ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

БЕЛЯНКОВ ВАСИЛИЙ ЮРЬЕВИЧ

ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гольдштейн Александр Ефремович

Томск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ ……..…….. 4

ВВЕДЕНИЕ …….…... 5

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ….. 14

1.1 Легкосплавные бурильные трубы. Условия работы и требования к контролю ..……..…….. 14

1.2 Методы и средства контроля легкосплавных бурильных труб ……..... 20

1.3 Вихретоковый метод измерения толщины стенки немагнитных объектов ……..……..…….. 26

Выводы по главе 1……..……. 35

ГЛАВА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С НЕМАГНИТНОЙ ТРУБОЙ …… 37

2.1 Накладные вихретоковые преобразователи ..……..…….. 37

2.2 Описание задачи для построения модели ..……...…. 40

2.3 Численные методы решения задач вихретокового контроля ..…… 46

2.4 Построение модели взаимодействия ВТП с немагнитной трубой и исследование влияющих факторов ...…….…….. 57

Выводы по главе 2 ...……..……. 66

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА ВТП ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА ..……..…….. 67

3.1 Алгоритм преобразования сигнала ВТП ...……..……... 67

3.2 Программная отстройка от влияния электропроводности материала объекта контроля ..……..…… 70

Выводы по главе 3 ...……..……. 72

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ И АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА .…..…….. 74

4.1 Структурная схема вихретокового толщиномера ..……..……. 75

4.2 Интерфейс вихретокового толщиномера ..……...…….. 77

Выводы по главе 4 ..…….…… 80

ГЛАВА 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА …….. 81

5.1 Первичная настройка ……..…… 81

5.2 Рабочая настройка ……..……..…… 85

5.3 Калибровка ……..……...……... 86

Выводы по главе 5 ……...……..……. 89

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ……....……. 90

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ ……..……...……. 92

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ……..……..…….. 96

ПРИЛОЖЕНИЯ ……..……..……... 105

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БК – бурильная колонна

ВК – вихретоковый контроль

ВТП – вихретоковый преобразователь

ЛБТ – легкосплавная бурильная труба

ЛБТ ПН – легкосплавная бурильная труба повышенной надежности

МГЭ – метод граничных элементов

МИУ – метод интегральных уравнений

МКР – метод конечных разностей

МКЭ – метод конечных элементов

МЭЗ – метод эквивалентных зарядов

НК – неразрушающий контроль

ОК – объект контроля

ЭДС – электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

С быстрыми темпами развития буровых технологий для достижения максимальных технико-экономических показателей возникает необходимость совершенствовать приборы и методы контроля бурового оборудования, в частности легкосплавных бурильных труб (ЛБТ), изготавливаемых из алюминиевых сплавов согласно ISO 15546-2011 и ГОСТ 23786-79. Преимуществами этих труб являются: небольшой вес; высокий коэффициент облегчения в буровом растворе; коррозионная стойкость в агрессивных средах (сероводород и углекислый газ); более высокая по сравнению со стальными бурильными трубами гибкость, облегчающая вписываемость труб в сильно искривленные участки ствола; немагнитность материала, что требуется для проведения инклинометрии скважин. На сегодняшний день вихретоковый и ультразвуковой методы неразрушающего контроля (НК) ЛБТ признаны наиболее эффективными и получили широкое применение. В настоящее время, в соответствии с нормативными документами, контроль толщины стенки таких труб производится с использованием акустического метода, имеющего недостатки, связанные с высокой трудоемкостью и низкой производительностью контроля в условиях буровой площадки. Вихретоковый метод контроля толщины стенки ЛБТ может рассматриваться как альтернативный, свободный от указанных недостатков.

Тело трубы и зона неразъемного трубного соединения наиболее подвержены появлению дефектов при эксплуатации ЛБТ, что может привести к разрушению бурильной колонны (БК). Несмотря на требования российских ГОСТов, предписывающих проведение ультразвукового контроля толщины стенки трубы в нескольких сечениях, часто необходимо получение более подробной информации о состоянии стенки трубы для повышения достоверности контроля и предупреждения аварий. На сегодняшний день, несмотря на большое разнообразие толщиномеров, на рынке отсутствуют мобильные системы для оперативного контроля толщины стенки ЛБТ в полевых

условиях, с возможностью получения полной картины ее состояния. Разработка такого оборудования крайне необходима для повышения достоверности контроля, оценки остаточного ресурса и планирования дальнейших действий для обеспечения безаварийной работы.

Цель диссертационной работы и задачи исследования

Цель работы – разработка методов и средств вихретокового контроля толщины стенки бурильных труб в условиях буровой площадки при изменении основных влияющих факторов в широком диапазоне.

Задачи исследования

1. Разработать модель взаимодействия магнитного поля вихретокового преобразователя (ВТП) и немагнитной трубы, позволяющей оценить характер влияния на выходной сигнал преобразователя основных влияющих факторов.

2. Создать алгоритм преобразования сигнала ВТП, позволяющий обеспечить измерение контролируемого параметра объекта в условиях изменения влияющих факторов в широком диапазоне.

3. Разработать средства аппаратной и программной технической реализации многочастотного метода измерения толщины стенки бурильной трубы.

4. Разработать методики первичной и рабочей настройки толщиномера.

Методы исследования

При проведении исследований использовались методы аналоговой и цифровой обработки сигналов, методы аналитического расчета, математического моделирования и анализа, методы визуализации данных.

Научная новизна

Разработана модель взаимодействия магнитного поля вихретокового преобразователя и немагнитной трубы с использованием метода конечных элементов, позволяющая оценить характер воздействия на выходной сигнал преобразователя основных и дополнительных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы,

электропроводности материала, кривизны поверхности трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, поворота оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

Предложен многочастотный метод измерения толщины стенки трубы, основанный на использовании в качестве функции преобразования экспериментальной зависимости фазы вносимого напряжения нижней частоты от значения зазора, и толщины стенки, корректируемой в зависимости от изменения фазы вносимого напряжения верхней частоты, обусловленного изменением электропроводности материала.

Доказана эффективность использования в многочастотных вихретоковых толщиномерах метода разделения частотных составляющих сигнала вихретокового преобразователя, основанного на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

Предложены способы проведения первичной и рабочей настроек вихретокового толщиномера.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанный вихретоковый толщиномер позволяет оперативно решать задачи по контролю стенки ЛБТ в диапазоне толщин 5…15 мм при значении воздушного зазора до 15 мм, обеспечивает погрешность измерения ±5% в рабочем диапазоне и надежное выявление коррозионных и эрозионных поражений, как внутренней, так и внешней поверхности трубы.

Разработанные методы и средства позволяют производить мобильный контроль в условиях буровой площадки.

Используемые алгоритмы преобразования сигналов измерительной информации позволяют проводить измерения в широком диапазоне изменения влияющих факторов и могут быть применены для создания новых мобильных систем вихретокового контроля.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в научно-производственной деятельности ООО «НПК Интроскопия» (г. Томск) при разработке четырехканальной системы вихретокового контроля толщины стенки легкосплавных бурильных труб в условиях буровой площадки.

Адаптированные результаты работы используются для обучения студентов по дисциплине «Методы электрического, магнитного и вихретокового контроля», а также обучения специалистов вихретокового неразрушающего контроля.

Апробация работы

Результаты проведенных исследований обсуждались на научных семинарах в Национальном исследовательском Томском государственном университете, радиофизический факультет (Томск, 2018), Алтайском государственном университете, физико-технический факультет (Барнаул, 2018); в Государственном региональном центре стандартизации, метрологии и испытаний Томской области (Томск, 2018), на Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 2017 (Бердск, 2017), V Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (Томск, 2016), Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 2015 (Алтай, 2015), XVI Международной научно-технической конференции «Измерение. Контроль. Информатизация» (Барнаул, 2015).

Публикации

В соответствии с темой диссертации опубликовано 8 печатных работ, 6 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus. Получено 2 патента на изобретение.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с немагнитной трубой, разработанная с помощью метода

конечных элементов, позволяет оценить характер влияния изменения основных параметров объекта контроля на сигнал вихретокового преобразователя.

2. Для обеспечения высокой достоверности контроля толщины стенки при широком диапазоне изменений основных влияющих факторов может быть применен многочастотный метод, основанный на использовании в качестве функции преобразования экспериментальной зависимости фазы вносимого напряжения нижней частоты от значения зазора и толщины стенки, корректируемой в зависимости от изменения фазы вносимого напряжения верхней частоты, обусловленного изменением электропроводности.

3. Для разделения частотных составляющих сигнала вихретокового преобразователя толщиномера может быть эффективно использован метод, основанный на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

4. Проведение первичной и рабочей настроек вихретокового толщиномера обеспечивает достижение требуемых метрологических характеристик в условиях изменений основных влияющих факторов в широком диапазоне.

Личный вклад автора

Разработал модель взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с легкосплавной бурильной трубой для исследования влияющих факторов с использованием программного продукта Comsol Multiphysics. Провел экспериментальные исследования для подтверждения адекватности полученной модели. Разработал алгоритм преобразования выходного сигнала ВТП в значение толщины стенки ЛБТ. Написал программу в среде LabView для исполнения алгоритма и визуализации результатов. Участвовал в разработке контрольных образцов, методик первичной настройки, рабочей настройки, калибровки, реализовал их на практике. Проводил лабораторные испытания прототипа вихретокового толщиномера. Адаптировал и внедрял полученные результаты в процесс обучения студентов и специалистов неразрушающего контроля.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 106 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 91 источник, из которых 59 на русском языке, 32 – на иностранных. Работа содержит 5 таблиц и 28 рисунков.

Во введении отражены: актуальность диссертационной работы; положения научной новизны; используемые методы; цели, задачи и направление исследований; представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются методы НК толщины стенки ЛБТ и объект контроля.

Важность своевременного, оперативного и достоверного контроля толщины стенки сложно переоценить, так как разрушение трубы и, как следствие, ствола бурильной колонны приводит к огромным экономическим потерям и рискам, связанным с обеспечением безопасности рабочего персонала.

В соответствии с нормативными документами, используемыми на текущий момент, контроль толщины стенки таких объектов производится при помощи акустического метода контроля, имеющего известные недостатки, связанные с высокой трудоемкостью и низкой производительностью. Вихретоковый метод контроля толщины стенки бурильных труб может рассматриваться как альтернативный метод, свободный от указанных недостатков. С использованием накладных ВТП, достоинствами которых являются универсальность, возможность контроля объектов плоской, цилиндрической и сложной форм с односторонним доступом к объекту контроля, локальность, можно обеспечить высокую разрешающую способность и точно определить зону дефекта при сканировании поверхности объекта контроля.

Сложность решения задачи измерения толщины стенки электропроводящих труб с использованием накладного ВТП обусловлена возможным существенным изменением в реальных условиях контроля толщины стенки зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы, а также удельной электрической проводимости материала трубы и значительным

влиянием этих параметров на сигнал ВТП. Наиболее эффективным способом отстройки от воздействия на результаты вихретокового контроля одновременно нескольких влияющих факторов является использование многочастотного возбуждения вихревых токов.

Во второй главе рассматривается моделирование взаимодействия электромагнитного поля ВТП с немагнитной трубой.

Для исследования влияния на выходной сигнал ВТП таких реально встречающихся при контроле факторов, как изменение зазора между поверхностью ВТП и объектом контроля, изменение электропроводности объекта контроля, линейное и угловое смещение оси симметрии ВТП относительно оси симметрии объекта контроля, отклонение формы объекта контроля от правильной, наличие локальных дефектов и близость края объекта контроля, использованы численные методы, наибольшее применение из которых для рассматриваемого класса задач имеет метод конечных элементов (МКЭ). Преимущества МКЭ при решении задач заключаются в универсальности применения, произвольной форме обрабатываемой области, отсутствии необходимости аппроксимации объекта стандартными геометрическими фигурами, возможности решения несимметричных задач с учетом неоднородности параметров материалов и сред. Результаты математического моделирования при правильном построении и настройке модели достаточно точно совпадают с результатами физического моделирования.

Основные результаты, полученные с помощью указанной модели, графически отображены в виде годографов относительного вносимого напряжения ВТП от изменения указанных параметров объекта контроля.

В третьей главе рассматривается алгоритм преобразования сигнала ВТП толщиномера, позволяющий осуществить эффективную отстройку от влияния на результат измерения толщины объекта основных влияющих факторов. Особенностью решения является использование двухчастотного магнитного поля и экспериментальных функций преобразования, определенных с использованием образцов труб различной толщины стенки с фиксированной

удельной электрической проводимостью материала при различных значениях зазора. На первом этапе вычислительного преобразования информативных параметров сигнала ВТП, амплитуды и фазы обоих частот осуществляется вычисление значения зазора, затем вычисляется промежуточное значение толщины стенки в предположении, что удельная электрическая проводимость материала трубы равна удельной электрической проводимости образцов, после чего вычислительные преобразования обеспечивают отстройку от влияния на результат контроля изменений удельной электрической проводимости материала. Для этого вычисляется фаза вносимого напряжения первой частоты при измеренном зазоре и значении удельной электрической проводимости, соответствующей используемым для определения функций преобразования образцам; вычисляется разность фаз между измеренным значением вносимого напряжения первой частоты и значением для используемых при определении функций преобразования образцов труб, и определяется разность фаз второй частоты, зависящая от изменения первой, после чего делается поправка на изменение фазы второй частоты и рассчитывается значение толщины стенки объекта контроля.

В четвертой главе рассматриваются особенности технических решений программной и аппаратной реализации вихретокового толщиномера. Особенностью является то, что в объекте контроля осуществляется возбуждение вихревых токов двух синхронизированных частот. Такое возбуждение позволяет осуществить качественное разделение сигналов ВТП, обусловленных каждой в отдельности частотной составляющей вихревых токов. Схема построена таким образом, что амплитудно-частотная характеристика измерительного канала толщиномера имеет нулевые значения на частотах, кратных разностной частоте, что позволяет обеспечить качественное разделение сигналов разных частот без использования избирательных резонансных усилителей, уменьшение полосы пропускания которых ограничено нестабильностью частотозадающих элементов, характеристики которых даже при тщательном их подборе в значительной мере подвержены влиянию изменений температуры окружающей среды.

В пятой главе рассматривается метрологическое обеспечение разработанного вихретокового толщиномера.

Для корректной работы толщиномера в соответствии с заявленными характеристиками технической документации необходимо выполнить подготовку прибора.

