, смещаясь при увеличении магнитного поля, встречает препятствие (например, включение), она останавливается и остаётся неподвижной при дальнейшем увеличении поля. При некотором возросшем значении поля граница преодолевает препятствие и скачком перемещается дальше, до очередного препятствия, уже без увеличения поля. Из-за подобных задержек кривая намагничивания ферромагнетика имеет ступенчатый характер (рисунок 1.4).

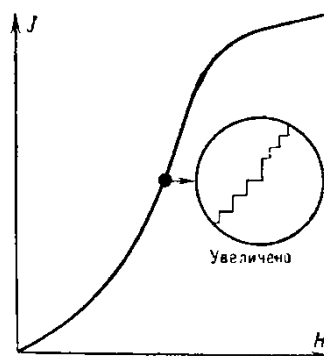


Рисунок 1.4 – Скачки Баркгаузена на кривой намагничивания [6]

Величина энергии, необходимой для преодоления препятствий и перемещения границ доменов, зависит от качества материала, его механической и термической обработки, наличия и распределения в нем микропор, дислокаций, напряжений, включений и т.п., поэтому параметры скачков Баркгаузена (магнитных шумов) могут служить для определения качества материалов и изделий из них [5].

Физические основы методов неразрушающего контроля и оценки механических напряжений в ферромагнитных конструкциях с использованием эффекта Баркгаузена изложены в работах [30 – 32]. В работе [33] рассматривается возможность оценки остаточных механических напряжений в околошовном пространстве сварочного соединения крупногабаритных стальных изделий на основе измерения уровня магнитных шумов. В работе [34] проведен анализ современных приборов, основанных на эффекте Баркгаузена, их достоинств, недостатков и применений для контроля физико-механических свойств изделий из ферромагнитных материалов. В работах [35 – 38] показана перспективность использования магнитных шумов для контроля механических напряжений в изделиях из высокопрочных сталей. Представлен метод неразрушающего контроля усталостных напряжений на основе анализа параметров скачков Баркгаузена. Представлена информационно-измерительная система, позволяющая реализовывать предложенные алгоритмы контроля механических напряжений, в том числе для случая плосконапряженного состояния. В работе [39] проводится оценка неопределенности измерения напряжений методом эффекта Баркгаузена с помощью разработанного эталона механических напряжений. Показано, что учет анизотропии двухосного напряженного состояния позволяет значительно снизить неопределенность измерения напряжений.

Для определения напряженно-деформированного состояния ферромагнитных конструкций могут использоваться методы, основанные на эффекте изменения намагниченности (а, следовательно, и магнитного поля) в районе локальных намагниченных областей металла при воздействии механических напряжений. В работе [40] представлены результаты ряда исследований, направленных на разработку методов и средств неразрушающего контроля механических напряжений в металлоконструкциях на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений. Показано, что в предварительно намагниченной

области стальной конструкции под воздействием механических напряжений величина намагниченности изменяется, причем величина этого изменения зависит от приложенной нагрузки. Представлены результаты измерения магнитного поля при растяжении пластины из стали 17Г1С с разрезом (рисунок 1.5).

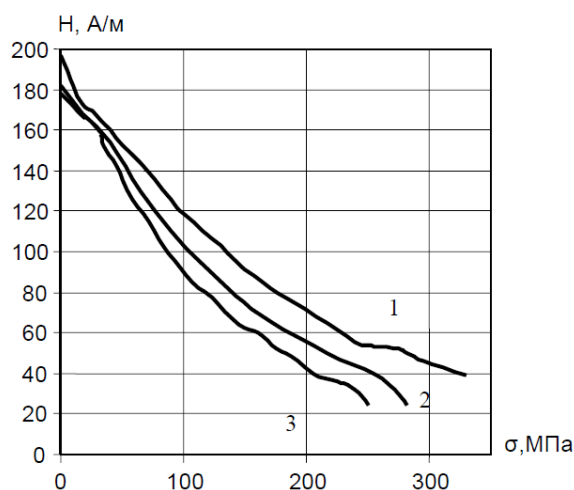


Рисунок 1.5 – Зависимость локального магнитного поля от величины растягивающих напряжений при трех значениях расстояния от датчика до вершины разреза: 17 мм (1), 10 мм (2), 0,5 мм (3) [40]

Измерения проводились в трех точках, расположенных на разном расстоянии от вершины разреза. Результаты измерений свидетельствуют о том, что значение магнитного поля  $H$  при росте растягивающих напряжений  $\sigma$  монотонно уменьшается.

В работах [41 – 44] предложен метод определения механических напряжений, в котором с целью повышения точности измерения поверхность металлоконструкции намагничивается в виде матрицы чередующихся по направлению локально намагниченных участков (магнитных меток) с определенными пространственными параметрами. Использование магнитных меток позволяет существенно уменьшить влияние внешнего магнитного поля на результаты измерения напряжений. Метод реализуется следующим образом: проводятся измерения магнитного поля вблизи матрицы меток до и после изменения нагрузки; рассчитывается величина изменения разности

минимальных и максимальных значений поля  $\Delta H$ ; по градуировочному графику зависимости  $\Delta H(\sigma)$  определяется величина напряжений, действовавших в области матрицы магнитных меток.

Работа [45] посвящена адаптации метода оценки механических напряжений по величине изменения магнитного поля локальных намагниченных участков для контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов. Проведен ряд экспериментальных исследований, направленных на определение закономерностей изменения магнитного поля локальных намагниченных участков под нагрузкой. Исследования производились с помощью лабораторной установки, позволяющей реализовать следующие виды работ: продольное растяжение и сжатие полого цилиндрического образца (диаметр 25 мм, длина 80 мм); создание в образце кольцевых напряжений до 200 МПа; локальное намагничивание образца; измерение напряжённости магнитного поля намагниченных участков образца. Исследовались образцы из сталей 10 и 09Г2С. Получены зависимости изменения напряжённости магнитного поля от величины приложенной нагрузки. Исследованы процессы необратимого изменения напряжённости магнитного поля локальной намагниченной области образца под действием продольных напряжений (растяжение, сжатие) при дозированном изменении внутреннего давления (изменении кольцевых напряжений). Установлено, что при заданной величине вариации давления  $\Delta P$  уменьшение напряжённости магнитного поля локально намагниченного участка полого цилиндра  $\Delta H$  тем больше, чем больше величина приложенной продольной нагрузки  $\sigma$  (рисунок 1.6).

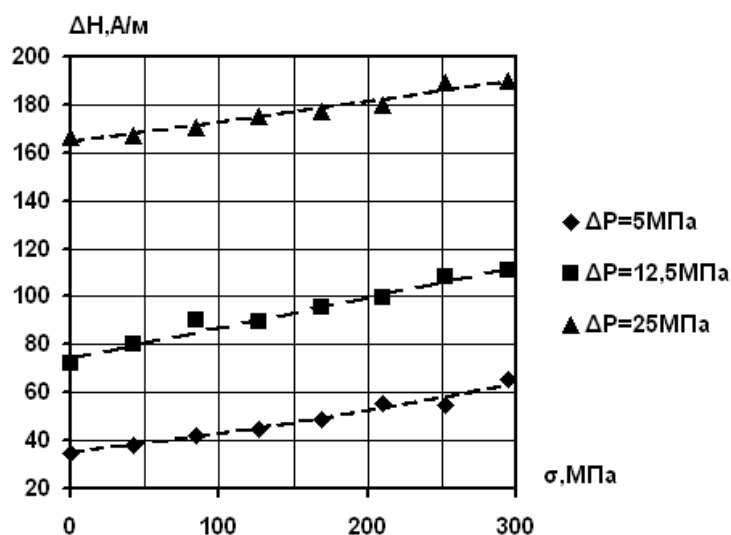


Рисунок 1.6 – Зависимости величины уменьшения напряжённости магнитного поля намагниченного участка полого цилиндра из стали 09Г2С от напряжения растяжения при трех значениях вариации внутреннего давления [45]

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что величина убыли напряжённости магнитного поля  $\Delta H$  практически линейно связана с величиной продольных напряжений в металле полого цилиндра. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше вариация избыточного внутреннего давления. На основании полученных на лабораторной модели результатов предложен метод измерения продольных напряжений подземного трубопровода по величине монотонного изменения магнитного поля локального намагниченного участка металла вследствие дозированного уменьшения и последующего восстановления внутреннего давления в трубопроводе [46]. На действующем подземном трубопроводе предложенный метод реализуется следующим образом: на выбранном для обследования участке трубопровода с определённым интервалом делаются отверстия в грунте до верхней образующей трубы. Через эти отверстия к поверхности трубы доставляется намагничивающее устройство, а затем датчик магнитометра, помещённый в немагнитный корпус. Измеряется начальное значение напряжённости магнитного поля в локально



намагниченном участке. Далее производится уменьшение и возврат в исходное состояние давления в трубопроводе. После этого измерения повторяются во всех точках. Определяется изменение напряжённости магнитного поля в каждой точке контроля. С использованием градуировочных зависимостей проводится оценка величины продольных механических напряжений в каждой выбранной точке трубопровода. При использовании этого метода не требуется проведение вскрытия грунта на протяженных участках трубопровода, однако для выполнения измерений, которые проводятся у поверхности трубопровода, все же необходимо проведение земляных работ.

Рассмотренные методы оценки механических напряжений по изменению намагниченности использовались при анализе напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, обусловленного действием снеговой и ветровой нагрузки [47], для оценки напряжений и деформаций трубопроводов в геодинамических зонах [48, 49], а также для прогнозирования усталостного разрушения металла трубопроводов [50].

Отметим несколько достаточно общих характерных особенностей, свойственных предложенным к настоящему времени методам оценки механических напряжений в ферромагнитных конструкциях, основанным на магнитоупругом эффекте. Во-первых, для реализации этих методов необходимо изменение намагниченности материала в точке контроля. Во-вторых, для проведения измерений необходим доступ к поверхности конструкции (при работе на трубопроводах в ряде случаев возможно проведение измерений через изоляцию). В-третьих, величина механических напряжений определяется на основании результатов измерений тех или иных магнитных параметров (коэрцитивная сила, шумы Баркгаузена, остаточная намагниченность) с помощью заранее полученных градуировочных зависимостей. При этом точность (погрешность) определения механических напряжений в общем случае является неконтролируемой величиной, поскольку на практике невозможно обеспечить идентичность всех влияющих

на магнитные параметры характеристик объекта контроля и стенда (образца), на котором получена градуировочная зависимость.

### 1.3 Метод дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов

Метод дистанционного магнитометрического контроля [51] основан на измерении постоянного магнитного поля подземных трубопроводов с поверхности грунта. Основными достоинствами этого метода являются простота реализации и возможность получения некоторой информации о трубопроводе без проведения земляных работ. В частности, использование научно обоснованных методов обработки результатов магнитометрических измерений позволяет уточнить привязку результатов внутритрубной дефектоскопии на местности, что может способствовать более точному определению координат участков подземных трубопроводов, на которых требуется проведение шурфований и диагностических обследований [52]. Кроме того, с помощью этого метода контроля в ряде случаев может быть выполнен поиск потенциально опасных участков трубопроводов.

При проведении магнитометрических обследований подземных трубопроводов измерения магнитного поля, как правило, проводятся в точках, расположенных на поверхности грунта над осью трубопровода (рисунок 1.7). Вектор напряженности постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}$  в некоторой точке пространства вблизи трубопровода, изготовленного из ферромагнитного материала, может быть представлен в виде суммы трех слагаемых [52]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_3, \quad (1.5)$$

где  $\mathbf{H}_1$  – вектор напряженности магнитного поля, связанного с намагниченностью металла трубопровода,  $\mathbf{H}_2$  – вектор напряженности магнитного поля Земли (для средней полосы европейской части России модуль  $H_2 \approx 42$  А/м, вертикальная составляющая  $H_{2g} \approx 40$  А/м,

горизонтальная составляющая  $H_{2z} \approx 13$  А/м),  $H_3$  – вектор напряженности магнитного поля тока катодной защиты, протекающего в трубопроводе. Величина  $H_3$  определяется соотношением

$$H_3 = \frac{I}{2\pi R}, \quad (1.6)$$

где  $I$  – сила тока в трубопроводе,  $R$  – расстояние от оси трубопровода до точки измерения. Вектор  $H_3$  направлен по касательной к окружности радиуса  $R$ , лежащей в плоскости, перпендикулярной к оси трубопровода; центр окружности расположен на оси трубопровода. При  $I = 1$  А и  $R = 1$  м  $H_3 \approx 0,16$  А/м.

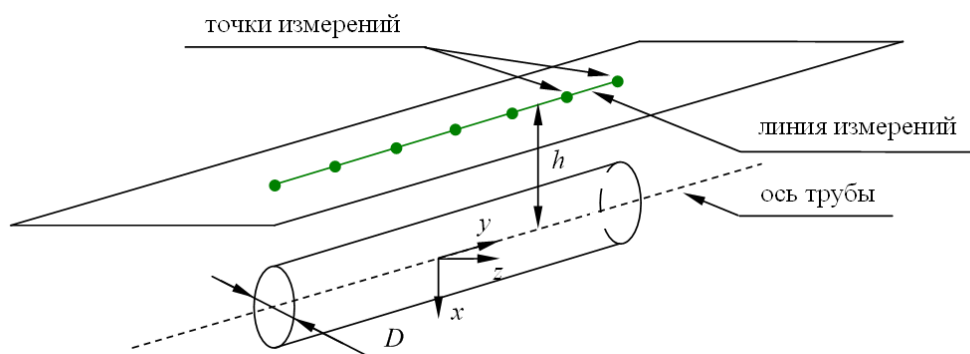


Рисунок 1.7 – Схема дистанционного магнитометрического обследования трубопровода диаметром  $D$ , ось которого расположена на глубине  $h$  относительно поверхности грунта [52]

Намагниченность металла трубопровода формируется под влиянием множества различных факторов [51]. Исходная термоостаточная намагниченность, возникающая в процессе производства труб, может изменяться при хранении и при транспортировке труб. При укладке труб ориентация их остаточной намагниченности не учитывается. Для каждой трубы имеется два варианта ориентации продольной намагниченности и бесконечное множество вариантов ориентации поперечной намагниченности, так как угловая ориентация трубы при укладке может быть произвольной. Намагниченность околошовных зон изменяется при сварке трубопровода. В

процессе эксплуатации намагниченность трубопровода может изменяться под влиянием механических напряжений и магнитных внутритрубных дефектоскопов. Кроме того, имеет место намагниченность, индуцированная магнитным полем Земли, в котором находится трубопровод. В результате намагниченность трубопровода приобретает достаточно сложный вид, что отражается в распределении магнитного поля вдоль проекции оси трубопровода на поверхность грунта (пример магнитограммы реального участка подземного трубопровода представлен на рисунке 1.8).

Рассмотрим работы, связанные с проведением дистанционных магнитометрических обследований подземных трубопроводов. В зарубежной литературе отмечается, что результаты магнитометрических измерений могут быть использованы для прогнозирования положения кольцевых сварных швов между отдельными секциями труб [53]. При этом указывается, что такой способ не будет давать правильных результатов при наличии магнитных помех.

Цикл работ [54 – 57] коллектива канадских авторов посвящен исследованию возможности использования результатов наземного магнитометрического обследования для обнаружения механических напряжений, связанных с изгибом подземных трубопроводов. В [54] отмечается, что магнитное поле трубопровода определяется исходной намагниченностью труб, которая может изменяться в процессе строительства и эксплуатации, в том числе и под влиянием механических напряжений. Указывается на недостаточность экспериментальных данных о магнитоупругом эффекте для трубопроводов. Предполагается, что при получении достаточного количества данных возможно развитие техники наземного обследования трубопроводов для обнаружения участков с повышенными механическими напряжениями.

В работах [55 и 56] представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований влияния упругого изгиба и изменения внутреннего давления на изменение магнитного поля трубы диаметром 110

мм. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что изменение намагниченности максимально при первом цикле изменения нагрузки. При последующих циклах происходят меньшие изменения намагниченности.

В работе [57] приводятся результаты исследования влияния механических напряжений на намагниченность образцов трубной стали, содержащей 1% марганца. Представлены примеры изменений намагниченности, связанных с циклическими изменениями растягивающих и сжимающих напряжений при разной амплитуде изменения напряжений и при разном внешнем магнитном поле.

В отечественной литературе последних лет имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных дистанционным магнитометрическим обследованиям подземных газо- и нефтепроводов. Разработан ряд приборов для проведения дистанционных магнитометрических обследований. В работах [58 – 61] изложены основные принципы метода расчета характеристик источников магнитного поля по результатам дистанционных измерений. При этом считается, что источники магнитного поля являются локальными, что не всегда имеет место при обследовании подземных трубопроводов и может приводить к ошибкам при интерпретации магнитограмм. В работах [62, 63] описывается применение указанного метода для бесконтактного обследования магистральных трубопроводных систем и для оценки их коррозионной защищенности, представлены характеристики диагностических комплексов серии «Орион», приводятся некоторые результаты обследований. В работах [64 – 67] описывается магнитометр «СКИФ-МБС-04» и особенности его применения для диагностирования магистральных трубопроводов. В работе [68] приводятся сведения о применении для дистанционной магнитометрической диагностики подземных трубопроводов устройства «ИАМ» (индикатор аномалий металла). В работах [69, 70] представлено описание результатов применения для дистанционных измерений магнитного поля трубопроводов прибора «М-1» [71]. В работах [72 – 74] описывается применение для

дистанционных измерений магнитного поля подземных трубопроводов приборов серии «ИКН». Указывается, что на результаты измерений и особенно на результаты интерпретации магнитного поля подземных трубопроводов существенным образом влияет так называемый человеческий фактор. В работах [75, 76] представлены результаты исследований магнитных полей трубопроводов с использованием приборных комплексов «АЭМД» и «КЭМДТ», причем в работе [75] проводятся исследования возможности применения дистанционного магнитометрического контроля подводных переходов нефте- и газопроводов с поверхности воды.

Предложен ряд способов интерпретации результатов магнитометрического обследования подземных трубопроводов, ориентированных, в основном, на задачи диагностики: способ прогнозирования местоположения течей в трубопроводах [77], способ контроля и обнаружения дефектов на трубопроводах из ферромагнитных материалов [78], способ обнаружения дефектов внутрипромысловых трубопроводов [79], способ обнаружения дефектов трубопровода и несанкционированных врезок в трубопровод [80], способ бесконтактного выявления местоположения и характера дефектов металлических сооружений [81], способ диагностики технического состояния подземных трубопроводов [82]. Большинство этих способов основано на предположении о том, что отклонения характеристик магнитного поля на отдельных участках трубопровода от средних значений связаны с дефектами трубопровода либо с повышенными механическими напряжениями. При этом конкретные величины отклонения характеристик магнитного поля от среднего значения, при которых участок считается дефектным, как правило, не указываются. Между тем от этих величин напрямую зависит количество и протяженность выявленных дефектных участков. Достоверность указанных эмпирических способов интерпретации магнитограмм вызывает сомнения, поскольку эти способы не имеют под собой надежной теоретической базы.

В работе [52] на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований определены области применения и ограничения метода дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов, разработаны научно обоснованные методы обработки результатов измерений, получено объяснение наблюдаемых на практике особенностей магнитограмм, установлена связь между полем на поверхности грунта и намагниченностью металла трубопровода, проведен анализ основных источников погрешностей при магнитометрических измерениях. Выполненные исследования позволили установить причины формирования основных особенностей магнитограмм реальных трубопроводов (рисунок 1.8).

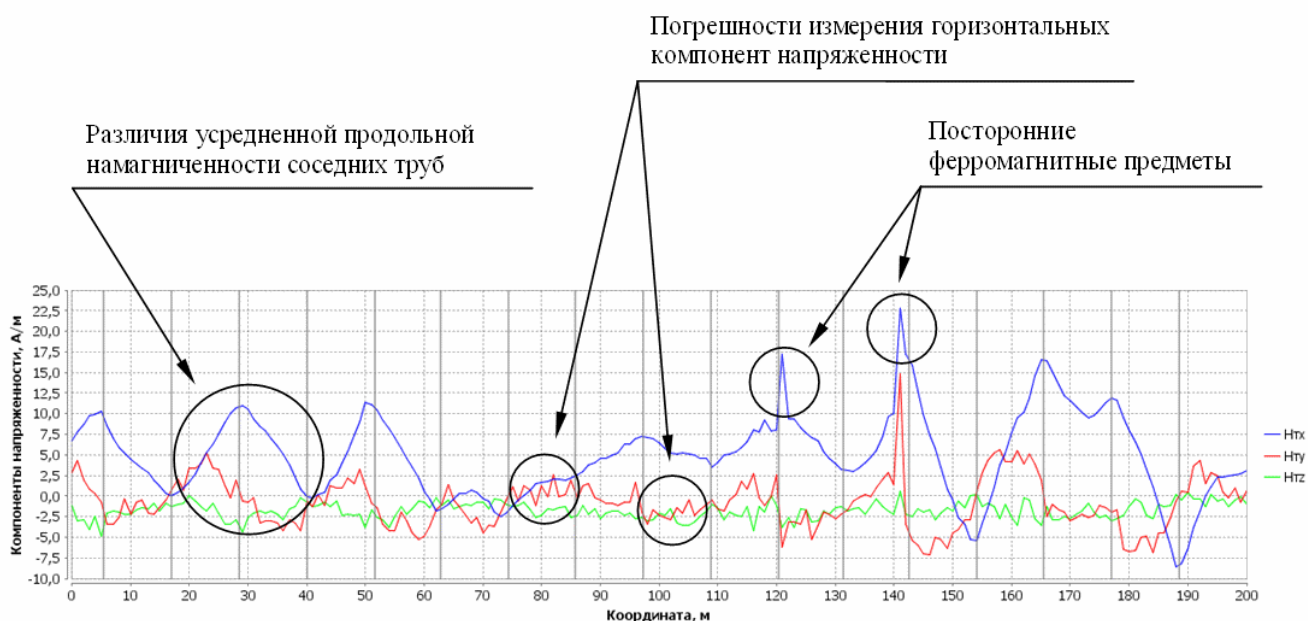


Рисунок 1.8 – Основные особенности магнитограмм трубопроводов [52].

Расположение осей декартовой системы координат показано на рисунке 1.7

Установлено, что различия горизонтальных компонент напряженности магнитного поля в соседних точках измерения связаны с угловыми отклонениями магнитных осей датчиков от вертикали и оси трубопровода. Сравнительно узкие и резкие аномалии связаны с посторонними металлическими предметами, причем по ширине этих аномалий можно оценить глубину залегания посторонних предметов. Наконец, достаточно

плавные изменения компонент магнитного поля, происходящие на участках, протяженность которых сравнима с характерной длиной трубы (~ 11 м), связаны с различными комбинациями усредненной намагниченности соседних труб. Показано, что по магнитограммам можно получить информацию о наличии и глубине залегания посторонних ферромагнитных предметов, информацию о расположении некоторых кольцевых сварных швов, а также информацию об усредненной поперечной (по отношению к оси трубопровода) намагниченности труб и о различиях усредненной продольной намагниченности труб.

В работе [52] проведено подробное систематическое исследование взаимосвязи между магнитным полем на поверхности грунта и намагниченностью металла трубопровода. Для расчета магнитного поля применена математическая модель, основанная на представлении трубопровода в виде совокупности элементарных магнитных диполей. При этом напряженность постоянного магнитного поля  $\mathbf{H}$ , создаваемого трубопроводом, определяется соотношением

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left( \frac{3(\mathbf{J}\mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{J}}{r^3} \right) dV, \quad (1.5)$$

где  $\mathbf{J}$  – вектор намагниченности элемента объема  $dV$ ,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор, соединяющий элемент объема  $dV$  и точку наблюдения. Интегрирование производится по объему трубопровода  $V$ . Если известны координаты элементарных источников (элементов объема трубопровода) и их намагниченность, то на основе этих данных может быть произведен численный расчет магнитного поля, создаваемого трубопроводом, в любой заданной точке пространства. Таким образом, магнитное поле в каждой точке контроля представляет собой суперпозицию полей различных элементов трубопровода. Особенности изменения магнитного поля при увеличении расстояния до источников приводят к тому, что магнитограммы, получаемые при дистанционных измерениях, существенно отличаются (и количественно, и качественно) от результатов измерения магнитного поля у поверхности



трубопровода. Этот факт необходимо учитывать при исследовании влияния механических напряжений в трубопроводе на результаты дистанционных измерений магнитного поля. В общем случае намагниченность разных участков трубопровода отличается. Изменение намагниченности под нагрузкой зависит от магнитной предыстории, которая у разных участков трубопровода также может быть неодинаковой. Эти факторы приводят к тому, что изменение магнитного поля трубопровода на поверхности грунта при изменении нагрузки имеет существенно более сложный характер, чем изменение магнитного поля вблизи локальных предварительно намагниченных участков металла при изменении механических напряжений.

#### **1.4 Характеристики измерительного оборудования, использовавшегося при экспериментальных исследованиях**

В данной работе для проведения полевых и стендовых измерений постоянного магнитного поля использовались опытные образцы магнитометрического комплекса «МАГ-01» разработки ОАО «Гипрогазцентр» [83 – 85]. Основные технические характеристики комплекса представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики магнитометрического комплекса «МАГ-01»

Характеристика	Единица измерения	Значение
Диапазон измерения компонент напряженности магнитного поля	А/м	±100
Относительная погрешность измерения напряженности магнитного поля	%	0,5
Относительная погрешность измерения глубины залегания оси трубопровода $h$ при величине тока в трубопроводе не менее $25 \text{ мА/м} \times h[\text{м}]$	%	5
Относительная погрешность поиска оси трубопровода при величине тока в трубопроводе не менее $25 \text{ мА/м} \times h[\text{м}]$	% от $h$	5
Количество измеряемых компонент напряженности магнитного поля	-	3

Комплекс состоит из переносного приемника специальных сигналов и генератора специальных сигналов. Приемник специальных сигналов представляет собой трехкомпонентный феррозондовый магнитометр, оснащенный системой позиционирования на местности, ориентированной на работу на магистральных трубопроводах (эта система включает блок поиска оси трубопровода и измерения глубины заложения оси трубопровода, а также датчик отклонения от вертикали). Приемник позволяет проводить измерения трех взаимно перпендикулярных компонент напряженности постоянного магнитного поля в точке измерения, а также выполнять измерения глубины заложения оси трубопровода. Генератор специальных сигналов предназначен для создания в трубопроводе переменного тока заданной частоты, необходимого для работы системы позиционирования приемника (для проведения поиска оси трубопровода и выполнения измерений глубины заложения оси трубопровода).

Для проведения стендовых экспериментальных работ имеется возможность отсоединения датчика магнитного поля от приемника специальных сигналов. В этом случае датчик магнитного поля может быть установлен на заданном расстоянии от поверхности металла стенда с использованием специально изготовленных проставок из немагнитного материала.

### **1.5 Обобщение результатов главы 1**

Проведенный обзор работ показывает, что имеется принципиальная возможность оценки изменения напряженного 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 оценка изменения механических напряжений.

Для совершенствования методов оценки напряженного состояния подземных трубопроводов по результатам дистанционных измерений постоянного магнитного поля требуется проведение следующих работ:

1. Проведение полевых экспериментальных исследований для выявления основных закономерностей изменения магнитных полей действующих подземных магистральных трубопроводов при изменении их напряженного состояния.

2. Проведение стендовых экспериментальных исследований влияния различных видов изменения напряженного состояния (связанных с изменением внутреннего давления и изгибом) на изменение постоянного магнитного поля элементов трубопроводов.

3. Исследование влияния циклического изменения различных видов изменения напряженного состояния (связанных с изменением внутреннего давления и изгибом) на характер изменения постоянного магнитного поля элементов трубопроводов.

4. Экспериментальное исследование совместного влияния различных видов изменения напряженного состояния (связанных с изменением

внутреннего давления и изгибом) на изменение постоянного магнитного поля элементов трубопроводов.

5. Разработка методик оценки технического и напряженного состояния подземных трубопроводов по результатам периодических дистанционных измерений постоянного магнитного поля на поверхности грунта, реализуемых с использованием существующего магнитометрического оборудования.

## **ГЛАВА 2 ПОЛЕВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

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

### **2.1 Магнитометрические измерения при капитальном ремонте трубопровода диаметром 1420 мм**

#### **2.1.1 Характеристика объекта исследований**

Измерения проводились на двух участках магистрального газопровода «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. Схема расположения первого участка измерений представлена на рисунке 2.1. Второй участок измерений расположен в районе 2462 – 2467 км. Протяженность второго участка 4000 м. Схема расположения второго участка измерений представлена на рисунке 2.2.

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». Использовано следующее 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.

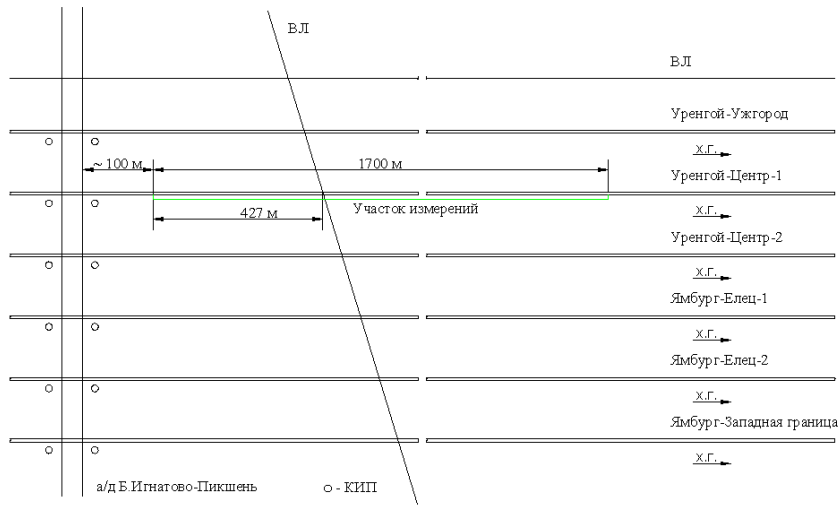


Рисунок 2.1 – Схема расположения первого участка измерений

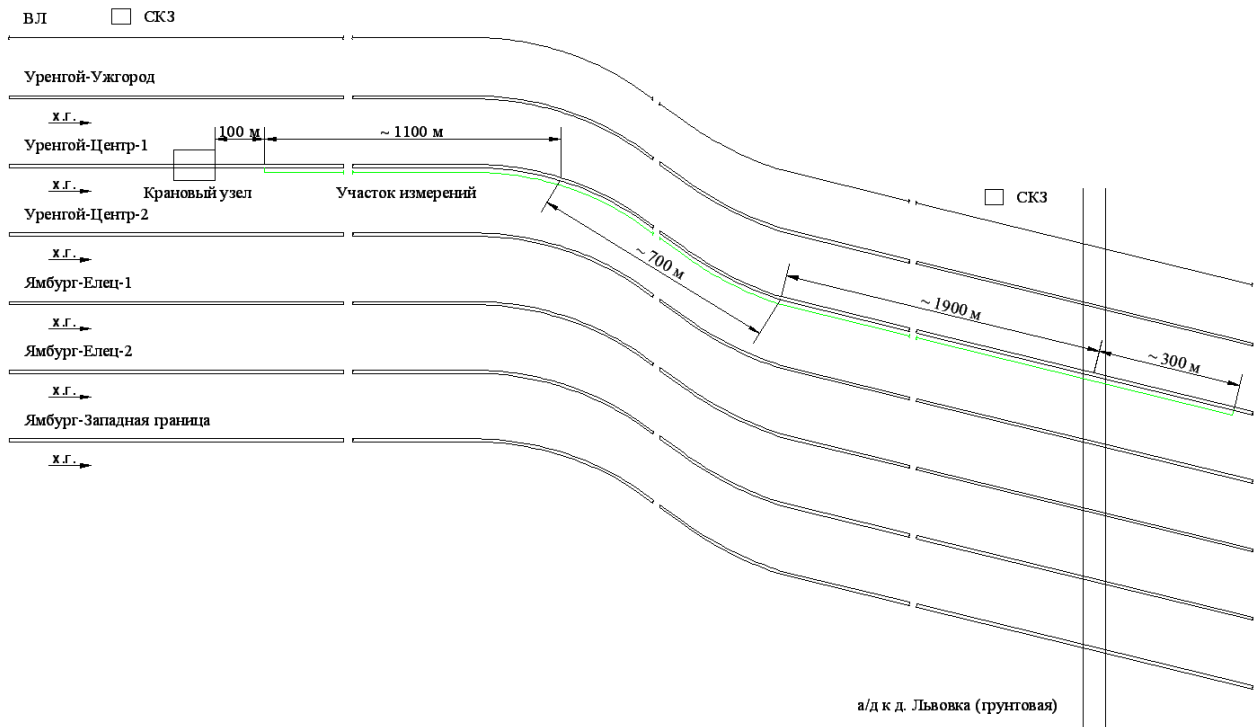


Рисунок 2.2 – Схема расположения второго участка измерений

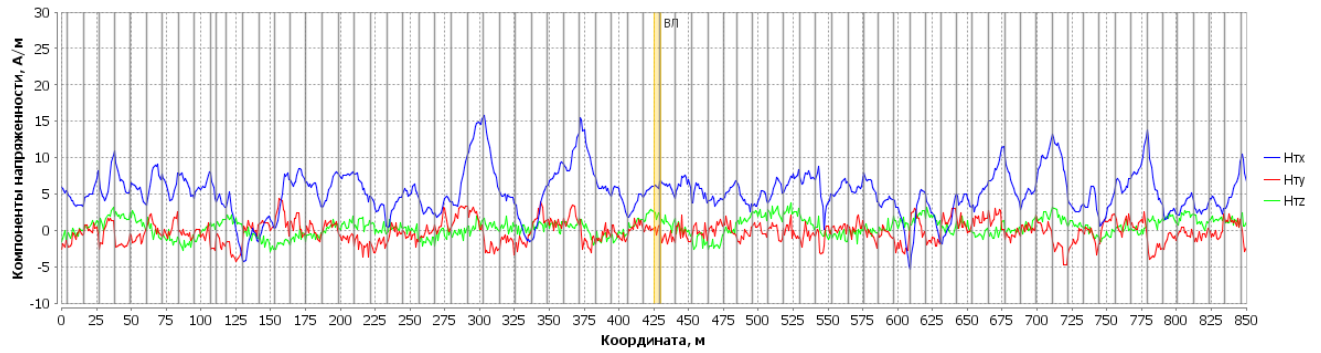
Результаты измерений на участке 1 представлены в разделах 2.1.2 – 2.1.4. Результаты измерений на участке 2 представлены в разделах 2.1.5 – 2.1.6.

### 2.1.2 Результаты измерения магнитного поля на участке 1

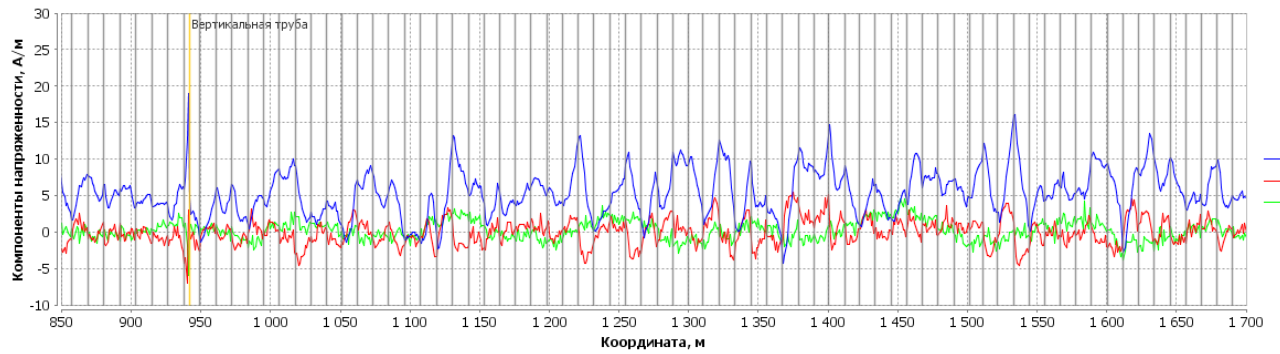
Магнитометрические измерения на участке 1 проводились при наличии рабочего давления (6,3 МПа) в трубопроводе (этап 1) и при отсутствии избыточного внутреннего давления в трубопроводе (этап 2). Средняя глубина заложения трубопровода составляла 1,2 м до верхней образующей (1,9 м до оси трубопровода).

Результаты измерения трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода (после вычитания поля Земли) на участке 1 представлены на рисунках 2.3 (этап 1) и 2.4 (этап 2). На рисунке 2.5 представлены результаты расчета величины изменения компонент напряженности магнитного поля. На магнитограммах указано положение кольцевых сварных швов (вертикальные линии серого цвета). Информация о линейных координатах кольцевых сварных швов была получена в ходе ВТД и подтверждена после откапывания трубопровода и снятия изоляции.

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 [52]. 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 кольцевых сварных швов с линейными координатами 27 м и 38 м на этапе 1 имеются максимумы  $H_x$ , высотой около 4 А/м и 5 А/м соответственно, а на этапе 2 эти экстремумы отсутствуют. 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. В районе кольцевого сварного шва с линейной координатой 779 м на этапе 1 имеется максимум  $H_x$ , а на этапе 2 – минимум  $H_x$ .

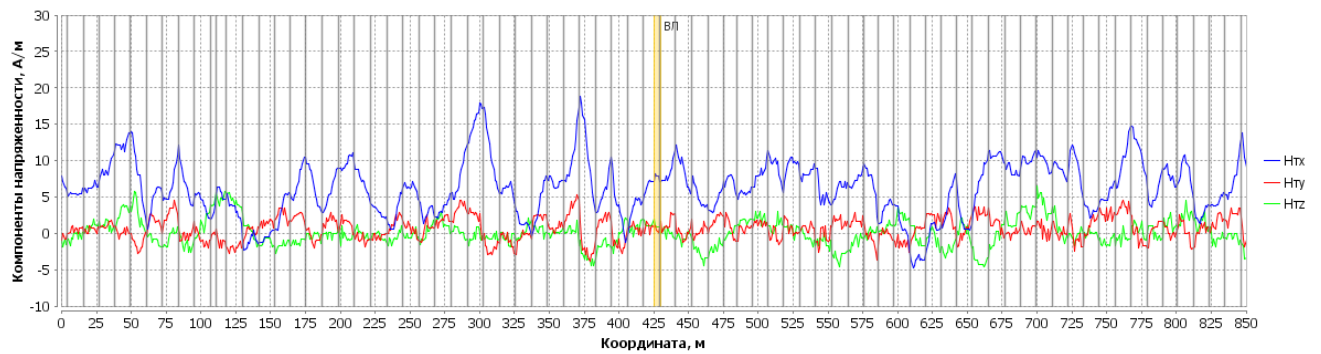


а

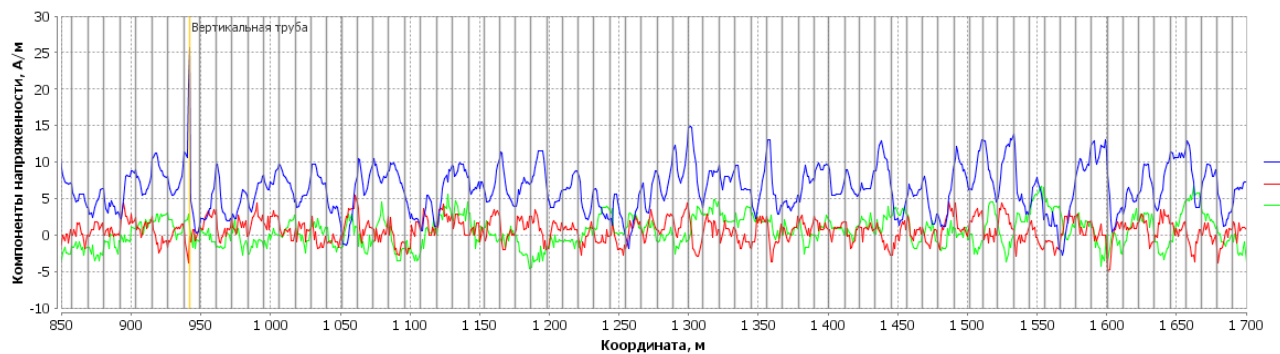


б

Рисунок 2.3 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1. Участки 0 – 850 м (а), 850 – 1700 м (б)



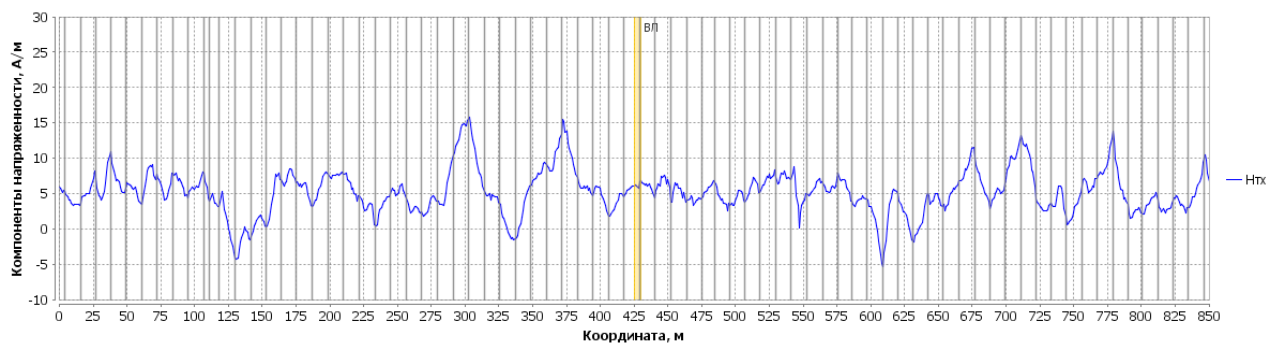
а



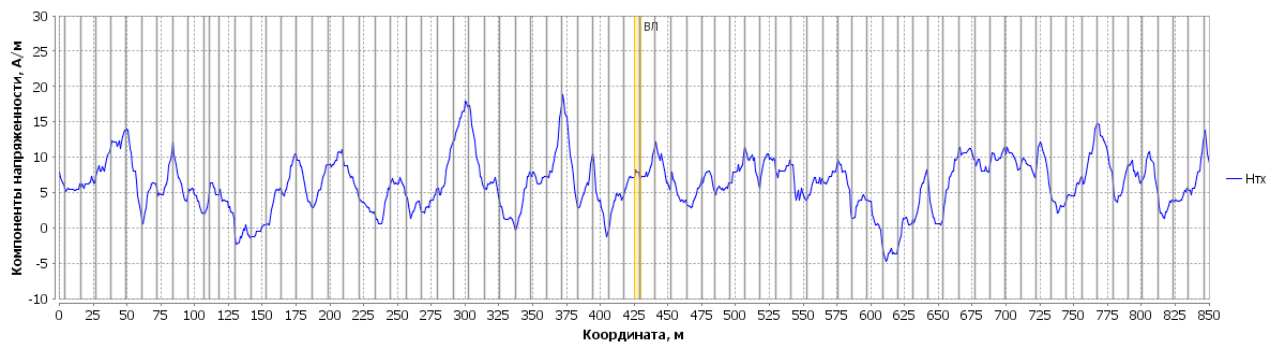
б

Рисунок 2.4 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 2. Участки 0 – 850 м (а), 850 – 1700 м (б)

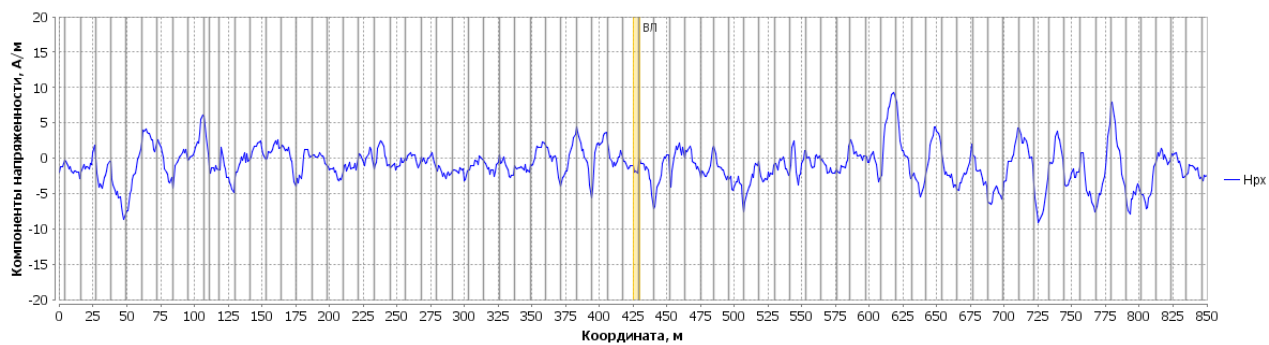




а

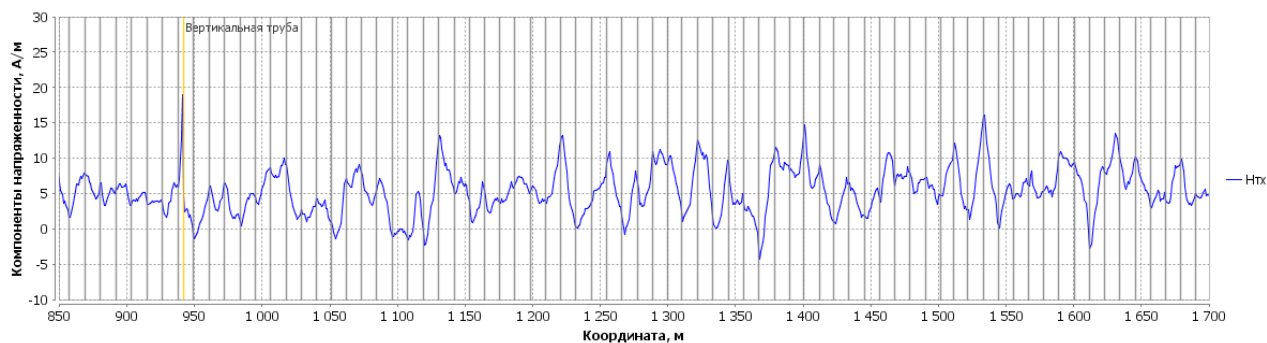


б

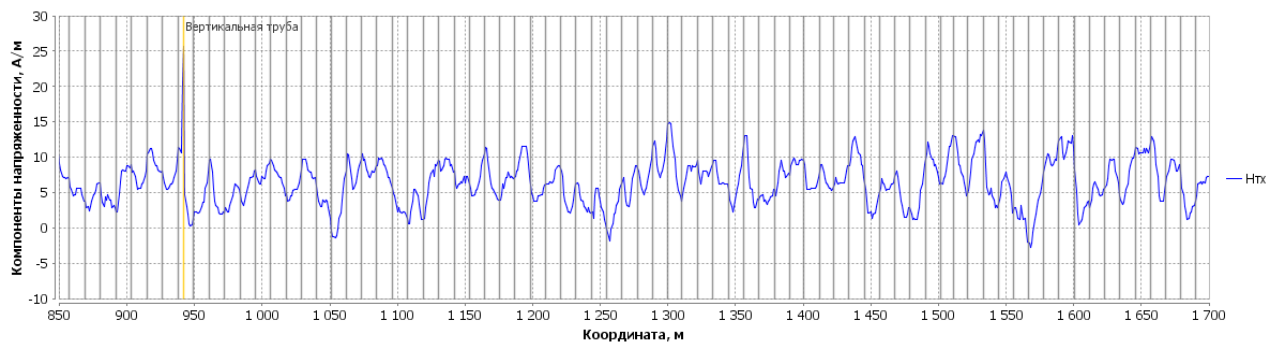


в

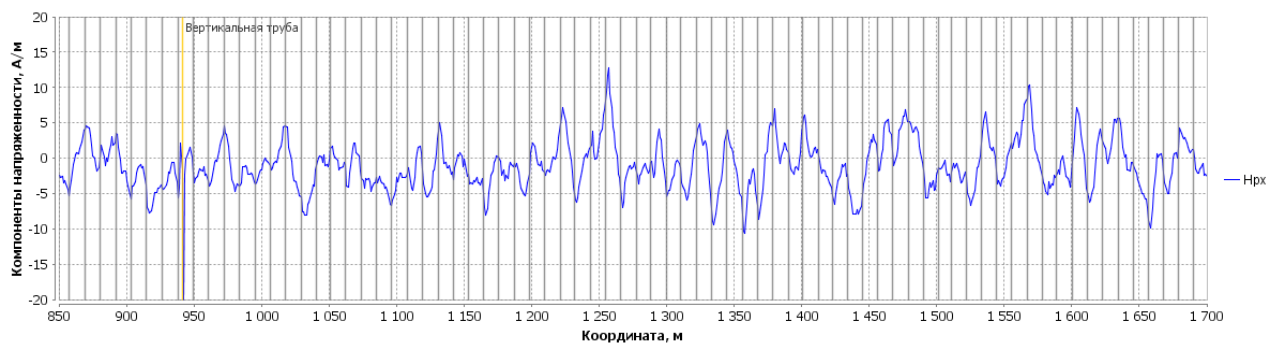
Рисунок 2.5 – Участки 0 – 850 м . График радиальной (Hx) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1 (а), График радиальной (Hx) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе (б), График разности радиальных (Hx) компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапах 1 и 2 (в)



а



б



в

Рисунок 2.6 – Участки 850 – 1700 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 (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 (за исключением участка с линейными координатами 940 – 944 м, на котором имелась магнитная помеха – вертикальная стальная труба – КИП).

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 необходимо проводить с учетом погрешностей измерения компонент напряженности магнитного поля. В ходе работы была проведена оценка погрешностей в соответствии с алгоритмами, разработанными в [52]. При расчетах считалось, что углы отклонения магнитных осей датчиков от вертикали и от оси трубопровода не превышают  $2^\circ$ , а ошибки определения координат блока датчиков относительно оси трубопровода не превышают 0,1 м. Результаты расчета погрешностей представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Абсолютные погрешности измерения компонент напряженности магнитного поля трубопровода, усредненные по участку измерения

	$\Delta H_x$ , А/м	$\Delta H_y$ , А/м	$\Delta H_z$ , А/м
Этап 1	1,07	1,84	2,30
Этап 2	1,17	1,88	2,37

Таким образом, 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.

### 2.1.3 Оценка величины изменения механических напряжений в трубопроводе

Изменение механических напряжений, произошедшее между измерениями на этапах 1 и 2, можно оценить с использованием соотношений:

$$\sigma_{\kappa}(P) = \frac{PD_{\varepsilon}}{2\delta}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_{np}(P) = \frac{\sigma_{\kappa}(P)}{2}. \quad (2.2)$$

где  $P$  – внутреннее давление,  $D_{\varepsilon}$  – внутренний диаметр трубопровода,  $\delta$  – толщина стенки.

Для данного трубопровода  $D = 1420$  мм,  $\delta = 16$  мм,  $P_1 = 6,3$  МПа,  $P_2 = 0$  МПа. Температуру трубопровода на этапах 1 и 2 будем считать одинаковой.

Тогда  $\Delta\sigma_{\kappa} \approx -275$  МПа, а  $\Delta\sigma_{np} \approx -100$  МПа.

Таким образом, кольцевые напряжения на этапе 2 на 275 МПа меньше, чем на этапе 1, продольные напряжения на этапе 2 на 100 МПа меньше, чем на этапе 1.

#### **2.1.4 Взаимосвязь между изменением магнитного поля и техническим состоянием трубопровода**

Пусть  $H_{1ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода ( $j$  может принимать значения  $x, y, z$ ) в  $i$ -ой точке измерения на этапе 1,  $H_{2ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода в  $i$ -ой точке измерения на этапе 2,  $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения. Для количественной оценки изменения магнитограмм при изменении давления рассчитаем среднеквадратичное значение разности соответствующих компонент  $d_j$ :

$$d_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{2ij} - H_{1ij})^2}. \quad (2.6)$$

Для участка 0 – 1700 м  $d_x = 3,21$  А/м;  $d_y = 1,90$  А/м;  $d_z = 1,87$  А/м. Среднеквадратичные 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  $d_x$ .

Проведем сопоставление величины изменения вертикальной составляющей магнитного поля при изменении механических напряжений и степени поврежденности трубопровода. Рассмотрим участки длиной 100 м.

Для каждого участка рассчитаем значения  $d_x$ . Для оценки степени поврежденности участка будем использовать количество труб  $m$  на данном участке, подлежащих вырезке по результатам диагностического обследования, выполненного после откапывания трубопровода и снятия изоляции. Данные по количеству труб, подлежащих вырезке, имеются для участка 100 – 1700 м, поскольку на части участка 0 – 100 м диагностическое обследование не проводилось. Результаты расчета  $d_x$  и значения  $m$  для стометровых составных частей участка 100 – 1700 м представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов среднеквадратичных значений разности вертикальных компонент напряженности магнитного поля трубопровода и количество труб, подлежащих вырезке, для участков длиной 100 м

Координаты участка, м	$d_x$ , А/м	$m$
100-200	2,08	7
200-300	1,43	2
300-400	1,90	1
400-500	2,22	0
500-600	2,24	0
600-700	3,88	3
700-800	4,27	6
800-900	2,73	5
900-1000	3,31	3
1000-1100	3,42	2
1100-1200	3,06	7
1200-1300	3,68	7
1300-1400	4,19	9
1400-1500	4,00	8
1500-1600	3,64	7
1600-1700	3,66	8

Каждому из участков длиной 100 м соответствует точка в системе координат  $m - d_x$ . Соответствующая диаграмма представлена на рисунке 2.6. 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 2.6 приведена линейная аппроксимация тренда, найденная по методу наименьших квадратов.

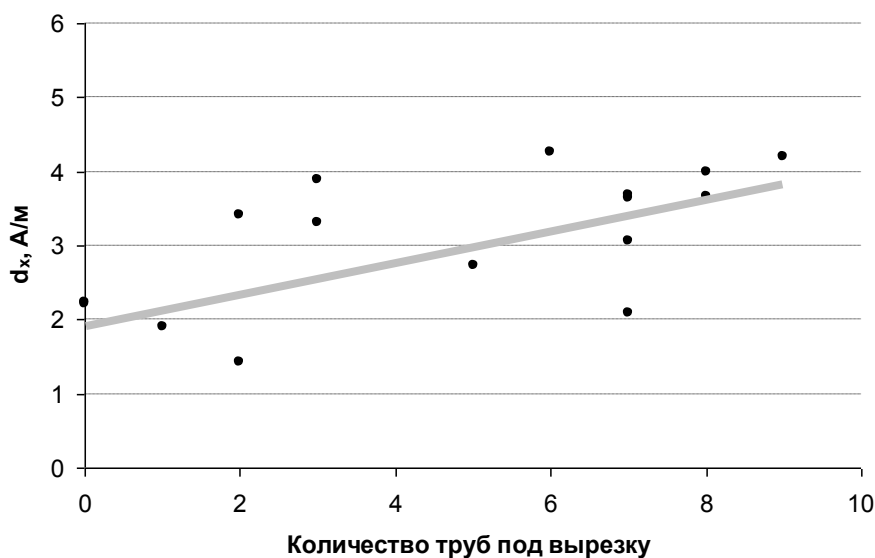


Рисунок 2.6 – Влияния относительного числа дефектных труб стометровых участков трубопровода на величину среднеквадратичного изменения радиальной составляющей магнитного поля

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.

### 2.1.5 Результаты измерения магнитного поля на участке 2

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).

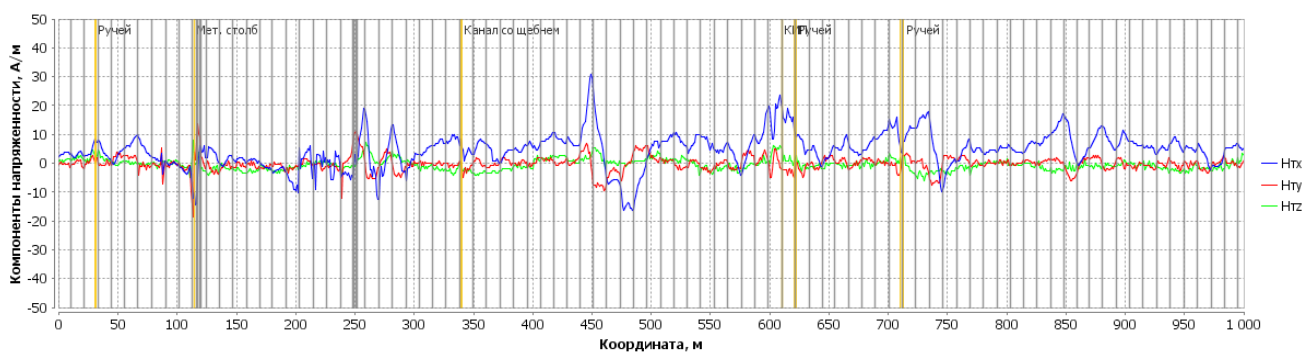
Результаты измерения трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода (после вычитания поля Земли) на участке 2 представлены на рисунке 2.7. Вычитание поля Земли проводилось в соответствии с предложенным в работе [52] специальным алгоритмом, позволяющим учесть изменение горизонтальных компонент напряженности магнитного поля, связанных с перемещением прибора по криволинейным (в плане) участкам трубопровода. На магнитограммах указано положение кольцевых сварных швов (вертикальные линии серого цвета). Информация о линейных координатах кольцевых сварных швов была получена в ходе ВТД и подтверждена после откапывания трубопровода и снятия изоляции.

На большей части второго участка измерений 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. Однако 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. На этих участках значения компонент напряженности выходили за указанные пределы.

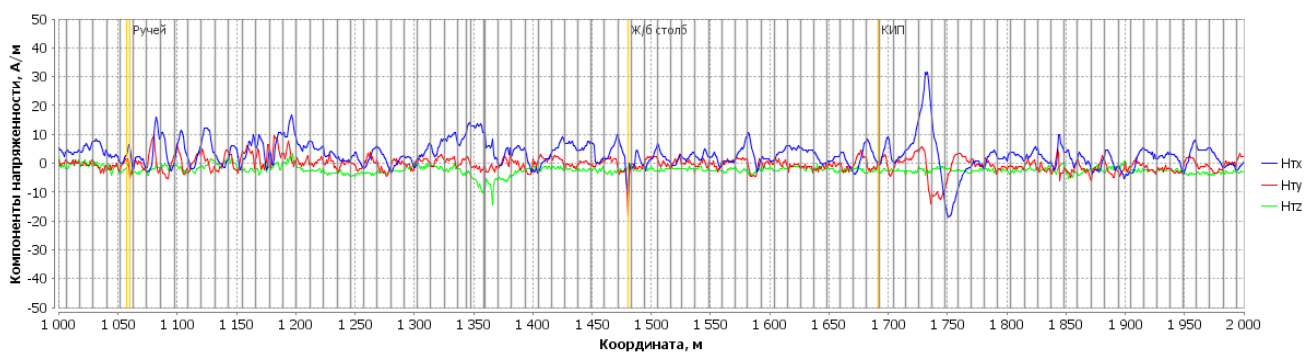
Путем сопоставления результатов ВТД, проведенного за 4 года до проведения магнитометрических измерений, и диагностического обследования, проведенного непосредственно после проведения магнитометрических измерений и откапывания трубопровода, установлено, что за 4 года, предшествующие проведению измерений, на ряде участков трубопровода был проведен ремонт с заменой труб. Ориентировочные линейные координаты замененных труб относительно начала второго участка измерений представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Перечень труб, замененных в период с 2010 г. по 2014 г.

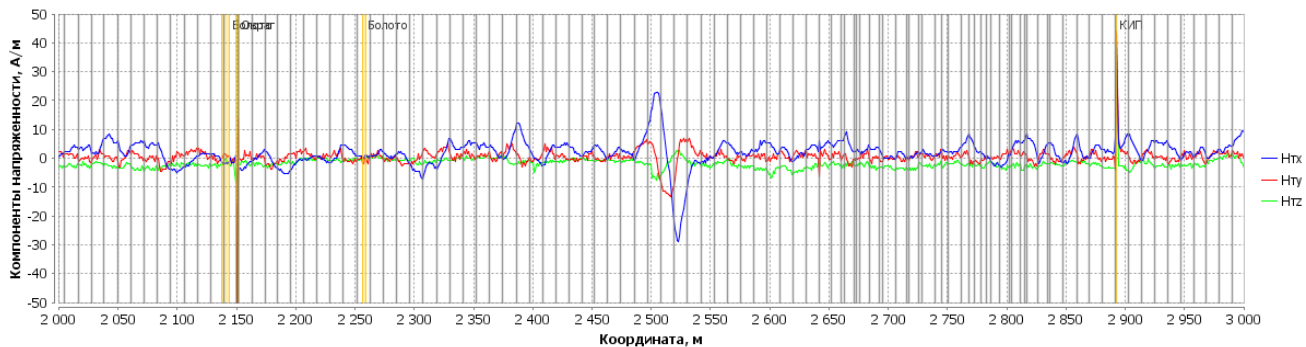
Номер трубы	Ориентировочная координата начала, м	Номер трубы	Ориентировочная координата начала, м
8040	452	8335	3555
8041	463	8344	3655
8156	1738	8346	3678
8225	2509	8347	3690
8333	3532	8353	3755
8334	3545		



а



б



в



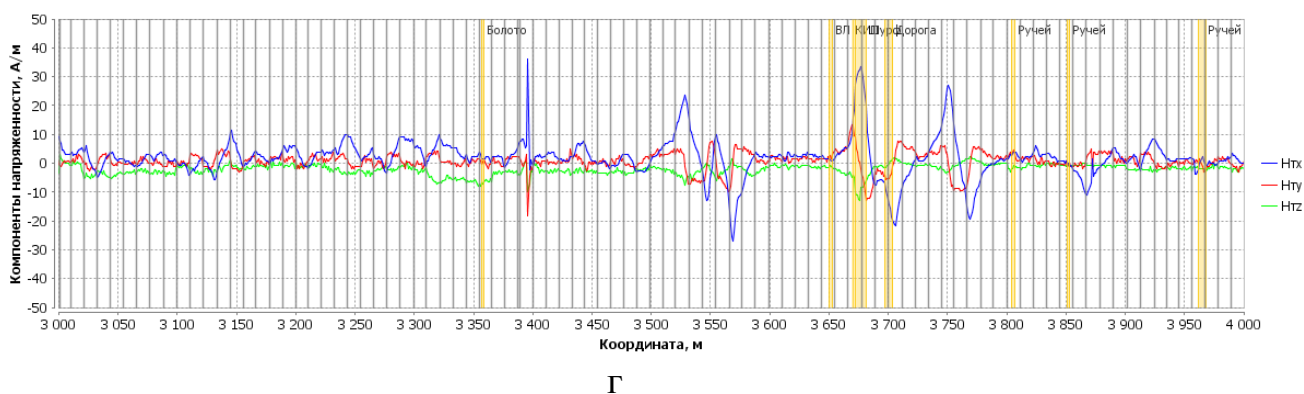


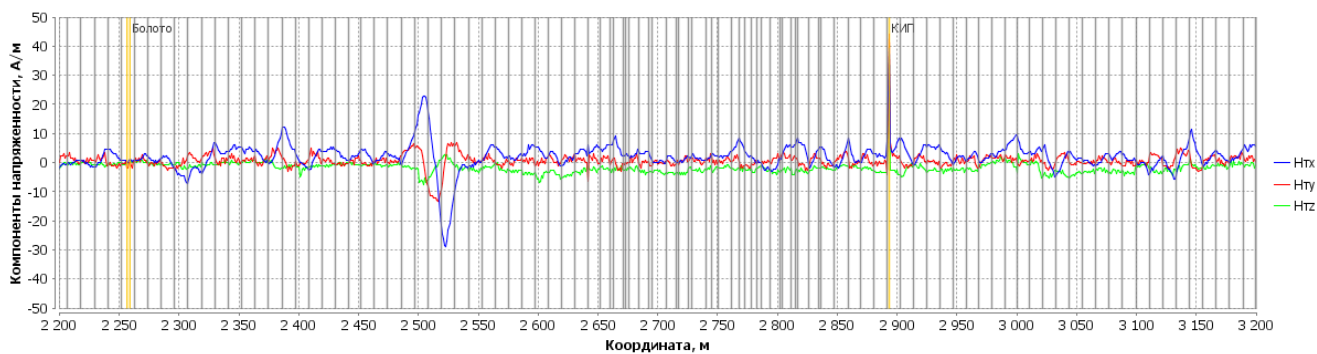
Рисунок 2.7 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода при рабочем давлении. Участки 0 – 1000 м (а), 1000 – 2000 м (б), 2000 – 3000 м (в), 3000 – 4000 м (г)

Таким образом, обнаруженные аномалии магнитного поля расположены именно в тех местах, где за несколько лет до выполнения измерений был проведен ремонт с заменой труб. Аномалии магнитного поля могут быть связаны с тем, что намагниченность новых труб отличается от намагниченности соседних старых труб. Кроме того, возможно, что на этих участках имеются продольные механические напряжения, связанные с ремонтом, например, из-за того, что температура трубопровода во время работы отличается от температуры, при которой выполнялась сварка трубопровода при замене труб.

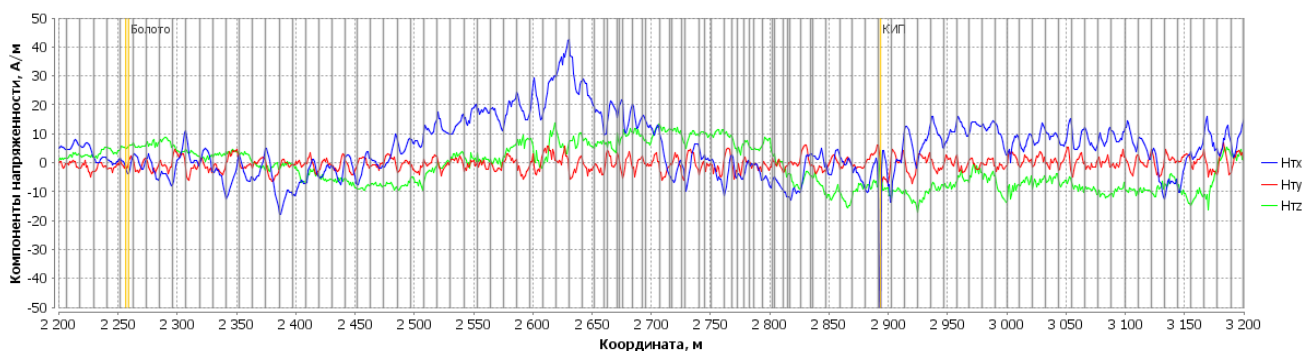
### 2.1.6 Особенности изменения магнитного поля трубопровода после пропуска внутритрубного дефектоскопа

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 2.8.

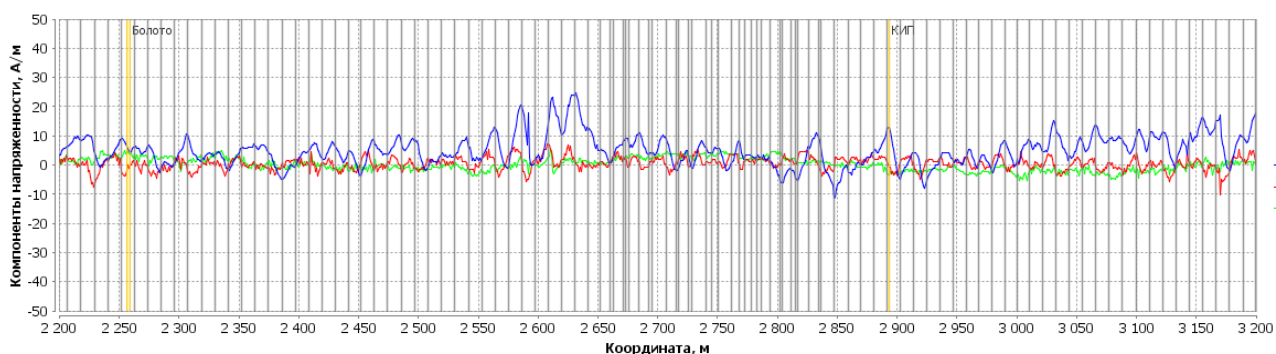
На магнитограммах, полученных после ВТД при рабочем давлении, наблюдаются характерные квазисинусоидальные изменения компонент  $H_x$  и  $H_z$  с периодом около 500 м, связанные, очевидно, с вращением дефектоскопа и несимметричностью его магнитной системы. Если из результатов измерений вычесть вклад, 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, на большей части участка измерений 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.



а



б



в

Рисунок 2.8 – 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. Во всех трех случаях наблюдается взаимосвязь между положением некоторых кольцевых сварных швов и положением экстремумов компоненты  $H_x$ . 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.

## 2.2 Магнитометрические измерения при изменении внутреннего давления в трубопроводе диаметром 159 мм

### 2.2.1 Характеристика объекта исследований

Исследования проводились на участке газопровода-отвода к ГРС с. Атюрьево (ответвляется от магистрального газопровода «Уренгой-Центр-1» с 2609 км) 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. Схема расположения участка измерений представлена на рисунке 2.9.

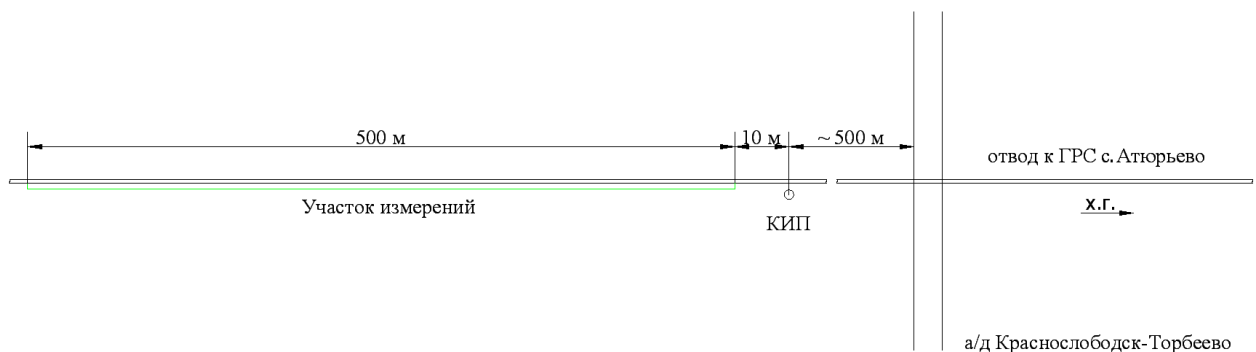


Рисунок 2.9 – Схема расположения участка измерений

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». Использовано следующее 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 1 м.

## 2.2.2 Результаты измерения магнитного поля над осью трубопровода

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).