На этапе изготовления выполняется первичная настройка, в соответствии с которой в вычислительный блок записываются данные амплитуды и фазы, определяются коэффициенты функций обратного преобразования, соответствующие значениям толщин контрольных образцов при фиксированных значениях зазора между поверхностью трубы и ВТП. Настройка выполняется в условиях лаборатории.

Перед началом работы с прибором выполняется рабочая настройка, в рамках которой производится балансировка ВТП при отсутствии объекта контроля и запись значения амплитуды первой частоты при нулевом зазоре между ВТП и поверхностью объекта контроля, которое используется в функции вычисления зазора; проверяется отклонение показаний прибора от действительного значения и производится автоматическая корректировка.

Для проверки соответствия между действительным и измеренным значением выполняется калибровка толщиномера на контрольном образце.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

1.1 Легкосплавные бурильные трубы. Условия работы и требования к контролю

Легкосплавная бурильная труба представляет собой сборную конструкцию, состоящую из алюминиевого тела трубы и стальной замковой части, соединенных между собой с помощью трубной резьбы по ГОСТ 23786-79. Соединение является неразъемным и должно работать в течение всего срока эксплуатации бурильной трубы. На практике наиболее распространены трубы из алюминиевых сплавов марки 1953Т1 и Д16Т, изготавливаемые методом прямого гидравлического горячего прессования. С быстрым ростом технологического прогресса, бурильные трубы из алюминиевых сплавов получили широкое применение. С их использованием осуществляется бурение 70–80% объема проходки нефтяных и газовых скважин [4, 14, 15, 35, 76].

При бурении скважин очень важно сохранять высокую надежность бурильной колонны (особенно если это касается скважин большой глубины с использованием горизонтальной проходки), снижать напряженно-деформированное состояние для обеспечения безаварийной работы в условиях перегрузок и высоких температур. Существенным образом на это влияет компоновку и вес бурильной колонны, определяющие уровень нагрузок на буровое оборудование.

На сегодняшний день основным материалом для изготовления бурильных труб остается сталь, однако трубы из алюминиевых сплавов по некоторым характеристикам их превосходят, что определяет их эффективность и целесообразность использования в составе бурильных колонн. К таким свойствам относятся: низкий удельный вес, высокая удельная прочность, высокое облегчение в буровом растворе, низкое значение модулей продольной упругости и сдвига, высокие виброгасящие свойства, коррозионная стойкость в агрессивных средах, в частности в H_2S и CO_2, немагнитные свойства, легкая разбуриваемость.

Низкий удельный вес

Растягивающие нагрузки при подъеме, крутящий момент БК и сжимающие силы определяют ограничения использования инструмента при бурении длинных вертикальных, горизонтальных, наклонно-направленных скважин. Указанные параметры зависят не только от комплектующих БК, но и от удельного веса материала используемых труб.

Высокая удельная прочность

Несмотря на то, что алюминиевые сплавы имеют более низкие прочностные свойства по сравнению со стальными, основной лимит уходит на преодоление сопротивления и собственного веса БК, поэтому включение ЛБТ в компоновку показывает большую эффективность. Механические свойства сплавов, используемых при изготовлении ЛБТ, приведены в Таблице 1.

Таблица 1 − Физико-механические свойства сплавов, используемых для производства ЛБТ

Характеристика	Тип сплава	
	Д16Т	1953Т1
Предел прочности min, МПа	460	530
Предел текучести min, МПа	325	480
Расчетная плотность, кг/м^3	2180	2820
Относительное удлинение, min, %	12	7
Относительное сужение, min, %	18–20	14–15
Модуль упругости: -E -G, МПа × 10^5	0,72; 0,26	0,70; 0,275
Рабочая температура max, °С	160	120

Высокое облегчение в буровом растворе

Компоновка БК с использованием ЛБТ дает повышенный эффект облегчения в тяжелых буровых растворах.

Низкое значение модулей продольной упругости и сдвига

Сниженное значение модуля упругости в ЛБТ улучшает проходимость БК на участках с большими перегибами, тем самым улучшается возможность оптимизации профиля скважины. Более эффективное бурение достигается на участках с малым радиусом кривизны благодаря снижению уровня напряжений на изгиб. Пластичность материала влияет на определение места верхней границы прихвата инструмента, удлинение и угол закручивания БК. Применение ЛБТ увеличивает допуски для упругого удлинения БК и количества оборотов инструмента по сравнению со стальными трубами. Эти свойства позволяют увеличить точность определения места прихвата и расширяют возможности для регулировки растягивающих нагрузок и момента вращения, которые прилагаются к бурильной колонне при ликвидации прихвата силовым методом.

Высокие виброгасящие свойства

Рассеивание энергии упругих колебаний в ЛБТ выше, чем в стальных бурильных трубах настолько, что логарифмический декремент затухания может быть выше в 1,5 раза для типовых размеров. Более мягкие алюминиевые трубы позволяют сдвинуть в область пониженных значений собственные частоты БК и при правильном подборе компоновки избежать резонанса.

Коррозионная стойкость в агрессивных средах

Высокие антикоррозионные свойства ЛБТ, в частности для сред H_2S и CO_2, позволяют применять такие трубы без специальных защитных мер. Особые преимущества эти свойства дают при бурении морских скважин и скважин с пластовыми жидкостями.

Лабораторные испытания по определению коррозионной стойкости используемых для производства ЛБТ сплавов в растворах с различными значениями pH и для случая полного насыщения раствора H_2S показали результаты, приведенные в Таблице 2.

Таблица 2 – Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов (скорость коррозии, г/м^2 в час)

Среда	Тип сплава		
	Д16Т	1953Т1	1980Т1
Щелочная, pH 11 (5% NaCl + NaOH)	0,49	0,21	0,34
Нейтральная, pH 7 (5% NaCl)	0,01	0,02	0,01
Кислотная, pH 2,5 (5% NaCl + 0,5% CH_3COOH)	0,05	0,04	–
H_2S до полного насыщения	Коррозия отсутствует		

Немагнитные свойства

Инклинометрия скважины и проведение геофизических исследований требуют использование немагнитных элементов БК. В современной практике широко распространено использование диамагнитных труб аустенитного класса или более дорогих специальных труб, изготовленных из сплавов системы никель-кобальт-молибден. Легкосплавные бурильные трубы существенно дешевле таких труб, и немагнитные свойства позволяют их использовать в компоновках для проведения любых видов магнитного каротажа скважины без использования упомянутого инструмента.

Легкая разбуриваемость

Нередко из-за неправильного расчета затрубного пространства в процессе бурения возникает прихват колонны, особенно при установке цементных мостов и спуске хвостовиков. Применяя ЛБТ в нижней части БК, задача освобождения инструмента значительно упрощается, так как такие трубы легко разбуриваются шарошечным долотом со скоростью 15–20 м/ч [1, 3, 35, 58].

Практика показывает, что при бурении протяженных горизонтальных скважин основными ограничениями являются: большие величины крутящего момента и сложность доведения до забоя проектных осевых нагрузок,

возникающих из-за высоких значений сил трения. Легкосплавная бурильная труба практически в 2,5 раза легче стальной трубы аналогичного типоразмера, и, соответственно, в буровом растворе эта разница возрастает еще. При этом прочностные свойства ЛБТ ниже таковых стальных труб лишь в 1,5 раза. Разница в весовых, прочностных параметрах и силах трения определяет эффективность применения ЛБТ. Ликвидация заклинок силовым методом на больших глубинах без использования ЛБТ практически невозможна, так как резерв прочности стальных труб тратится на преодоление нагрузок от сил трения и собственного веса, поэтому довести увеличенную нагрузку и вращающий момент до прихваченного сечения можно только с использованием облегченной компоновки. Модули продольной упругости и сдвига алюминиевых сплавов, характеризующие пластичность материала, уровень действующих напряжений и его сопротивление знакопеременным нагрузкам на изгиб меньше практически в три раза, чем у стали. Указанные свойства позволяют снизить уровень напряжений в БК, повысить предел усталости труб и обеспечить возможность бурения скважин на малых радиусах искривления с быстрым набором или сбросом кривизны [60, 71, 79].

С увеличением глубин скважин использование ЛБТ помогает снизить долю времени на проведение спуско-подъемных операций для смены породоразрушающего инструмента.

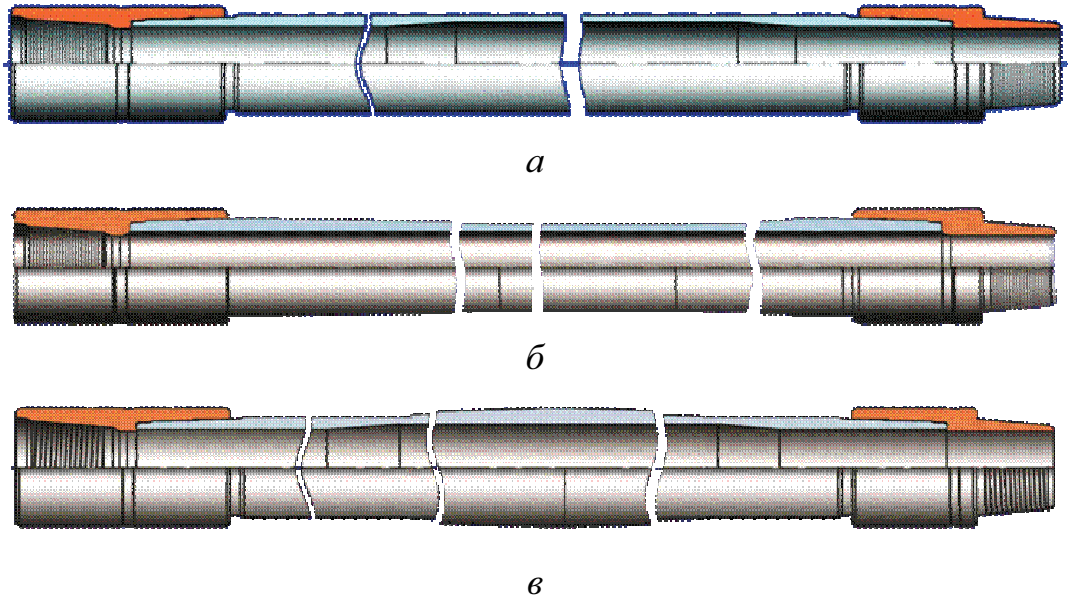
Одним из крупных мировых производителей легкосплавных бурильных труб является фирма «Акватик» (Россия), входящая в состав компании Weatherford, и изготавливающая весь ряд бурильных труб в соответствии со стандартом ISO 15546. На сегодняшний день «Акватик» производит легкосплавные бурильные трубы повышенной надежности (ЛБТПН), отличающиеся способом соединения трубы и замка на упорной трапецеидальной резьбе с коническим стабилизирующим пояском [1].

Типоразмеры и технические характеристики ЛБТПН приведены Таблице 3. Базовая длина труб составляет 12200 мм, но может быть уменьшена до 9200 мм или 8100 мм, если того требует конструкция буровой вышки.

Таблица 3 − Типоразмеры и технические характеристики легкосплавных бурильных труб повышенной надежности

Типоразмер трубы	Длина трубы, м	Толщина стенки, мм	Диаметр трубы, мм	Диаметр замка, мм	Резьбовое соединение (аналог по API)	Масса трубы в сборе, кг	Исполнение трубы с протекторным утолщением		Предельные прочностные параметры Алюминиевый сплав Д16Т/1953Т1		
							Диаметр протектора	Масса трубы в сборе	Растягивающая нагрузка, кН	Крутящий момент, кН*м	Внутреннее давление, МПа
90х9	9,2	9	91	108	З-86 (NC 31)	80,5	107	87,5	750/1110	13/19	56/83
103х9	9,3	9	103	120,6	З-102 (NC 38)	96,0	118	105,0	865/1275	17,1/25,3	49,7/73,4
103х11	12,2	11	103	120,6	З-102 (NC 38)	137,0	118	146,5	1033/1526	20/29	61/90
114х11	12,2	11	116	152	З-122 (NC 46)	168,0	138	185,0	1180/1740	25,9/38,3	53,9/79,7
129х11	12,2	11	129	159	З-133 (NC 50)	186,0	150	202,5	1325/1957	25,9/48,8	48,5/71,6
147х11	12,2	11	147	178	З-147 (5 1/2 FH)	217,0	172	242,0	1525/2255	44,3/65,4	42,6/62,9
147х13	12,2	13	147	178	З-147 (5 1/2 FH)	239,0	172	264,0	1780/2625	50,2/74,1	50,3/74,3
147х15	12,2	15	147	178	З-147 (5 1/2 FH)	268,5	172	293,5	2022/2986	55,7/82,1	58/85,7
168х11	9,5	11	168	203	З-171 (6 5/8 FH)	231,0	194	264,0	1762/2603	60/87	37/55
168х13	9,5	13	168	203	З-171 (6 5/8 FH)	250,0	194	283,0	2056/3037	68/100	44/65

Трубы изготавливаются с внутренней и наружной высадкой законцовок, а также с протекторным утолщением в середине трубы для снижения интенсивности износа (Рисунок 1).



а

б

в

Рисунок 1 − Легкосплавные бурильные трубы повышенной надежности с наружной (*а*) и внутренней (*б*) высадкой законцовок, с протекторным утолщением в середине трубы (*в*)

Обобщая описанные показатели ЛБТ, можно отметить следующие преимущества их использования по сравнению со стальными трубами:

1) увеличение глубины бурения скважины;
2) снижение напряженно-деформированного состояния бурильной колонны;
3) сокращение времени проведения спуско-подъемных операций;
4) повышение энергоэффективности, достигаемой посредством снижения веса БК, уменьшением затрат на ГСМ и т.д.;
5) снижение затрат на транспортировку ЛБТ.

1.2 Методы и средства контроля легкосплавных бурильных труб

При эксплуатации бурильных труб в условиях воздействия больших напряжений, высоких температур, сил трения и агрессивных сред существует необходимость проведения своевременного контроля используемых изделий, так

как их разрушение влечет за собой серьезные последствия. Разрушающие методы контроля не применимы ввиду необходимости дальнейшего использования инспектируемого оборудования. Для обеспечения контроля и своевременного предупреждения аварийных ситуаций применяются неразрушающие методы контроля.