Результаты измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля трубопровода на этапах 1 и 2 представлены на рисунках 2.10 и 2.11 соответственно. На рисунке 2.12 представлены результаты расчета величины изменения компонент напряженности магнитного поля.

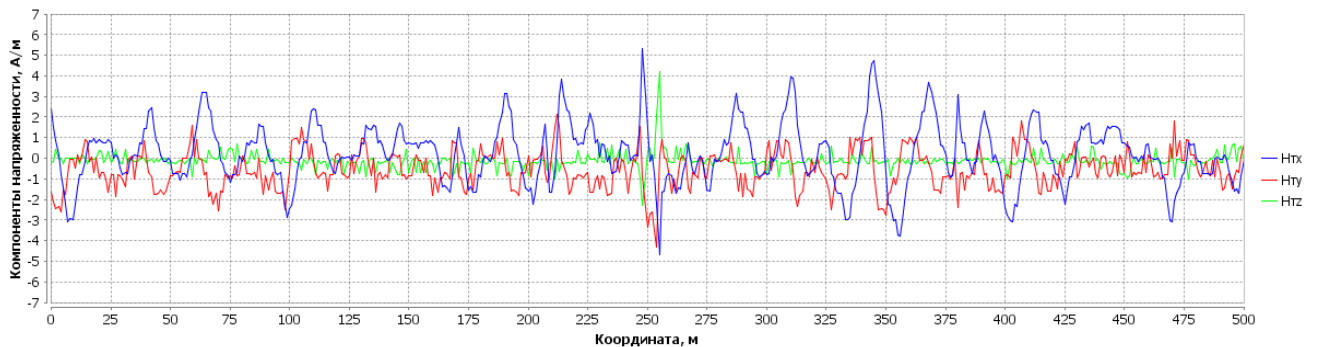


Рисунок 2.10 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1

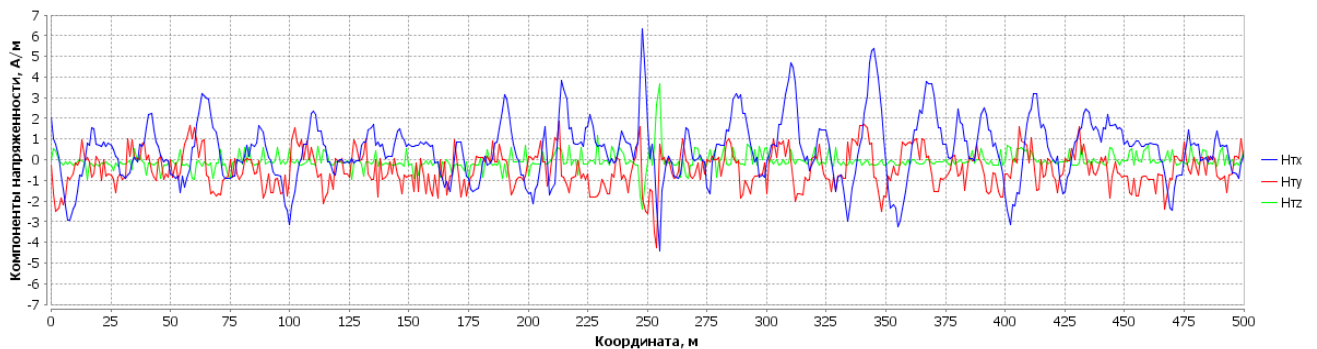


Рисунок 2.11 – Графики трех компонент напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 2

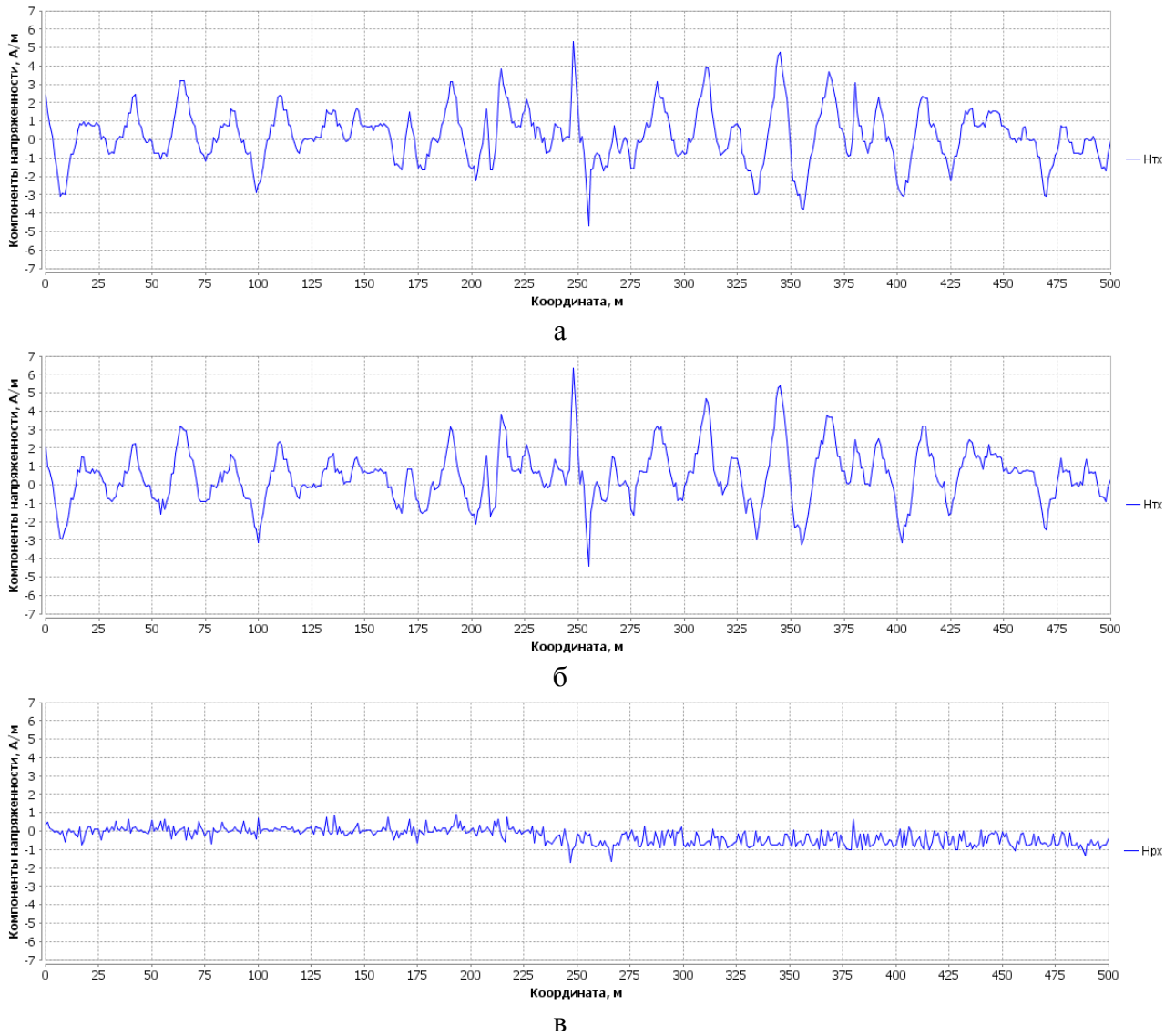


Рисунок 2.12 – График радиальной ( $H_x$ ) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 1 (а), График радиальной ( $H_x$ ) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапе 2 (б), График разности радиальной ( $H_x$ ) компоненты напряженности магнитного поля трубопровода на этапах 1 и 2 (в).

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. На магнитограммах наблюдаются характерные особенности (экстремумы компоненты  $H_x$  и переходы через ноль компоненты  $H_y$ ), позволяющие выполнить прогноз расположения кольцевых сварных швов трубопровода.

В ходе работы была проведена оценка погрешностей в соответствии с алгоритмами, предложенными в работе [52]. При расчетах считалось, что углы отклонения магнитных осей датчиков от вертикали и от оси трубопровода не превышают  $2^\circ$ , а ошибки определения координат блока датчиков относительно оси трубопровода не превышают 0,1 м (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Абсолютные погрешности измерения компонент магнитного поля трубопровода, усредненные по участку длиной 500 м

	$\Delta H_x$ , А/м	$\Delta H_y$ , А/м	$\Delta H_z$ , А/м
Этап 1	0,41	0,81	0,80
Этап 2	0,42	0,82	0,81

Изменения компонент напряженности магнитного поля, связанные с изменением внутреннего давления, по абсолютной величине сравнимы с погрешностями измерений соответствующих компонент.

### 2.2.3 Оценка величины изменения механических напряжений в трубопроводе

Изменение механических напряжений, произошедшее между измерениями на этапах 1 и 2, можно оценить с использованием соотношений (2.4) и (2.5). Для данного трубопровода  $D = 159$  мм,  $\delta = 4$  мм,  $P_1 = 1,0$  МПа,  $P_2 = 5,5$  МПа. Температуру трубопровода на этапах 1 и 2 будем считать одинаковой. Тогда  $\Delta\sigma_k \approx 89$  МПа, а  $\Delta\sigma_{np} \approx 45$  МПа.

Таким образом, кольцевые напряжения на этапе 2 на 89 МПа больше, чем на этапе 1, продольные напряжения на этапе 2 на 45 МПа больше, чем на этапе 1.

#### **2.2.4 Анализ особенностей влияния изменений механических напряжений на магнитное поле для трубопроводов малого диаметра**

Для количественной оценки изменения магнитного поля при изменении механических напряжений рассчитаем среднеквадратичное значение разности  $x$ -компонент напряженности магнитного поля при наличии и при отсутствии избыточного внутреннего давления (2.6). Для участка  $0 - 500$  м  $d_x = 0,50$  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 (раздел 2.1.2), на котором при изменении внутреннего давления с 6,3 МПа до нуля наблюдались существенные изменения магнитного поля, достигающие в некоторых точках 13 А/м). Такое различие может быть обусловлено рядом факторов. Первый фактор – различие геометрических характеристик трубопроводов. Магнитное поле на поверхности грунта определяется намагниченностью и объемом источника магнитного поля (трубопровода), а также расстоянием от источника до точек измерения. Площадь поперечного сечения стенки трубопровода с наружным диаметром 159 мм и толщиной стенки 4 мм составляет  $3,95 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, а площадь поперечного сечения стенки трубопровода с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 16 мм составляет  $141,95 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Таким образом, объем металла на единицу длины трубопровода диаметром 159 мм в 36 раз меньше, чем объем металла на единицу длины трубопровода диаметром 1420 мм, а расстояние от верхней образующей трубопровода до точек измерения (поверхности грунта) примерно одинаково. Следовательно, при одинаковом изменении намагниченности металла, связанной с изменением внутреннего давления, изменение поля на поверхности грунта для трубопровода диаметром 159 мм



будет примерно в 30 – 40 раз меньше, чем для трубопровода диаметром 1420 мм. Вторым фактором – различие изменений механических напряжений, связанных с изменением внутреннего давления. Для данного участка трубопровода кольцевые напряжения изменились на 89 МПа, продольные изменения изменились на 45 МПа. Для участка трубопровода диаметром 1420 мм кольцевые напряжения изменились на 275 МПа, продольные изменения изменились на 100 МПа (раздел 2.1.3). 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.

### 2.3 Обобщение результатов главы 2

1. Экспериментально установлено, что постоянное магнитное поле подземного трубопровода диаметром 1420 мм, измеряемое над осью трубопровода на поверхности грунта, существенно изменяется при изменении механических напряжений в трубопроводе. Величина изменения различается для разных точек наблюдения как по абсолютному значению, так и по знаку. В наибольшей степени изменяется вертикальная компонента напряженности магнитного поля  $H_x$ . При изменении продольных механических напряжений на 100 МПа и кольцевых механических напряжений на 275 МПа величина изменения  $H_x$  на поверхности грунта достигает 13 А/м при глубине заложения оси трубопровода около 1,9 м.

2. Различия изменения магнитного поля для разных точек наблюдения свидетельствуют о том, что характер изменения намагниченности труб зависит не только от действующих в данный момент механических напряжений, но и в значительной степени определяется магнитной предысторией конкретной трубы, которая, как правило, неизвестна. Продольная намагниченность разных труб при одном и том же изменении механических напряжений может как возрастать, так и убывать, что, по-видимому, связано с различной ориентацией векторов намагниченности относительно поверхности труб.

3. Различие величин среднеквадратичных значений разности вертикальных компонент напряженности магнитного поля трубопровода ( $d_x$ ), рассчитанных для достаточно протяженных (длиной 100 м) смежных участков одного и того же трубопровода, свидетельствует о том, что под действием изменения механических напряжений (связанных с изменением внутреннего давления) происходят различные изменения магнитных характеристик труб, расположенных на разных участках. Обнаружена взаимосвязь между величиной изменения поля при изменении механических напряжений, которая характеризуется значением  $d_x$  для участков длиной 100 м, и итоговой поврежденностью металла трубопровода, которая характеризуется количеством труб  $m$  на этих участках, которые подлежат вырезке по результатам диагностического обследования. Для рассмотренного участка магистрального газопровода, эксплуатируемого около 30 лет, коэффициент корреляции значений  $d_x$  и  $m$  составил 0,62.

4. Наблюдаются аномалии магнитного поля в районе участков, на которых выполнялся ремонт с заменой труб. На этих участках абсолютные значения вертикальной компоненты напряженности магнитного поля трубопровода (после вычитания поля Земли)  $H_x$  превышали 20 А/м. Такие аномалии могут быть связаны с наличием продольных механических напряжений, связанных, например, с тем, что температура трубопровода во время работы отличается от температуры, при которой выполнялась сварка

трубопровода при замене труб. После пропуска магнитного внутритрубного дефектоскопа аномалии магнитного поля на указанных участках исчезли, вероятно, это связано с изменением магнитных характеристик в стенке трубопровода.

5. 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. Основные причины этого уменьшения – снижение объема металла, приходящегося на единицу длины газопровода и уменьшение изменения механических напряжений (при сопоставимом изменении внутреннего давления) в трубопроводе малого диаметра. Сравнительные оценки по изменению магнитного поля газопроводов диаметром 1420 мм и 159 мм свидетельствуют о том, что измеряемое с поверхности грунта магнитное поле газопровода диаметром 159 мм приблизительно в 60 – 80 раз меньше, чем газопровода диаметром 1420 мм .

## **ГЛАВА 3 СТЕНДОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ**

Систематические исследования влияния механических напряжений на магнитное поле проводились в ходе работ на специально изготовленных для этой цели испытательных стендах. В первом стенде (диаметр 1420 мм, длина ~ 25 м) предусмотрена возможность изменения НДС путем изменения внутреннего давления. Во втором стенде (диаметр 219 мм, длина ~ 10 м) кроме изменения внутреннего давления, дополнительно имеется возможность создания деформации изгиба.

### **3.1 Магнитометрические измерения при изменении внутреннего давления в испытательном стенде, сваренном из дефектных труб диаметром 1420 мм**

#### **3.1.1 Характеристика объекта исследований**

Объектом исследования является испытательный стенд, представляющий собой участок трубопровода с торцевыми заглушками, в который подавалась вода под давлением. Стенд сварен из десяти катушек, вырезанных из различных магистральных трубопроводов. Наружный диаметр стенда 1420 мм, длина стенда с заглушками 24,6 м. Схема стенда представлена на рисунке 3.1. Общий вид стенда представлен на рисунке 3.2. Основные параметры катушек представлены в таблице 3.1. Дефекты тела труб (на основании обследования неразрушающими методами контроля) представлены в таблице 3.2. Развертка боковой поверхности стенда представлена на рисунке 3.3.

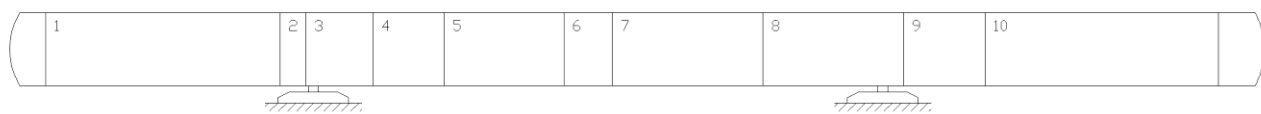


Рисунок 3.1 – Схема испытательного стенда с указанием номеров катушек



Рисунок 3.2 – Общий вид испытательного стенда

Таблица 3.1 – Параметры катушек

Номер трубы	Длина, м	Тип	Расположение продольных швов, час		Средняя толщина стенки, мм
			1-й	2-й	
1	4,60	1Ш	3,0	-	15,9
2	0,50	1Ш	9,0	-	16,3
3	1,31	1Ш	5,5	-	16,4
4	1,40	1Ш	8,2	-	18,8
5	2,35	2Ш	2,0	8,0	17,3
6	0,95	2Ш	1,8	7,8	17,2
7	2,95	2Ш	1,0	7,0	15,7
8	2,75	1Ш	6,0	-	15,7
9	1,60	СШ	-	-	15,9
10	4,58	1Ш	3,0	-	16,0

Таблица 3.2 – Дефекты тела трубы (на основании заключений по визуально-измерительному контролю и вихретоковому контролю)

Номер трубы	Наименование дефекта	Расстояние от шва, м		Угловое расположение, час	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. глубина, мм
		кольцевого	продольного				
2	Мех. повреждения	0,05	2,32	3,5	400	400	2,0
3	Коррозионные язвы	0,33	-0,90	3,0	410	100	5,5
	Коррозионные язвы	1,20	-0,54	4,0	100	80	3,0
4	Мех. повреждения	0,40	2,50	3,0	130	350	1,0
5	Мех. повреждения	1,15	0,08	2,0	200	300	0,5
7	Сетка трещин	1,50	0,05	1,5	120	80	9,5
	Сетка трещин	1,65	0,08	1,5	100	70	2,5
	Сетка трещин	1,80	0,05	1,5	100	80	3,0
	Вышлифовка	2,00	0,05	1,5	800	120	7,0
	Коррозия	2,15	0,27	2,0	600	300	0,5
8	Сетка трещин	0,35	-1,23	2,8	120	80	5,0
	Сетка трещин	0,20	-1,19	2,7	100	80	5,0
	Коррозионные язвы	0,28	-1,64	1,5	200	70	2,0
	Коррозионные язвы	1,20	-1,12	3,0	200	200	2,0
	Коррозионные язвы	2,25	-1,12	3,0	200	300	2,0
9	Мех. повреждения	0,60	-	3,0	150	400	4,0

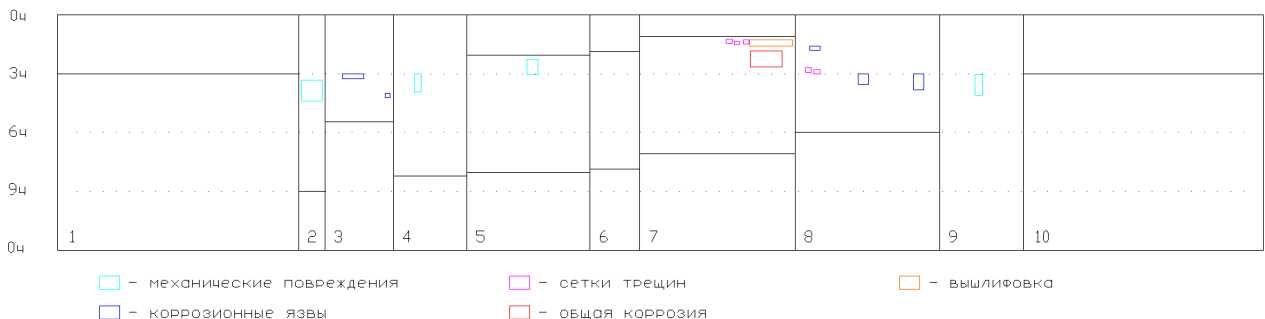


Рисунок 3.3 – Развертка боковой поверхности испытательного стенда с указанием расположения сварных швов и дефектов

### 3.1.2 Результаты измерения магнитного поля над осью стенда при разной величине избыточного внутреннего давления

В ходе работы были проведены измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля трубы в точках, расположенных над осью трубы. Измерения проводились с использованием датчика комплекса «МАГ-01». 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 3.4.

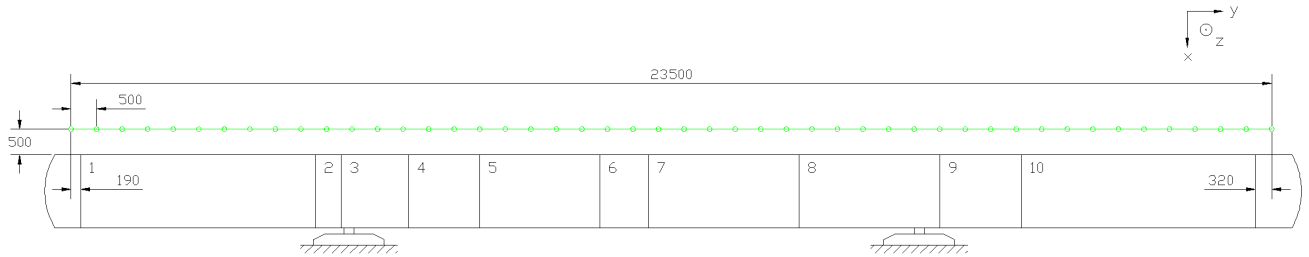


Рисунок 3.4 – Схема расположения точек измерения магнитного поля над осью трубы. Точки измерения обозначены зеленым цветом

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 (непосредственно после опрессовки) и после 10 циклов изменения давления (от 0 до 6,0 МПа). Определялось собственное поле трубы, т.е. из измеренных значений компонент напряженности вычитались соответствующие компоненты напряженности поля Земли. Результаты измерений представлены на рисунках 3.5 и 3.6. На этих рисунках на магнитограммы наложена следующая дополнительная информация: положение кольцевых сварных швов (сплошные вертикальные линии серого цвета), номера труб, тип труб (1Ш, 2Ш, СШ), угловая ориентация продольных швов труб, час. Характер изменения компонент магнитного поля при изменении давления можно оценить с помощью диаграмм, представленных на рисунках 3.7 – 3.12.

В ряде точек измерения (с линейными координатами  $y$  от 7,5 до 12,5 м) значения  $H_x$  до циклического изменения давления при  $P = 0$  и  $P = 3,0$  МПа (повышение давления) выходили за пределы диапазона измерений датчика (рисунок 5). На магнитограммах наблюдаются характерные особенности

(экстремумы компоненты  $H_x$ ) в районе расположения кольцевых сварных швов ( $y \approx 17,0$  м;  $y \approx 18,5$  м). В то же время, имеются экстремумы компоненты  $H_x$ , не связанные с кольцевыми сварными швами ( $y \approx 1,5$  м;  $y \approx 9,0$  м;  $y \approx 20,5$  м).

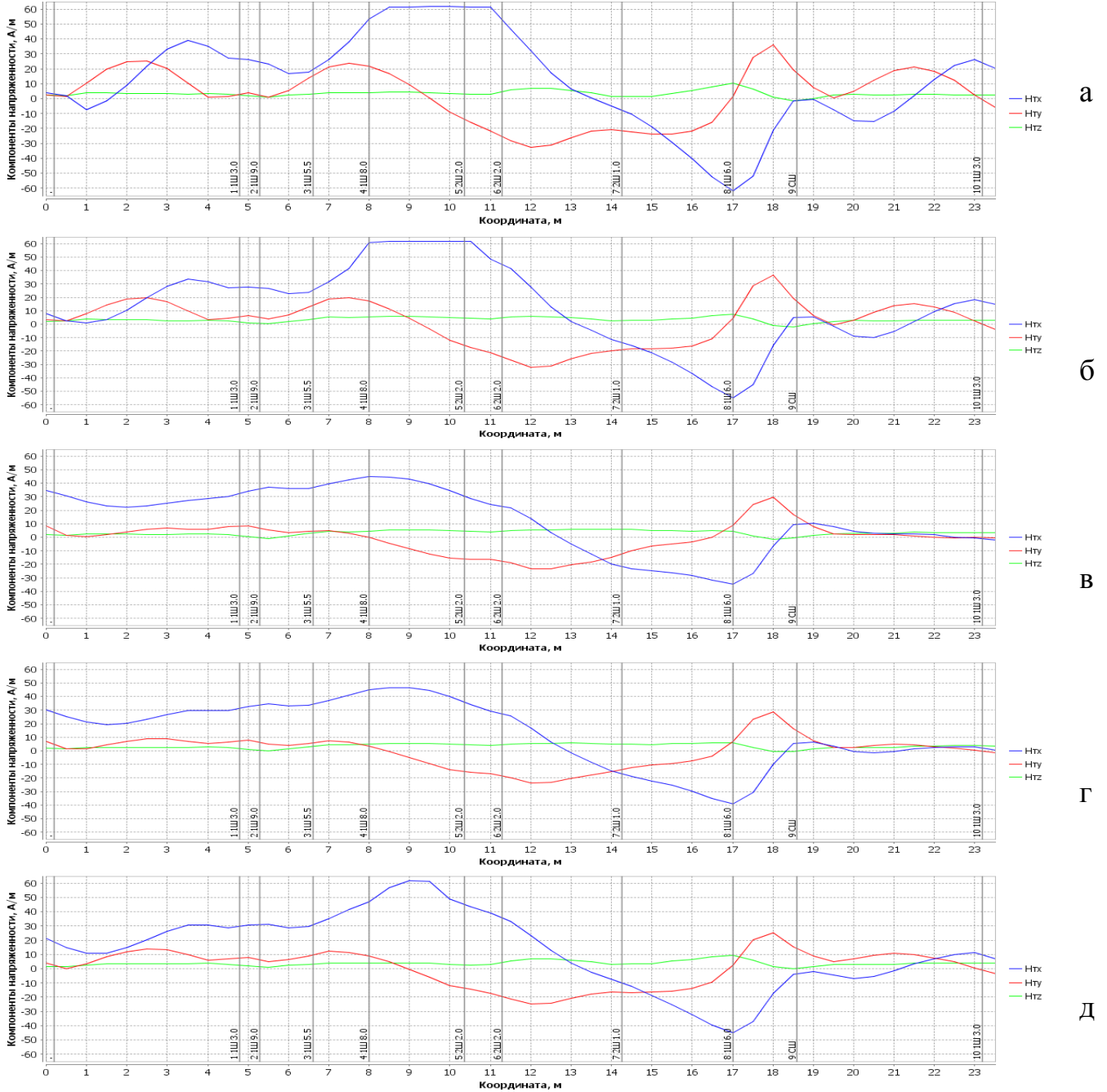


Рисунок 3.5 – Результаты измерения магнитного поля до циклического изменения давления.  $P = 0$  до повышения давления (а),  $P = 3,0$  МПа при повышении давления (б),  $P = 6,0$  МПа (в),  $P = 3,0$  МПа при понижении давления (г),  $P = 0$  после понижения давления (д)



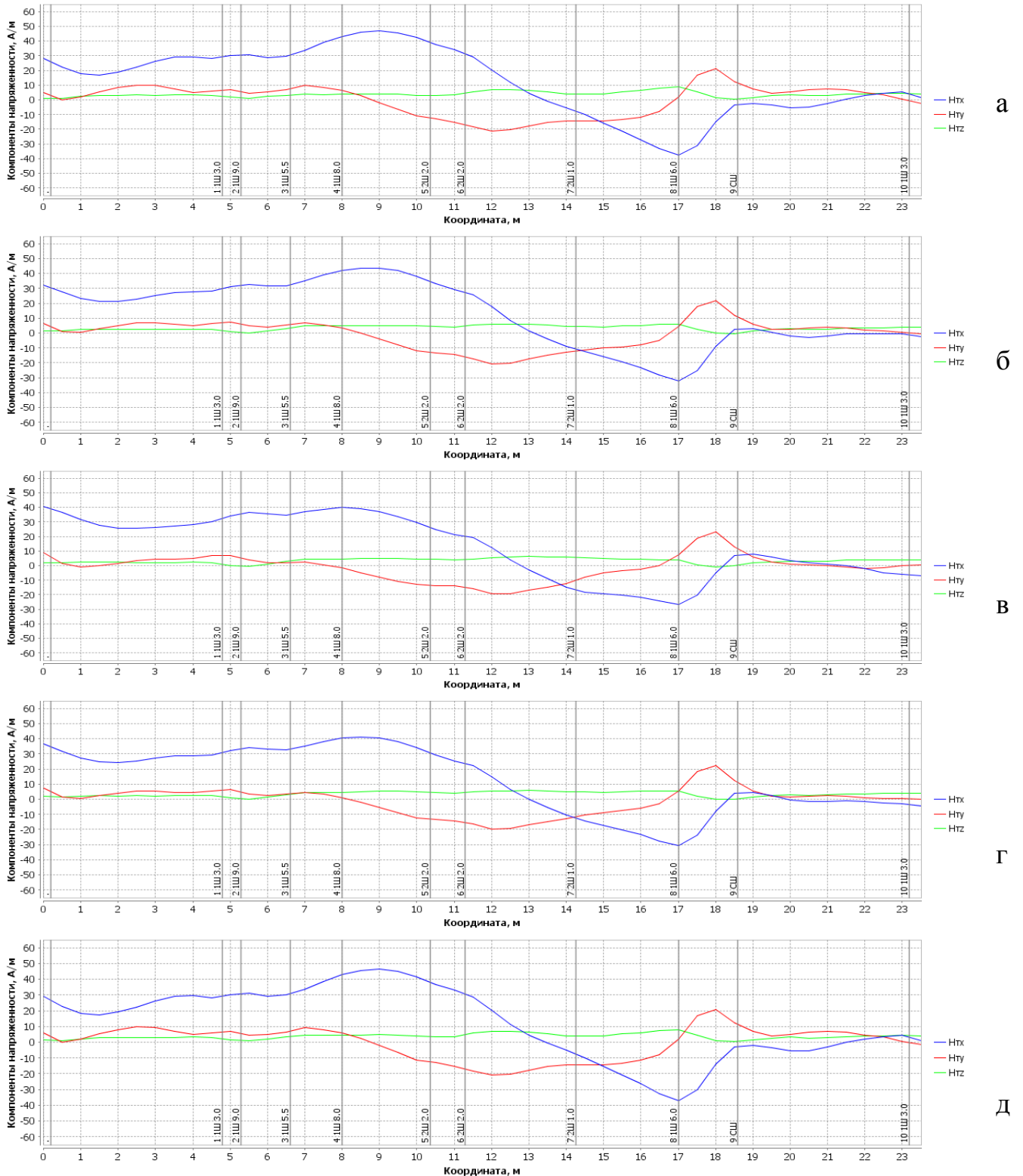


Рисунок 3.6 – Результаты измерения магнитного поля после циклического изменения давления.  $P = 0$  до повышения давления (а),  $P = 3,0$  МПа при повышении давления (б),  $P = 6,0$  МПа (в),  $P = 3,0$  МПа при понижении давления (г),  $P = 0$  после понижения давления (д)

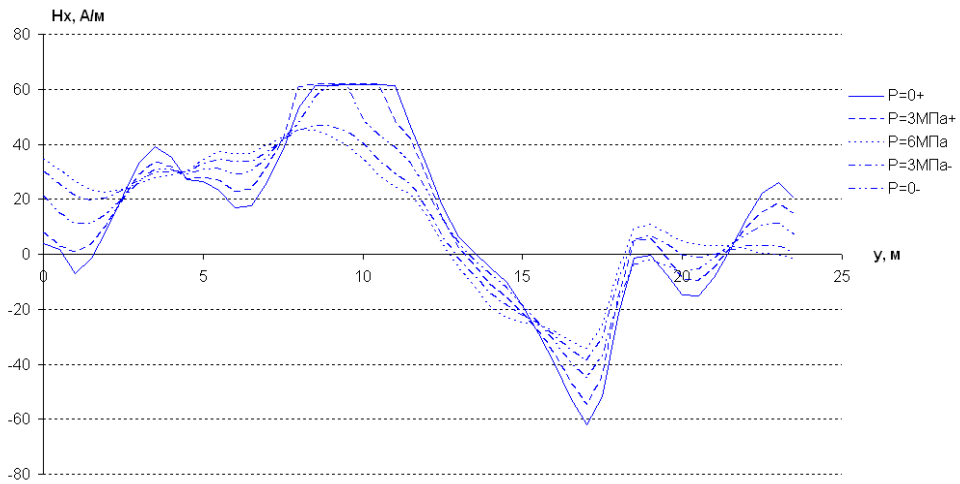


Рисунок 3.7 – Значения компоненты  $H_x$  при разном внутреннем давлении (до циклического изменения давления)

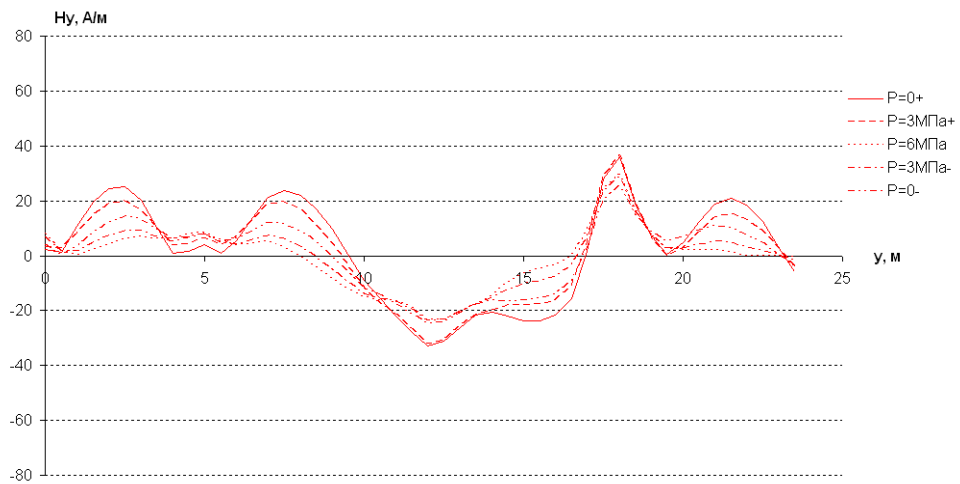


Рисунок 3.8 – Значения компоненты  $H_y$  при разном внутреннем давлении (до циклического изменения давления)

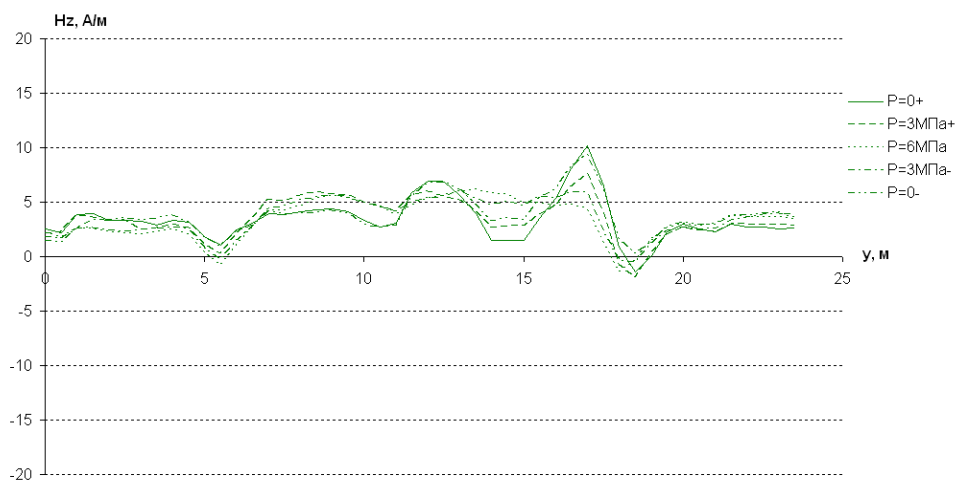


Рисунок 3.9 – Значения компоненты  $H_z$  при разном внутреннем давлении (до циклического изменения давления)

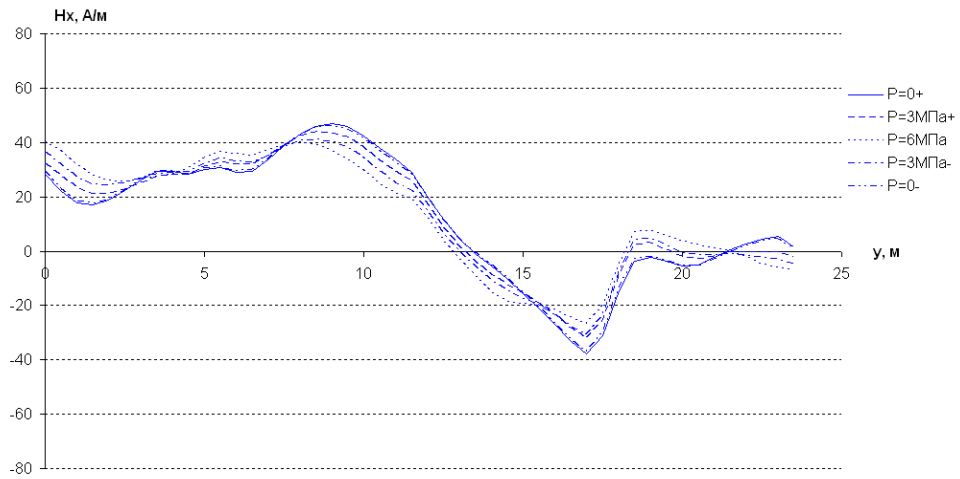


Рисунок 3.10 – Значения компоненты  $H_x$  при разном внутреннем давлении (после циклического изменения давления)

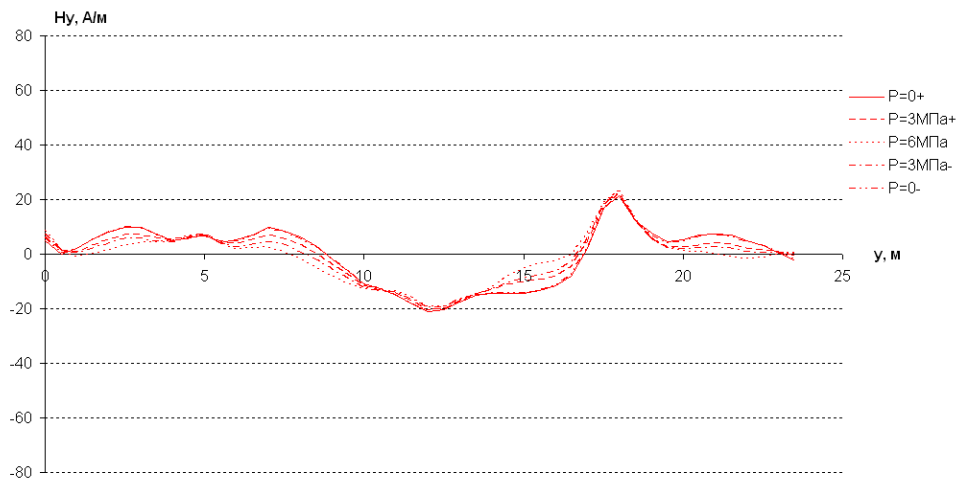


Рисунок 3.11 – Значения компоненты  $H_y$  при разном внутреннем давлении (после циклического изменения давления)

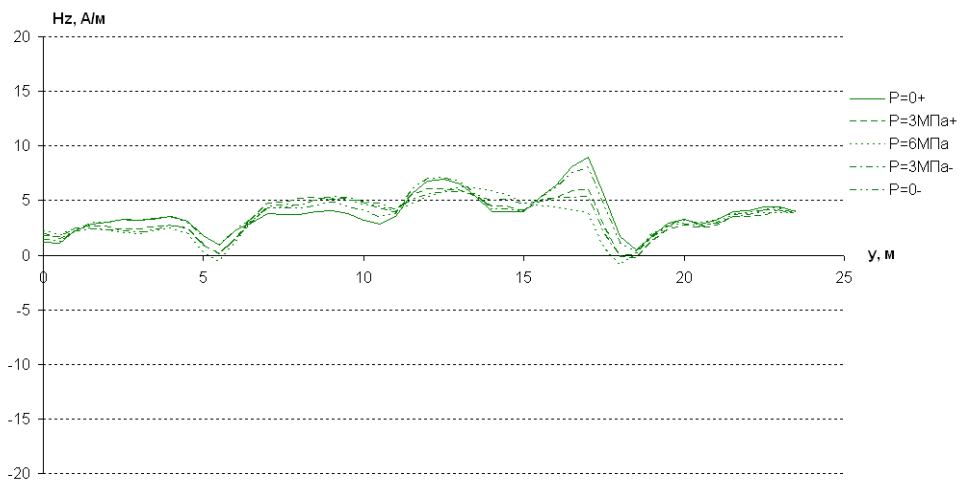


Рисунок 3.12 – Значения компоненты  $H_z$  при разном внутреннем давлении (после циклического изменения давления)

Пусть  $H_{1ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода ( $j$  может принимать значения  $x, y, z$ ) в  $i$ -ой точке измерения при внутреннем давлении  $P_1$ ,  $H_{2ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода в  $i$ -ой точке измерения при внутреннем давлении  $P_2$ ,  $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения. Для количественной оценки изменения магнитограмм при изменении давления рассчитаем минимальное и максимальное значение разности компонент напряженности  $\delta H_{ij}$ :

$$\delta H_{ij} = H_{2ij} - H_{1ij}. \quad (3.1)$$

Кроме того, рассчитаем среднеквадратичное значение разности соответствующих компонент  $d_j$ :

$$d_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta H_{ij})^2}. \quad (3.2)$$

Результаты расчетов для некоторых вариантов сочетаний величин  $P_1$  и  $P_2$  представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – 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

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 3.3, необходимо проводить с учетом погрешностей измерения компонент напряженности

магнитного поля. В ходе работы была проведена оценка погрешностей в соответствии с алгоритмами, разработанными в [52]. При расчетах считалось, что углы отклонения магнитных осей датчиков от вертикали и от оси трубопровода не превышают  $1^\circ$ . Погрешности, связанные с неточностью определения координат точек измерения, не учитывались, поскольку при измерениях блок датчиков устанавливался через проставку непосредственно на трубопровод. Результаты расчета погрешностей представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Абсолютные погрешности измерения компонент магнитного поля трубопровода, усредненные по участку измерения

	$\Delta H_x$ , А/м	$\Delta H_y$ , А/м	$\Delta H_z$ , А/м
До циклического изменения давления			
$P = 0$ (до повышения давления)	0,57	1,14	1,29
$P = 3,0$ МПа (повышение давления)	0,55	1,13	1,26
$P = 6,0$ МПа	0,46	1,11	1,15
$P = 3,0$ МПа (понижение давления)	0,47	1,10	1,15
$P = 0$ (после понижения давления)	0,49	1,11	1,20
После циклического изменения давления			
$P = 0$ (до повышения давления)	0,46	1,10	1,15
$P = 3,0$ МПа (повышение давления)	0,45	1,11	1,13
$P = 6,0$ МПа	0,44	1,11	1,12
$P = 3,0$ МПа (понижение давления)	0,44	1,10	1,12
$P = 0$ (после понижения давления)	0,46	1,10	1,15

Таким образом, при изменении внутреннего давления происходит изменение постоянного магнитного поля над трубопроводом, при этом в разных точках измерения величина изменений отличается (как по значению, так и по знаку); поле может как уменьшаться, так и увеличиваться. В наибольшей степени изменяется  $x$ -компонента напряженности (при повышении давления от 0 до 6,0 МПа абсолютная величина изменения достигает 37 А/м), а в наименьшей степени –  $z$ -компонента (при повышении давления от 0 до 6,0 МПа максимальная абсолютная величина изменения – около 6 А/м). Такие результаты согласуются с полученными ранее при полевых измерениях на магистральном газопроводе диаметром 1420 мм

(глава 2). 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). Значения  $d_x$ , которыми удобно характеризовать изменение поля на всем участке измерений, составляют для этих двух случаев 18,62 А/м и 8,39 А/м соответственно. Результаты измерений при  $P = 0$  (до повышения давления) и при  $P = 0$  (после понижения давления) до циклики существенно отличаются ( $d_x = 9,70$  А/м). Это значит, что после повышения и последующего снижения давления магнитное поле не вернулось к исходным значениям, 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 ( $d_x = 0,54$  А/м, максимальные отличия компонент напряженности для всех точек наблюдения не выходят за пределы погрешности измерения).

### **3.1.3 Результаты измерений магнитного поля при циклическом изменении давления.**

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. Схема расположения блока датчиков магнитного поля представлена на рисунке 3.13.

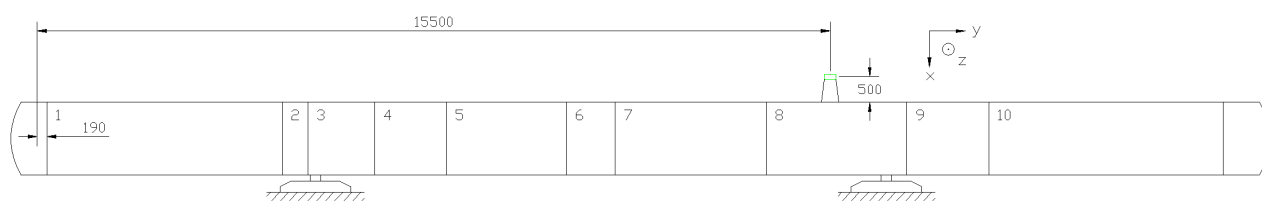


Рисунок 3.13 – Схема расположения блока датчиков при циклическом изменении давления

Диаграммы поведения компонент напряженности магнитного поля при изменении давления представлены на рисунках 3.14 – 3.15.

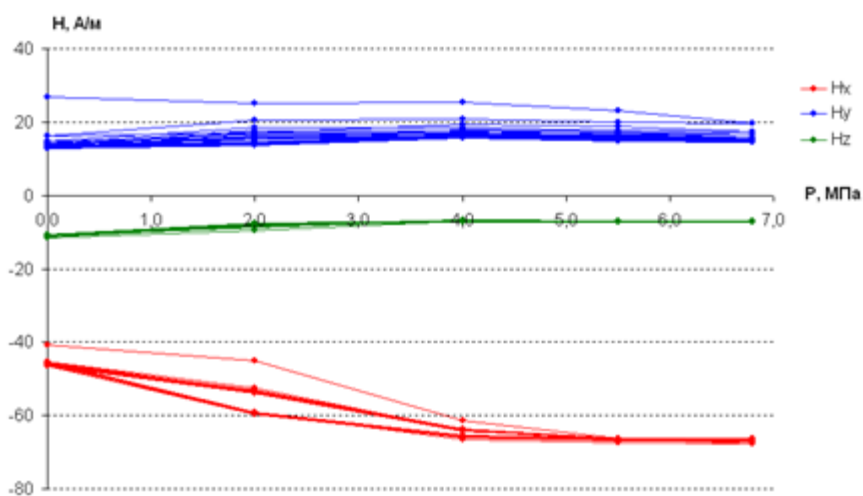


Рис. 3.14 Поведение компонент напряженности магнитного поля при циклическом изменении давления в трубе. Блок датчиков 2. Циклы 1 – 10.

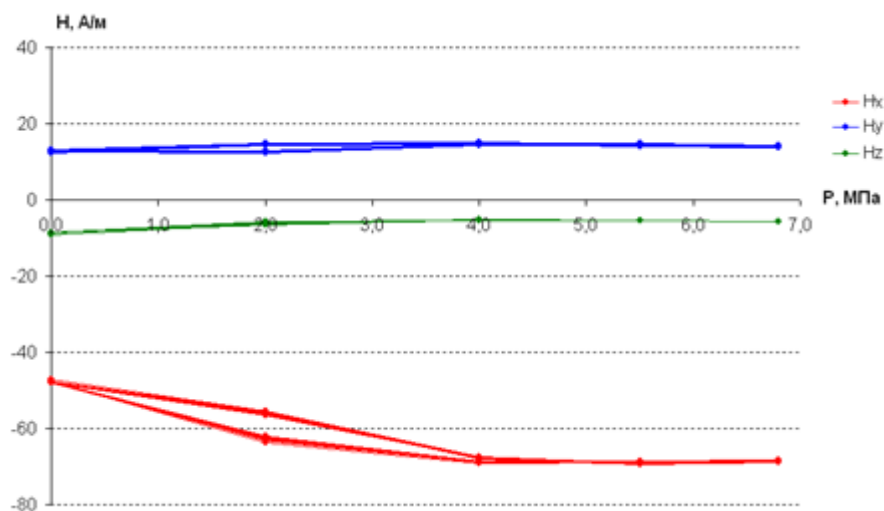


Рис. 3.15 Поведение компонент напряженности магнитного поля при циклическом изменении давления в трубе. Блок датчиков 2. Циклы 11 – 40.

Анализ кривых на рис. 3.14 – 3.15 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. Из курса сопротивления материалов известно, что для тонкостенных труб с заглушками, нагруженных внутренним давлением справедливы следующие выражения

$$\sigma_k = \frac{PD}{2\delta} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{пр} = \frac{PD}{4\delta} = \frac{\sigma_k}{2} \quad (3.4)$$

Где  $P$  – давление,  $D$  – диаметр,  $\delta$  – толщина трубы,  $\sigma_k$  – кольцевые, а  $\sigma_{пр}$  – продольные напряжения. Учитывая конкретные значения  $D$  и  $\delta$  формулы (3.3, 3.4) принимают вид.

$$\sigma_k = 50P \text{ (МПа)} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{пр} = 25P \text{ (МПа)} \quad (3.6)$$

Пропорциональная связь между напряжениями -  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{пр}$  и внутреннем давлением –  $P$  позволяет представить режим бароциклирования в виде пульсационных механоциклов, приведенных на Рис. 3.16, где иллюстрируется тот факт, что характер изменения давления, а так же кольцевых и продольных напряжений одинаков. В нашем случае учитывая формулы (3.5) и (3.6) и реальные величины давления в трубе можно утверждать, что максимальные значения напряжений  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{пр}$  при механоциклировании составляют 340 и 170 МПа соответственно.



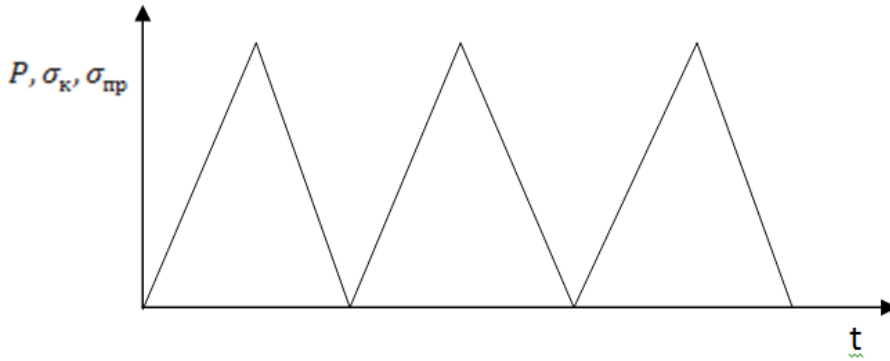


Рис. 3.16 Схема пульсационного механоциклирования.

Из обобщенного закона Гука, с учетом конкретного вида напряженного состояния следует:  $\sigma_y = \sigma_{11} = \sigma_{пр} = \frac{\sigma_k}{2}$ ;  $\sigma_x = \sigma_{22} = 0$ ;  $\sigma_z = \sigma_{33} = \sigma_k$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu\sigma_z] = \frac{1}{E} [\sigma_k/2 - \mu\sigma_k] = \sigma_k(0.5 - \mu) = 0.21 \frac{\sigma_k}{E} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [-\mu(\sigma_z + \sigma_y)] = -\frac{\mu}{E} \left[ \frac{3\sigma_k}{2} \right] = -0.44 \frac{\sigma_k}{E} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu\sigma_y] = \frac{\sigma_k}{E} (1 - 0.5\mu) = 0.85 \frac{\sigma_k}{E} \quad (3.9)$$

В формулах (3.7-3.9) коэффициент Пуассона  $\mu$  для сталей принят равным 0.29 .

За счет эффекта обратной магнитострикции в теле трубы происходит изменение вектора намагниченности  $\Delta J_i$ , которое вызвано действием деформации, задаваемой тензором  $\varepsilon_{ij}$  .

В области упругих деформаций связь между вектором, (тензором первого ранга)  $\Delta J_i$ , и тензором второго ранга  $\varepsilon_{ij}$  может быть представлена в виде:

$$\Delta J_i = a_{ijk} \varepsilon_{jk} \quad (3.10)$$

где  $a_{ijk}$  – компонента тензора третьего ранга, в (3.10) используется правило суммирования по повторяющимся индексам. В развернутом виде формула (3.10) принимает вид (3.11-3.13)

$$\Delta J_1 = a_{111} \varepsilon_{11} + a_{122} \varepsilon_{22} + a_{133} \varepsilon_{33} \quad (3.11)$$

$$\Delta J_2 = a_{211} \varepsilon_{11} + a_{222} \varepsilon_{22} + a_{233} \varepsilon_{33} \quad (3.12)$$

$$\Delta J_3 = a_{311} \varepsilon_{11} + a_{322} \varepsilon_{22} + a_{333} \varepsilon_{33} \quad (3.13)$$

Пренебрегая в (3.11-3.13) недиагональными членами по сравнению с диагональными, получим (3.14-3.16).

$$\Delta J_1 = a_{111} \varepsilon_{11} = 0.21 a_{111} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.14)$$

$$\Delta J_2 = a_{222} \varepsilon_{22} = -0.44 a_{222} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.15)$$

$$\Delta J_3 = a_{333} \varepsilon_{33} = 0.85 a_{333} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.16)$$

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:

$$\Delta H_y = \Delta H_1 = f(r) \Delta J_1 = f(r) a_{111} \varepsilon_{11} = 0.21 f(r) a_{111} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.17)$$

$$\Delta H_x = \Delta H_2 = f(r) \Delta J_2 = f(r) a_{222} \varepsilon_{22} = -0.44 f(r) a_{222} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.18)$$

$$\Delta H_z = \Delta H_3 = f(r) \Delta J_3 = f(r) a_{333} \varepsilon_{33} = 0.85 f(r) a_{333} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.19)$$

В проведенном исследовании величина компоненты вектора напряженности магнитного поля  $\Delta H_x$  демонстрирует заметное возрастания по модулю при увеличении давления и падение при его уменьшении, при этом обратимое изменение магнитного поля достигает 20 А/м. Существенно более слабое влияние оказывает бароциклирование на изменении  $\Delta H_y$  и  $\Delta H_z$ . Анализ кривых на рис. 3.14 и 3.15 показывает, что величина  $\Delta H_x$  в установившемся цикле достигает 20 А/м, в то время как  $\Delta H_y$  – 2 А/м, а  $-\Delta H_z$  – 1.5 А/м. Что позволяет записать соотношения:

$$\left| \frac{\Delta H_x}{\Delta H_y} \right| \approx 10; \quad \left| \frac{\Delta H_x}{\Delta H_z} \right| \approx 13; \quad (3.20)$$

Подставляя в соотношения (3.20) формулы (3.17-3.19) получаем:

$$a_{222} \approx 4.8 a_{111} \quad a_{222} \approx 25.1 \cdot a_{333}$$

Записывая (3.17-3.19) в терминах  $a_{222}$  получаем (3.21-3.23):

$$\Delta H_y = 0.04 f(r) a_{222} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.21)$$

$$\Delta H_x = -0.44 f(r) a_{222} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.22)$$

$$\Delta H_z = 0.03 f(r) a_{222} \frac{\sigma_K}{E} \quad (3.23)$$

Этот факт свидетельствует о том, что наибольшее изменение магнитного поля за цикл реализуется в направлении, параллельном оси

сжатия и по этому, для практического определения изменения компонент магнитного поля можно вполне ограничиться применением одной единственной формулы (3.22).

Соотношение (3.22) удовлетворительно описывают величины изменения компонент магнитного поля при механоциклировании по осевым и кольцевым значениям напряжений. В формуле учтено, что наибольшее значение изменение магнитного поля реализуется в направлении оси  $x$ . Ключевой в ней является компонента тензора третьего ранга.

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

Принимая в (3.22)  $f(r) = \frac{1}{r}$  получаем:

$$a_{222} = \frac{|\Delta H_x|Er}{0.44\sigma_k} \quad (3.24)$$

Учитываем в (3.24) что,  $|\Delta H_x| = 20$  А/м;  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $r = 1$  м;

$$\sigma_k = 3.4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2.$$

Получаем  $a_{222} = 1.07 \cdot 10^4$  А.

Таким образом формулу (3.24) 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 (3.25):

$$\sigma_k = \frac{|\Delta H_x|Er}{0.44a_{222}} \quad (3.25)$$

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 -  $\sigma_k$  в трубопроводе.

Описанный выше метод измерения компонент магнитного поля в процессе бароциклирования труб отраженный в формулах (3.21-3.23) дает основание, что выражения (3.24, 3.25) могут быть использованы для упрощенного способа определения напряженно-деформированного состояния металла магистральных трубопроводов в полевых условиях с поверхности грунта при проведении магнитометрических измерений.

## 3.2 Магнитометрические измерения при изменении механических напряжений в стенде диаметром 219 мм

### 3.2.1 Характеристика объекта исследований

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. Схема стенда представлена на рисунке 3.19. Общий вид стенда представлен на рисунке 3.20. 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.

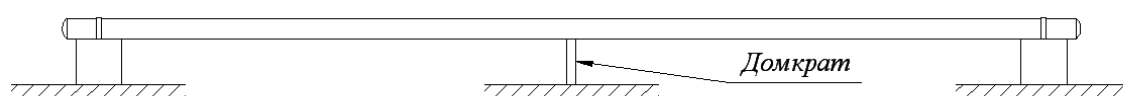


Рисунок 3.19 – Схема испытательного стенда



Рисунок 3.20 – Общий вид испытательного стенда

### 3.2.2 Результаты измерения магнитного поля при изменении избыточного внутреннего давления и изгибе стенда

Цель первого этапа измерений – экспериментальное исследование влияния деформации изгиба на величину необратимого изменения магнитного поля при изменении внутреннего давления в стенде. Измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля проводились с использованием датчика комплекса «МАГ-01». Датчик с помощью проставки из немагнитного материала устанавливался над осью трубы на расстоянии 0,3 м от верхней образующей в точках с линейными координатами  $y$  от -2,5 м до 2,5 м, расстояние между точками измерения вдоль оси трубы 0,5 м. Схема расположения точек измерения с указанием ориентации системы координат датчика представлена на рисунке 3.21.

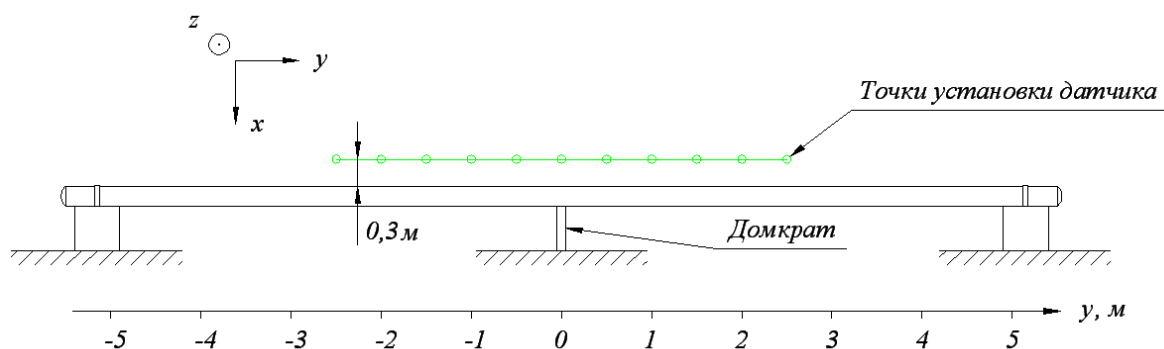
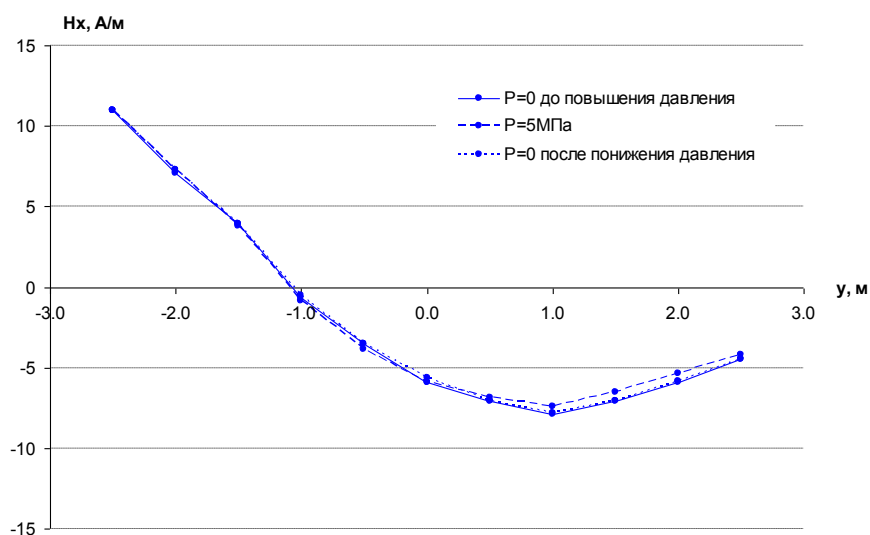


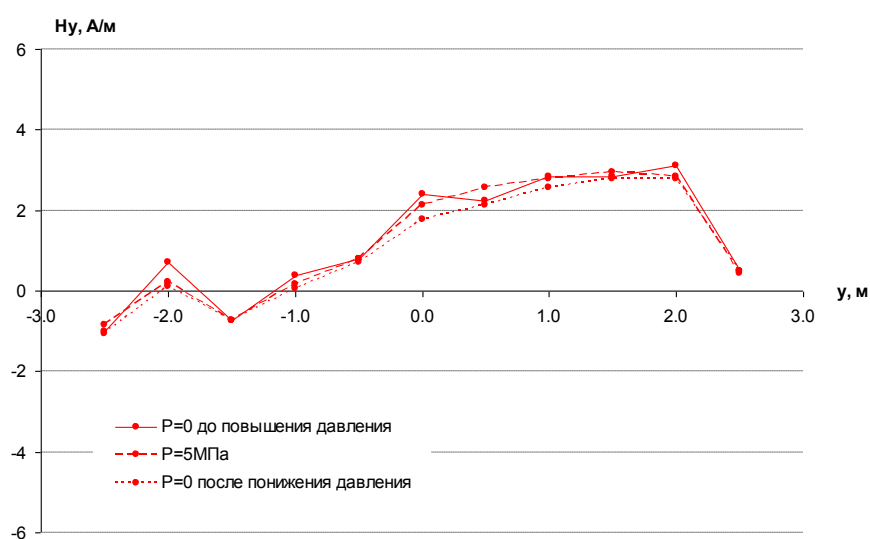
Рисунок 3.21 – Схема расположения точек измерения магнитного поля на первом этапе измерений. Точки измерения обозначены зеленым цветом

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). Определялось собственное поле трубы, т.е. из измеренных значений компонент напряженности вычитались соответствующие компоненты напряженности магнитного поля Земли. Результаты измерений магнитного поля при первом цикле изменения давления представлены на рисунке 3.22. Результаты измерений магнитного поля после пяти циклов изменения давления представлены на рисунке 3.23. Результаты измерений магнитного поля после изгиба трубы представлены на рисунке 3.24. Графики разностей компонент напряженности магнитного поля при  $P = 0$  после понижения давления и при  $P = 0$  до повышения давления представлены на рисунке 3.25.

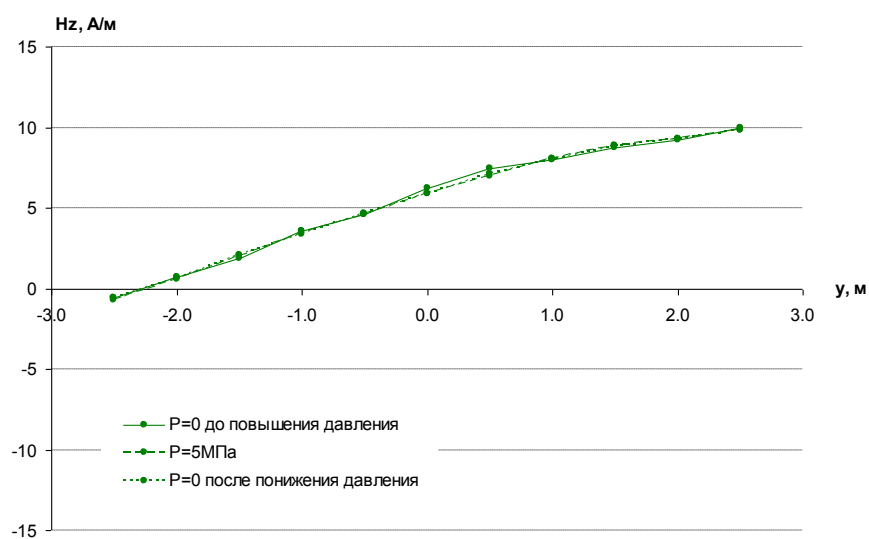
Для количественной оценки изменения магнитограмм при изменении давления будем использовать тот же способ, что и в разделе 3.1. Рассчитаем минимальное и максимальное значение разности компонент напряженности  $\delta H_{ij}$  (3.1), а также среднеквадратичное значение разности соответствующих компонент  $d_j$  (3.2). Результаты расчетов для некоторых вариантов сочетаний величин  $P_1$  и  $P_2$  представлены в таблице 3.6.



а

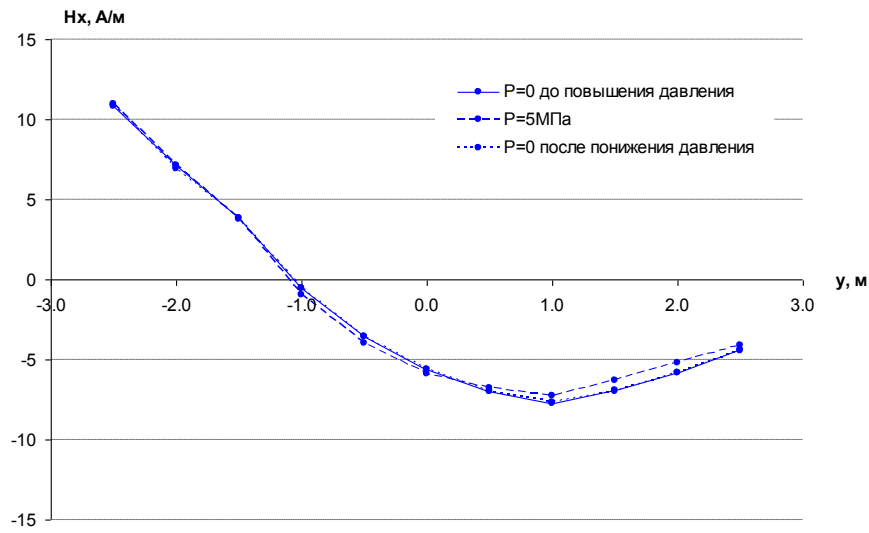


б

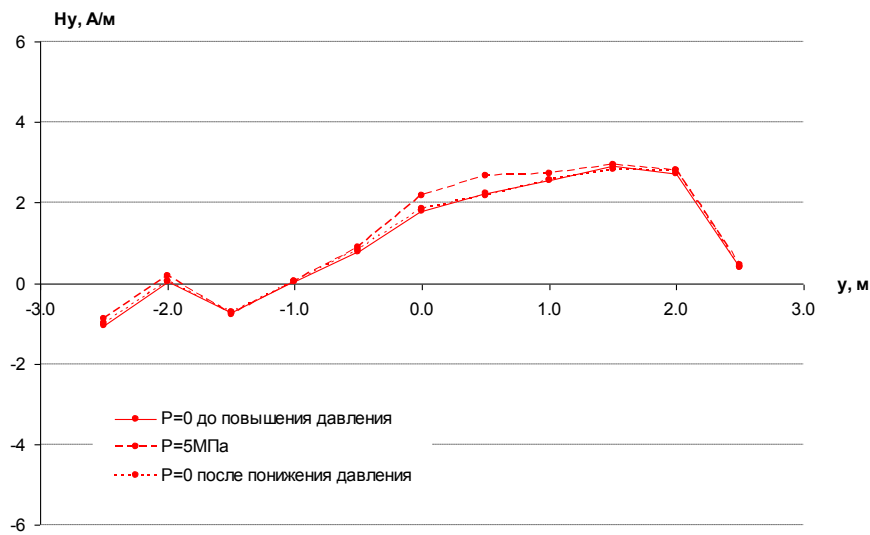


в

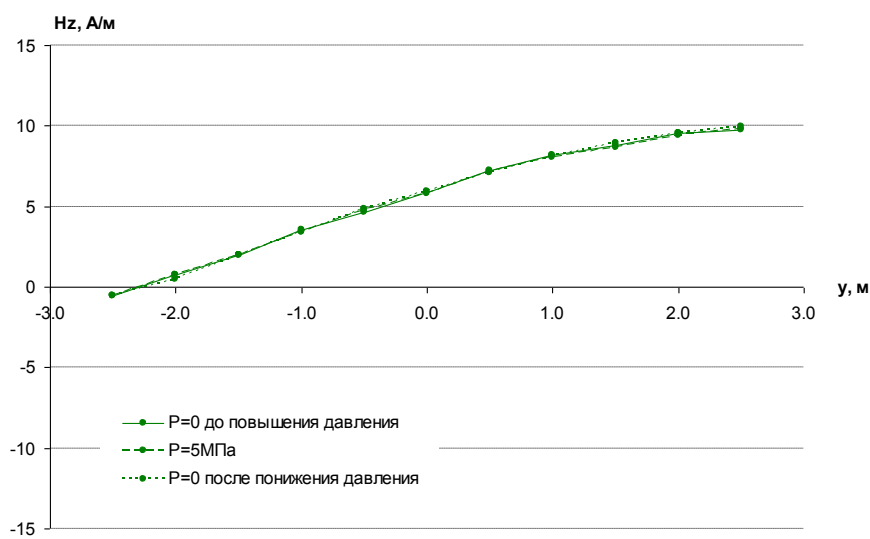
Рисунок 3.22 – Результаты измерений компонент  $H_x$  (а),  $H_y$  (б) и  $H_z$  (в) напряженности магнитного поля при первом цикле изменения давления.