Основной причиной выхода из строя ЛБТ является разрушение тела трубы и зоны неразъемного трубного соединения, вызванное коррозионным воздействием, эрозией и механическим износом. Содержание песка и абразивных частиц в закачиваемом буровом растворе более 1% ведет к интенсивному износу внутренних элементов БК. При бурении верхних участков скважины направлений и кондукторов на месторождениях Западной Сибири содержание песка и абразивных частиц в закачиваемом буровом растворе нередко превышает 3%, это связано с геологическим составом пород, представленных в большей степени песчаниками. Система очистки не в состоянии снизить уровень содержания песка до 1%, так как на данных интервалах бурения расход бурового раствора может достигать 80 л/с, что также является причиной активного разрушения бурового инструмента. В случаях, когда имеют место неполадки в системе очистки, нарушена технология приготовления бурового раствора или используются некачественные химические реагенты, содержание песка также может превышать 1%.

Вращение БК приводит к износу внешней ее части за счет трения о породу в необсаженном стволе или о стальную обсадную колонну. Вращение может достигать 150 об/мин. При бурении в режиме слайдирования, когда отсутствует вращение бурового инструмента, но возможно его хождение вниз-вверх, наблюдается односторонний износ инструмента.

При составлении программы на бурение и расчете бурильной компоновки учитываются предельные нагрузки на каждый элемент БК, но реальные скважинные условия и аварийные ситуации могут привести к превышению этих параметров. В случае прихвата осуществляется работа гидромеханическим ясом,

устанавливаются кислотные ванны и предпринимаются попытки вытягивания инструмента с превышением растягивающих нагрузок.

Важность своевременного, оперативного и достоверного контроля толщины стенки ЛБТ сложно переоценить, так как разрушение трубы и, как следствие, ствола БК, приводит к огромным экономическим издержкам и рискам, связанным с обеспечением безопасности рабочего персонала. Как известно, механическое разрушение при бурении и коррозия уменьшают толщину стенки трубы, что влечет за собой потерю устойчивости, приводящую, как следствие, к аварийной ситуации. Поэтому определение таких зон и отбраковка труб имеет большое значение [7, 41].

Кроме определения толщины стенки в соответствии с действующими нормативными документами для оценки состояния ЛБТ используется комплекс мероприятий, основанных на различных физических принципах. В первую очередь производится визуальный и измерительный контроль, являющийся технически наиболее простым способом определения дефектов, но не позволяющий оценить их величину на недоступных к осмотру участках. Для проведения дефектоскопии используют ультразвуковой и вихретоковый методы, а также контроль проникающими веществами. Для увеличения достоверности и информативности контроля, как правило, используются одновременно несколько методов. Сегодня широкое применение получили несколько вариантов проведения контроля: непосредственно в скважине, на буровой площадке и в условиях ремонтного цеха, каждый из которых имеет свои преимущества.

В соответствии с нормативными документами, используемыми на территории России на текущий момент, в частности РД 41-01-25 (Неразрушающий контроль бурового инструмента и оборудования при эксплуатации. Организация и порядок проведения работ), для алюминиевых труб, изготовленных по ГОСТ 23786-79 (Трубы бурильные из алюминиевых сплавов. Технические условия) [15], контроль толщины стенки осуществляется при помощи акустического метода по четырем образующим трубы в местах наиболее вероятного износа (Рисунок 2), в трех (безпротекторные алюминиевые

трубы) или пяти точках (протекторные алюминиевые трубы) на каждой образующей [42, 75, 78].

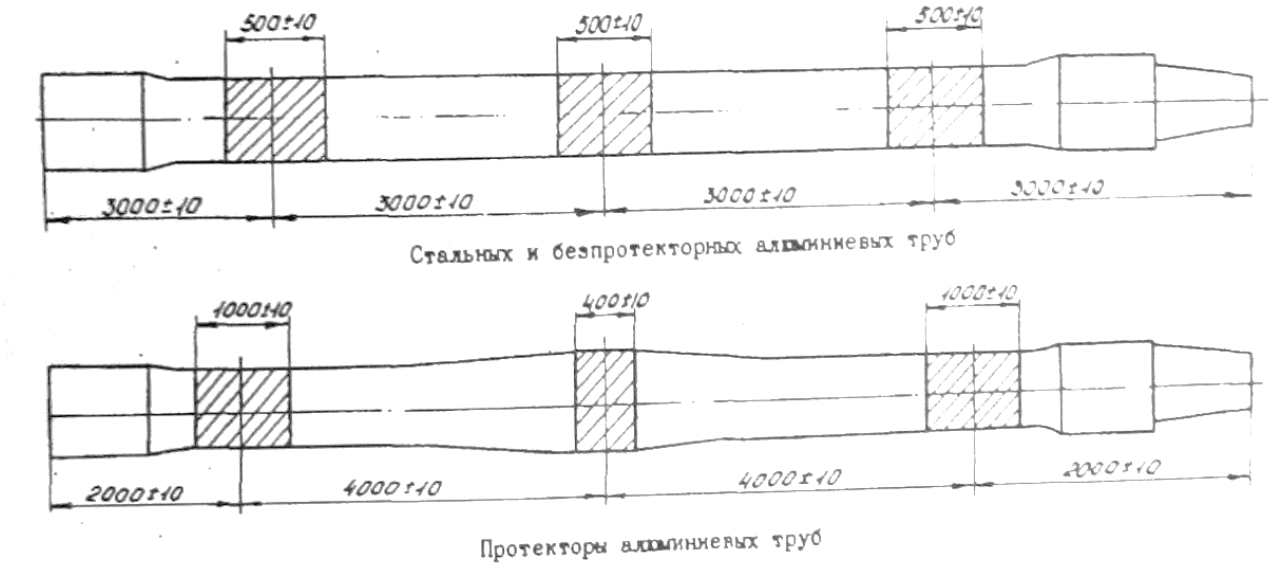


Рисунок 2 − Зона контроля толщины стенки алюминиевых бурильных труб

Рекомендуемый и наиболее часто встречающийся акустический метод состоит в следующем: преобразователь, установленный на поверхности изделия, излучает зондирующий импульс, который, отражаясь от противоположной стенки объекта контроля, регистрируется этим же датчиком [32, 45, 81]. Время импульса зависит как от пути прохождения звука в объекте, так и от характеристик материала.

Зачастую требования к контролю со стороны заказчика гораздо шире рекомендаций отечественных стандартов, что накладывает определенные обязательства на исполнителей по полноте и качеству контроля. На проектах, выполняемых иностранными компаниями, используются рекомендации по контролю объектов бурильной колонны американского стандарта DS-1, включающего следующие требования к контролю толщины стенки тела трубы [30]:

1) использование звукового импульсного инструмента с цифровым дисплеем;

2) оборудование датчика раздельными приемо-передающими устройствами;

3) калибровка по значениям от 0,1 до 2 дюймов, но не реже одного раза в 6 мес.;

4) при калибровке и проведении измерений должна использоваться одинаковая жидкость, обеспечивающая акустический контакт;

5) стандартный образец должен иметь не менее двух значений толщины следующего характера:

– участок большей толщины равен номинальной толщине стенки плюс 0,05 дюйма;

– участок меньшей толщины равен 70% от номинальной толщины стенки минус 0,05 дюйма;

6) стандартный образец проверяется на предмет соответствия заявленной толщине с точностью до 0,002 дюйма с помощью микрометра;

7) толщина обоих участков стандартного образца должна быть определена толщиномером после калибровки с точностью до ± 0,001 дюйма.

Процедура контроля [30]:

– приемный и передающий элементы толщиномера устанавливаются перпендикулярно продольной оси трубы;

– обеспечивается акустический контакт с помощью специальной контактной жидкости, измерение толщины производится по окружности трубы с шагом не более 1 дюйма;

– снимаются показания с шагом 1 фут (30,5 см) от геометрического центра трубы. Дополнительные показания снимаются таким же образом на других участках по усмотрению инспектора или требованию заказчика;

– в зоне выявления наименьшего значения инспектор должен провести замеры в радиусе 1 дюйма (2,54 см) от точки минимума для подтверждения этого значения.

Изучив вышеуказанные стандарты, используемые для акустического контроля ЛБТ, становится понятно, насколько высокую трудоемкость представляет использование этого метода в условиях буровой площадки.

Однако, несмотря на описанные трудности проведения контроля, акустические методы являются популярными и широко применяются для толщинометрии и дефектоскопии [64, 73, 81, 84]. Сервисная компания Schlumberger (США) отмечает, что ультразвуковой контроль БК имеет

преимущества перед другими методами, используемыми в настоящее время: рычажные профилемеры контролируют стенку трубы только с внутренней поверхности; измерители потока магнитной индукции имеют ограниченную точность; электромагнитный контроль дает низкое разрешение, показывая среднюю потерю толщины, которая интерпретируется лучшим образом при сопоставлении с базовой зависимостью.

Ведущие производители имеют акустические дефектоскопы собственных разработок. Компания Schlumberger выпускает дефектоскоп Ultrasonic Casing Imager (UCI) [51]. В описании утверждается, что этот прибор обеспечивает контроль как внутренней, так и наружной коррозии. Использование высокой частоты сигнала определяет разрешение, минимальный размер дефекта составляет 0,3 дюйма для ширины луча 0,11 дюйма. Такая частота сигнала приводит к большому затуханию. Для обеспечения бесперебойной работы внутри трубы последняя должна быть заполнена водой или нефтью без примеси твердых фракций и газа, или жидкостью плотностью не более 1,15 г/см^3. Заявленный диапазон измерений от 4,5 до 15,2 мм с погрешностью измерений толщины стенки 4%.

Компания Halliburton (США) предлагает несколько приборов, позволяющих оценивать состояние стенок труб. Pulse Echo Tool [PET] содержит восемь стационарных преобразователей, расположенных в два слоя. Используемая частота излучения – 350 кГц. По частоте резонанса оценивается толщина стенки трубы, по времени пролета импульса — внутренний диаметр. Основное назначение прибора – оценка состояния цементного кольца. Из-за низкого разрешения прибора он не подходит для поиска потери толщины стенки локального характера и поиска дефектов. Circumferential Acoustic Scanning Tool - Visualization (CAST-V) по принципу действия является аналогом прибора UCI компании Schlumberger, но использует более низкую частоту. Исходя из описания, эта установка может работать не только в обсаженных скважинах, но и в открытом стволе, что обеспечивает возможность одновременного контроля толщины стенки и диаметра трубы, а также оценки состояния цементного кольца.

Наземная ультразвуковая дефектоскопия заслуживает особого внимания, так как является более достоверной, поэтому получила широкое распространение. Компания «Алтес» (г. Москва) разрабатывает акустическое оборудование для наземной дефектоскопии, содержащее кроме блока дефектоскопа различного рода вспомогательное оборудование, в частности переносные моторизированные стеллажи для автоматизированного контроля по всей наружной поверхности трубы, матрицы преобразователей сканирующей головки, позволяющие определять толщину стенки трубы и выявлять различные типы дефектов, в том числе продольно и поперечно ориентированные трещины [2]. Недостатком таких установок являются их массивность и необходимость создания определенных условий, т.е. предполагается контроль на трубной базе, что не всегда применимо из-за большой удаленности таких баз от буровой.

Недостатки ультразвукового метода связаны с высокой трудоемкостью и низкой производительностью, обусловленными необходимостью подготовки поверхности объекта контроля и обеспечением акустического контакта, особенно остро ощутимы при контроле в условиях буровой площадки. Трудности в подготовке поверхности и непростые производственные условия увеличивают сложность этого метода в разы. Вихретоковый метод контроля толщины стенки ЛБТ может рассматриваться как альтернативный, свободный от указанных недостатков [9, 10, 34, 35, 38, 42, 55].

1.3 Вихретоковый метод измерения толщины стенки немагнитных объектов

Вихретоковый метод контроля основан на анализе распределения электромагнитного поля в электропроводящих металлических объектах с неоднородностями различного характера. Такие расчеты относятся к числу сложных краевых задач электродинамики и заключаются в определении векторных функций в интересующих областях с границами различной формы.

Первым практическим применением вихревых токов для НК стало разработанное валийским ученым Дэвидом Хьюзом устройство с

трансформаторным ВТП для оценки электрофизических параметров металлоизделий.

Большой вклад в основание практического применения вихретокового контроля внес немецкий ученый, профессор, специалист в области электромагнитной дефектоскопии Фридрих Ферстер, основавший компанию «Институт доктора Ферстера». Он разработал теорию метода для контроля металлических изделий и первым использовал амплитудно-фазовый способ обработки сигналов.

Основоположником фундаментальных и теоретических исследований в СССР является А. Б. Сапожников. Он систематизировал последовательность решения задач теории электромагнитной дефектоскопии в переменных магнитных полях [45].

Качественную картину распределения вихревых токов от дефекта, возбуждаемых накладным датчиком, первыми описали В. В. Власов и В. А. Комаров [11]. Ими установлен характер распределения вихревых токов по дефекту, который является одинаковым для магнитных и немагнитных материалов.

Исследования по распределению поля дефекта с использованием переменного магнитного поля проводились В. В. Клюевым [31] и П. И. Бедой [6]. Развитие средств вычислительное техники привело к широкому распространению численных методов, в том числе для решения задач НК на основании взаимодействия электромагнитного поля с различными дефектами [12].

Для решения двумерных задач использовались методы конечных элементов (МКЭ) и интегральных уравнений (МИУ) [25, 51].

В развитие теоретических основ электромагнитной дефектоскопии существенный вклад внес В. Е. Шатерников [57]. Предлагаемые им расчетные аналитические модели охватывают широкий класс задач электромагнитного контроля объектов сложной формы, разработаны способы расчета выходных параметров преобразователей с произвольным сечением обмоток.

Строгому математическому решению двумерных задач вихретоковой дефектоскопии посвящены работы Ю. К. Федосенко [54]. Рассматривается поле накладного преобразователя в виде двухпроводной линии и расположенного над проводящим объектом плоской формы с поверхностными и внутренними дефектами различного характера, которое рассчитывается системой интегральных уравнений с использованием функций Грина, эффективно решаемых численными методами.

Показанные модели имеют практическую ценность при разработке средств вихретоковой дефектоскопии. Их многообразие свидетельствует о многогранности и сложности решения задач взаимодействия электромагнитного поля ВТП и объекта контроля с дефектами. Однако сегодняшний уровень вихретоковой дефектоскопии показывает ограниченность применения существующих моделей для решения широкого класса задач, и все более широкое применение с развитием процессорной техники находят программы для численного решения дифференциальных уравнений.