а



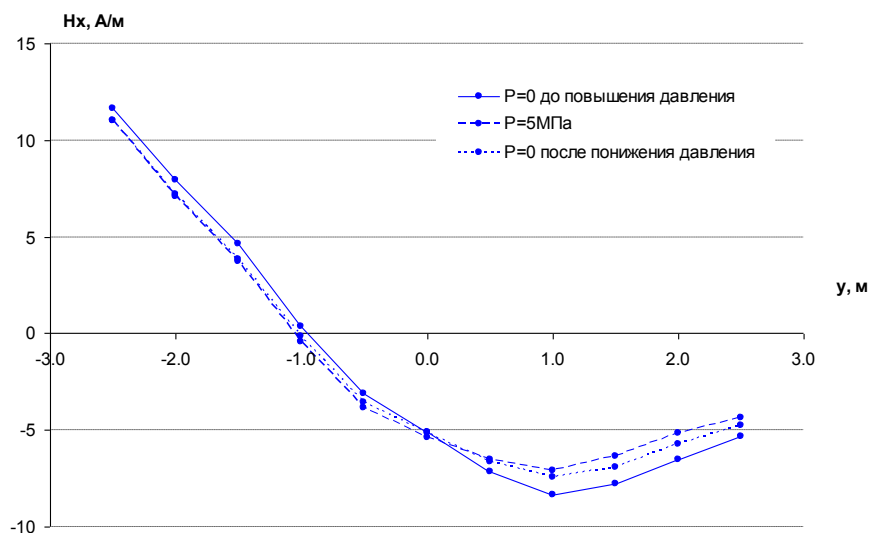
б



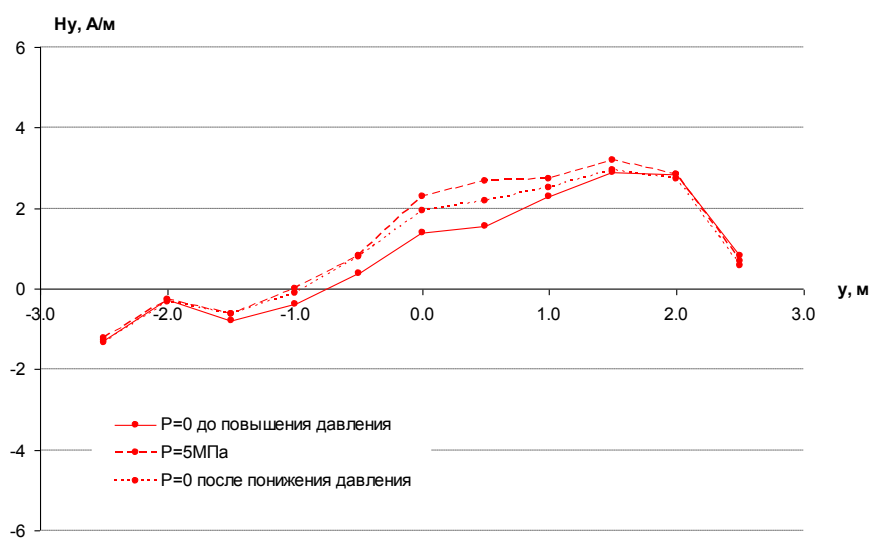
в

Рисунок 3.23 – Результаты измерений компонент  $H_x$  (а),  $H_y$  (б) и  $H_z$  (в) напряженности магнитного поля после пяти циклов изменения давления

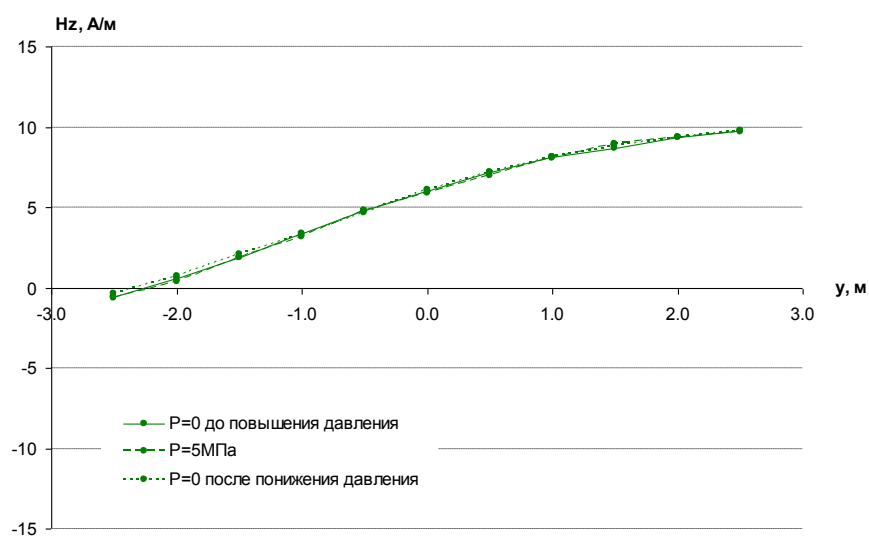




а

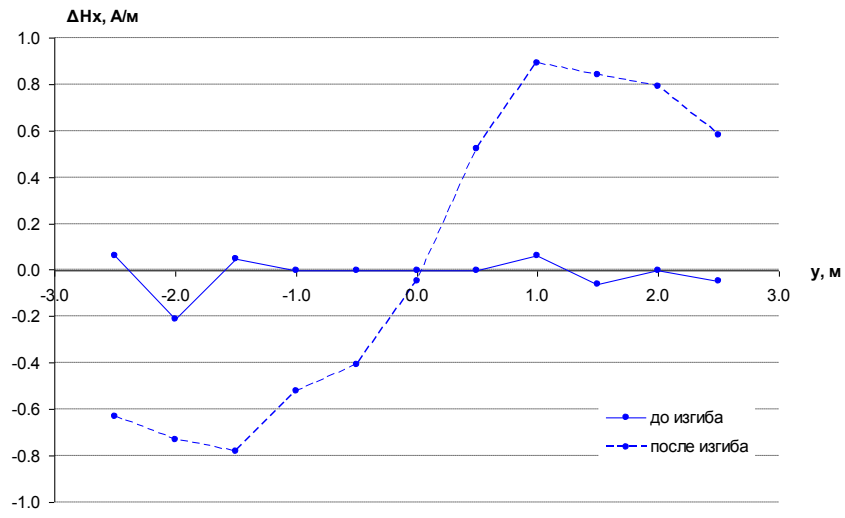


б

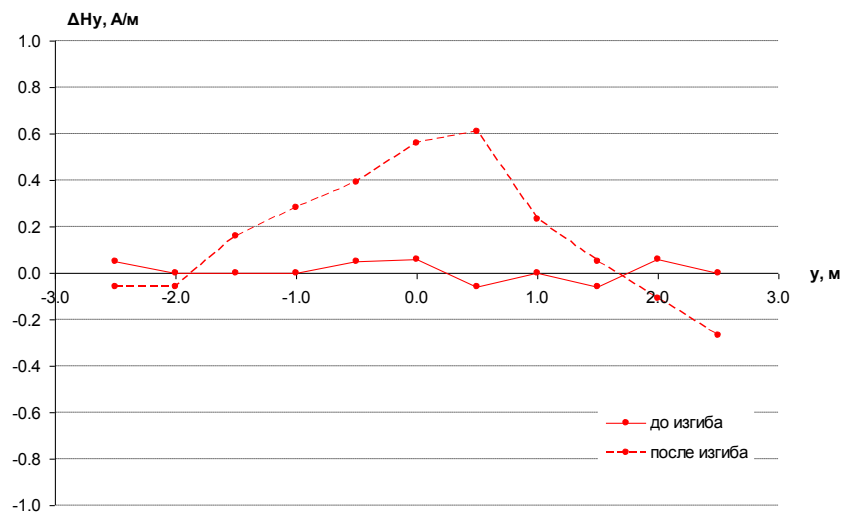


в

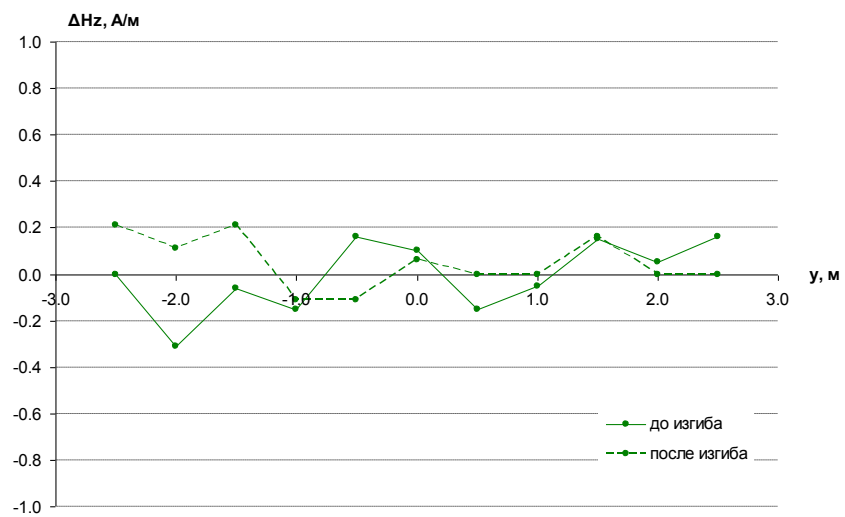
Рисунок 3.24 – Результаты измерений компонент  $H_x$  (а),  $H_y$  (б) и  $H_z$  (в) напряженности магнитного поля после изгиба трубы



а



б



в

Рисунок 3.25 – Графики разностей компонент  $H_x$  (а),  $H_y$  (б) и  $H_z$  (в) напряженности магнитного поля при  $P = 0$  после понижения давления и при  $P = 0$  до повышения давления

Таблица 3.6 – 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

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 3.6, необходимо проводить с учетом погрешностей измерения компонент напряженности магнитного поля. В ходе работы была проведена оценка погрешностей в соответствии с алгоритмами, разработанными в [52]. При расчетах считалось, что углы отклонения магнитных осей датчиков от вертикали и от оси трубопровода не превышают  $0,5^\circ$ . Погрешности, связанные с неточностью определения координат точек измерения, не учитывались, поскольку при измерениях блок датчиков устанавливался через проставку непосредственно на трубопровод. Результаты расчета погрешностей представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Абсолютные погрешности измерения компонент магнитного поля стенда, усредненные по участку измерения

Условия измерения магнитного поля	$\Delta H_x,$ А/м	$\Delta H_y,$ А/м	$\Delta H_z,$ А/м
$P = 0, P = 5,0$ МПа, до и после циклики, после изгиба	0,26	0,38	0,49

Результаты измерений при  $P = 0$  (до повышения давления) и при  $P = 0$  (после понижения давления) до изгиба практически совпадают ( $d_x$  принимает значения 0,11 А/м до циклики и 0,07 А/м после циклики, максимальные отличия компонент напряженности  $H_x$  для всех точек наблюдения не выходят за пределы погрешности измерения). Иначе говоря, до изгиба при изменении давления наблюдаются обратимые изменения магнитного поля. 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).

### **3.2.3 Результаты измерений магнитного поля при изгибе стенда, участки которого имеют разную намагниченность**

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. Измерения трех компонент напряженности постоянного магнитного поля проводились с использованием датчика комплекса «МАГ-01». Датчик с помощью проставки из немагнитного материала устанавливался над осью трубы на расстоянии 0,3 м от верхней образующей в точках с линейными координатами  $y$  от -5,0 м до 5,0 м, расстояние между точками измерения вдоль оси трубы 0,5 м. Схема расположения точек измерения с указанием ориентации системы координат датчика представлена на рисунке 3.26.

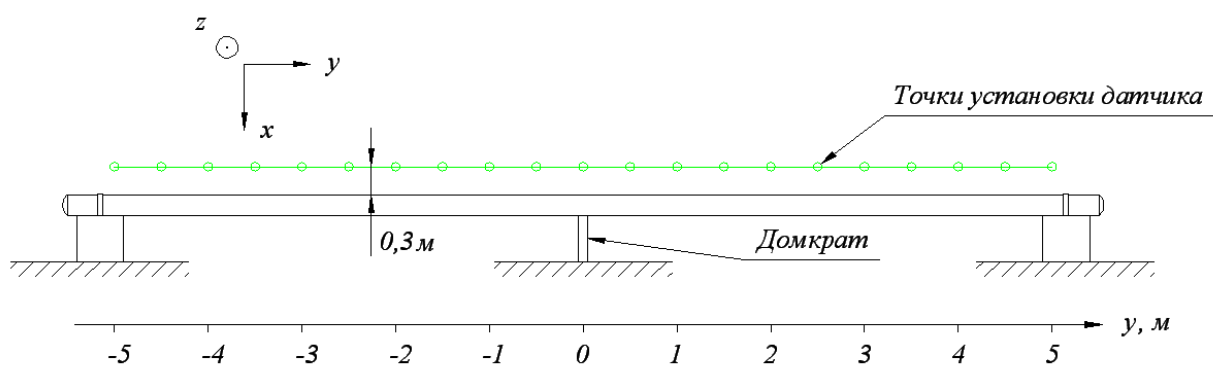
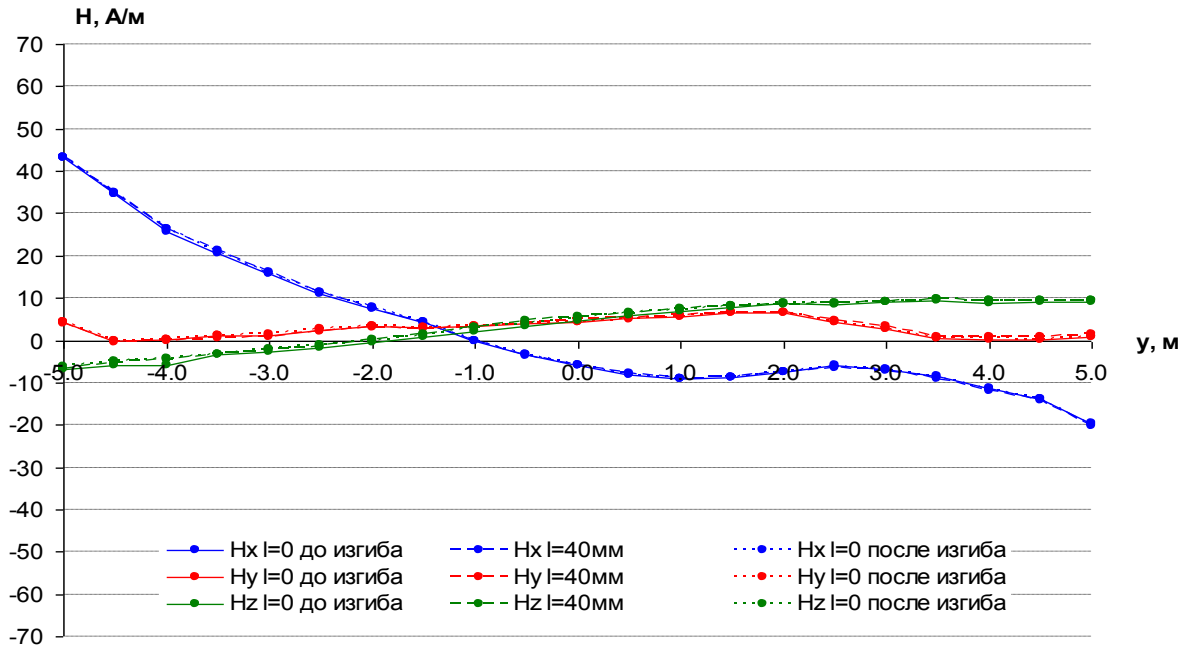


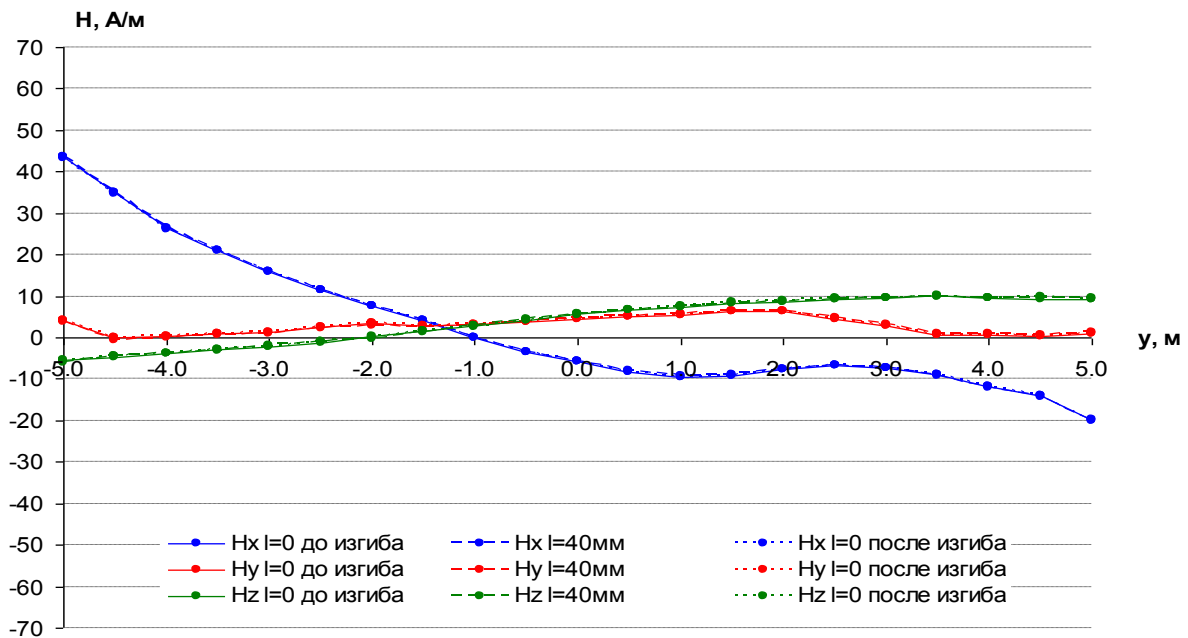
Рисунок 3.26 – Схема расположения точек измерения магнитного поля на втором этапе измерений. Точки измерения обозначены зеленым цветом

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 каждый были направлены навстречу друг другу). Способ изменения намагниченности, а также влияние намагниченности на магнитное поле трубы подробно рассмотрены в разделе 3.2.4. Результаты измерений магнитного поля при исходной намагниченности представлены на рисунке 3.27. Результаты измерений магнитного поля после создания однородной продольной намагниченности представлены на рисунке 3.28. Результаты измерений магнитного поля после создания неоднородной продольной намагниченности представлены на рисунке 3.29.

Зависимости компонент напряженности магнитного поля в точке с линейной координатой  $y = 0$  при циклическом изменении прогиба от номера цикла изменения нагрузки  $n$  для разных вариантов намагниченности представлены на рисунках 3.30 – 3.32.

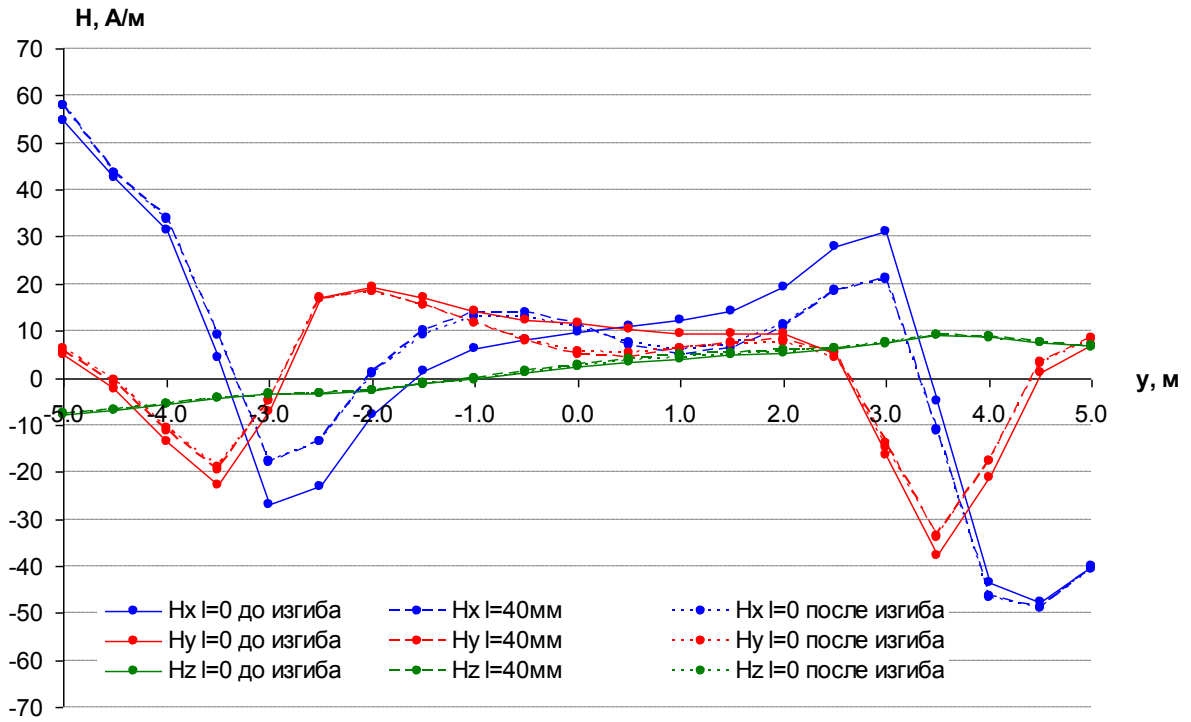


а

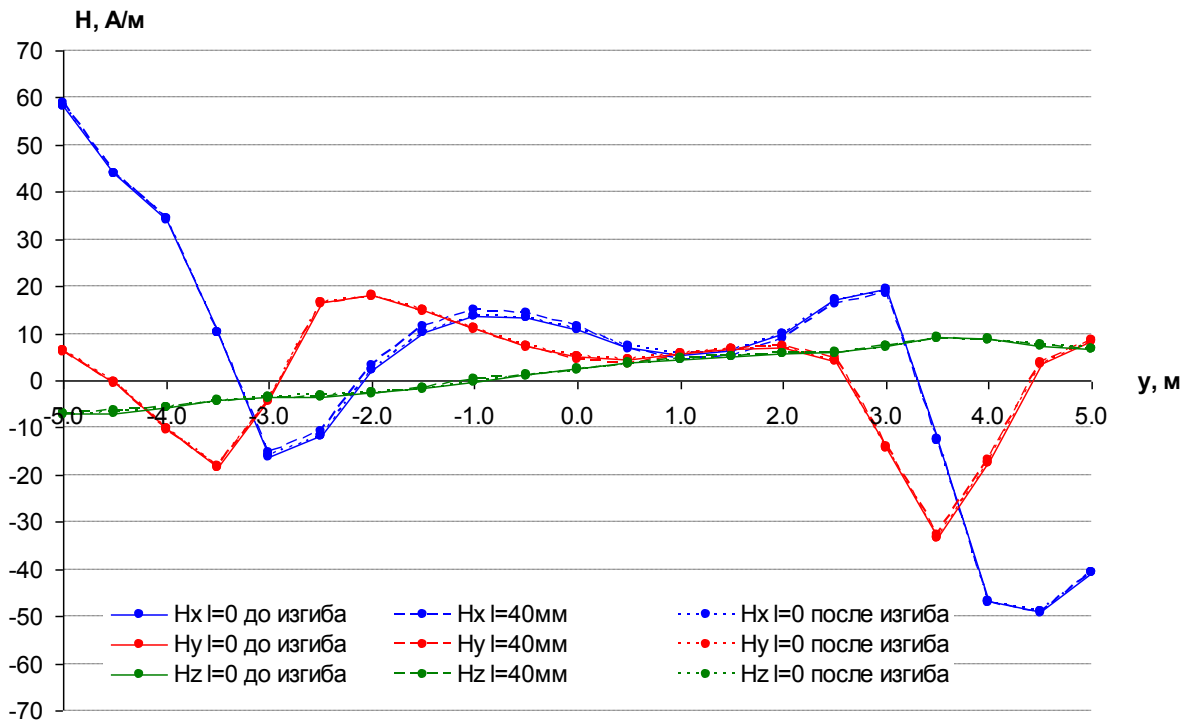


б

Рисунок 3.27 – Результаты измерений компонент напряженности магнитного поля до циклического изменения нагрузки (а) и после циклического изменения нагрузки (б) при исходной намагниченности трубы

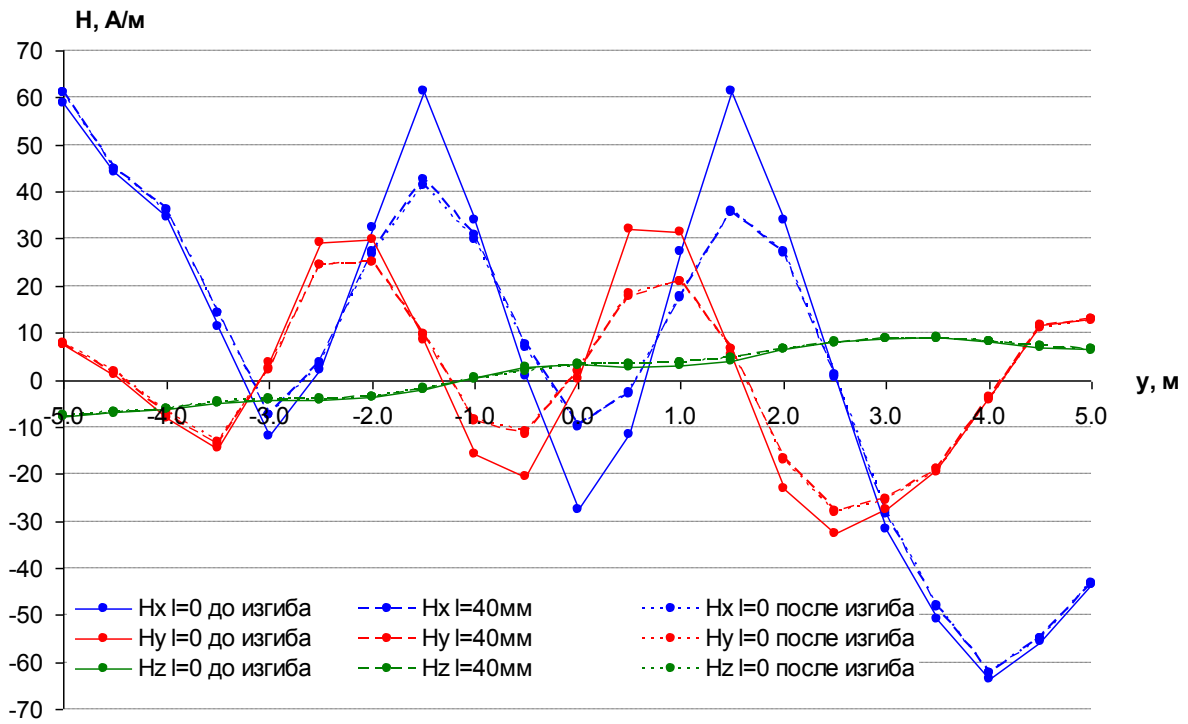


а

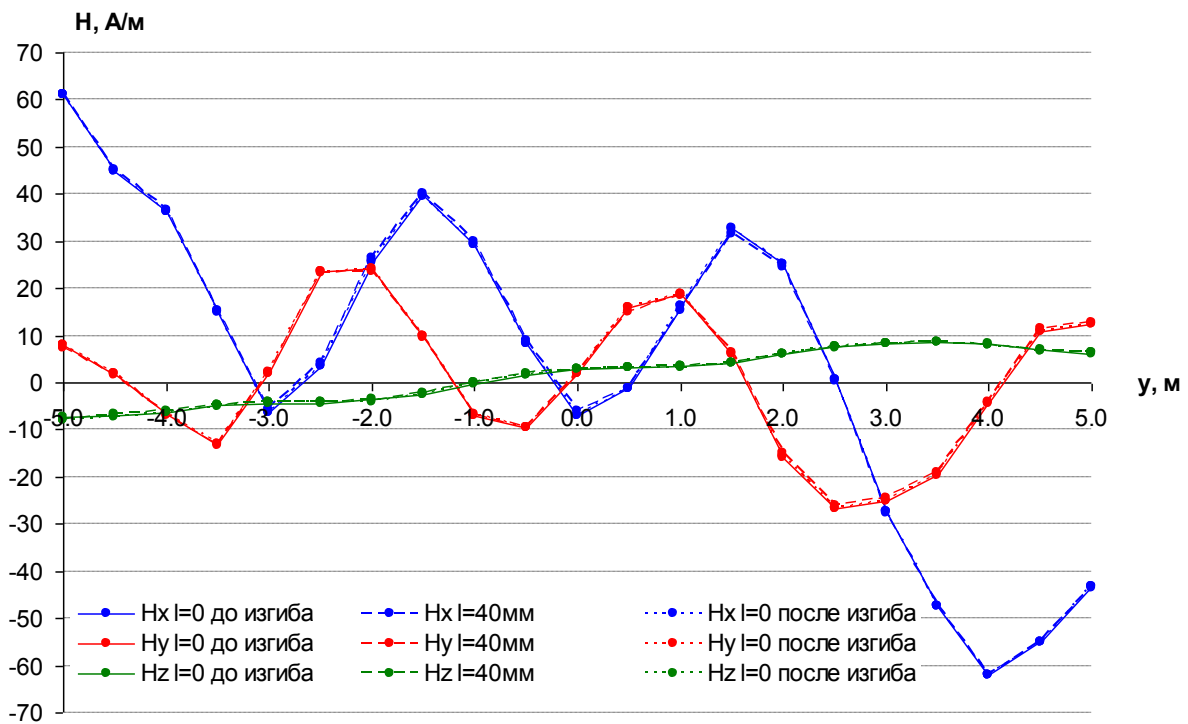


б

Рисунок 3.28 – Результаты измерений компонент напряженности магнитного поля до циклического изменения нагрузки (а) и после циклического изменения нагрузки (б) при однородной намагниченности участка с линейными координатами от -3 до 3 м



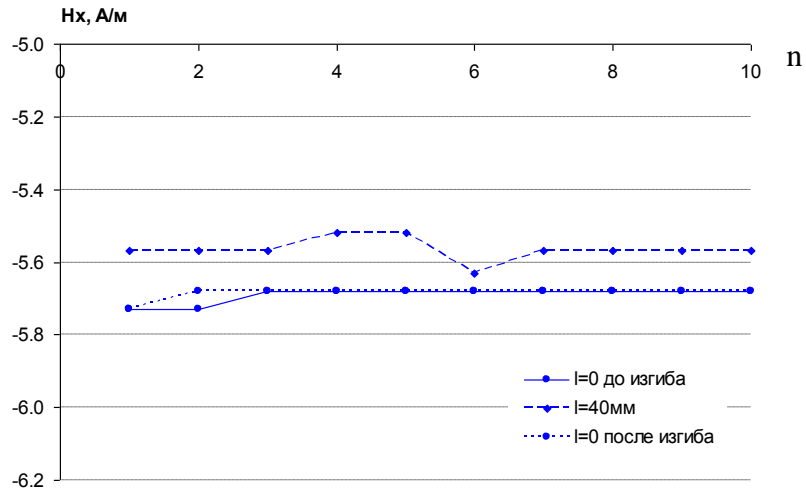
а



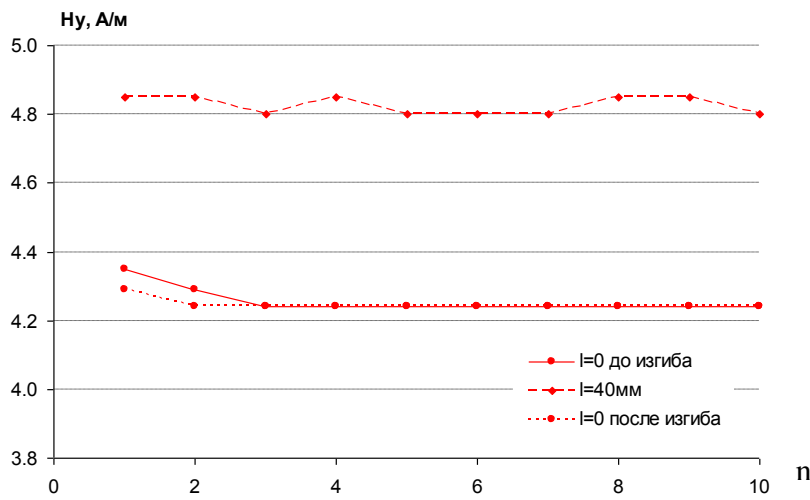
б

Рисунок 3.29 – Результаты измерений компонент напряженности магнитного поля до циклического изменения нагрузки (а) и после циклического изменения нагрузки (б) при неоднородной намагниченности участка с линейными координатами от -3 до 3 м

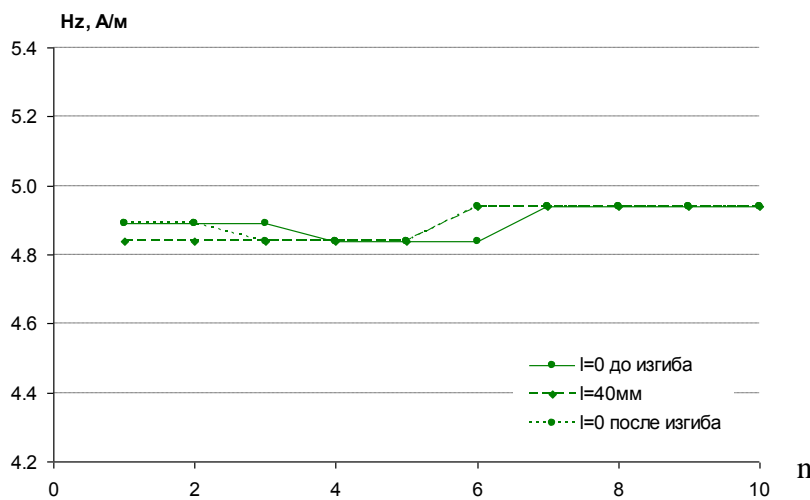




а



б



в

Рисунок 3.30 – Зависимости значений компонент напряженности магнитного поля  $x$ - (а),  $y$ - (б) и  $z$ - (в) при разной величине прогиба от номера цикла при исходной намагниченности трубы.