Особое внимание для развития вихретокового контроля уделялось исследованию ВТП. Работы многих ученых, в том числе В. Г. Герасимова [12], В. В. Клюева [31, 38], В. Е. Дидса и Ц. В. Додда, А. Л. Дорофеева [26, 27], А.И. Никитина [40]. И. Г. Лещенко, Н. М. Родигина, А. Б. Сапожникова [45], Ф. Ферстера, В. Е. Шатерникова [58], Ю. М. Шкарлета [36, 46], Н. Н. Зацепина, В. В. Дякина, В. А. Сандовского [28] описывают такие исследования.

Большинство исследований этих авторов посвящены решению краевых задач методом разделения переменных. Рассматриваются модели различного характера (накладной преобразователь над многослойным электропроводящим плоским объектом, многослойный проводящий цилиндр в поле проходного ВТП; ВТП над электропроводящей сферой и т.д.).

Ю. М. Шкарлет предложил методику для расчета накладных ВТП в приближенном виде, используемых для контроля электропроводящих изделий плоской формы, которая позволила найти закономерности в распределении электромагнитного поля ВТП, взаимодействующего с объектом контроля, и выделить способы обработки сигналов [36].

В тот же период накладные цилиндрические ВТП исследовал В. С. Соболев [46]. С помощью вычислительной техники были проведены точные расчеты поля кругового витка, в том числе с учетом размеров ВТП.

В. Е. Шатерников и его ученики рассмотрели задачи вихретокового контроля изделий сложной формы, в частности такие модели, как сфероиды в поле накладного витка, для которых рассчитаны вносимое напряжение, приведены годографы, проанализировано влияние некоторых характеристик объекта контроля на изменение сигнала ВТП [57]. Разработаны оптимальные конструктивные параметры ВТП для контроля качества и геометрии изделий сложной формы, в том числе работающих в тяжелых условиях и при высоких температурах.

На основании полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований распределения электромагнитного поля ВТП при взаимодействии с объектами различной формы разработаны точные и приближенные методы расчета. Следует отметить, что в большинстве работ обработка сигнала реализуется амплитудным, амплитудно-фазовым и фазовым способами, нашедшими широкое применение в современных приборах и системах вихретокового контроля. Кроме упомянутых выше, существуют и другие способы обработки сигнала и отстройки от мешающих факторов, разработанные отечественными и зарубежными учеными: автогенераторный, переменно-частотный, многочастотный, модуляционный и др.

Задача отстройки от мешающих факторов с увеличением точности контроля и определением параметров различных (поверхностных и подповерхностных) дефектов в немагнитных объектах решается в работе А. Я. Тетерко [49]. Здесь также рассмотрены некоторые аспекты разработки электромагнитных дефектоскопов с использованием нескольких частот.

Вихретоковому контролю с использованием адаптивных средств посвящены работы А. В. Ивченко [29]. Им разработан одночастотный вихретоковый дефектоскоп, имеющий автоматическую установку рабочей частоты и чувствительности, позволяющий определять коррозионные поражения в обшивке летательных аппаратов с учетом изменения толщины

стенки и защитных покрытий. В работе сделан выбор оптимальной рабочей частоты и рассмотрены механизмы повышения точности измерений коррозии на внутренней стороне объекта контроля. Проанализировано воздействие на сигнал ВТП трех влияющих факторов: толщины стенки объекта контроля, воздушного зазора между поверхностью объекта и ВТП, глубины залегания дефекта.

Стремительный рост процессорных технологий позволил моделям, созданным с помощью численных методов, выйти на новый уровень. Численные методы дали возможность моделировать объекты сложной геометрической формы и существенно снизить временные и трудозатраты на проведение некоторых исследований, что позволило анализировать распределение электромагнитного поля и визуализировать результаты. Для оценки параметров дефектов стало возможным широкое использование результатов расчетов теоретических моделей при различных условиях контроля объекта.

До недавнего времени область применения вихретокового контроля ограничивалась выявлением поверхностных дефектов, определением толщины стенки немагнитных металлических объектов до 5 мм в узких диапазонах отстройки от влияния зазора между ВТП и объектом контроля [44, 55, 83]. В работе Ю. К. Федосенко [31] отмечается, что наиболее широко применяются ультразвуковые и радиационные методы, обладающие более высокой точностью, тогда как применение вихретоковых толщиномеров ограничивается измерением толщин в диапазоне от нескольких мкм до 2–3 мм. Дополнительно показана эффективность использования ВТП трансформаторного типа и фазового способа для измерения толщины с отстройкой от влияния изменения зазора до поверхности объекта контроля.

Отдельное внимание следует уделить количеству одновременно используемых частот тока возбуждения ВТП. На сегодняшний день широкое применение нашли одно-, двух- и трехчастотные способы. С увеличением количества частот появляются широкие возможности по разделению влияющих факторов и отстройке от мешающих факторов. При этом следует отметить, что важной задачей является качественное разделение частотных составляющих

измерительного сигнала. Существующие решения применительно к задаче вихретоковой толщинометрии имеют ряд недостатков, которые описаны ниже.

При измерении тонких электропроводящих слоев значения толщины T и удельной электрической проводимости σ принципиально не разделяются, поэтому прибор измеряет произведение ($T\sigma$) двух параметров. Поскольку материал слоя в подавляющем большинстве случаев известен, то значение σ заносится в базу данных прибора и учитывается программно при вычислении толщины слоя. Значение σ более точно подбирается на этапе калибровки прибора на образцах с известным значением толщины. По такой методике калибруются известные измерители толщины металлизации отверстий печатных плат.

Существует разработка электромагнитного толщиномера [86], содержащего последовательно соединенные генератор синусоидального сигнала, ВТП, усилитель, схему амплитудно-фазового преобразования сигнала ВТП, в которой в качестве опорного используется выходное напряжение генератора, и индикатор. Благодаря амплитудно-фазовому преобразованию сигнала в данном устройстве осуществляется отстройка от влияния на результаты измерений толщины изменений зазора между ВТП и объектом контроля. Недостатками этого устройства являются отсутствие отстройки от влияния изменений электропроводности материала и малый диапазон отстройки от влияния изменений зазора.

Известно устройство для контроля толщины металлических изделий [87], содержащее два генератора синусоидальных сигналов высокой и низкой частот, подключенных ко входам двухчастотного ВТП, схему частотного выделения и амплитудно-фазового преобразования сигналов ВТП и индикатор. Благодаря наличию двухчастотного возбуждения вихретокового преобразователя устройством обеспечивается эффективная отстройка от влияния на результаты измерений изменения зазора между ВТП и объектом контроля в значительном диапазоне. Недостатком этого устройства является малый диапазон измерений и трудоемкость отстройки от влияния изменений электропроводности материала.

В исследованиях В. Ф. Булгакова и И. И. Толмачева [9, 10], а также В. В. Косых и соавт. [34] рассматривается вопрос контроля толщины стенки ЛБТ вихретоковым методом с использованием двух частот. Недостатком этого метода является отсутствие отстройки от изменения электропроводности материала, а также сильное влияние измерений температурных условий на результат. Предложенный авторами толщиномер содержит: генератор, соединенный с возбуждающей обмоткой накладного дифференциального трансформаторного ВТП; блок предварительной обработки сигналов, на который поступает напряжение с измерительных обмоток ВТП; измеритель разности фаз, на который поступают сигнал с блока предварительной обработки и опорное напряжение; блок запоминающих устройств, преобразующий разность фаз в цифровой код; формирователь управляющих сигналов, осуществляющий управление блоками и выдающий сигналы начала и конца трубы. Для предотвращения влияния зазора h между ВТП и поверхностью контролируемой трубы на показание толщиномера, значение фазы корректируется на величину части опорного напряжения, что смещает начало координат комплексной плоскости вносимого напряжения ВТП и обеспечивает отстройку от влияния зазора. Такой способ трудно применить для поставленной задачи измерений толщины стенки ЛБТ в условиях буровой площадки, так как ни диапазон измеряемой величины, ни формат отстройки от влияния электропроводности σ не обеспечивают современных требований к контролю. Следует отметить: в работе В. В. Косых и соавт. [34], как и в исследовании Ю. К. Федосенко [55], отмечается, что серийно выпускаемые вихретоковые толщиномеры способны измерять толщину немагнитных труб в диапазоне лишь 0,5…5,0 мм.

Известны разработки толщиномеров для измерений толщины стенки ЛБТ диаметром 129 мм и наиболее распространенных 147 мм в интервале 6–12 мм. Эти приборы снабжены разъемными проходными ВТП и позволяют осуществлять контроль непосредственно при спуско-подъемных операциях, однако они регистрируют только интегральную характеристику утонения стенки

по всему сечению, что не позволяет выявить разностенность и локальные утонения, а также имеют низкую точность.

В работе Benoit de Halleux et al. [65] рассмотрен способ определения толщины стенки немагнитных труб диаметром 12–20 мм и номинальной толщиной от 0,9 до 2,5 мм с погрешностью в пределах 2%. Диапазон изменений влияющих факторов и формат отстройки не позволяют рассматривать такое решение использования применительно к контролю ЛБТ.

Многочастотному контролю изделий из алюминиевых сплавов накладным ВТП посвящена работа [72]. В устройстве используется две частоты, экспериментальный метод с применением цифровой обработки, реализующей функции Уолша. Такая методика имеет ограничения по диапазону изменений влияющих факторов (зазора между ВТП и поверхностью ОК и электропроводности) и не подходит для решения текущей задачи.

Трехпараметровый способ вихретокового контроля металлических немагнитных объектов, реализованный в устройстве [52], позволяет отстраиваться от влияния изменения зазора и электропроводности, что является близким по идее решением к предлагаемому в настоящей работе. Его недостатком является низкая достоверность контроля ввиду невозможности качественного разделения реакций ВТП на взаимодействие с объектом каждой в отдельности частотных составляющих возбуждающего магнитного поля. Это обусловлено использованием в составе устройства для обеспечения частотной избирательности измерительных каналов избирательных резонансных усилителей, уменьшение полосы пропускания которых ограничено нестабильностью частотозадающих элементов, характеристики которых даже при тщательном их подборе в значительной мере подвержены влиянию изменений температуры окружающей среды. Особенно сильная зависимость результатов контроля от температуры имеет место при измерении удельной электрической проводимости материала σ и толщины объекта контроля T, в случае реализации которого основными информативными параметрами сигнала вихретокового преобразователя являются фазы сигналов второй и третьей

частот. Такой вариант является близким к решению, предлагаемому в настоящей работе по использованию нескольких частот, но имеет существенные недостатки в стабильности показаний при изменении температурных условий и низкую точность в широком диапазоне изменений влияющих факторов.

Интересное решение предложено в работе С. С. Куликова [35], где рассматривается вопрос контроля толщины стенки непосредственно в скважине, используя измерение реакции вихревых токов матрицей измерительных катушек, расположенных во внутренней полости контролируемой трубы с взаимно перпендикулярным расположением оси катушки и поверхности трубы. Такой способ с измерением тангенциальной составляющей магнитного поля имеет достоинство в виде непосредственного контроля в стволе скважины. Недостатком его является низкая точность оценки толщины, не удовлетворяющая количественному контролю. Также исследованию толщины стенки с внутренней поверхности трубы посвящены работы многих других авторов [47, 48, 50].

Компания «TesTex Inc» (США) предлагает многоцелевую систему неразрушающего контроля PS-2000 для инспекции труб из черных и цветных металлов с наружной стороны с использованием технологии низких частот Low Frequency Electromagnetic Technique (LFET). Прибор имеет восемь каналов для обнаружения дефектов, в том числе трещин, эрозии, коррозии, питтинговой коррозии, использует диапазон частот от 5 Гц до 30 кГц, отображает результаты в реальном времени и имеет возможность моторизированного исполнения [88]. Несмотря на широкие функциональные возможности, подобные системы нацелены на качественное определение дефектов и не позволяют с достаточной точностью измерять толщину стенки алюминиевых труб.

Многие известные компании, такие как «Foerster», «Olympus NDT», «Rohmann GmbH», «Tecnatom S.A.», «General Electric Inspection Technologies», «Force Technology», «Centurion NDT», «Zetec», «CMS», «Rosen» и другие также не имеют готовых решений для количественного измерения толщины стенки

немагнитных электропроводящих объектов с достаточной точностью в широком диапазоне изменений влияющих факторов. Существующие системы этих компаний и направления их исследований нацелены на качественное определение различных типов дефектов и их оценки.

В общем случае сложность решения задачи измерения толщины стенки электропроводящих труб обусловлена возможным существенным изменением в производственных условиях контроля толщины стенки, зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы, а также удельной электрической проводимости материала трубы и влиянием этих параметров на сигнал ВТП. По сути, задача измерения толщины стенки электропроводящих труб заключается в нахождении функциональной зависимости информативных параметров сигнала накладного ВТП от измеряемого параметра трубы – толщины стенки T с отстройкой от влияния на результаты измерения изменений в широких диапазонах зазора h между ВТП и поверхностью контролируемой трубы, и удельной электрической проводимости материала трубы σ. Нелинейность функций преобразования делает такую задачу сложной для работы в широком диапазоне изменений влияющих факторов.

Выводы по главе 1

1. Развитие буровых технологий показало перспективу использования ЛБТ, обладающих рядом преимуществ по сравнению со стальными трубами.

2. Контроль состояния толщины стенки ЛБТ является важной задачей для обеспечения безаварийной работы и требует постоянного развития.

3. На сегодняшний день нормативные документы рекомендуют использовать акустический метод контроля, который обладает рядом недостатков, в частности низкой производительностью и высокой трудоемкостью, обусловленной необходимостью подготовки поверхности и обеспечением акустического контакта.

Вихретоковый метод может рассматриваться в качестве альтернативного, позволяющего существенно повысить производительность контроля.

4. Существующие на сегодняшний день приборы вихретокового контроля, предназначенные для измерений толщины стенки электропроводящих немагнитных объектов, направлены на качественное измерение толщины с получением картины изменения состояния стенки и не обладают необходимыми характеристиками для количественного контроля.

На основании обзора проведенных исследований можно заключить следующие положения:

– необходимо использовать несколько частот для одновременного контроля нескольких влияющих факторов с выделением информативных и отстройкой от мешающих;

– используемые частоты следует качественно разделять для достижения высокого соотношения сигнал/шум и обеспечения хорошей разрешающей способности;

– на фоне сложных функциональных зависимостей для отстройки от мешающих факторов в широком диапазоне необходимы эффективные алгоритмы преобразования сигналов с высокой степенью корреляции.