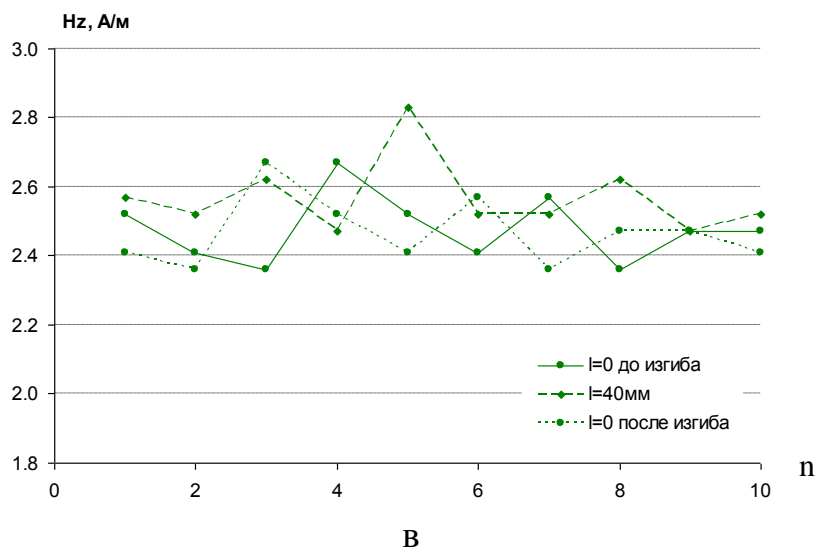
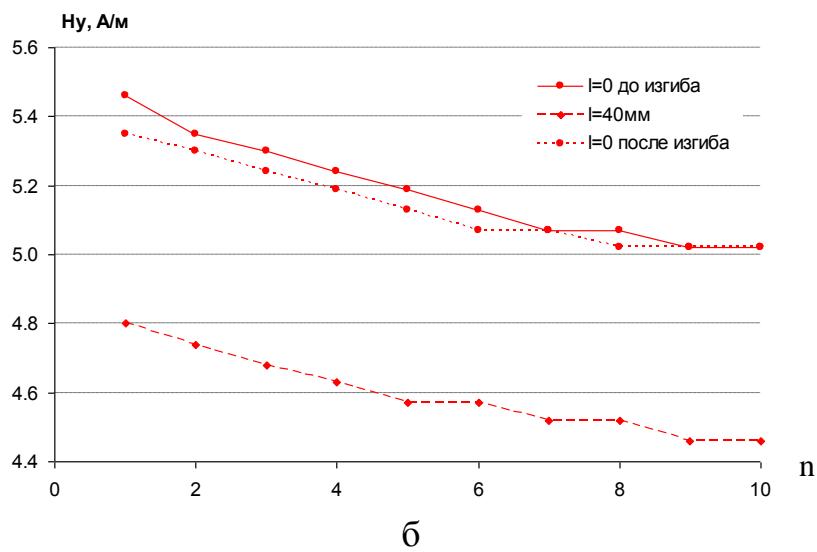
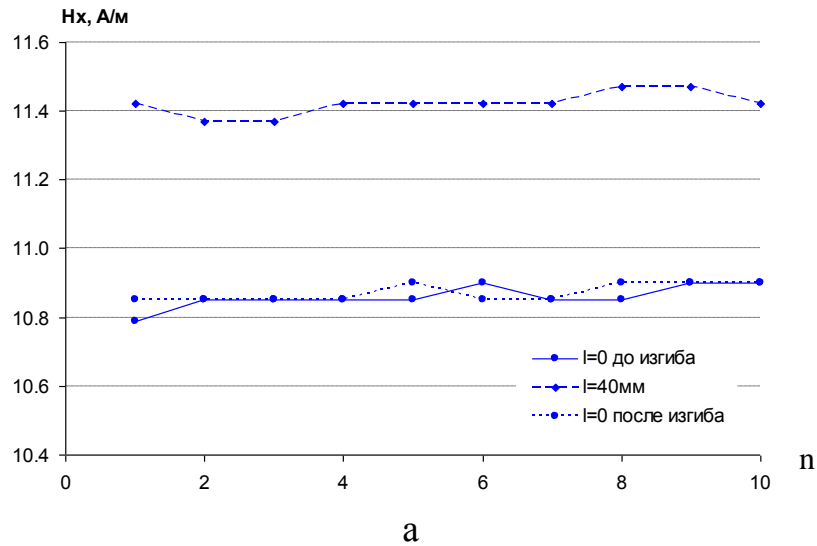
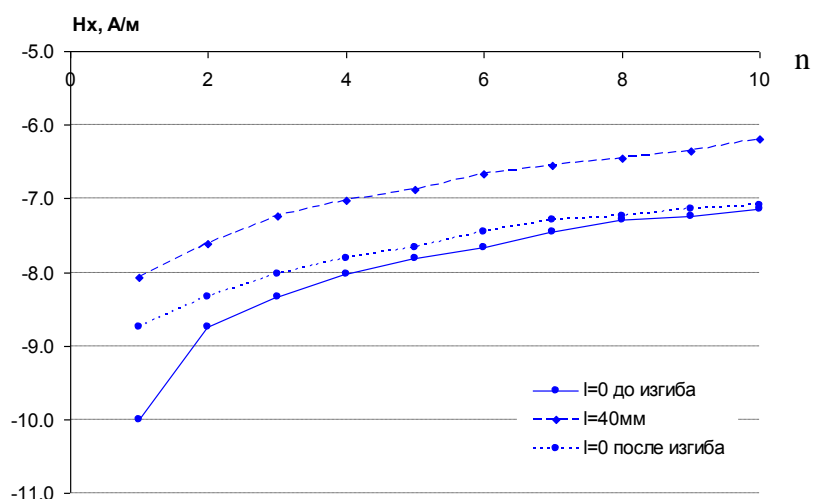
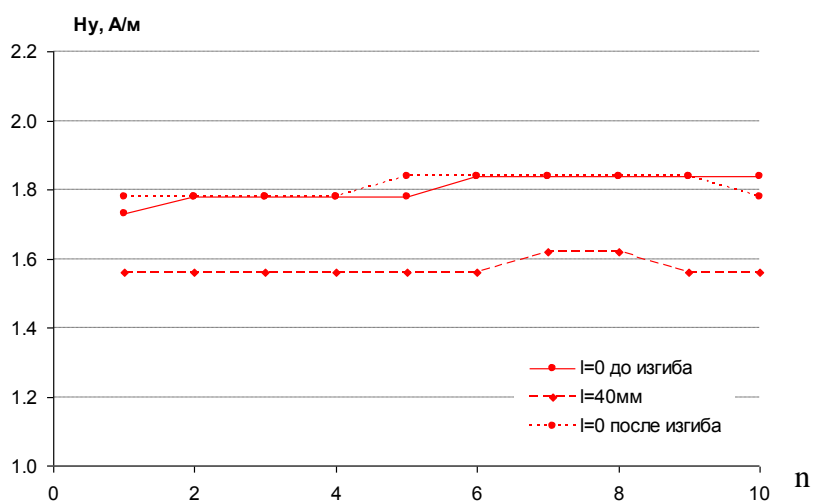


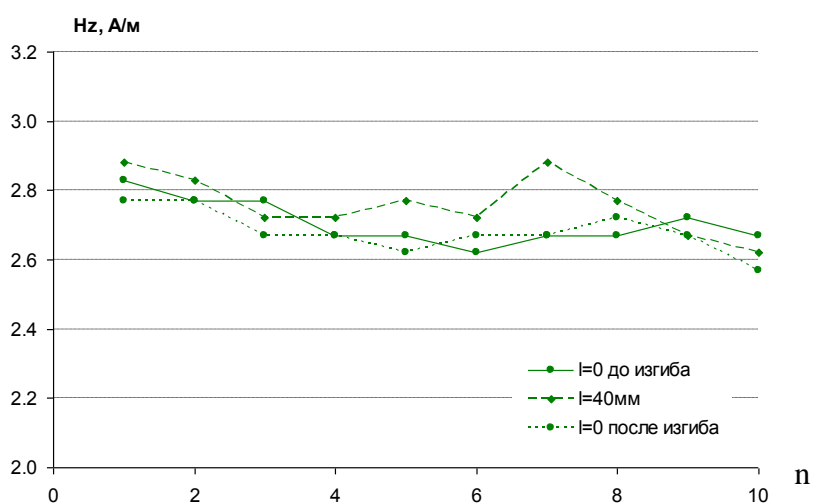
Рисунок 3.31 – Зависимости значений компонент напряженности магнитного поля  $x$ - (а),  $y$ - (б) и  $z$ - (в) при разной величине прогиба от номера цикла при однородной намагниченности участка с линейными координатами от  $-3$  до  $3$  м



а



б



в

Рисунок 3.32 – Зависимости значений компонент напряженности магнитного поля  $x$ - (а),  $y$ - (б) и  $z$ - (в) при разной величине прогиба от номера цикла при неоднородной намагниченности участка с линейными координатами от -3 до

Для количественной оценки изменения магнитограмм при изменении прогиба рассчитаем минимальные и максимальные значения разности компонент напряженности  $\delta H_{ij}$ , а также среднеквадратичные значения разности компонент напряженности  $d_j$ . Эти величины рассчитываются согласно соотношениям (3.1) и (3.2), в которых  $H_{1ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода ( $j$  может принимать значения  $x, y, z$ ) в  $i$ -ой точке измерения при прогибе трубы  $l_1$ ,  $H_{2ij}$  –  $j$ -я компонента напряженности магнитного поля трубопровода в  $i$ -ой точке измерения при прогибе трубы  $l_2$ ,  $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения. Результаты расчетов для некоторых вариантов сочетаний величин  $l_1$  и  $l_2$  представлены в таблице 3.8. Результаты расчета погрешностей измерения компонент напряженности магнитного поля представлены в таблице 3.9.

При исходной намагниченности стенда величины изменений магнитного поля при изгибе (как обратимая, так и необратимая составляющие) сравнимы с погрешностью измерений. Максимальная величина изменения компоненты  $H_x$  магнитного поля не превышает 0,7 А/м. Различия результатов измерений, выполненных при первом цикле изменения прогиба и после десяти циклов изменения прогиба, незначительны. Это связано с тем, что на данном испытательном стенде ранее проводились работы, связанные с циклическим изменением величины прогиба трубы.

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 снятия нагрузки магнитное поле не возвращается к исходным значениям. 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 3.8 – 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		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-0,52	-0,44	-0,25	-0,31	-0,50	-0,72
	$\delta H_{jmax}$ , 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		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-0,31	-0,11	-0,05	-0,16	-0,06	-0,21
$\delta H_{jmax}$ , 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		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-9,75	-6,53	-0,26	-1,10	-0,95	-0,36
	$\delta H_{jmax}$ , 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 нагрузки			После циклического изменения нагрузки		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-10,01	-5,97	-0,31	-0,26	-0,06	-0,46
$\delta H_{jmax}$ , А/м	9,49	3,74	0,31	0,31	0,17	0,26	
$d_j$ , А/м	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		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-25,81	-14,22	-0,62	-1,20	-1,06	-0,46
	$\delta H_{jmax}$ , А/м	17,89	9,02	0,82	0,94	0,73	0,31
	$d_j$ , А/м	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		
	$j$	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
	$\delta H_{jmin}$ , А/м	-25,55	-13,77	-0,93	-0,21	-0,16	-0,52
$\delta H_{jmax}$ , А/м	17,62	9,46	0,67	0,16	0,17	0,26	
$d_j$ , А/м	9,05	5,22	0,35	0,09	0,09	0,23	

Таблица 3.9 – Абсолютные погрешности измерения компонент магнитного поля стенда, усредненные по участку измерения

Условия измерения магнитного поля	$\Delta H_x$ , А/м	$\Delta H_y$ , А/м	$\Delta H_z$ , А/м
Исходная намагниченность, $l = 0, l = 40$ мм, до и после циклики	0,29	0,44	0,52
Однородная намагниченность, $l = 0, l = 40$ мм, до и после циклики	0,33	0,46	0,56
Неоднородная намагниченность, $l = 0, l = 40$ мм, до и после циклики	0,36	0,51	0,61

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 приводит к существенному повышению необратимой составляющей изменения магнитного поля при первом изменении механических напряжений.

### 3.2.4 Влияние намагниченности участков стенда на характер магнитного поля над осью трубы

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

При  $L \gg D$  магнитное поле внутри соленоида считается однородным. Вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси соленоида. Величина напряженности магнитного поля определяется следующим соотношением [87]:

$$H = \frac{NI}{L}, \quad (3.26)$$

где  $I$  – сила тока в витках соленоида.

Если условие  $L \gg D$  не выполняется, то поле внутри соленоида не является однородным. Оценим величину возможной ошибки, связанной с использованием для вычисления не совсем точной в этом случае формулы (3.26). Напряженность магнитного поля в точке, расположенной на оси соленоида конечной длины на расстоянии  $b$  от центра соленоида, определяется следующим соотношением [87]:

$$H = \frac{NI}{L} k, \quad (3.27)$$

$$k = \frac{1}{2} \left( \frac{a-b}{\sqrt{r^2 + (a-b)^2}} + \frac{a+b}{\sqrt{r^2 + (a+b)^2}} \right), \quad (3.28)$$

где  $r = D/2$  – радиус соленоида,  $a = L/2$  – половина длины соленоида.

Построим зависимость  $k(b)$  для рассматриваемого соленоида (рисунок 3.33).

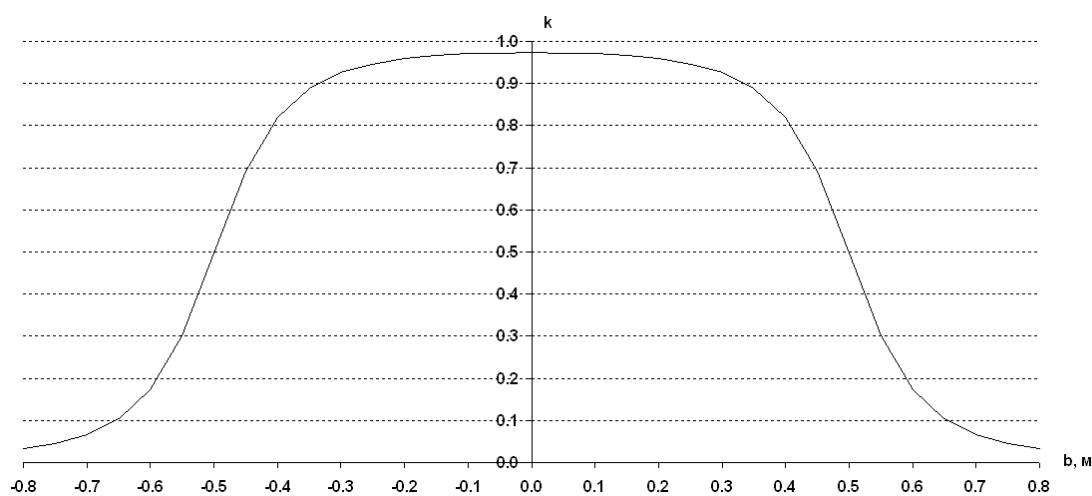


Рисунок 3.33 – Зависимость  $k(b)$

Значения коэффициента  $k$  для некоторых вариантов расстояния от центра соленоида представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Отношение напряженности поля на оси соленоида конечных размеров при разных расстояниях до его центра к напряженности поля, рассчитанной согласно (3.26)

$b, \text{ м}$	$k$	$b, \text{ м}$	$k$
0,0	0,973	0,6	0,173
0,1	0,970	0,7	0,067
0,2	0,959	0,8	0,032
0,3	0,926	0,9	0,019
0,4	0,820	1,0	0,012
0,5	0,497	1,1	0,008

Таким образом, поле в центре данного соленоида ( $b = 0$ ) составляет 97% от величины, рассчитанной согласно (3.26). При удалении от центра соленоида поле все больше отличается от значения, рассчитанного с помощью (3.26). На расстояниях до 300 мм в обе стороны от центра соленоида можно считать, что напряженность поля составляет не менее 90 % от величины, рассчитанной согласно (3.26).

Исследуемый объект (труба с наружным диаметром 219 мм) изготовлен из стали 20. Для этого материала характерно значение коэрцитивной силы 318 – 382 А/м. Для перемагничивания участка образца в нужном направлении необходимо, чтобы внешнее магнитное поле превосходило величину коэрцитивной силы данного материала. При этом необходимо, чтобы магнитное поле в точках наблюдения после изменения намагниченности стенда не выходило за пределы диапазона измерений датчика ( $\pm 100$  А/м, при этом измеряемая величина представляет собой сумму магнитного поля стенда и магнитного поля Земли). С учетом этих требований для создания однородной намагниченности на участке с координатами  $y$  от -3,0 до 3,0 м использовано внешнее поле  $H \approx 580$  А/м, направленное отрицательно вдоль оси  $y$ , а для создания неоднородной намагниченности – внешнее поле  $H \approx 480$  А/м, направленное положительно вдоль оси  $y$ ; с использованием такого поля перемагничивались участки с координатами  $y$  от -1,5 м до 0,0 м и от 1,5 м до 3,0 м. Перемагничивание указанных участков в обратном направлении должно привести к понижению максимальных

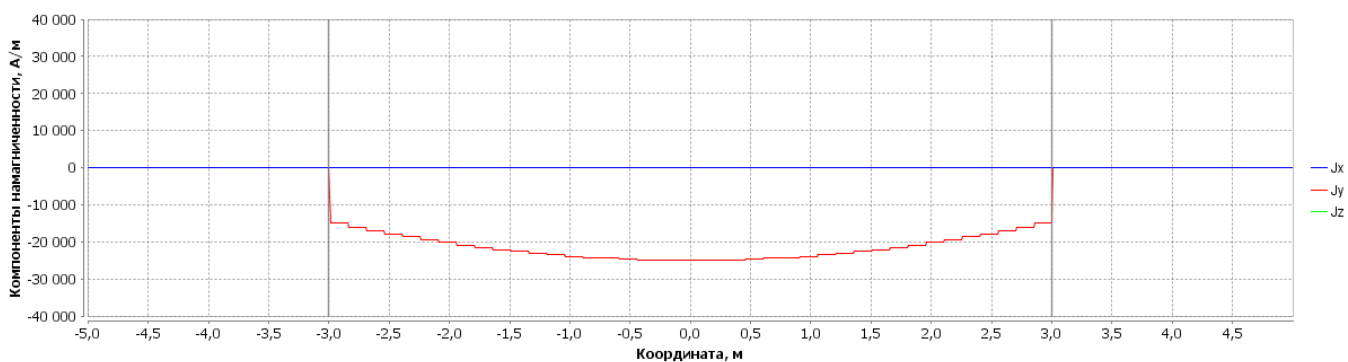


значений намагниченности на участках с координатами  $y$  от  $-3,0$  м до  $-1,5$  м и от  $0,0$  м до  $1,5$  м. Поэтому для того, чтобы получить на чередующихся участках длиной  $1,5$  м намагниченность, противоположную по направлению, но близкую по абсолютной величине, при создании обратной намагниченности было использовано несколько меньшее значение магнитного поля соленоида.

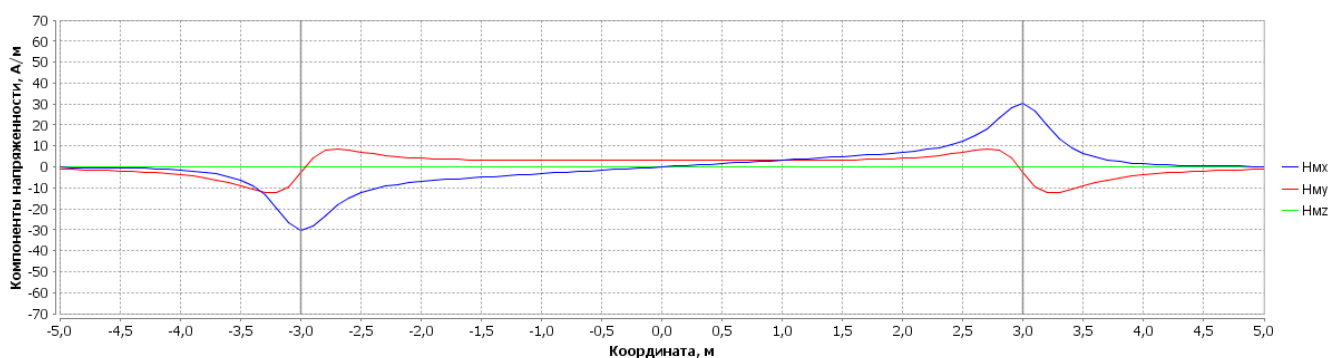
Подставив в (3.26) параметры рассматриваемого соленоида, получим следующее выражение:  $H$  [А/м] =  $481 I$  [А]. Следовательно, для создания поля  $H \approx 580$  А/м необходима сила тока  $I \approx 1,2$  А, а для создания поля  $H \approx 480$  А/м необходима сила тока  $I \approx 1,0$  А.

Анализ петли гистерезиса магнитомягкого железа [3] показывает, что при указанных значениях перемещающего поля намагниченность участков стенда должна достигать  $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$  А/м. Разработанное в рамках работы [52] программное обеспечение позволяет составить модель стенда с учетом предполагаемых величины и направления намагниченности отдельных участков стенда и произвести расчеты магнитного поля этой модели в точках, расположенных над осью стенда (на том же расстоянии от оси, что и точки измерения магнитного поля). На рисунках 3.34 и 3.35 представлены результаты моделирования, а также, для сравнения, результаты измерений магнитного поля (непосредственно после изменения намагниченности) для двух вариантов намагниченности участков стенда (однородная и неоднородная намагниченность). На рисунках сплошными вертикальными линиями серого цвета обозначены границы участков с различающейся намагниченностью. Сравнение рисунков 3.34б и 3.34в, а также 3.35б и 3.35в, показывает, что на участке с координатами  $y$  от  $-3,0$  м до  $3,0$  м наблюдается качественное совпадение результатов моделирования и экспериментальных данных. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными на участках с координатами  $y$  от  $-5,0$  м до  $3,0$  м и от  $3,0$  м до  $5,0$  м объясняется влиянием

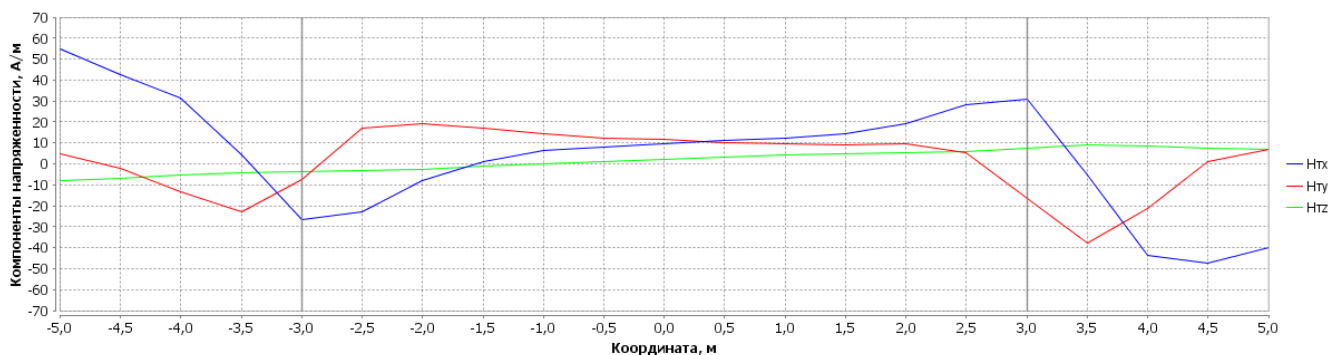
намагниченности соответствующих участков стенда (при моделировании намагниченность этих участков считалась нулевой).



а

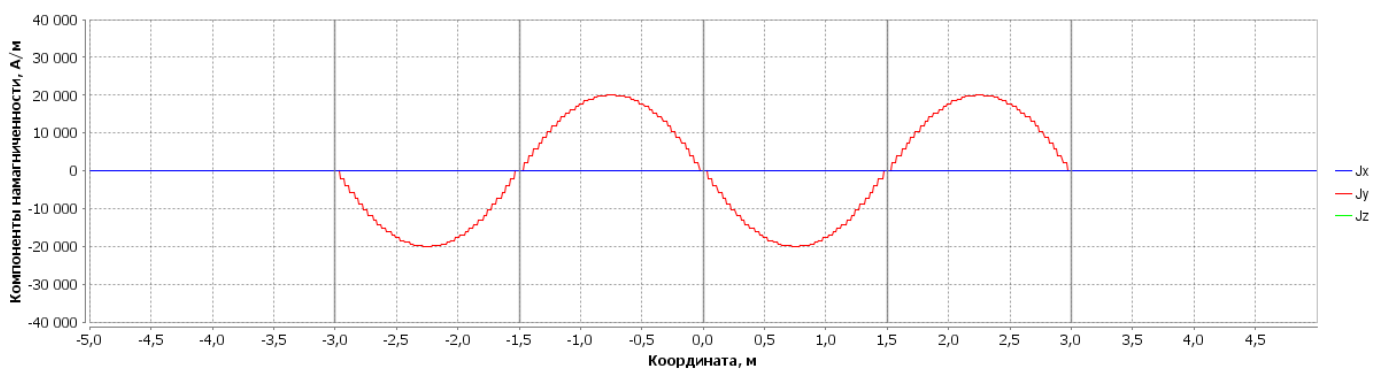


б

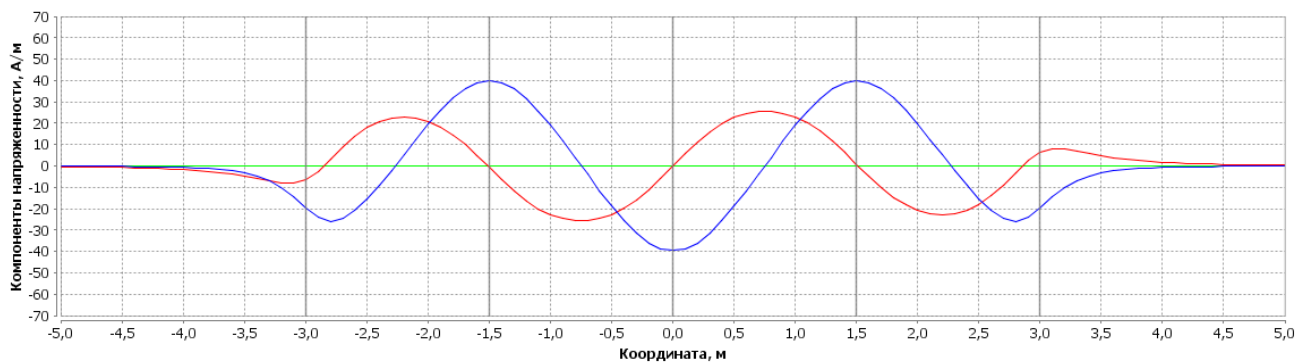


в

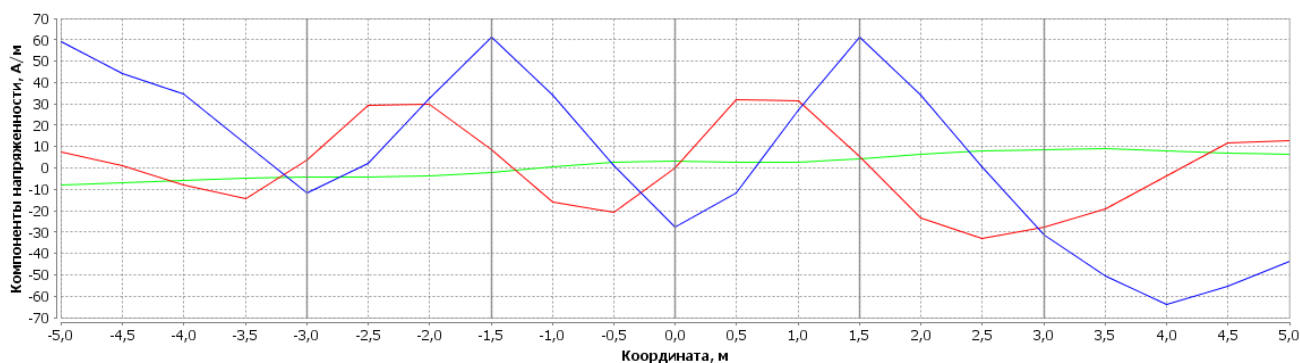
Рисунок 3.34 – Зависимость намагниченности участков стенда от линейной координаты, используемая при расчете магнитного поля (а), результаты расчета магнитного поля модели (б), результаты измерения магнитного поля стенда (в) для однородной намагниченности участка стенда с линейными координатами  $y$  от  $-3,0$  м до  $3,0$  м



а



б



в

Рисунок 3.35 – Зависимость намагниченности участков стенда от линейной координаты, используемая при расчете магнитного поля (а), результаты расчета магнитного поля модели (б), результаты измерения магнитного поля стенда (в) для неоднородной намагниченности участка стенда с линейными координатами  $y$  от  $-3,0$  м до  $3,0$  м

На основании результатов измерения магнитного поля над осью стенда рассчитаем усредненную намагниченность участков стенда с использованием алгоритмов, предложенных в [52]. Расчеты проведем для поля, измеренного

непосредственно после изменения намагниченности, и для поля, измеренного после первого приложения нагрузки при  $l = 40$  мм, поскольку последующие магнитограммы (после снятия нагрузки и после циклического изменения давления) практически совпадают с магнитограммами после первого приложения нагрузки при  $l = 40$  мм. Результаты расчетов для однородной намагниченности представлены на рисунках 3.36 и 3.37, а для неоднородной намагниченности – на рисунках 3.38 и 3.39. Результаты расчетов показывают, что используемая модель источников позволяет получить удовлетворительное совпадение расчетного и измеренного полей. Сравнение результатов расчета намагниченности при  $l = 0$  и при  $l = 40$  мм показывает, что после изгиба намагниченность в центральной части стэнда по абсолютной величине уменьшилась.

### **3.2.5 Оценка механических напряжений, вызванных повышением давления и изгибом стэнда**

Оценим величину продольных и кольцевых механических напряжений, связанных с изменением внутреннего давления в испытательном стэнде. Кольцевые напряжения  $\sigma_k$  можно определить по приближенной формуле (3.3). Продольные напряжения  $\sigma_{np}$ , определяются соотношением (3.4). В нашем случае  $D_n = 219$  мм,  $\delta = 5$  мм,  $D_g = 209$  мм. Тогда  $\sigma_k = 20,9P$ ,  $\sigma_{np} = 10,2P$ . Таким образом, при изменении внутреннего давления в испытательном стэнде 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 [88]. Таким образом, можно считать, что изменение НДС стэнда в ходе данных экспериментальных работ происходило в области упругих деформаций.

### 3.3 Обобщение результатов главы 3

1. Установлено, что при изменении избыточного внутреннего давления в стенде диаметром 1420 мм происходят изменения постоянного магнитного поля. Величина изменения существенно различается для различных точек измерения, что связано с различиями исходной намагниченности труб, из которых сварен испытательный стенд. При первом повышении давления от 0 до 6,0 МПа изменения вертикальной составляющей магнитного поля в разных точках измерения, расположенных над осью стенда на расстоянии 0,5 м от верхней образующей, составили от -37,0 А/м до 33,5 А/м. После 10 циклов изменения давления изменения вертикальной составляющей при том же изменении давления составили от -12,9 А/м до 14,7 А/м. Таким образом, величина изменения магнитного поля определяется в том числе и историей изменения механических напряжений в объекте контроля.

2. При периодическом изменении механических напряжений на протяжении первых нескольких циклов изменения магнитного поля являются необратимыми. На первом цикле среднеквадратичное значение разности вертикальных компонент магнитного поля  $d_x$  при нулевом давлении до и после повышения давления до 6,0 МПа составляет 9,70 А/м. После 10 циклов изменения можно считать обратимыми, магнитное поле после повышения давления и последующего снижения давления до нуля возвращается к исходным значениям ( $d_x = 0,54$  А/м; максимальные отличия компонент напряженности для всех точек наблюдения не выходят за пределы погрешности измерения).

3. Зависимость магнитного поля от механических напряжений не является однозначной. Имеет место характерный гистерезис – кривая изменения магнитного поля при увеличении механических напряжений не совпадает с кривой изменения магнитного поля при уменьшении механических напряжений.

4. В стенде диаметром 219 мм при деформации изгиба наблюдаются изменения постоянного магнитного поля, что позволяет определить факт изменения механических напряжений, связанных с изгибом, при периодических дистанционных магнитометрических измерениях.

5. Изменение намагниченности металла трубы приводит к существенному повышению необратимой составляющей изменения магнитного поля при первом изменении механических напряжений. Так, при однородной намагниченности участка стенда при первом изменении прогиба от  $l = 0$  до  $l = 40$  мм среднеквадратичное значение разности вертикальных компонент магнитного поля  $d_x = 6,57$  А/м, а после 10 циклов изменения прогиба  $d_x = 0,77$  А/м. При неоднородной намагниченности участка стенда значения  $d_x$  для указанных условий составляют 8,99 А/м и 0,57 А/м соответственно.

6. 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.

7. Эффект перехода от необратимого к обратимому изменению магнитного поля после определенного количества циклов изменения давления в трубопроводе может использоваться для определения участков трубопровода, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния металла.

## **ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

В данной 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.

### **4.1 Методика интегральной оценки поврежденности участков подземных трубопроводов**

#### **4.1.1 Область применения**

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. Интегральная оценка поврежденности участков подземных трубопроводов осуществляется с помощью проведения измерений постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта при двух разных значениях внутреннего давления в трубопроводе.

Возможность применения данной методики на конкретном участке трубопровода определяется величиной изменения давления, а также геометрическими характеристиками трубопровода – диаметром и глубиной залегания. Методика может быть применена, если изменения магнитного

поля в точках измерения при вариации давления превышают погрешности измерений магнитного поля.

#### **4.1.2 Общие положения**

При изменении напряженного состояния трубопровода, вызванного изменением внутреннего давления, происходит изменение намагниченности металла трубопровода (магнитоупругий эффект). Количественная оценка изменения механических напряжений по изменению магнитного поля возможна лишь для образцов, которые заранее намагничены определенным образом (либо для образцов, исходная намагниченность которых известна). Намагниченность металла подземного трубопровода формируется под воздействием множества факторов. Исходная термоостаточная намагниченность, возникающая в процессе производства труб, может изменяться при строительстве трубопровода и в процессе его эксплуатации под влиянием, например, магнитных внутритрубных дефектоскопов. Кроме того, имеет место намагниченность, индуцированная магнитным полем Земли. В результате намагниченность трубопровода приобретает достаточно сложный вид, что отражается в распределении магнитного поля вдоль проекции оси трубопровода на поверхность грунта.

При изменении механических напряжений на некотором участке подземного трубопровода происходит изменение намагниченности, а следовательно, и магнитного поля на поверхности грунта. При этом величина изменения зависит от магнитной предыстории данного участка трубопровода, которая при проведении измерений неизвестна. Магнитная предыстория может существенно отличаться для разных участков, поскольку при строительстве трубопровода вектора суммарных магнитных моментов соседних труб располагаются произвольным образом. В результате усредненная продольная намагниченность разных труб при одном и том же изменении давления может как возрастать, так и убывать, что связано с различной ориентацией векторов намагниченности относительно поверхности труб. На достаточно протяженных участках трубопровода



(включающих 5 и более труб) в качестве интегральной характеристики изменения намагниченности могут использоваться статистические характеристики (в частности, среднеквадратичное значение) разности значений напряженности постоянного магнитного поля, измеренных при разных механических напряжениях. Предполагается, что чем больше (в среднем по участку) изменяется намагниченность (а следовательно, и постоянное магнитное поле на поверхности грунта) при одном и том же изменении механических напряжений, тем больше предрасположенность данного участка к образованию дефектов.

#### **4.1.3 Порядок проведения работ по интегральной оценке поврежденности участков подземных трубопроводов**

Для реализации рассматриваемой методики необходимо выполнить следующую последовательность действий.

##### **1 Сбор исходных данных.**

1.1 Изучают и анализируют проектную, исполнительную и эксплуатационно-технологическую документацию (проектные продольные планы и профили рассматриваемого участка трубопровода; журналы изоляционных и сварочных работ на рассматриваемом участке трубопровода; технологические схемы рассматриваемого участка трубопровода; результаты ВТД; данные о ремонтах, проведенных на рассматриваемом участке трубопровода). Анализ указанной документации проводят с целью получения следующей информации: длины и порядок расположения труб на рассматриваемом участке трубопровода; конструктивные особенности трубопровода, имеющиеся на рассматриваемом участке (тройники, врезки и т. п.); пересечения обследуемого трубопровода на рассматриваемом участке с дорогами, другими трубопроводами, кабелями связи; наличие и расположение на местности маркеров ВТД; наличие и расположение на местности объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ).

1.2 Выполняют предварительный осмотр трассы трубопровода с целью оценки пригодности состояния трассы трубопровода для проведения работ; оценки наличия на участке измерений магнитных помех (посторонних ферромагнитных предметов); оценки состояния объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ); уточнения границ участка измерений на местности (длина участка измерений – не менее 1000 м).

## 2 Проведение измерений.

2.1 Для измерений используют оборудование, позволяющее проводить поиск оси трубопровода, определение глубины заложения и выполнять измерение вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля, например, комплекс «МАГ-01» разработки ОАО «Гипрогазцентр» [83].

2.2 Измеряют напряженность магнитного поля трубопровода до изменения внутреннего давления в трубопроводе. Измерения проводят в точках, расположенных на проекции оси трубопровода на поверхность грунта с шагом не более 1 м вдоль оси трубопровода.