Используя указанные положения, возможно создать вихретоковый толщиномер, позволяющий измерять толщину стенки немагнитных труб в диапазоне 0…15 мм, реализующий отстройку от влияющих факторов в широком диапазоне, предназначенный для контроля в условиях буровой площадки.

ГЛАВА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С НЕМАГНИТНОЙ ТРУБОЙ

С помощью моделирования взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой определены зависимости вносимого напряжения преобразователя от основных влияющих факторов – толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, и дополнительных – кривизны стенки трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

Данная глава посвящена анализу взаимодействия магнитного поля накладного ВТП и электропроводящей трубы с учетом влияющих факторов применительно к задаче измерения толщины стенки трубы и связанной с ее решением задаче измерения зазора между ВТП и поверхностью трубы.

2.1 Накладные вихретоковые преобразователи

Класс накладных ВТП на сегодняшний день представлен большим числом разнообразных конструкций, решающих широкий спектр задач неразрушающего контроля.

К накладным относятся ВТП, располагающиеся над поверхностью объекта контроля. Применяются при одностороннем доступе и могут использоваться для контроля объектов плоской, цилиндрической, в том числе при больших радиусах кривизны, и сложной форм. Такие возможности указывают на универсальность накладных ВТП, позволяют использовать их для локального контроля, обеспечивая высокое разрешение, точное выявление дефектных участков при сканировании или точечном контроле [28, 38].

Накладные ВТП помогают решать широкий круг задач, в том числе измерение:

– толщины стенки металла;

− толщины диэлектрических покрытий на электропроводящем основании;

− толщины слоя металла на основаниях различного типа;

− электропроводности металлов (сплавов) [37].

Кроме того, они позволяют находить дефекты различных форм, ориентаций и положений в объекте контроля, проводить структуроскопию, в частности ферромагнитных и композитных изделий.

ВТП накладного типа имеют повышенную, по сравнению с проходными, чувствительность к дефектам локального характера. Благодаря такому свойству, нашли широкое применение как при ручном, так и автоматизированном контроле листов, проката и труб. Применение различных конструкций ВТП позволяют обеспечить требуемую локальность и оказывает воздействие на диапазон измерения влияющих факторов. С их использованием активно применяются и разрабатываются приборы и установки мобильного и стационарного типов, имеющие как многоцелевые функции, так и настроенные под определенную задачу. На сегодняшний момент системы вихретокового контроля с использованием накладных ВТП представляют собой технологичные, с высоким быстродействием и широкими возможностями обработки и визуализации получаемых данных устройства.

Ограничениями использования накладных ВТП является сильное влияние зазора между ВТП и поверхностью ОК на выходной сигнал преобразователя, а также смещения различного характера [38, 55, 80].

В общем случае, применяя аналитические методы расчета, базовой моделью является двухобмоточный преобразователь с одинаковыми радиусами возбуждающей и измерительной обмотки, для которого легко найти значения выходных сигналов в виде вносимых напряжений. Как правило, вносимые напряжения гораздо меньше их начальных значений, поэтому для выделения полезной информации компенсируются собственные параметры ВТП различными способами.

Распространенным и очень эффективным является использование ВТП с тремя обмотками, содержащими одинаковые по форме и размеру измерительную и компенсационную, а также обмотку возбуждения. Последняя

располагается между первой и второй соосно и на одинаковом расстоянии. Измерительная и компенсационная обмотка включаются встречно, и при отсутствии вблизи объекта контроля на выходе получается нулевой сигнал. Такой тип накладного ВТП получил название «трансформаторный». На практике же очень сложно конструктивно скомпенсировать преобразователь, поэтому частично это делается с помощью программной обработки выходного сигнала. При появлении в зоне действия ВТП объекта контроля, на выходе появляется вносимое напряжение, действительная и мнимая которого выделяются и обрабатываются вычислительным блоком.

Для упрощения расчетов на практике широко применяется замена возбуждающей обмотки (с током) и измерительной (бесконечного сопротивления) на эквивалентные витки аналогичной формы бесконечно тонкого сечения, расположенные в местах среднего витка реальной обмотки ВТП.

Самыми простыми с точки зрения технологии изготовления и учитывая стремление вихревых токов к круговой форме, являются накладные преобразователи с круговыми витками обмоток без использования магнитных сердечников, повышающих абсолютные значения сигнала, но снижающих метрологические характеристики. Такие ВТП нашли наибольшее применение.

В большинстве аналитических расчетов применяются допущения в виде коаксиальных витков круговой форме, поэтому описание дифференциальных уравнений значительно упрощается, система решается путем введения потенциала в цилиндрической системе координат. Результатом является интегральная функция для выходного напряжения преобразователя.

Преобразователи с отличной от круговой формы витков обмоток имеют схожие выражения, что позволяет с некоторыми допущениями и добавлением специальных функций решать их аналогичным образом. По этой причине нормированные значения полученного вносимого напряжения близки для анализа влияющих факторов.

Важным параметром для практического применения является максимальное значение вносимого напряжения ВТП, относительно которого нормируют полученные значения при контроле объекта.

Контроль объектов с использованием накладных преобразователей также напрямую связан с изменением зазора между ВТП и поверхностью ОК, которое может быть связано с несколькими причинами: взаимные перемещения, кривизна поверхности ОК, износ защитного корпуса ВТП, загрязнение поверхности контроля. Эти факторы существенно влияют на выходной сигнал и их необходимо учитывать при проектировании приборов вихретокового контроля.

Учитывая все преимущества накладных ВТП, одной из важных задач, эффективно решаемых с их применением, является измерение толщины стенки электропроводящих немагнитных объектов, в том числе труб, а также толщины диэлектрических покрытий этих труб (воздушного зазора между ВТП и поверхностью контроля) и электропроводности материала ОК.

2.2 Описание задачи для построения модели

Выбор накладного ВТП, как указано выше, обусловлен в первую очередь достаточно высокими требованиями к точности и разрешающей способностью контроля, которые должны обеспечивать возможность локализации дефектов как при точечной инспекции, так и при сканировании объекта, а также универсальностью и возможностью контроля изделий различной формы и с односторонним доступом.

Использование многочастотного возбуждения вихревых токов является наиболее эффективным способом для отстройки от воздействия одновременно нескольких влияющих факторов на выходной сигнал ВТП. В настоящей работе предлагается вариант реализации метода контроля толщины стенки электропроводящей трубы T в условиях значительного изменения зазора h и удельной электрической проводимости материала σ с использованием двух частот.

На Рисунке 3 схематично показана конструкция накладного трансформаторного ВТП, используемого для контроля толщины стенки труб. ВТП содержит обмотку возбуждения w_1, измерительную обмотку w_{21} и

компенсационную обмотку w_{22}. Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии объекта контроля, их начальные электродвижущие силы (ЭДС) взаимно компенсируются. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта контроля, на выходе преобразователя возникает сигнал, обусловленный вихревыми токами в объекте. В общем случае амплитуда и фаза (комплексные составляющие) вносимой ЭДС определяются амплитудой и частотой тока возбуждения, конструктивными параметрами ВТП, электромагнитными характеристиками материала и геометрическими параметрами объекта контроля, взаиморасположением ВТП и объекта контроля.

Для определения функций преобразования необходимо проанализировать взаимодействие электромагнитного поля ВТП с ЛБТ с учетом влияющих факторов.

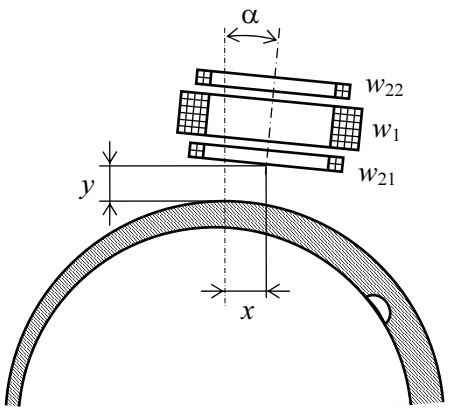


Рисунок 3 – Накладной вихретоковый преобразователь, находящийся во взаимодействии с электропроводящей трубой

В качестве объекта контроля рассматривалась труба из немагнитного материала с удельной электрической проводимостью σ в диапазоне 10…25 МСм/м с номинальным наружным диаметром $D = 147$ мм и толщиной стенки T в диапазоне 5…15 мм. Расстояние между измерительной обмоткой ВТП и поверхностью трубы варьировалось в диапазоне 0…15 мм.

Для ВТП были заданы следующие параметры: наружный диаметр обмотки возбуждения – 40 мм; внутренний диаметр обмотки возбуждения – 32 мм;

высота обмотки возбуждения – 10 мм; диаметр среднего витка измерительной и компенсационной обмоток – 30 мм; расстояние между расположенными симметрично относительно обмотки возбуждения плоскостями средних витков измерительной и компенсационной обмоток – 22 мм.

Частота тока возбуждения принималась равной 125 и 2500 Гц. Частоты выбирались следующим образом: для нижней частоты глубина проникновения магнитного поля в объект контроля должна быть больше значений измеряемой толщины стенки, для верхней – глубина проникновения в металл должна быть меньше значения толщины стенки, при этом достаточной для обеспечения чувствительности к изменению электропроводности материала и зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля. Физический смысл глубины проникновения заключается в следующем: в слое глубиной δ был бы сосредоточен весь ток, возбужденный в соответствующем сечении металла, если бы его плотность в этом слое равнялась максимальной плотности J_{max} вихревого тока, создаваемой на поверхности. Глубина проникновения δ вихревых токов для плоской волны равна глубине, на которой плотность вихревого тока уменьшается в e раз по сравнению с плотностью на поверхности металла со стороны источника переменного магнитного поля. Для источника в виде плоской волны глубина проникновения рассчитывается по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_a \omega \sigma}},$$

где $\mu_a = \mu_0 \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость металла, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость металла; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота изменения H, σ – удельная электрическая проводимость материала.

Для глубины проникновения вихревых токов существуют различные определения. В большинстве случаев принимают, что глубина проникновения – это расстояние от поверхности до той глубины, где интенсивность вихревых токов снижается до $1/e$ ($e = 2{,}7183$) от величины на поверхности образца, что соответствует 36,8 %. Глубина проникновения δ зависит от рабочей частоты f,

электрической проводимости σ магнитной проницаемости образца материала μ_r. Стандартная глубина проникновения (мм) рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{\mu_a f \sigma}},$$

Как видно из уравнения, с увеличением рабочей частоты *f,* уменьшается глубина проникновения вихревых токов и, следовательно, чувствительность вихретокового контроля к неоднородностям материала в глубине образца становится недостаточной.

Исходя из рекомендаций Ю. К. Федосенко [55], частота тока возбуждения определяется по формуле:

$$f \geq 2/(\pi\mu_0\sigma T^2),$$

получаемой из условия $T^*\beta \geq 2$, где $T^* = T/R$ – относительная толщина слоя, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – постоянная магнитная проницаемость, σ – удельная электрическая проводимость материала слоя, $\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ – обобщенный параметр (R – радиус ВТП, ω – частота возбуждаемого переменного электромагнитного поля).

Тем не менее глубина проникновения – это вовсе не предел обнаружения глубоких дефектов. Предел обнаружения, прежде всего, обуславливается возможностью различить полезный сигнал на фоне возникающих шумов [59]. При использовании решений, описанных в настоящей работе, появляется возможность измерять толщину стенки со значением больше, чем стандартная глубина проникновения.

На Рисунке 4 показаны годографы относительного вносимого напряжения накладного ВТП от изменения удельной электрической проводимости σ, зазора h и толщины T при использовании двух частот – 2500 и 125 Гц. Анализ зависимостей показывает, что информация о толщине стенки может быть получена путем измерения фазы вносимого напряжения низкой частоты. Мешающими факторами в этом случае являются изменения зазора и удельной электрической проводимости материала, значения которых так же, хотя и в меньшей степени, влияют на изменение фазы вносимого напряжения.

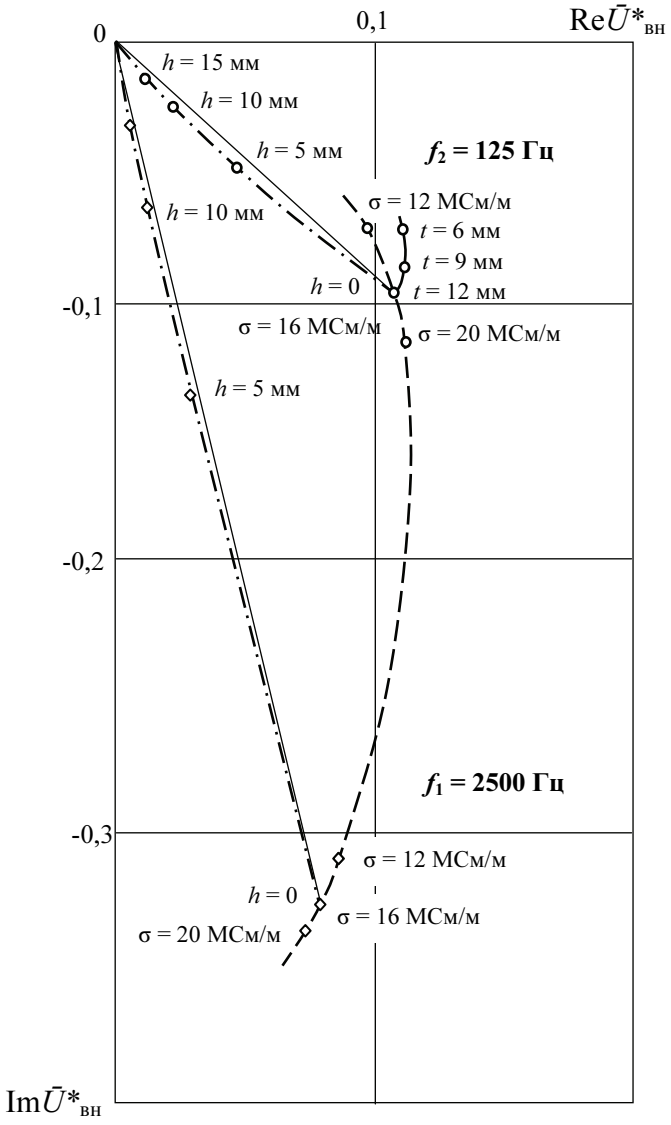


Рисунок 4 − Годографы $\bar{U}^*_{вн}$ от изменения удельной электрической проводимости σ (−−), зазора h (−·−) и толщины T (—) для частот 2500 Гц (−) и 125 Гц (−)

С учетом того, что чувствительность изменения фазы низкой частоты к изменению толщины стенки является неодинаковой для различных диапазонов последней, то и погрешность измерения, вызванная изменением зазора и электропроводности будет отличаться. Так, изменение зазора на 1 мм в диапазоне измерений толщин с наибольшей чувствительностью к изменению фазы низкой частоты (12–15 мм) эквивалентно изменению толщины до 1,3 мм и увеличивает погрешность на 10%, а изменение электропроводности на 1 МСм/м эквивалентно изменению толщины до 1 мм и увеличивает погрешность на 8%

в том же диапазоне. Приведенные результаты показывают необходимость отстройки от изменения указанных факторов.