2.3 Изменяют внутреннее давление в трубопроводе.

2.4 Измеряют напряженности магнитного поля трубопровода после изменения внутреннего давления в трубопроводе. При измерениях датчик располагают в тех же точках, в которых проводились измерения до изменения давления.

2.5 Записывают линейные координаты (относительно начала участка измерений) имеющихся на участке измерений возможных источников постоянного магнитного поля (железобетонные плиты, посторонние ферромагнитные предметы и т.п.).

## 3 Обработка результатов измерений.

3.1 Исключают из рассмотрения участки с магнитными помехами (металлические предметы, положение которых известно при проведении измерений, краны, тройники, врезки, пересечения с коммуникациями).

3.2 В каждой точке измерения рассчитывают разность вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля при разном давлении  $\delta H_{xi}$  ( $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения):

$$\delta H_{xi} = H_{x1i} - H_{x2i}, \quad (4.1)$$

где  $H_{x1i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения до изменения давления,  $H_{x2i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения после изменения давления.

3.3 Рассчитывают среднеквадратичное значение разности вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля для всего участка измерений:

$$d_0 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta H_{xi}^2}. \quad (4.2)$$

3.4 Рассчитывают среднеквадратичные значения разности вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля отдельно для участков длиной 50 - 100 м. Среднеквадратичное значение для  $j$ -го участка рассчитывается по формуле

$$d_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_i \delta H_{xi}^2}. \quad (4.3)$$

В (4.3) суммирование производится по точкам измерения, расположенных в пределах рассматриваемого участка,  $m$  – количество точек измерения в пределах рассматриваемого участка.

3.5 Проводят сравнение рассчитанных значений  $d_j$  и величины  $d_0$ . Участки, для которых выполняется условие

$$d_j > d_0 \quad (4.4)$$

считаются более поврежденными, чем остальные участки.

3.6 Алгоритм интегральной оценки поврежденности участков трубопровода представлен на рисунке 4.1.

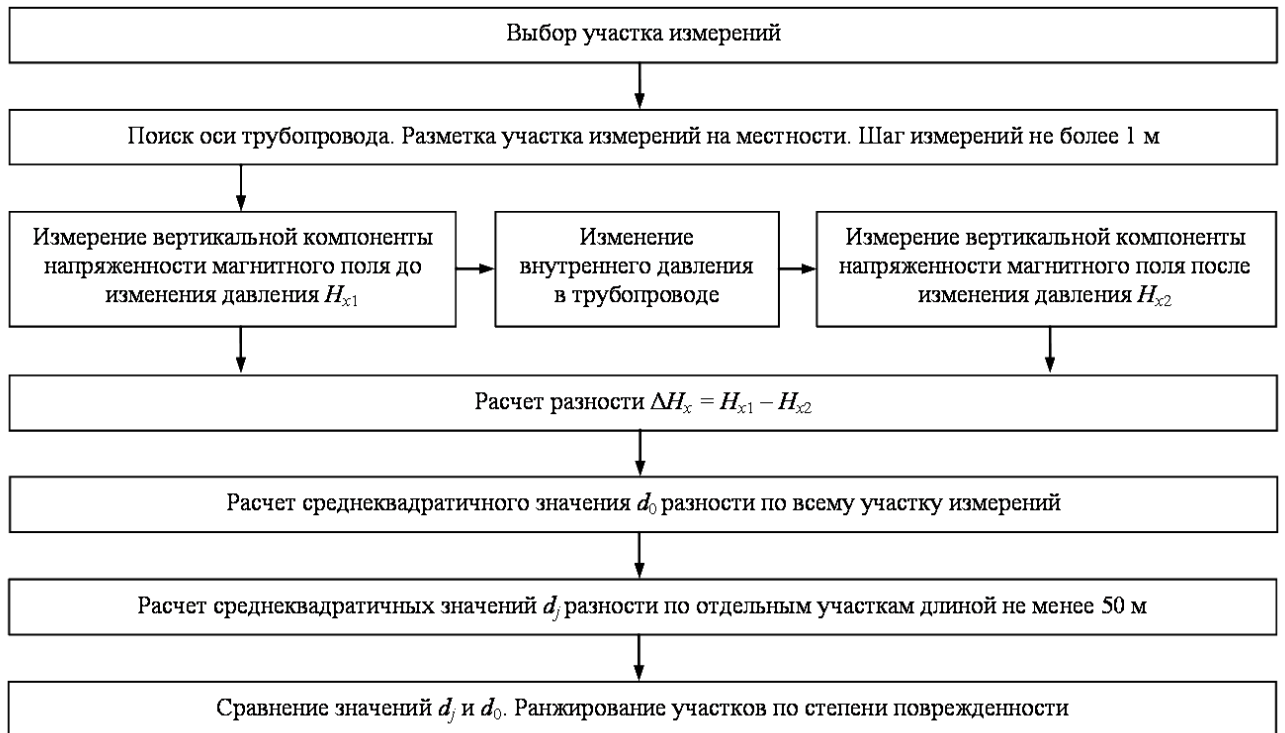


Рисунок 4.1 – Алгоритм интегральной оценки поврежденности участков трубопровода

#### 4.1.4 Пример использования методики

Проиллюстрируем применение предложенной методики на примере участка трубопровода, рассмотренного в разделе 2.1.2. Пусть необходимо дистанционно, без вскрытия грунта, определить наиболее поврежденные области на участке подземного магистрального газопровода длиной 1700 м и диаметром 1420 мм. Рабочее давление на данном участке газопровода 6,3 МПа. Для решения этой задачи в соответствии с предлагаемой методикой выполняют следующую последовательность действий.

1 Выполняют измерение вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля газопровода в точках, расположенных вдоль проекции оси газопровода на поверхность грунта. Расстояние между точками измерения 1 м. Результаты измерений представлены на рисунке 4.2. Положение точек измерения отмечают на местности.

2 Производят изменение внутреннего давления в газопроводе с 6,3 МПа до нуля.

3 Выполняют повторные измерения вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля газопровода в тех же точках, что и до изменения внутреннего давления. Результаты измерений представлены на рисунке 4.3.

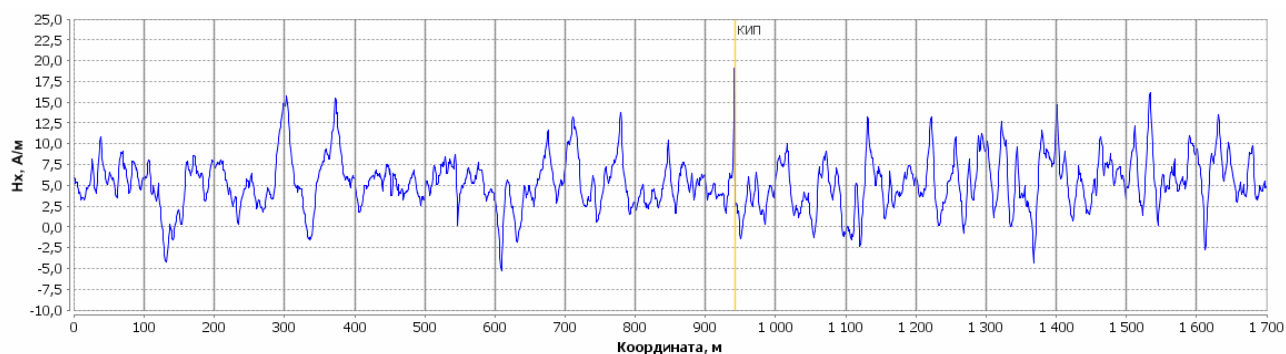


Рисунок 4.2 – График измеренных значений вертикальной компоненты напряженности магнитного поля участка трубопровода длиной 1700 м при избыточном внутреннем давлении 6,3 МПа

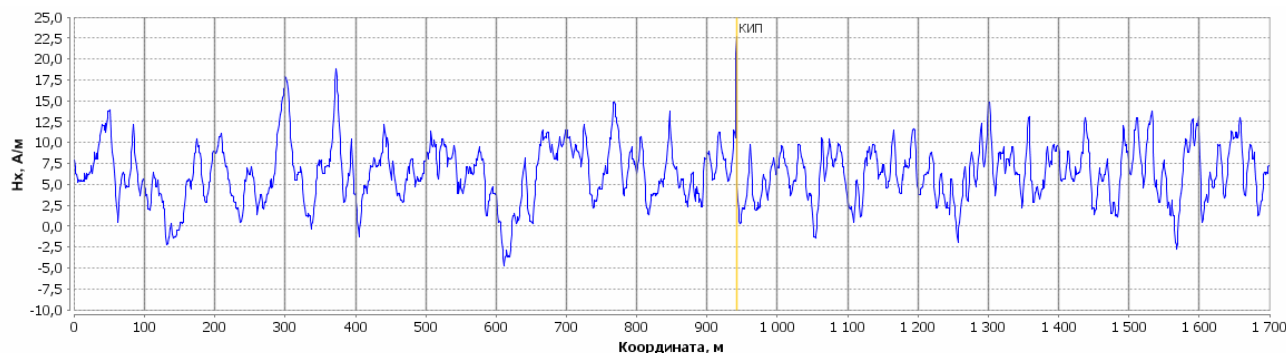


Рисунок 4.3 – График измеренных значений вертикальной компоненты напряженности магнитного поля участка трубопровода длиной 1700 м при отсутствии избыточного внутреннего давления

4 В точке с линейной координатой 941 м имеется магнитная помеха – КИП. Эту точку при последующей обработке результатов измерений исключают из рассмотрения.

5 Для каждой точки измерения (кроме исключенных) по формуле (4.1) рассчитывают разность вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля, измеренных до и после изменения внутреннего давления. Результаты расчета представлены на рисунке 4.4.

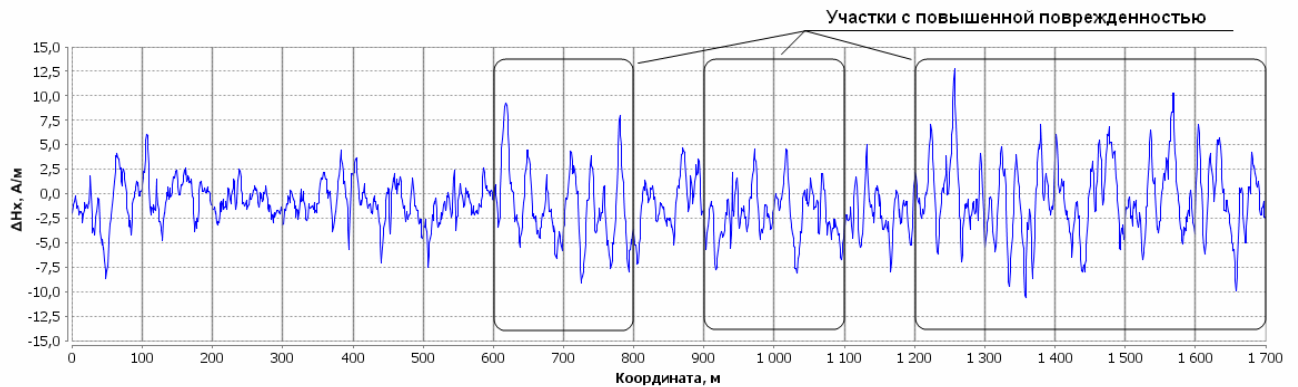


Рисунок 4.4 – График разности вертикальных компонент напряженности магнитного поля до и после изменения внутреннего давления

6 Рассчитывают среднеквадратичное значение разности для всего участка измерений по формуле (4.2):  $d_0 = 3,21$  А/м.

7 Обследуемый участок длиной 1700 м разбивают на 17 участков длиной 100 м каждый. Для каждого участка вычисляют среднеквадратичное значение разности вертикальных компонент индукции  $d_j$  по формуле (4.3). Результаты расчетов представлены в таблице 4.1. Полученные значения изменяются от 1,43 А/м до 4,27 А/м.

8 Проводят сравнение величин  $d_j$  и значения  $d_0$ . Делают заключение о том, что участки с номерами 7, 8, 10, 11, 13 – 17 являются более поврежденными на обследуемом фрагменте газопровода.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов среднеквадратичных значений разности вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля трубопровода. Серым цветом выделены участки с повышенной поврежденностью.

Номер участка	Координаты участка, м	Среднеквадратичное значение разности $d_j$ , А/м
1	0 – 100	3,04
2	100 – 200	2,08
3	200 – 300	1,43
4	300 – 400	1,90
5	400 – 500	2,22
6	500 – 600	2,24
7	600 – 700	3,88
8	700 – 800	4,27
9	800 – 900	2,73
10	900 – 1000	3,31
11	1000 – 1100	3,42
12	1100 – 1200	3,06
13	1200 – 1300	3,68
14	1300 – 1400	4,19
15	1400 – 1500	4,00
16	1500 – 1600	3,64
17	1600 – 1700	3,66

9 По результатам диагностики неразрушающими методами контроля, проведенной на данном фрагменте газопровода, количество и величина дефектов, найденных на участках, где среднеквадратичное значение разности вертикальных компонент индукции превышало 3,21 А/м, больше, чем в среднем по обследуемому фрагменту газопровода.

#### 4.1.5 Программное обеспечение для реализации методики

В рамках работы [52] для обработки результатов дистанционного магнитометрического контроля подземных трубопроводов было разработано специализированное программное обеспечение. В ходе данной работы возможности указанного программного обеспечения были расширены с целью обеспечения возможности автоматизированного определения интегральной поврежденности участков трубопроводов, на которых проведены магнитометрические измерения при вариациях внутреннего

давления. Рассмотрим основные особенности данного программного обеспечения в части реализации предложенной методики интегральной оценки поврежденности.

Общий вид главного окна программы показан на рисунке 4.5.

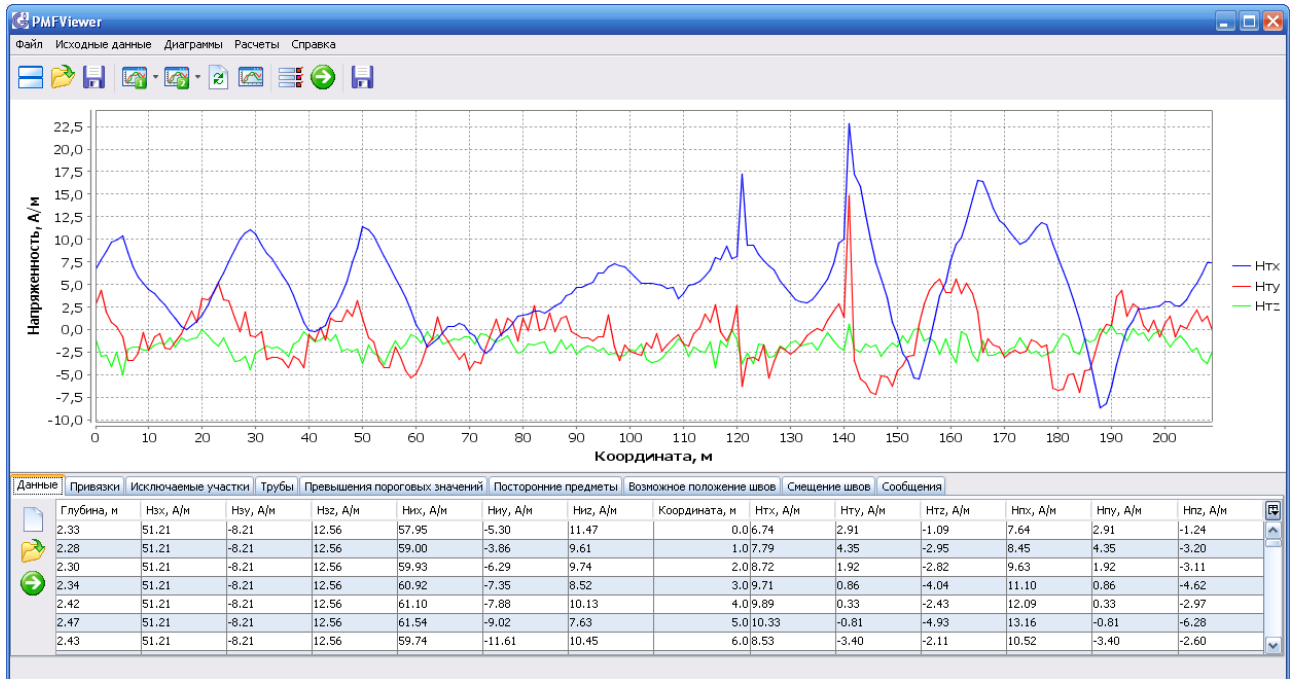


Рисунок 4.5 – Главное окно программы

Для реализации методики интегральной оценки поврежденности используется специальное окно «Сравнение магнитограмм». В этом окне имеются две вкладки: вкладка «Диаграммы» и вкладка «Статистические характеристики разности полей».

Вкладка «Диаграммы» (рисунок 4.6) используется для визуализации результатов измерений трех компонент напряженности магнитного поля при двух значениях внутреннего давления в трубопроводе и значений разностей указанных трех компонент. Отметим, что для реализации методики достаточно измерения только вертикальной компоненты напряженности магнитного поля. Однако с помощью использовавшегося в работе измерительного оборудования (комплекс «МАГ-01») выполняется измерение



трех компонент напряженности. Поэтому в программном обеспечении реализована возможность визуализации всех трех компонент.

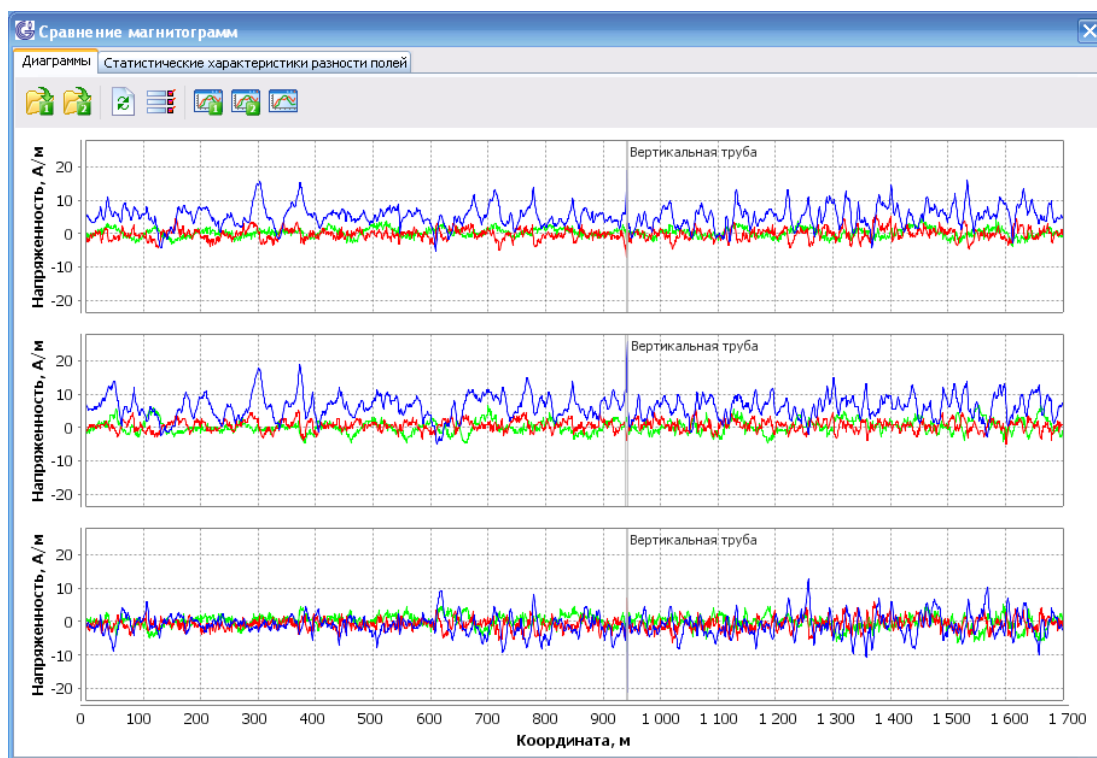


Рисунок 4.6 – Окно «Сравнение магнитограмм», вкладка «Диаграммы»

В верхней части вкладки «Диаграммы» расположена панель инструментов с кнопками, которые позволяют выполнять загрузку результатов измерений при разном давлении из файлов, а также управляют отображением информации на диаграммах.

Основную часть вкладки «Диаграммы» занимает панель диаграмм. На этой панели отображаются магнитограммы участка трубопровода при разных значениях давления, а также диаграмма разности полей.

Вкладка «Статистические характеристики разности полей» окна «Сравнение магнитограмм» (рисунок 4.7) используется для проведения расчетов в соответствии с алгоритмом, представленным в разделе 4.1.3, а также для представления результатов этих расчетов. Основную часть вкладки «Статистические характеристики разности полей» занимает панель графического отображения результатов расчетов среднеквадратичных

значений разности вертикальных компонент напряженности магнитного поля при двух значениях давления (СКЗ разности  $H_x$ ). В нижней части вкладки «Статистические характеристики разности полей» расположена панель вкладок с таблицами, содержащими исходные данные и результаты расчетов. На этой панели расположены вкладки «Участки одинаковой длины» «Составной участок».

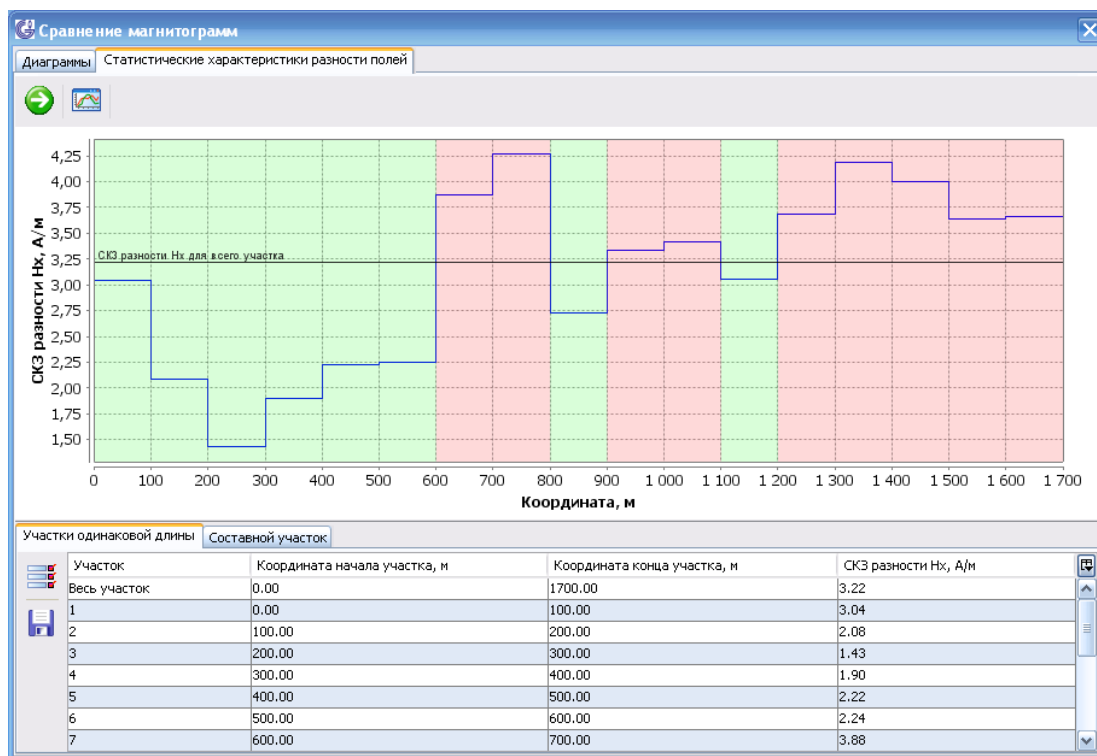


Рисунок 4.7 – Окно «Сравнение магнитограмм», вкладка «Статистические характеристики разности полей»

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет выполнить все расчеты, необходимые для реализации предложенной методики интегральной оценки поврежденности, а также обеспечивает возможность наглядного представления результатов этих расчетов.

## **4.2 Методика определения факта изменения напряженного состояния подземного трубопровода при периодических измерениях магнитного поля**

### **4.2.1 Область применения**

В данной методике 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.

Методика может 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.

Ориентировочная величина фиксируемых изменений напряженного состояния на конкретном участке трубопровода определяется геометрическими характеристиками трубопровода – диаметром и глубиной залегания. Выполненные работы показывают, что на трубопроводе диаметром 1420 мм при глубине заложения около 1,2 м до верхней образующей надежно определяются изменения кольцевых напряжений на 275 МПа и изменения продольных напряжений на 100 МПа.

### **4.2.2 Общие положения**

Предлагаемая методика основана на результатах экспериментальных исследований магнитоупругого эффекта на реальных подземных трубопроводах и их отдельных элементах, выполненных в ходе данной работы. При разработке предлагаемой методики использовались следующие

выводы, сформулированные по результатам выполненных полевых и стендовых работ.

1 Для трубопровода диаметром 1420 мм при глубине залегания коло 1 м до верхней образующей изменение механических напряжений на величину порядка 100 МПа приводит к изменению магнитного поля на поверхности грунта, которое для ряда точек наблюдения существенно превосходит погрешность измерения магнитного поля (с учетом неточности определения координат точки измерения относительно трубопровода и неточности углового позиционирования датчика относительно вертикали).

2 При одинаковом изменении механических напряжений величина изменения магнитного поля в разных точках наблюдения (точках с разными линейными координатами) существенно различается как по абсолютной величине, так и по знаку.

3 Величина изменения магнитного поля зависит не только от изменения механических напряжений, но и от истории изменения механических напряжений, а также от магнитной предыстории каждой трубы. Как правило, для реальных участков трубопровода неизвестна ни история изменения механических напряжений, ни магнитная предыстория труб.

Таким образом, путем сравнения результатов периодических магнитометрических измерений могут быть определены участки подземных трубопроводов, на которых происходят измерения механических напряжений, однако величина (в МПа) и знак этого изменения надежно определены быть не могут. Поэтому предлагаемая методика, позволяющая установить факт изменения механических напряжений, имеет индикаторный характер. Тем не менее, такая методика может иметь практическую значимость, так как для подземных трубопроводов, не оборудованных современными системами мониторинга деформаций, в настоящее время не имеется других методов оценки изменения напряженного состояния, которые реализуются без доступа к поверхности металла трубопровода. Методика имеет ряд ограничений, в частности, между периодическими измерениями

магнитного поля не должно происходить существенных изменений давления и температуры в трубопроводе, не должно быть внешних воздействий на магнитное поле трубопровода (связанных, например, с пропуском магнитных внутритрубных дефектоскопов).

#### **4.2.3 Порядок проведения работ по определению участков трубопроводов, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния**

Для реализации рассматриваемой методики необходимо выполнить следующую последовательность действий.

##### **1 Сбор исходных данных.**

1.1 Изучают и анализируют проектную, исполнительную и эксплуатационно-технологическую документацию (проектные продольные планы и профили рассматриваемого участка трубопровода; журналы изоляционных и сварочных работ на рассматриваемом участке трубопровода; технологические схемы рассматриваемого участка трубопровода; результаты ВТД; данные о ремонтах, проведенных на рассматриваемом участке трубопровода). Анализ указанной документации проводят с целью получения следующей информации: длины и порядок расположения труб на рассматриваемом участке трубопровода; конструктивные особенности трубопровода, имеющиеся на рассматриваемом участке (тройники, врезки и т. п.); пересечения обследуемого трубопровода на рассматриваемом участке с дорогами, другими трубопроводами, кабелями связи; наличие и расположение на местности маркеров ВТД; наличие и расположение на местности объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ).

1.2 Выполняют предварительный осмотр трассы трубопровода с целью оценки пригодности состояния трассы трубопровода для проведения работ; оценки наличия на участке измерений магнитных помех (посторонних ферромагнитных предметов); оценки состояния объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ); уточнения границ участка измерений на местности.

1.3 Определяют время проведения двух этапов измерения магнитного поля  $t_1$  и  $t_2$ . Выбор значений  $t_1$  и  $t_2$  проводят исходя из того, что в ходе реализации предлагаемой методики будут определены участки трубопровода, на которых происходят изменения напряженного состояния за период времени  $\Delta t$  между  $t_1$  и  $t_2$ .

## 2 Проведение измерений.

2.1 Для измерений используют оборудование, позволяющее проводить поиск оси трубопровода и выполнять измерение вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля, например, комплекс «МАГ-01» разработки ОАО «Гипрогазцентр» [83].

2.2 Выполняют измерения напряженности магнитного поля трубопровода в момент времени  $t_1$ . Измерения проводят в точках, расположенных на проекции оси трубопровода на поверхность грунта с шагом не более 1 м вдоль оси трубопровода.

2.3 Выполняют измерения напряженности магнитного поля трубопровода в момент времени  $t_2$ . При измерениях датчик располагают в тех же точках, в которых проводились измерения в момент времени  $t_1$ .

2.4 Записывают линейные координаты (относительно начала участка измерений) имеющихся на участке измерений возможных источников постоянного магнитного поля (железобетонные плиты, посторонние ферромагнитные предметы и т.п.).

## 3 Обработка результатов измерений.

3.1 Исключают из рассмотрения участки с магнитными помехами (металлические предметы, положение которых известно при проведении измерений, краны, тройники, врезки, пересечения с коммуникациями).

3.2 В каждой точке измерения рассчитывают разность вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$   $\delta H_{xi}$  ( $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения):

$$\delta H_{xi} = H_{x1i} - H_{x2i}, \quad (4.5)$$

где  $H_{x1i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения в момент времени  $t_1$ ,  $H_{x2i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения в момент времени  $t_2$ .

3.3 Рассчитывают максимальные (по модулю) значения разности вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля отдельно для участков длиной не менее 20 м. Максимальное абсолютное значение разности  $\delta H_{xj}$  для  $j$ -го участка рассчитывается по формуле

$$\delta H_{xj} = \max(|\delta H_{xi}|). \quad (4.6)$$

3.4 Рассчитывают величину погрешности  $\Delta H_x$  измерения вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля с учетом неточности определения координат точки измерения относительно трубопровода и неточности углового позиционирования датчика относительно вертикали. Расчет погрешности проводят в соответствии с алгоритмами, предложенными в [52].

3.5 Проводят сравнение значений  $\delta H_{xj}$  (4.6) и удвоенной (так как измерения выполняются дважды) величины погрешности  $2\Delta H_x$ . Считается, что на участках, для которых выполняется условие

$$\delta H_{xj} > 2\Delta H_x \quad (4.7)$$

за время  $\Delta t$  между  $t_1$  и  $t_2$  произошли изменения напряженного состояния.

3.6 Алгоритм определения участков трубопроводов, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния, представлен на рисунке 4.11.

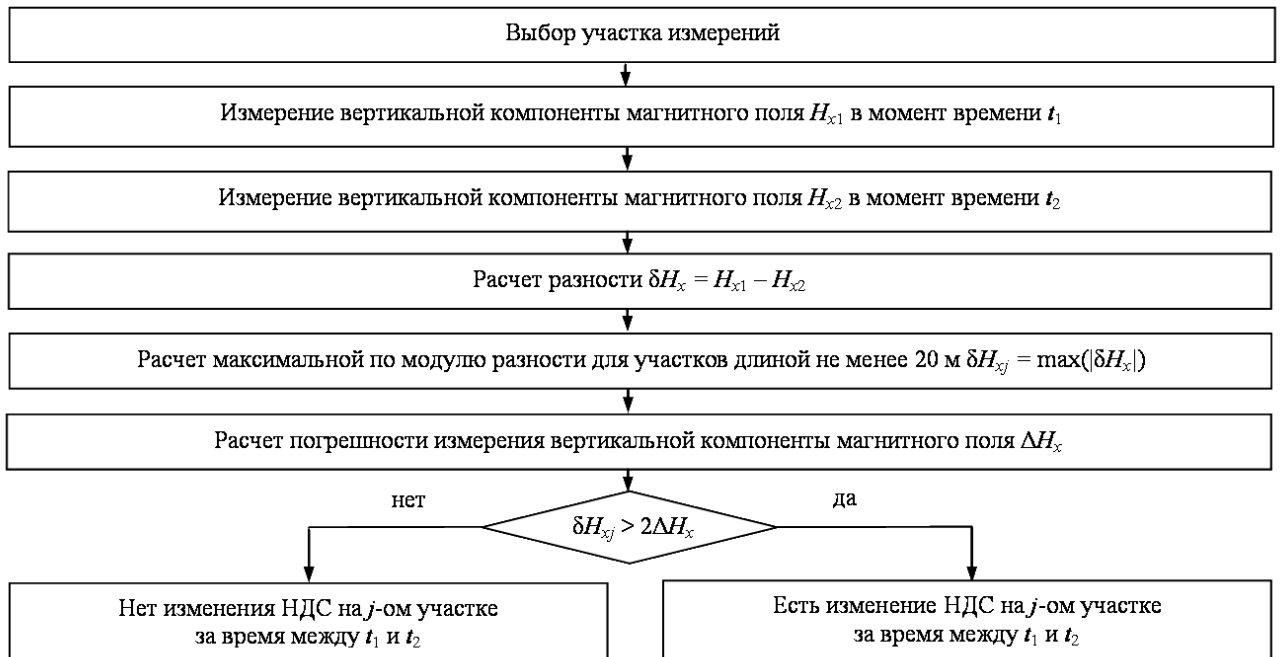


Рисунок 4.11 – Алгоритм определения участков трубопроводов, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния

### 4.3 Методика определения изменений напряженного состояния на участках подземных трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов

#### 4.3.1 Область применения

Методика определения факта изменения напряженного состояния подземного трубопровода, представленная в разделе 4.2, позволяет установить, произошло ли изменение механических напряжений за период между двумя измерениями магнитного поля на рассматриваемом участке. При этом между указанными двумя измерениями не должно происходить значительного изменения режима эксплуатации трубопровода (и связанных с этим существенных изменений давления и температуры в трубопроводе). В случае, если имеется трубопровод, в котором происходит периодическое одинаковое изменение режима эксплуатации, связанное, например, со



снижением на определенную величину рабочего давления (либо имеется возможность выполнения соответствующих технологических операций), то может быть предложена иная методика для определения участков, на которых происходят изменения механических напряжений, не связанные с вариациями давления, а вызванные другими причинами, например, изгибом трубопровода из-за проседания грунта. Эта методика также основана на сравнении результатов двух измерений магнитного поля трубопровода, выполненных с поверхности грунта.

Методика может применяться для трубопроводов, изготовленных из ферромагнитного материала и имеющих систему электрохимической защиты. В трубопроводе должны происходить периодические изменения напряженного состояния (например, из-за изменения давления  $P$ ). За период, предшествующий применению методики, в трубопроводе должны произойти не менее 5 одинаковых изменений напряженного состояния (например, из-за изменения давления от  $P_1$  до  $P_2$  и вновь до  $P_1$ ). В процессе применения методики должно происходить еще одно аналогичное изменение напряженного состояния (изменение давления от  $P_1$  до  $P_2$  и вновь до  $P_1$ ). Определение факта изменения механических напряжений, не связанных с изменением давления, осуществляется с помощью проведения двух измерений постоянного магнитного поля на исследуемом участке трубопровода. Первое измерение проводится при давлении  $P_1$  до его изменения до  $P_2$ . Второе измерение проводится при давлении  $P_1$  после его изменения до  $P_2$ .