Кроме основных влияющих факторов исследованы и дополнительные, вызывающие изменение сигнала ВТП при контроле толщины стенки.

Для расчета результатов взаимодействия магнитного поля ВТП с электропроводящим объектом и определения функции преобразования влияющих факторов объекта в параметры сигнала ВТП хорошо себя зарекомендовали аналитические модели, позволяющие исследовать различные варианты взаимодействия при достаточно высокой степени соответствия теоретических и экспериментальных результатов [28, 38, 64, 72, 73, 81, 90].

Однако такие аналитические решения получены для ограниченного класса задач взаимодействия, предполагающих, как правило, осесимметричное взаимное расположение ВТП и объекта контроля, имеющего при этом правильную геометрическую форму (плоскую, сферическую, цилиндрическую и т.д.). Соответственно, данные решения не позволяют исследовать влияние на выходной сигнал ВТП таких реально встречающихся при контроле параметров, как линейное и угловое смещение оси симметрии ВТП относительно оси симметрии объекта контроля, отклонение формы объекта контроля от правильной, наличие локальных дефектов различных форм, близость края объекта контроля.

От указанного недостатка свободны численные методы расчета, наибольшее применение из которых для рассматриваемого класса задач имеет метод конечных элементов (МКЭ). Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, генерируемых при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. Преимущества при решении реальных задач заключаются в универсальности применения, произвольной форме обрабатываемой области, отсутствии необходимости аппроксимации объекта стандартными геометрическими фигурами, возможность решения

несимметричных задач с учетом неоднородности параметров материалов и сред [59, 82, 85, 91].

2.3 Численные методы решения задач вихретокового контроля

На сегодняшний день для расчета электромагнитных полей используется немало численных методов. Они имеют отличия по назначению, возможностям, а также трудоемкости реализации в вычислительных системах. Наиболее широкое распространение на практике имеют:

– МКЭ (Метод конечных элементов);

– МКР (Метод конечных разностей);

– МГЭ (Метод конечных элементов);

– МИУ (Метод граничных элементов);

– МЭЗ (Метод эквивалентных зарядов);

– гибридный метод.

Применение этих методов заключается в составлении и решении системы линейных алгебраических уравнений. Отличие между ними в способах учета граничных условий, составления систем уравнений, видом и размерностью матрицы коэффициентов полученной системы. Процедуру вычисления в общем случае можно разделить на три этапа.

На первом этапе происходит выбор метода и описание модели, содержащей основные технические и физические параметры. Важным моментом является процедура упрощения модели, позволяющая пренебречь элементами, влияние которых не существенно по отношению к итоговому результату. При этом часть модели, подлежащая подробному изучению физических параметров, локализуется и обрабатывается с минимальными допущениями. К таким допущениям относятся линейность характеристик среды, симметричность геометрии модели, использование эквивалентных объектов и другие.

На втором этапе реализуется процедура расчета электромагнитного поля с использованием выбранного метода в конкретной области.

Третьим этапом является постпроцессинговая обработка, вывод требуемых результатов и их анализ. Для этого создаются графики, диаграммы распределения электромагнитного поля в интересующей области, а также производится расчет числовых значений. Для трехмерных и двумерных моделей возможности получения полезной информации отличаются, например, вывод эквипотенциальных плоскостей для первой и силовых линий для второй. После этого происходит первичный анализ данных, предполагающий сопоставление результатов, полученных расчетным путем с экспериментом.

На сегодняшний день широко применяются и имеют большую техническую и методическую базу три численных метода для решения задач электродинамики. Это упомянутые выше МКЭ, МКР и МИУ. Сравнение различных методов является непростой задачей, во-первых, потому что существует множество модификаций каждого метода, во-вторых, одним из основополагающих факторов для пользователя является точность, скорость вычислений, удобство и простота реализующей конкретный метод программы построения модели. Один и тот же метод в различных реализациях и программах может отличаться по своей эффективности на порядки. Применительно к задачам расчета электромагнитного поля в дефектоскопии лучшие результаты имеют МКЭ и МИУ.

Любой из этих методов позволяет решать одинаковые задачи, преимущества и недостатки могут быть определены для каждого случая отдельно и зависят от поиска удачного алгоритма решения.

Для проектирования средств электромагнитного контроля нужно проводить анализ большого количества функциональных зависимостей между ВТП и параметрами объекта контроля. Для общего случая анализа взаимодействия ВТП с объектом контроля необходимо изменять геометрию ВТП, величину зазора между ВТП и поверхностью объекта контроля, частоту и ток возбуждения ВТП, удельную электрическую проводимость и магнитную проницаемость, ориентацию и размер дефекта объекта контроля. Для таких расчетов с учетом использования строгих численных методов требуются немалые вычислительные

ресурсы и время, которые можно сэкономить, используя допущения и упрощения, описанные выше. Это позволяет на порядок снизить объем вычислений при сохранении необходимой точности, повысить эффективность и производительность расчетов.

Метод конечных элементов сегодня является наиболее популярным и получил широкое распространение [56]. Это обусловлено возможностью построения геометрии любой сложности, учетом граничных условий различного типа, расчетом потенциала в автоматическом режиме во всех узлах, скоростью расчета в любой точке области. Метод конечных элементов базируется на интегральной форме граничной задачи. Вся расчетная область делится на плоские (2D) или объемные (3D) кусочные элементы, внутри которых распределение поля аппроксимируется с помощью полиномов. Создание, решение и обработка систем линейных алгебраических уравнений являются главными этапами для реализации таких задач. Как правило, системы уравнений, при расчете методом конечных элементов, имеют высокий порядок. В сложных областях именно наличие большого числа элементов сетки с большим числом узлов показывает ограничения использования МКЭ. При этом метод обеспечивает гибкость и широкие возможности для визуализации результатов. Трудоемкость расчета сетки (во всем объеме), и необходимость использования мощных вычислительных систем вместе с заметными погрешностями расчета вблизи поверхностей (для интегральных методов не характерно), показывают отрицательные характеристики МКЭ. Также особенностью является то, что необходимо обязательное создание локальной области для расчета полей, поэтому нередко приходится ограничивать расчетную область с введением нулевых граничных условий 1-го и 2-го рода [62].

Метод конечных разностей (метод сеток) имеет глубокую историю и является относительно простым, так как требует минимального количества математических операций [5]. В зависимости от размерности поставленной задачи, область исследования разбивается на 2D или 3D элементы (сетку). Частные производные заменяются в соответствии с эквивалентными конечно-

разностными аппроксимациями на прямоугольной сетке, а затем выводится система алгебраических уравнений относительно неизвестных потенциалов в узлах сетки. Коэффициенты в матрице полученного уравнения имеют большое количество нулей. Минусами метода конечных разностей являются необходимость хранения матриц со слабым заполнением и сложность создания прямоугольной конечно-разностной сетки для объектов со сложной геометрией и криволинейными поверхностями.

Метод граничных элементов соединяет два решения краевых задач дифференциальных уравнений с частными производными [72]. Сначала происходит преобразование краевых задач к интегральным уравнениям, после чего, применяя функции формы (аналогично методу конечных элементов), аппроксимируются полученные решения. Метод граничных элементов интегрирует функции поля относительно неизвестных параметров поля на границе, при этом отдельные элементы на границе аппроксимируются с помощью полиномов. Главным достоинством МГЭ является снижение размерности задач относительно МКЭ, а недостатком – операции с матрицами несимметричной формы, коэффициенты в которых получаются с помощью численного интегрирования.

Метод интегральных уравнений (МИУ) заключается в замещении реального распределения заряда по поверхности системой фиктивных зарядов, которые размещены на поверхности или внутри элементов системы образования поля [5]. По сути, используя граничные условия, в рамках интегральных численных методов происходит аппроксимация распределения источников поля по поверхности объекта исследования. Метод интегральных уравнений позволяет производить замещение распределенного заряда слоями зарядов, распределенных по поверхности объекта, определяемых граничными условиями. Основным преимуществом МИУ является достаточно высокая точность полученных значений напряженности поля в области расчета. Относительно метода конечных и граничных элементов МИУ требует только разбиения границ на элементы, и не формирует сетку во внутреннем пространстве. Для некоторых

категорий задач такое достоинство дает обратный (отрицательный) эффект, например, когда необходимо анализировать поле во всем пространстве и визуализировать полученные результаты по всему объему.

Метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) представляет собой упрощенный вариант метода интегральных уравнений. Его суть состоит в замещении распределения заряда по поверхности системой эквивалентных зарядов, значения которых берутся из граничных условий. Поле во всех точках промежутка между электродами рассчитывается по правилам наложения составляющих отдельных эквивалентных зарядов. Численное интегрирование, в отличие от МИУ, не требуется. Достоинства и недостатки у этих методов аналогичные, за исключением экономичности МЭЗ для задач с использованием простой геометрии объектов.

В последнее время значительное развитие получил гибридный метод. Название говорит само за себя, для решения задач с его использованием применяются один из двух методов МГЭ или МКЭ, при этом используется одно решающее устройство. В сложных задачах возможно сочетание методов в зависимости от постановки применительно к геометрии объектов и линейности характеристик распределенных в пространстве величин. Сама идея гибридного метода считается наиболее перспективной, однако из-за высоких требований к вычислительным ресурсам на сегодняшний день его применение ограничено.

Любой из описанных выше методов может использоваться для расчета различного круга задач неразрушающего контроля. Здесь стоит отметить, что выбор зачастую определяется не преимуществами какого-либо метода, а наличием на рынке программ, которые предназначены для решения целевых задач. В рамках использования программной среды, огромное значение имеет структурирование задачи, качество описания алгоритмов, затраты на вычислительные ресурсы и время расчета, для получения результатов требуемой точности. Существующие прикладные программные продукты имеют свой интерфейс и предустановленные библиотеки для выбора материалов, а иногда

и элементов с заданной геометрией целиком, что существенно снижает трудозатраты и облегчает процесс решения поставленной задачи [74].

Сегодня на рынке предлагается немало продуктов для обеспечения автоматизации инженерных расчетов. По общепризнанной мировой классификации такие программные пакеты для расчета и анализа физики процессов и полей получили название CAE (Computer-aided engineering). Наиболее популярными и получившими широкое распространение системами CAE для электромагнитных полей являются следующие продукты:

1. ANSYS Inc. (США) – является мировым лидером в области CAE систем. Выпускает программный продукт с одноименным названием ANSYS [61].

ANSYS имеет синхронизацию с распространенными системами CAD, такими как SolidEdge, SolidWorks, CATIA, Autodesk-Inventor и др. Программа является модульной, каждый из которых предназначен для выполнения определенных инженерных задач. Основными модулями являются:

– ANSYS MULTIPHYSICS, позволяющий решать задачи комплексного характера, в частности структурного анализа, расчета тепловых и электромагнитных полей. Имеется возможность для решения не только прямых, но и сложных последовательных задач, сочетая различные физические процессы;

– ANSYS MAXWELL использует МКЭ для расчета переменных электромагнитных полей, а также задач статики. Имеет возможности для создания 2D и 3D моделей, анализа электромеханических и электромагнитных элементов, в частности различных преобразователей, катушек и трансформаторов. Главным достоинством ANSYS MAXWELL является простота и автоматизация процедуры решения задачи, необходимо лишь создать геометрию и задать свойства используемых материалов. Для расчета модели сетка генерируется в автоматическом режиме, подстраиваясь под заданную геометрию;

– ANSYS PExprt используется для построения моделей трансформаторов и катушек индуктивности, помогает определить нужные размеры и геометрию, воздушные зазоры и формат обмоток для заданных силовых требований. Для

анализа результата используется упомянутый выше ANSYS MAXWELL, в том числе позволяющий рассчитать распределение плотности тока в обмотках и потока в активной зоне. С помощью модуля ANSYS Simplorer можно оперативно создать эквивалентную модель для оценки влияния магнитного поля в реальной схеме. Такой симбиоз позволяет эффективно решать поставленные задачи и избавиться от многоэтапного создания прототипа;

– ANSYS Simplorer позволяет смоделировать сложные электрические и электронные схемы, используя множество различных технологий построения модели.

2. COMSOL Multiphysics − универсальная программная платформа для моделирования прикладных задач, разработанная компанией Comsol Group, основанной в 1986 г. в Стокгольме (Швеция). Базовая платформа может использоваться отдельно или расширенно с увеличением функциональных возможностей. Модули расширения позволяют моделировать электромагнитные, механические, акустические, гидродинамические, термодинамические и химические устройства и процессы. Модули расширения и продукты LiveLink™ легко интегрируются в единую программную среду. Продукт обладает высокой гибкостью и интуитивным интерфейсом. Для решения задач вихретокового контроля существует модуль электродинамики AC/DC, обладающий широкими функциональными возможностями и относительной простотой для расчета электромагнитных полей [68].

3. Cobham Technical Services (Великобритания) – компания, имеющая богатую историю в области инжиниринга в авиационной промышленности, разрабатывающая и постоянно улучшающая совместно с Vector Fields Software программный продукт Opera, позволяющий проводить анализ электромагнитных полей с помощью метода конечных элементов [67]. Opera позволяет генерировать 2D и 3D модели, проектировать, анализировать и оптимизировать их. Разработана для решения численными методами реальных задач, кроме стандартных расчетов электромагнитных полей позволяет моделировать движение (вращательное и линейное), переходные процессы, материалы с нелинейными характеристиками, внешние цепи.