#### **4.3.2 Общие положения**

Предлагаемая методика основана на результатах экспериментальных исследований, выполненных на испытательных стендах, изготовленных из фрагментов трубопроводов (глава 3). В ходе этих исследований особое внимание уделялось выявлению закономерностей изменения магнитного поля при циклическом изменении механических напряжений в

испытательных стендах. Предлагаемая методика основана на достаточно подробно исследованном в ходе стендовых работ эффекте перехода от необратимого к обратимому изменению магнитного поля при увеличении количества циклов периодического нагружения.

Эффект перехода от необратимого к обратимому изменению магнитного поля после определенного количества циклов изменения давления может использоваться для контроля изменений механических напряжений на участках трубопровода, на которых в процессе эксплуатации происходят циклические изменения напряженного состояния металла. Если имеется трубопровод, в котором в процессе эксплуатации или в ходе специально проведенных технологических операций происходили неоднократные (10 и более раз) одинаковые изменения давления, то магнитограммы, полученные на этом трубопроводе при одинаковом давлении до и после очередного изменения давления, должны совпадать. При этом диаметр, глубина заложения трубопровода и разность давлений должны быть такими, чтобы результаты измерения поля при разных давлениях существенно отличались. Если действительно результаты измерений совпадают, то можно предположить, что на данном участке за время, предыдущих ориентировочно пяти циклов изменения давления, не происходило изменения напряженного состояния, связанного с внешними причинами (проседание грунта и т.п.). Если бы локальные изменения напряженного состояния имели место, то на таких участках был бы нарушен циклический характер изменения механических напряжений, а следовательно, результаты измерения магнитного поля до и после изменения давления не совпадали бы. Иначе говоря, если на некоторых участках магнитограммы не совпадают, то это может быть связано с появлением дополнительных напряжений на этих участках, то есть с такими изменениями механических напряжений, которые не связаны с изменением давления.

Как и для методики, предложенной в разделе 4.2, в данном случае речь идет об определении факта изменения механических напряжений. Величина

и знак этого изменения надежно определены быть не могут, то есть предлагаемая методика имеет индикаторный характер. С момента первого изменения механических напряжений и до завершения второго этапа измерений (то есть на протяжении как минимум 6 циклов изменения давления) не должно быть внешних воздействий на магнитное поле трубопровода (связанных, например, с пропуском магнитных внутритрубных дефектоскопов).

#### **4.3.3 Порядок проведения работ по определению участков с изменениями напряженного состояния для трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов**

Для реализации рассматриваемой методики необходимо выполнить следующую последовательность действий.

##### **1 Сбор исходных данных.**

1.1 Изучают и анализируют проектную, исполнительную и эксплуатационно-технологическую документацию (проектные продольные планы и профили рассматриваемого участка трубопровода; журналы изоляционных и сварочных работ на рассматриваемом участке трубопровода; технологические схемы рассматриваемого участка трубопровода; результаты ВТД; данные о ремонтах, проведенных на рассматриваемом участке трубопровода). Анализ указанной документации проводят с целью получения следующей информации: длины и порядок расположения труб на рассматриваемом участке трубопровода; конструктивные особенности трубопровода, имеющиеся на рассматриваемом участке (тройники, врезки и т. п.); пересечения обследуемого трубопровода на рассматриваемом участке с дорогами, другими трубопроводами, кабелями связи; наличие и расположение на местности маркеров ВТД; наличие и расположение на местности объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ).

1.2 Выполняют предварительный осмотр трассы трубопровода с целью оценки пригодности состояния трассы трубопровода для проведения работ;

оценки наличия на участке измерений магнитных помех (посторонних ферромагнитных предметов); оценки состояния объектов ЭХЗ трубопровода (КИП, УКЗ); уточнения границ участка измерений на местности.

1.3 Получают информацию о количестве и величине изменений давления в трубопроводе, произошедших с момента начала эксплуатации рассматриваемого участка (либо с момента последнего пропуска магнитного внутритрубного дефектоскопа).

## 2 Проведение измерений.

2.1 Для измерений используют оборудование, позволяющее проводить поиск оси трубопровода и выполнять измерение вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля, например, комплекс «МАГ-01» разработки ОАО «Гипрогазцентр» [83].

2.2 Измерения выполняют при изменении внутреннего давления от  $P_1$  до  $P_2$  и вновь до  $P_1$ . Выполняют измерения напряженности магнитного поля трубопровода при давлении  $P_1$  до его изменения до  $P_2$ . Измерения проводят в точках, расположенных на проекции оси трубопровода на поверхность грунта с шагом не более 1 м вдоль оси трубопровода.

2.3 Выполняют измерения напряженности магнитного поля трубопровода при давлении  $P_1$  после его изменения до  $P_2$ . При измерениях датчик располагают в тех же точках, в которых проводились измерения при давлении  $P_1$  до его изменения до  $P_2$ .

2.4 Записывают линейные координаты (относительно начала участка измерений) имеющих на участке измерений возможных источников постоянного магнитного поля (железобетонные плиты, посторонние ферромагнитные предметы и т.п.).

## 3 Обработка результатов измерений.

3.1 Исключают из рассмотрения участки с магнитными помехами (металлические предметы, положение которых известно при проведении измерений, краны, тройники, врезки, пересечения с коммуникациями).

3.2 В каждой точке измерения рассчитывают разность вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля до и после изменения давления  $\delta H_{xi}$  ( $i$  – номер точки измерения,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – количество точек измерения):

$$\delta H_{xi} = H_{x1i} - H_{x2i}, \quad (4.8)$$

где  $H_{x1i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения при давлении  $P_1$  до его изменения,  $H_{x2i}$  – вертикальная компонента напряженности в  $i$ -ой точке измерения при давлении  $P_1$  после его изменения.

3.3 Рассчитывают максимальные (по модулю) значения разности вертикальных компонент напряженности постоянного магнитного поля отдельно для участков длиной не менее 20 м. Максимальное абсолютное значение разности  $\delta H_{xj}$  для  $j$ -го участка рассчитывается по формуле

$$\delta H_{xj} = \max(|\delta H_{xi}|). \quad (4.9)$$

3.4 Рассчитывают величину погрешности  $\Delta H_x$  измерения вертикальной компоненты напряженности постоянного магнитного поля с учетом неточности определения координат точки измерения относительно трубопровода и неточности углового позиционирования датчика относительно вертикали. Расчет погрешности проводят в соответствии с алгоритмами, предложенными в [52].

3.5 Проводят сравнение значений  $\delta H_{xj}$  (4.8) и удвоенной (так как измерения выполняются дважды) величины погрешности  $2\Delta H_x$ . Считается, что на участках, для которых выполняется условие

$$\delta H_{xj} > 2\Delta H_x \quad (4.10)$$

за время между предыдущим и текущим изменением давления от  $P_1$  до  $P_2$  произошли изменения напряженного состояния, не связанные с изменением давления, а связанные с другими причинами, например, с изгибом трубопровода из-за проседания грунта.

3.6 Алгоритм определения участков с изменениями напряженного состояния для трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов, представлен на рисунке 4.12.

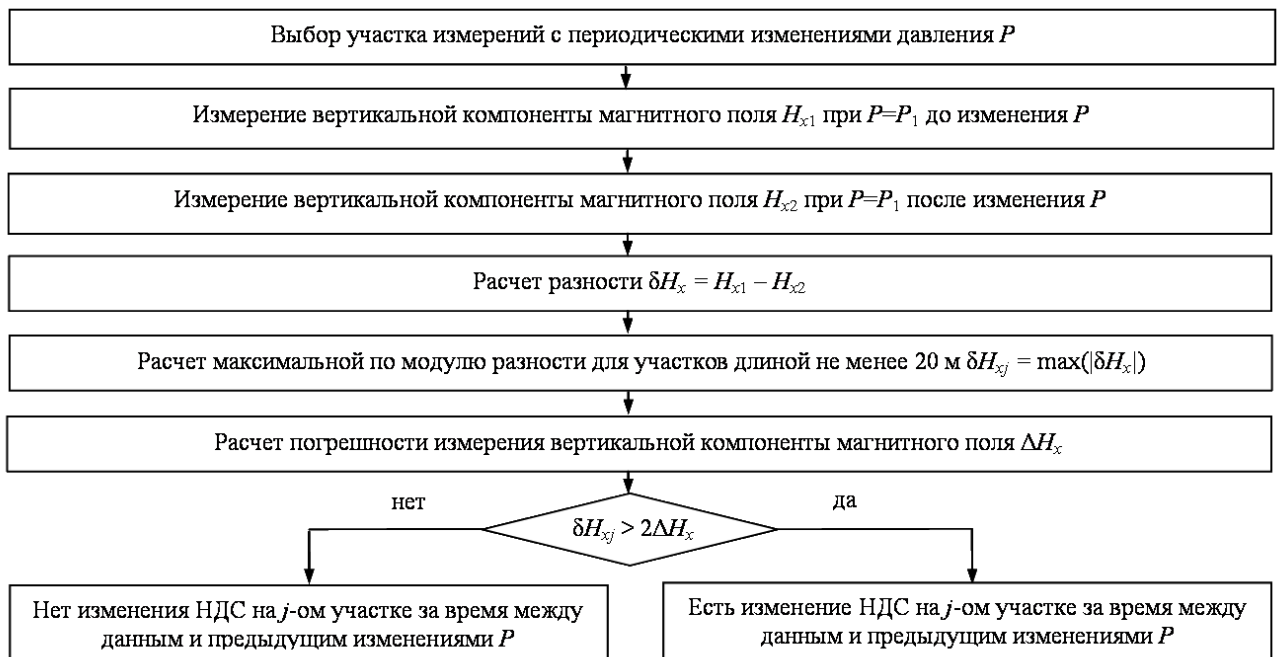


Рисунок 4.12 – Алгоритм определения участков с изменениями напряженного состояния для трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов,

#### 4.4 Обобщение результатов главы 4

1. Предложена методика интегральной оценки поврежденности участков подземного трубопровода, изготовленного из ферромагнитного материала, которая реализуется путем сравнения результатов измерений постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта при двух разных значениях внутреннего давления в трубопроводе. Методика основана на экспериментально подтвержденном предположении о том, что чем больше в среднем по участку изменяется намагниченность трубопровода (а следовательно, и постоянное магнитное поле на поверхности грунта) при одном и том же изменении механических напряжений, тем больше предрасположенность данного участка к образованию дефектов. Разработано

программное обеспечение для автоматизированной реализации предложенной методики.

2. Предложена индикаторная методика для определения участков подземного трубопровода, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния. Методика позволяет определить факт изменения механических напряжений на данном участке подземного трубопровода за время между двумя измерениями постоянного магнитного поля. При этом за рассматриваемый период времени между измерениями магнитного поля не должно происходить изменение режима эксплуатации трубопровода и связанных с этим существенных изменений давления и температуры в трубопроводе.

3. Предложена индикаторная методика для определения изменений напряженного состояния на участках подземных трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов (например, изменения рабочего давления). Методика основана на эффекте перехода от необратимого к обратимому изменению магнитного поля после определенного количества циклов периодического изменения напряженного состояния трубопроводов. Измерения производятся до и после очередного изменения эксплуатационного режима. Методика позволяет определить факт изменения механических напряжений на данном участке подземного трубопровода за время между предыдущим и текущим изменениями эксплуатационного режима.

4. 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено, что при изменении механических напряжений в трубопроводе изменяются составляющие постоянного магнитного поля, измеряемого над осью трубопровода на поверхности грунта. Величина изменения различается для разных точек наблюдения как по абсолютному значению, так и по знаку. В наибольшей степени изменяется вертикальная компонента напряженности магнитного поля  $H_x$ . При изменении продольных механических напряжений на 100 МПа и кольцевых механических напряжений на 275 МПа в трубопроводе диаметром 1420 мм величина изменения  $H_x$  на поверхности грунта достигает 13 А/м при глубине залегания оси трубопровода около 1,9 м. При этом погрешность измерения  $H_x$  около 1 А/м. Следовательно, путем сравнения результатов периодических магнитометрических измерений могут быть определены участки подземных трубопроводов, на которых происходят измерения механических напряжений.

2. Исследована взаимосвязь между характером изменения магнитного поля при изменении механических напряжений и историей изменения механических напряжений в объекте контроля. Показано, что при периодическом изменении механических напряжений, обусловленных внутренним давлением или изгибом, на протяжении первых нескольких циклов изменения магнитного поля являются необратимыми. С увеличением количества циклов изменения магнитного поля становятся обратимыми, то есть магнитное поле после повышения и последующего снижения нагрузки возвращается к исходным значениям.

3. Показано, что деформация изгиба, произошедшая в процессе циклического изменения давления (между двумя циклами изменения давления), приводит к возрастанию необратимой составляющей изменения магнитного поля при очередном (первом после изгиба) цикле изменения давления. Этот эффект может использоваться для поиска участков с



развивающейся деформацией изгиба на трубопроводах, в которых происходят периодические изменения внутреннего давления. Поиск проводится путем сравнения результатов измерения магнитного поля при одном и том же давлении до и после очередного цикла изменения давления. Если на некоторых участках магнитограммы не совпадают, то это может быть связано с нарушением циклического характера изменения напряжений на этих участках, то есть с таким изменением механических напряжений, которое не связано с изменением давления.

4. На основе эффекта обратной магнестрикции 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

5. Предложена методика интегральной оценки поврежденности участков подземного стального трубопровода, которая реализуется путем сравнения результатов измерений постоянного магнитного поля трубопровода с поверхности грунта при двух разных значениях внутреннего давления в трубопроводе. Методика основана на экспериментально подтвержденном предположении о том, что чем больше в среднем по участку изменяется постоянное магнитное поле на поверхности грунта при одном и том же изменении механических напряжений, тем больше предрасположенность данного участка к образованию дефектов.

6. Предложена методика определения участков подземного трубопровода, на которых в процессе эксплуатации происходят изменения напряженного состояния. Методика позволяет определить факт изменения механических напряжений на данном участке подземного трубопровода за время между двумя измерениями постоянного магнитного поля.

7. Предложена методика для определения изменений напряженного состояния на участках подземных трубопроводов, на которых происходят периодические изменения эксплуатационных режимов (например, изменения

рабочего давления). Методика основана на эффекте перехода от необратимого к обратимому изменению магнитного поля после определенного количества циклов периодического изменения напряженного состояния трубопроводов. Методика позволяет определить факт изменения механических напряжений на данном участке подземного трубопровода за время между предыдущим и текущим изменениями эксплуатационного режима.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Белов, К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах / К.П. Белов. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 256 с.
2. Акулов, Н.С. Ферромагнетизм / Н.С. Акулов. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1939. – 188 с.
3. Вонсовский, С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 817 с.
4. Гинзбург, В.Б. Магнитоупругие датчики / В.Б. Гинзбург. – М.: Энергия, 1970. – 72 с.
5. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
6. Бозорт, Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. – 784 с.
7. Новиков, В.Ф. Определение напряжений в трубопроводах коэрцитиметрическим методом / В.Ф. Новиков, М.С. Бахарев, В.В. Нассонов, В.А. Изосимов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – №3. – С. 66 – 71.
8. Новиков, В.Ф. К определению пластически деформированных участков металлоконструкции / В.Ф. Новиков, О.К. Мацура, В.В. Прилуцкий, К.Р. Муратов // Контроль. Диагностика. – 2010. – №7. – С. 18 – 21.
9. Новиков, В.Ф. Влияние двухосной упругой деформации на коэрцитивную силу и локальную остаточную намагниченность конструкционных сталей / В.Ф. Новиков, В.А. Захаров, А.И. Ульянов, С.В. Сорокина, М.Е. Кудряшов // Дефектоскопия. – 2010. – №7. – С. 59 – 68.
10. Ковенский, И.М. Влияние усталостного нагружения в малоцикловой области на структуру и свойства трубных сталей / И.М.

Ковенский, В.В. Нассонов, О.В. Балина // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2008. – №3. – С. 41 – 46.

11. Большакова, В.В. О возможности применения магнитных методов неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов / В.В. Большакова, Н.А. Кукин, Г.Я. Дымкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – №4. – С. 92 – 98.

12. Теплинский, Ю.А. Оценка напряженного состояния трубопроводов по анизотропии магнитных свойств металла / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев // Контроль. Диагностика. – 2004. – №8. – С. 22 – 24.

13. Теплинский, Ю.А. Исследование особенностей изменения магнитных параметров стали марки 17Г1С в условиях одноосной растягивающей нагрузки / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев, И.Н. Андронов // Контроль. Диагностика. – 2004. – №12. – С. 3 – 6.

14. Теплинский, Ю.А. Оценка механических свойств и микроструктуры ферромагнетиков по магнитным характеристикам / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, И.Ю. Быков, Ю.В. Александров // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2004. – №7. – С. 5 – 7.

15. Агинеи, Р.В. Коэрцитиметрический контроль трубопроводов в условиях двуосного напряженного состояния / Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев, Ю.А. Теплинский, И.Н. Андронов // Контроль. Диагностика. – 2005. – №6. – С. 14 – 16.

16. Агинеи, Р.В. Учет состояния материала конструкции при определении механических напряжений коэрцитиметрическим методом / Р.В. Агинеи, А.С. Кузьбожев, Ю.А. Теплинский, И.Н. Андронов // Контроль. Диагностика. – 2005. – №5. – С. 6 – 8.

17. Теплинский, Ю.А. Интерпретация результатов коэрцитиметрии при оценке напряженного состояния стальных конструкций / Ю.А. Теплинский, Р.В. Агинеи, И.Ю. Быков, Ю.В. Александров // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2004. – №8. – С. 26 – 28.

18. Агине́й, Р.В. Анализ вида напряженного состояния стенок газопроводных труб коэрцитиметрическим методом / Р.В. Агине́й, И.Н. Андронов, В.С. Корепанова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – №12. – С. 15 – 16.

19. Александров, Ю.В. Диагностика напряженного состояния металла газонефтепроводов по магнитным характеристикам / Ю.В. Александров, М.М. Бердник, Р.В. Агине́й // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 11. – С. 39 – 44.

20. Бердник, М.М. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей / М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агине́й // Контроль. Диагностика. – 2011. – №1. – С. 22 – 26.

21. Бердник, М.М. Совершенствование методики оценки сложного напряженного состояния нефтегазопроводов по величине коэрцитивной силы металла / М.М. Бердник, Р.В. Агине́й, Ю.В. Александров // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2011. – №1. – С. 15 – 18.

22. Александров, Ю.В. Диагностика напряженного состояния металла трубопроводов по результатам магнитного контроля / Ю.В. Александров, Р.В. Агине́й, М.М. Бердник // Газовая промышленность. – 2011. – №7. – С. 17 – 21.

23. Александров, Ю.В. Диагностирование сложноподвижного состояния газопроводов по результатам измерения коэрцитивной силы / Ю.В. Александров, Т.Т. Алиев, Р.В. Агине́й, М.М. Бердник // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – №2. – С. 26 – 34.

24. Бердник, М.М. Развитие метода оценки напряженно-деформированного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Бердник Мария Михайловна. – Ухта, 2010. – 23 с.

25. Пат. №2439530 РФ МПК7 G01N3/08. Способ определения механических напряжений в стальных конструкциях / Александров Ю.В.,

Агинеи Р.В., Кузьбожев А.С., Бердник М.М. – №2010132450/28 ; заявл. 02.08.2010 ; опубл. 10.01.2012.

26. Андронов, И.Н. Коэрцитиметрический анализ плосконапряженного состояния в магнитных сплавах / И.Н. Андронов, Р.В. Агинеи, И.С. Леонов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – №6. – С. 55 – 58.

27. Агинеи, Р.В. Исследование изменения коэрцитивной силы и параметров твердости стенок трубы при деформировании изгибом / Р.В. Агинеи, И.С. Леонов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – №3. – С. 39.

28. Андронов, И.Н. Анализ плосконапряженного состояния стальных трубопроводов по лепестковым диаграммам коэрцитивной силы / И.Н. Андронов, Р.В. Агинеи, И.С. Леонов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – №12. – С. 50 – 52.

29. Леонов, И.С. Совершенствование коэрцитиметрического метода для анализа напряженного состояния нефтегазопроводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Леонов Игорь Сергеевич. – Ухта, 2013. – 23 с.

30. Ломаев, Г.В. Исследование метода эффекта Баркгаузена и его применение в измерениях, автоматике и контроле материалов и окружающей среды : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.16 / Ломаев Гелий Васильевич. – Ижевск, 1998. – 47 с.

31. Горкунов, Э.С. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. Роль локальных эффектов в кристаллографической ориентации ферромагнетиков / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский // Дефектоскопия. – 1999. – № 6. – С. 3 – 23.

32. Горкунов, Э.С. Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов. Влияние упругой и пластической деформаций / Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, М. Миховски // Дефектоскопия. – 1999. – № 7. – С. 3 – 32.

33. Ломаев, Г.В. Исследование возможности оценки остаточных напряжений в зоне сварного соединения методом эффекта Баркгаузена / Г.В.

Ломаев, Р.Н. Вахитов, Д.С. Кулешова, А.Н. Мусалимов, Ю.Б. Камалова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – №2. – С. 117 – 120.

34. Филинов, В.В. Анализ современных приборов, основанных на эффекте Баркгаузена, и их применений для контроля физико-механических свойств изделий из ферромагнитных материалов / В.В. Филинов, А.В. Филинова, А.И. Мопанько // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. – 2011. – №35. – С. 43 – 50.

35. Филинов, В.В. Контроль механических напряжений в изделиях из сталей на основе регистрации магнитных и магнитоакустических шумов перемагничивания / В.В. Филинов, А.В. Филинова // Контроль. Диагностика. – 2007. – №2. – С. 41 – 44.

36. Филинов, В.В. Использование метода эффекта Баркгаузена при контроле усталостных напряжений / В.В. Филинов, А.В. Филинова, П.Г. Аракелов // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. – 2009. – №23. – С. 65 – 71.

37. Филинов, В.В. Информационная система для магнитошумового контроля механических напряжений / В.В. Филинов, П.Г. Аракелов, Г.А. Дидин // Приборы. – 2010. – №11. – С. 32 – 36.

38. Филинов, В.В. Разработка новых информативных параметров при контроле напряженного состояния ферромагнитных металлов на основе регистрации магнитных шумов перемагничивания / В.В. Филинов, П.Г. Аракелов // Контроль. Диагностика. – 2013. – №5. – С. 28 – 31.

39. Остривной, А.Ф. Эталон механических напряжений и переход от неразрушающего контроля напряжений к их измерениям / А.Ф. Остривной, С.Ю. Иванов, В.Л. Венгринович, В.Л. Цукерман, А.А. Лобашев // Контроль. Диагностика. – 2011. – №6. – С. 44 – 51.

40. Бахарев, М.С. Разработка методов и средств измерения механических напряжений на основе необратимых и квазиобратимых магнитоупругих явлений : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Бахарев Михаил Самойлович. – Тюмень, 2004. – 45 с.

41. Бахарев, М.С. Использование магнитоупругой памяти стали для определения полей механических напряжений в деталях машин и металлоконструкциях / М.С. Бахарев // Датчики и системы. – 2003. – №10. – С. 33 – 35.

42. Новиков, В.Ф. Закономерности магнитоупругого изменения локальной остаточной намагниченности сталей / В.Ф. Новиков, В.Ф. Дягилев, М.С. Бахарев, В.В. Нассонов, В.В. Прилуцкий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т.72. – №6. – С. 34 – 37.

43. Важенин, Ю.И. Применение магнитоупругой памяти металла для измерения механических напряжений / Ю.И. Важенин, В.Ф. Новиков, С.М. Кулак, М.С. Бахарев // Датчики и системы. – 2006. – №8. – С. 47 – 49.

44. Способ определения полей напряжений в деталях из ферромагнитных материалов : пат. 2154262 Рос. Федерация : МПК G01L1/12A / Новиков В.Ф., Ершов С.П., Бахарев М.С., Заводовский А.Г., Федоров Б.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет». – № 98120990/28 ; заявл. 16.11.1998 ; опубл. 10.08.2000.

45. Кулак, С.М. Разработка магнитоупругого метода контроля напряжённо-деформированного состояния подземных трубопроводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Кулак Сергей Михайлович. – Тюмень, 2007. – 16 с.

46. Магнитный способ определения осевых механических напряжений сложно нагруженного магнетика : пат. 2326356 Рос. Федерация : МПК G01L1/12 / Кулак С.М., Новиков В.Ф. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет». – № 2006142118/28 ; заявл. 28.11.2006 ; опубл. 10.06.2008.

47. Новиков, В.Ф. Неразрушающий контроль снеговой и ветровой нагрузки металлоконструкций в режиме магнитоупругой памяти / В.Ф. Новиков, М.С. Бахарев, С.В. Сорокина // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2008. – №3. – С. 51 – 54.



48. Кулак, С.М. Метод магнитоупругой памяти для оценки деформаций трубопроводов в геодинамических зонах / С.М. Кулак, В.Ф. Новиков, Н.К. Кострюкова, М.С. Бахарев, С.В. Сорокина // Датчики и системы. – 2009. – №12. – С. 4 – 7.

49. Радченко, А.В. Мониторинг напряжений (деформаций) протяженной металлоконструкции в динамически напряженных зонах / А.В. Радченко, В.Ф. Новиков, К.Р. Муратов, О.С. Мартынов, В.В. Логинов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2010. – №2. – С. 11 – 18.

50. Новиков, В.Ф. Прогнозирование усталостного разрушения металла трубопровода / В.Ф. Новиков, С.М. Кулак, К.Р. Муратов, О.К. Мацура // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2010. – №3. – С. 70 – 74.

51. Крапивский, Е.И. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов / Е.И. Крапивский, В.О. Некучаев. – Ухта: УГТУ, 2011. – 142 с.

52. Гуськов, С.С. Методы обработки результатов дистанционного магнитометрического обследования подземных трубопроводов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Гуськов Сергей Сергеевич. – Нижний Новгород, 2014. – 178 с.

53. Sowerbutts, W.T.C. The use of geophysical methods to locate joints in underground metal pipelines / W.T.C. Sowerbutts // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 1988. – V. 21. – № 3. – P. 273 – 281.

54. Atherton, D.L. Detection of anomalous stresses in gas pipelines by magnetometer survey (invited) / D.L. Atherton, A. Teitsma // J. Appl. Phys. 1982. – № 11 (53). – P. 8130 – 8135.

55. Atherton, D.L. Stress induced magnetization changes of steel pipes. Laboratory tests / D.L. Atherton, L. Coathup, D.C. Jiles, L. Longo, C. Welbourn, A. Teitsma // Magnetics, IEEE Transactions. – 1983. – V. 19. – № 4. – P. 1564 – 1568.

56. Atherton, D.L. Stress-induced magnetization changes of steel pipes. Laboratory tests. Part II / D.L. Atherton, C. Welbourn, D.C. Jiles, L. Reynolds, J.

Scott-Thomas // *Magnetics, IEEE Transactions*. – 1984. – V. 20. – № 6. – P. 2129 – 2136.

57. Atherton, D.L. Effect of stress on magnetization and magnetostriction in pipeline steel / D.L. Atherton, J.A. Szpunar // *Magnetics, IEEE Transactions*. – 1986. – V. 22. – № 5. – P. 514 – 516.

58. Григорашвили, Ю.Е. Метод локации источников слабых магнитных полей / Ю.Е. Григорашвили, Р.Г. Карпов, А.М.Степанов // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2006. – № 2. – С. 37 – 41.

59. Григорашвили, Ю.Е. Локатор источников слабых магнитных полей / Ю.Е. Григорашвили, Р.Г. Карпов, А.В. Бухлин // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2006. – № 9. – С. 21 – 25.

60. Карпов, Р.Г. Алгоритмическая, программная и аппаратная реализация системы магнитной локации скрытых объектов / Р.Г. Карпов // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2009. – № 3. – С. 53 – 60.

61. Карпов, Р.Г. Метод анализа и обработки данных для устройства трёхмерной магнитной локации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Карпов Руслан Геннадиевич. – М., 2009. – 25 с.

62. Григорашвили, Ю.Е. Технология дистанционной магнитной локации для оценки состояния изоляционного покрытия трубопроводов / Ю.Е. Григорашвили, Ю.В. Стицей, В.В. Иваненков, К.М. Гумеров // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. – 2007. – № 5. – С. 3 – 5.

63. Григорашвили, Ю.Е. Использование технологии магнитной локации при определении коррозионной защищенности магистральных трубопроводов / Ю.Е. Григорашвили, Ю.В. Стицей, В.В. Иваненков // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2009. – № 4. С. 29 – 35.

64. Горошевский, В.П. Обзор новых магнитных методов неразрушающего контроля / В.П. Горошевский, С.С. Камаева, И.С. Колесников // Территория Нефтегаз. – 2005. – № 4.

65. Воробьев, Я.В. Использование ферромагнитных свойств металла для диагностирования технического состояния и прогнозирования ресурса стальных трубопроводов / Я.В. Воробьев, Н.И. Волгина, Л.А. Хуснутдинов, С.С. Камаева // Технология металлов. – 2010. – №1. – С. 46 – 49.

66. Горошевский, В.П. Расчет безопасного давления и периода безаварийной работы трубопроводов по результатам магнитной томографии / В.П. Горошевский, С.С. Камаева, Н.И. Волгина // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 4. – С. 15 – 18.

67. Воробьев, Я.В. Влияние механических напряжений на магнитное поле рассеяния ферромагнитного трубопровода / Я.В. Воробьев, Н.И. Волгина, В.П. Горошевский // Технология металлов. – 2012. – № 6. – С. 18 – 24.

68. Велиюлин, И.И. Повышение эффективности ремонта магистральных газопроводов: концепция, методы, технические средства : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19 / Велиюлин Ибрагим Ибрагимович. – М., 2007. – 47 с.

69. Коннов, В.В. Комплексная дистанционная диагностика подземных газопроводов / В.В. Коннов // Территория NDT. – 2013. – № 2. – С. 42 – 54.

70. Коннов, В.В. Средства комплексной дистанционной диагностики подземных газопроводов / В.В. Коннов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 3. – С. 68 – 70.

71. Приборный комплекс для бесконтактной диагностики технического состояния подземных трубопроводов М-1 : пат. на полезную модель № 88453 Рос. Федерация : МПК G01N27/00 / Коннов В.В. ; патентообладатель ЗАО НПЦ «Молния». – № 2009129375/22 ; заявл. 30.07.2009 ; опубл. 10.11.2009.

72. Дубов, А.А. Контроль и оценка ресурса протяженных участков газопроводов / А.А. Дубов, В.А. Маркелов, В.Д. Котов, Ю.И. Усенко // Газовая промышленность. – 2006. – № 8. – С. 46 – 48.

73. Дубов, А.А. Бесконтактная диагностика газонефтепроводов с использованием магнитометрических измерителей концентрации напряжений / А.А. Дубов, Ал.А. Дубов // Газовая промышленность. – 2009. – № 12. – С. 48 – 51.

74. Дубов, А.А. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов при оценке их ресурса / А.А. Дубов // Газовая промышленность. – 2011. – № 4. – С. 41 – 43.

75. Пахотин, П.А. Разработка технологии дистанционного электромагнитного диагностирования подводных переходов нефте- и газопроводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19 / Пахотин Павел Александрович. – СПб., 2013. – 20 с.

76. Любчик, А.Н. Совершенствование магнитометрического метода дистанционного контроля местоположения поперечных сварных швов и напряженных состояний подземного стального трубопровода : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Любчик Анна Николаевна. – СПб., 2014. – 22 с.

77. Способ прогнозирования местоположения течей в трубопроводах : пат. 2062394 Рос. Федерация : МПК<sup>б</sup> F17D5/02 / Белов Е.М. ; заявитель и патентообладатель АО «Черногорнефть». – № 93030278/06 ; заявл. 01.06.1993 ; опубл. 20.06.1996.

78. Способ контроля и обнаружения дефектов на трубопроводах из ферромагнитных материалов : пат. 2294482 Рос. Федерация : МПК F17D5/02, G01N27/82 / Сабирзянов Т.Г., Сабирзянов М.Т., Мухаметшин Р.Р. ; патентообладатели Сабирзянов Т.Г., Сабирзянов М.Т., Мухаметшин Р.Р. – № 2005132032/06 ; заявл. 18.10.2005 ; опубл. 27.02.2007.

79. Способ обнаружения дефектов внутрипромысловых трубопроводов : пат. 2301941 Рос. Федерация : МПК F17D5/02 / Валеев М.Х., Лаптев А.А.,

Галлямов И.И., Галлямов А.И., Надршин Р.Ф. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Татнефть». – № 2006101137/06 ; заявл. 12.01.2006 ; опубл. 27.06.2007.

80. Способ обнаружения дефектов трубопровода и несанкционированных врезок в трубопровод и устройство для его осуществления : пат. 2379579 Рос. Федерация : МПК F17D5/02 / Абдулаев А.А., Фаизова Л.Х., Кудряшов Ю.Г. ; патентообладатель Абдулаев А.А. – № 2008123471/06 ; заявл. 09.06.2008 ; опубл. 20.01.2010.

81. Способ бесконтактного выявления местоположения и характера дефектов металлических сооружений и устройство для его осуществления : пат. 2264617 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> G01N27/82, G01V3/08 / Горошевский В.П., Камаева С.С., Колесников И.С. ; патентообладатели Горошевский В.П., Камаева С.С., Колесников И.С. – № 2001113748/28 ; заявл. 23.05.2001 ; опубл. 20.11.2005.

82. Способ диагностики технического состояния подземных трубопроводов : пат. 2453760 Рос. Федерация : МПК F17D5/00 / Аверкиев В.В., Антонов И.К., Елисеев А.А., Нестеров В.В., Семенов В.В., Филиппов О.В., Фогель А.Д. ; патентообладатель ОАО «Газпромнефть». – № 2009148562/06 ; заявл. 18.12.2009 ; опубл. 20.06.2012.

83. Комплекс измерительный для осуществления бесконтактного магнитометрического контроля трубопроводов «МАГ-01»: Руководство по эксплуатации. – Н. Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2010. – 58 с.

84. Устройство бесконтактного магнитометрического контроля состояния металла трубопровода : пат. 2306554 Рос. Федерация : МПК G01N27/72 / Пужайло А.Ф., Кривдин А.Ю., Вититнев О.Ю., Москалева М.Б., Шугаев В.Г., Спиридович Е.А., Запевалов Д.Н., Бутусов Д.С. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2006108285/28 ; заявл. 16.03.2006 ; опубл. 20.09.2007.

85. Устройство бесконтактного магнитометрического контроля состояния металла трубопровода : пат. 2460068 Рос. Федерация : МПК

G01N27/72 / Пужайло А.Ф., Кривдин А.Ю., Вититнев О.Ю., Кривдин Р.А., Спиридович Е.А., Марянин В.В., Шаров О.Б. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрогазцентр». – № 2011111866/28; заявл. 29.03.2011 ; опубл. 27.08.2012.

86. Александров, Ю.В. Ресурсные испытания металла длительно эксплуатируемых трубопроводов / Ю.В. Александров, А.С. Кузьбожев, Р.В. Агиней. – СПб.: Недра, 2011. – 304 с.

87. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 463 с.

88. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

A1. 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. Агиней // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2012. – № 4. – С. 28 – 32.

A2. 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.

A3. Агиней, Р.В. Моделирование магнитных аномалий при проведении магнитометрического контроля трубопроводов с поверхности грунта / Р.В. Агиней, С.С. Гуськов, В.В. Мусонов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2013. – № 1. – С. 40 – 45.

А4. 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.

А5. 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.

А6. 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.

А7. 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.

А8. 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.

А9. 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.

А10. 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.

А11. 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.

A12. 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.

A13. 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.

A14. 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.

A15. 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.

A16. 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.



A17. 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.

A18. 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.