Для использования в неразрушающем, в частности вихретоковом, контроле большое внимание заслуживает программный пакет OPERA-3D, имеющий следующие модули для расчета электромагнитных устройств:

– *Static Electromagnetics*, применяемый для решения постоянных электромагнитных полей, моделирования нелинейных характеристик магнитного материала, высокоточного расчета магнитных полей, источником которых являются как проводники, так и постоянные магниты, потерь в диэлектрических материалах, однородности, физики электростатики.

– *Dynamic Electromagnetics*, применяемый для решения переменных электромагнитных полей, вихревых токов в том числе, генерируемых разными источниками. Позволяет рассчитывать переходные процессы, установившиеся режимы, а также изменение картины поля, вызванной процессом вращательного и линейного перемещения поля постоянного тока.

Для решения задач вихретокового контроля, помимо указанных выше, можно использовать модули Magnetization and Demagnetization, Hysteresis, Lossy Dielectrics, Space Charge, RF, Microwave.

4. MSC Software Corporation (США) предлагает продукт MSCNastran [78]. Программа использует МКЭ для расчета мультифизических процессов. Основной особенностью этого продукта являются модули для моделирования материалов с анизотропными свойствами, расчет различных дефектов, их изменения во времени, расчет ресурса объекта. Несмотря на то, что у этой компании отсутствует специализированный модуль для расчета электромагнитных полей, существует программа построения сетки с дальнейшей возможностью экспорта полученных результатов в такие продукты, как ANSYS, Abaqus, LS-DYNA, Pam-Crash.

Универсальные CAE системы в последнее время все чаще заменяются целевыми программами, предназначенными для узкого, но более расширенного, анализа требуемых результатов. Как правило, в таких продуктах содержится большой накопленный опыт в виде стандартных библиотек и моделей. Стоит

отметить, что для решения задач вихретоковой дефектоскопии, в том числе, имеются такие программы.

5. INTEGRATED Engineering Software (Канада) имеет возможности 2D и 3D моделирования полей [75]. На сегодняшний момент программа полностью совместима со средой MATLAB. Для решения задач неразрушающего контроля существует двухмерный модуль OERSTED, использующий МГЭ и МКЭ. OERSTED позволяет параллельно с анализом электромагнитного поля рассчитывать силу, крутящий момент, вносимое напряжение, ток смещения, потокосцепление, мощность, комплексное сопротивление и ток.

3D модуль FARADAY, как и предыдущий, использует для расчетов МГЭ и МКЭ, позволяет рассчитать такие же характеристики, что и OERSTED. Кроме этих модулей для неразрушающего контроля применяются пакеты ELECTRO и MAGNETO, моделирующие 2D поля, и пакеты COULOMB и AMPERES для 3D полей.

6. Широкое распространение на сегодняшний день получил программный продукт CIVA компании EXTENDE [66]. Разработан совместно с французским научно-исследовательским институтом CEA (Commissariat a l'energie atomique), поставляется на мировой рынок с 2010 г. С помощью CIVA можно создать модель процедуры контроля, которая включает преобразователь, объект контроля, дефекты различного типа и влияющие параметры. Продукт включает несколько модулей по разным методам неразрушающего контроля: вихретоковому, акустическому, радиационному.

Модуль вихретокового контроля представлен программой CIVA ET. Большим достоинством CIVA является наличие собственной библиотеки преобразователей. Кроме последних, имеются некоторые стандартные дефекты: плоскодонное сверление, прорези в форме прямоугольника, полуэллипс, четвертьэллипс. Дефекты могут быть наложены на объект как отдельно, так и в виде объединения.

7. Livermore Software Technology Corporation (LSTC) (США) имеет продукт LS-DYNA, с встроенным модулем для решения задач расчета электромагнитных

полей EM (Electromagnetism) [77]. Модуль EM выводит приближенные решения уравнений Максвелла для вихревых токов (индукция-диффузия). Такой способ можно допустить только в случае, когда электромагнитная волна в среде рассматривается с мгновенным распространением. Модуль EM дает возможность создавать источники электрического тока в формате твердых проводников и рассчитывать связанное магнитное и электрическое поле, а также индуцированные токи. Синхронизируется с другими модулями компании, позволяющими решать механику и тепловые воздействия. Расчет электромагнитных полей система осуществляет методом конечных элементов для проводников и методом граничных элементов для окружающих диэлектриков. Построение геометрии объектов, распределение и расчет сетки осуществляется с помощью модуля LS-PREPOST.

8. ООО «Тор» (г. Санкт-Петербург) представляет программный продукт ELCUT [70]. Является отечественной разработкой в области компьютерного моделирования электромагнитных полей. Пакет использует метод конечных элементов для решения электромагнитных, тепловых и механических инженерных задач.

Для моделирования текущей задачи выбор был остановлен на программном пакете COMSOL Multiphysics. Продукт компании COMSOL выбран не случайно. Во-первых, наличие у группы разработчиков опыта моделирования именно в этой среде, во-вторых – наличие самой программы в организации, в-третьих – наличие достаточного набора функциональных возможностей для решения поставленных задач. Возможности COMSOL Multiphysics позволяют: устанавливать размерности модели (1D, 2D, 3D); выбирать между построением геометрии во внутренней среде или импортом из внешней CAD-системы; выбирать и настраивать физические возможности модели и граничные условия; генерировать сетку (в автоматическом режиме или интерактивным образом); решать стационарные, нестационарные, параметрические, на поиск собственных значений задачи; в режиме постобработки рассчитывать необходимые параметры, строить контуры,

графики, анимации и т.д. Программный продукт интегрируется с различными САПР приложениями и позволяет импортировать файлы в формате DXF и IGES, обеспечивает синхронизацию с популярными CAD продуктами (Autodesk, SolidWorks, CATIA и т.д.). Совместим с различными операционными системами: Windows, Mac, Linux, UNIX.

Несмотря на очевидные достоинства, следует отметить, что эта среда не является специализированной для моделирования задач вихретокового контроля, поэтому более прикладные продукты со встроенными библиотеками, например, CIVA EXTENDE, были бы удобнее при их наличии.

Точность решения используемым МКЭ определяется главным образом количеством элементов модели. Это фундаментальное свойство МКЭ. Безусловно, с увеличением количества элементов, требуется больше вычислительных ресурсов и времени. Кроме того, точность решений зависит от корректности поставленной задачи и описания уравнений [68]. Необходимо отметить, что в среде COMSOL Multiphysics, имеется функция уплотнения адаптивной сетки, позволяющая автоматически уменьшать ее в областях, в которых, по оценке системы, должна быть высокая погрешность. Вычислительные возможности современных компьютеров делают не столь существенным недостаток численных методов в целом, связанный с большим объемом вычислений. Кроме того, программа позволяет оптимизировать вычислительные операции путем уменьшения количества элементов сетки в отдельных областях с малыми значениями градиента параметров электромагнитного поля.

Применительно к рассматриваемой задаче взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой использование МКЭ позволяет не только осуществить анализ влияния на выходной сигнал преобразователя удельной электрической проводимости материала σ, толщины стенки T и наружного диаметра трубы D, а также зазора между ВТП и поверхностью трубы y, но, в отличие от упомянутых аналитических моделей, выполнить анализ влияния линейной x и угловой α несоосностей ВТП и трубы,

неравномерного изменения толщины и наличия локальных утонений стенки трубы (см. Рисунок 3).

2.4 Построение модели взаимодействия ВТП с немагнитной трубой и исследование влияющих факторов

Для 3D модели взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей немагнитной трубой использовался модуль AC/DC среды COMSOL Multiphysics, позволяющий реализовать многовитковые обмотки возбуждения с помощью функции Multi-turn coil domain. Построение геометрии элементов ВТП и объекта контроля осуществлялось с помощью встроенного графического интерфейса. Свойства материалов отдельных элементов выбирались из стандартной библиотеки в разделе Materials с корректировкой характеристик вручную.

При моделировании принималось, что наружная граница области исследования имеет форму сферы таким размером, чтобы не было влияния искажения поля на результаты расчета. Размеры сетки, определяющие точность результатов моделирования, оптимизировались таким образом, чтобы в областях с высоким градиентом изменения индукции магнитного поля, она имела меньший размер (Рисунок 5).

Извлечение необходимых результатов расчетов осуществлялось постпроцессинговым модулем Results, имеющим широкие возможности. Математические операции, в том числе интегрирование с целью определения вносимого напряжения измерительной обмотки проведены в разделе Derived Values. 3D, 2D и 1D Plot Group использовались для визуализации результатов и анализа интересующих областей.

Для проверки адекватности разработанной модели было выполнено сравнение результатов компьютерного и физического моделирований взаимодействия ВТП с дюралевой трубой из сплава Д16Т, имеющей наружный диаметр 147 мм и удельную электропроводность материала 16 МСм/м. Частота тока возбуждения устанавливалась равной 125 Гц.

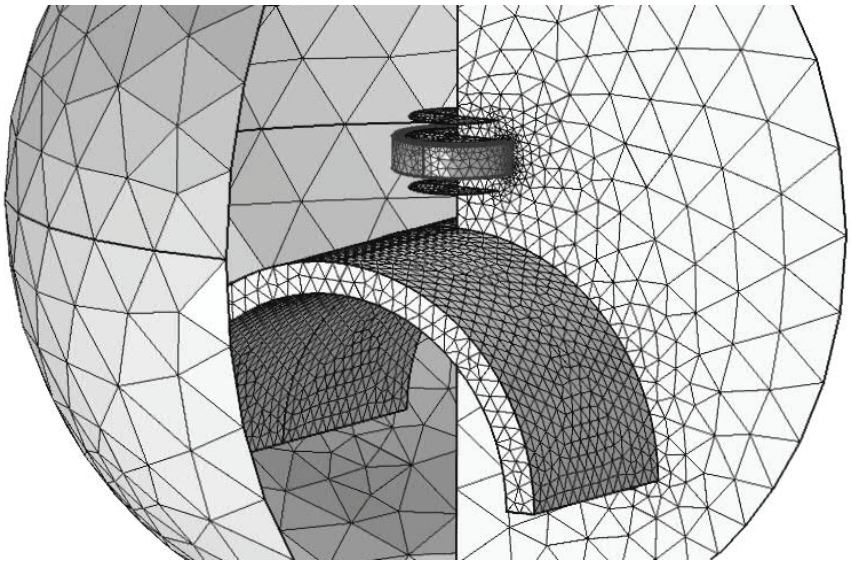


Рисунок 5 − Расчетная модель в среде COMSOL после наложения сетки

Физическое моделирование осуществлялось с использованием разработанного вихретокового толщиномера ВТ-16.2, обеспечивающего измерение толщины стенки ЛБТ в диапазоне 5…15 мм с погрешностью не более 5% при изменении зазора в диапазоне 0…15 мм.

На Рисунке 6 представлены полученные численным моделированием годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы (сплошная линия) и зазора (пунктирная линия). Ромбами на графике показаны экспериментальные данные.

Анализ зависимостей Рисунка 6 показывает, что результаты компьютерного и физического моделирований в данном диапазоне изменений влияющих факторов отличаются не более чем на 7 %, что свидетельствует об их достаточно высокой адекватности.

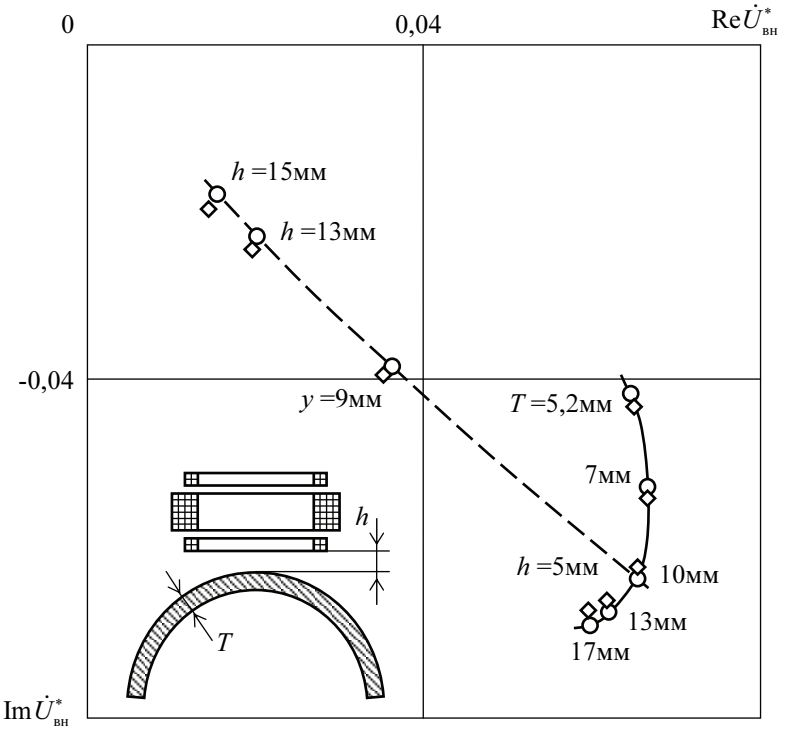


Рисунок 6 − Расчетные ( ) и экспериментальные (◊) зависимости относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T и зазора h

На Рисунке 7 показаны годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T, зазора h и удельной электропроводности материала σ.

На Рисунке 8 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП кривизны поверхности объекта контроля. Пунктирной линией показан годограф от изменения зазора y для случая плоской поверхности. Сплошными линиями показаны годографы от изменения радиуса кривизны R в диапазонах (50…∞) и (–∞…–73) мм. Положительные значения радиуса соответствуют выпуклой поверхности (наружная поверхность трубы), а отрицательные – вогнутой поверхности (внутренняя поверхность трубы).

Анализ зависимостей Рисунка 8 показывает, что годографы от изменения кривизны поверхности объекта контроля представляют собой близкие к прямым линии, пересекающиеся с годографом от изменения зазора под углом примерно 5…10°.

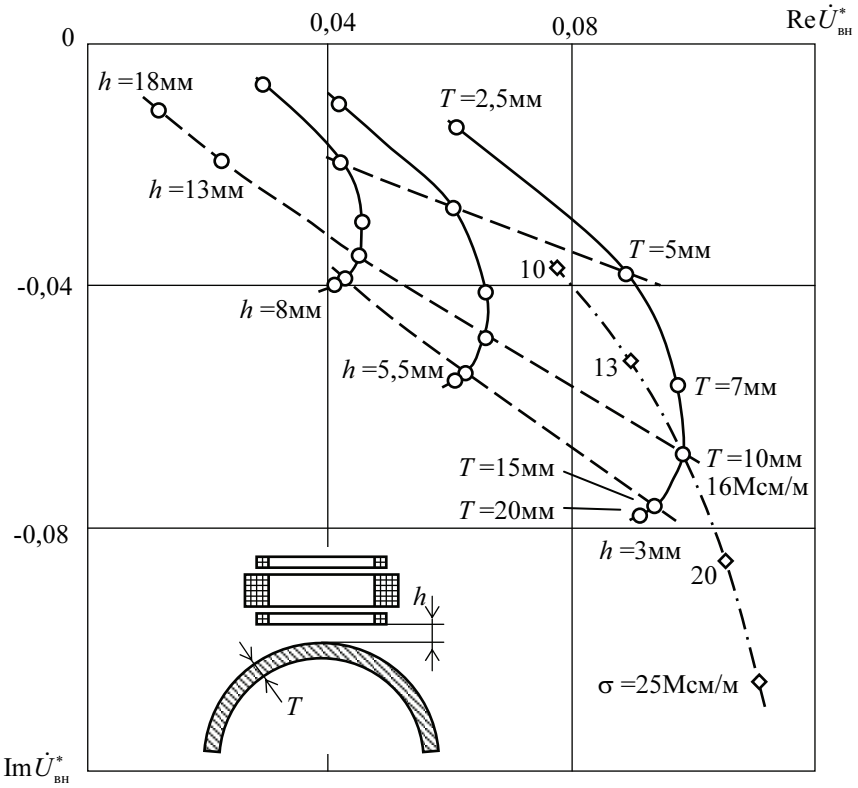


Рисунок 7 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T, зазора h и удельной электропроводности материала σ

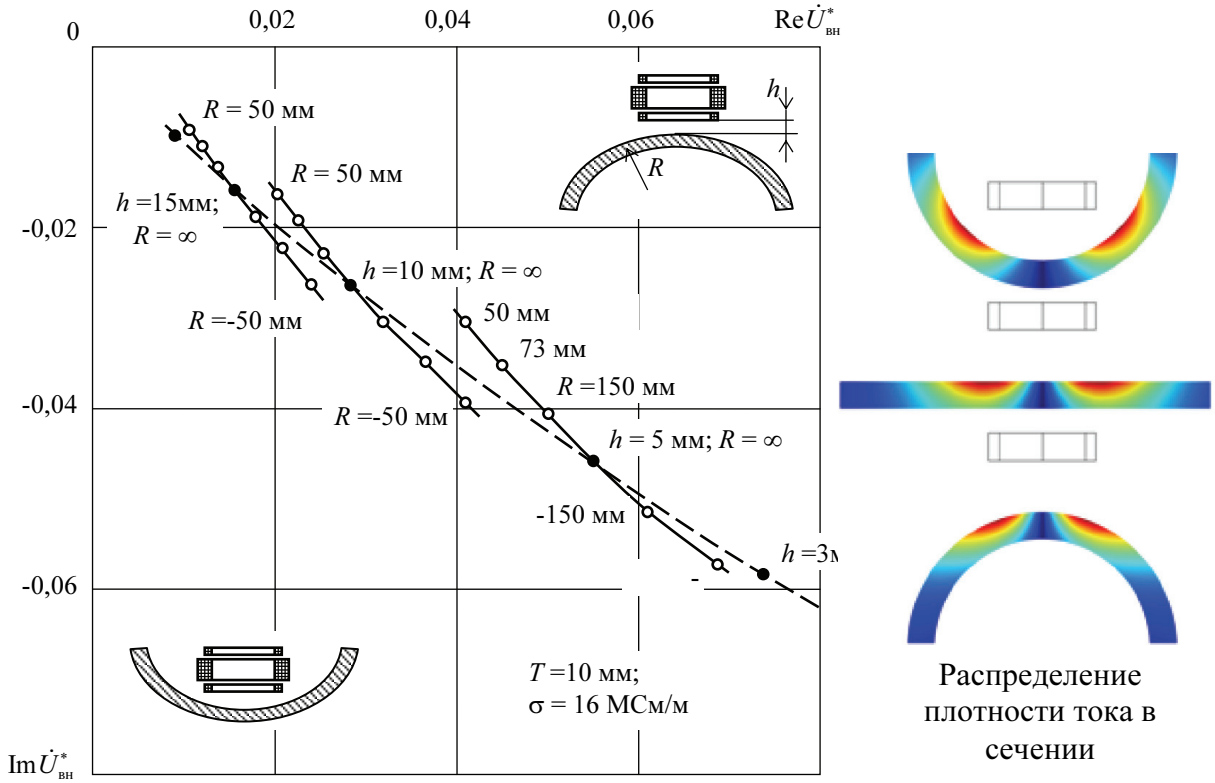


Рисунок 8 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения зазора и радиуса кривизны поверхности объекта контроля

На Рисунке 9 представлены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП смещения x продольной оси ВТП относительно поперечной оси трубы. Пунктирными линиями показаны годографы от изменения x для трех значений толщины T трубы, а сплошными – годографы от изменения зазора y для этих же значений толщины. Анализ результатов моделирования показывает, что годографы от смещения x представляют собой близкие к прямым линии, практически совпадающие с годографами от изменения зазора y.

На Рисунке 10 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U^*_{вн}$ от смещения x. В качестве нормирующего использовано значение амплитуды вносимого напряжения при $x = 0$. Значение смещения нормировано по отношению к радиусу среднего витка обмотки возбуждения $R_0 = 18$ мм. Следует отметить, что данная зависимость одинакова для всех исследованных значений толщины. Существенное изменение

сигнала ВТП от смещения имеет место при значениях x, превышающих половину радиуса среднего витка возбуждающей обмотки ВТП.

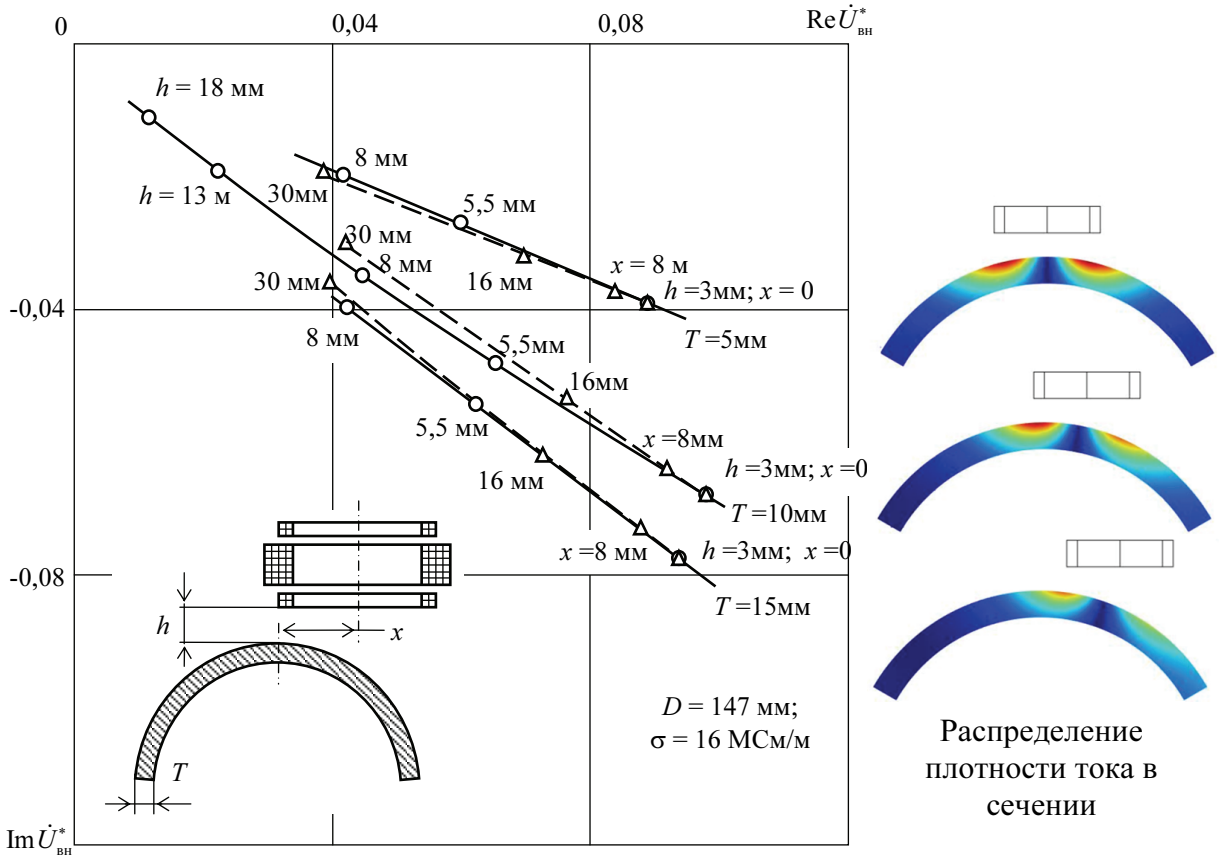


Рисунок 9 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от смещения его продольной оси относительно поперечной оси трубы

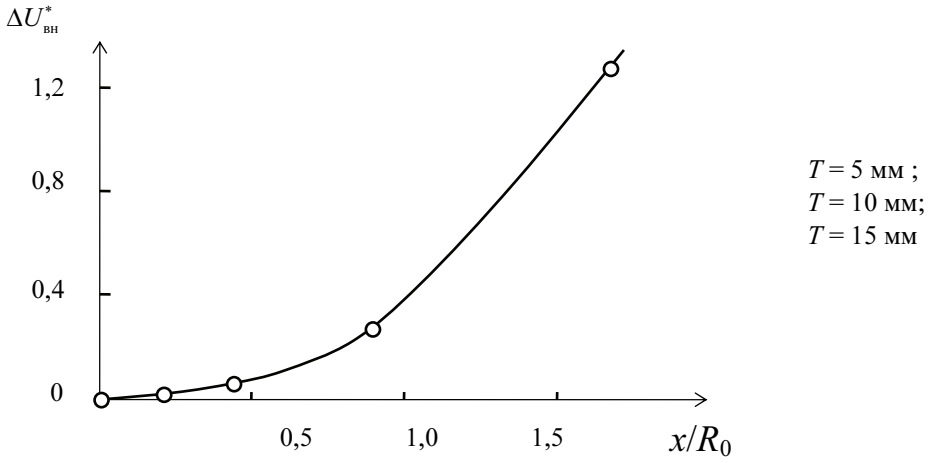


Рисунок 10 − Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U^*_{вн}$ от смещения x

На Рисунке 11 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП угла α между торцевой поверхностью ВТП и

поверхностью объекта контроля, в качестве которого в данном случае для наглядности рассматривалась электропроводящая пластина. При этом предполагалось, что наклон ВТП осуществляется относительно общей точки О поверхности пластины и края цилиндрического корпуса ВТП диаметром 44 мм. Годограф $\dot{U}^*_{\text{вн}}$ от изменения угла перекоса α (пунктирная линия) практически совпадает с годографом от изменения зазора *y*. Таким образом, можно считать, что при рассматриваемых размерах ВТП наклон на 5° вызывает такое же изменение амплитуды вносимого напряжения, как изменение зазора *y* на 2 мм.

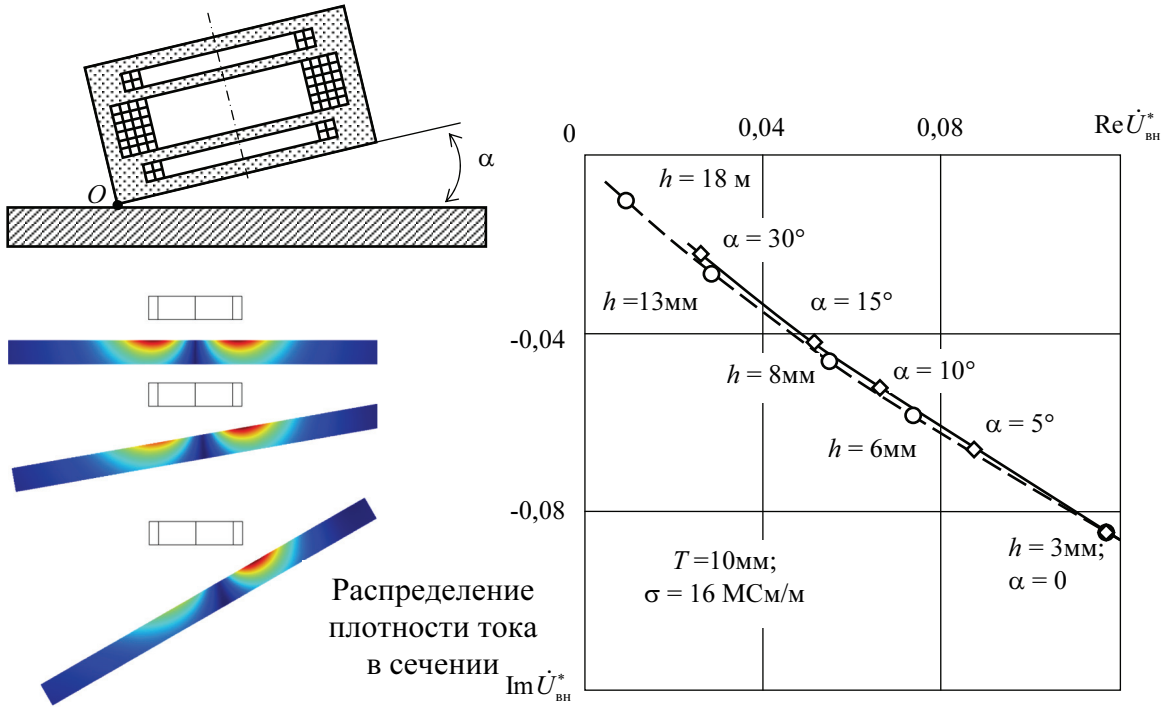


Рисунок 11 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения угла накона преобразователя α

При эксплуатации труб и, в частности ЛБТ, в результате механического и коррозионного воздействия, как отмечалось ранее, достаточно часто имеет место неравномерный износ стенки трубы. В связи с этим было исследовано влияние на сигнал накладного ВТП изменений толщины стенки клиновидной формы и утонения локального характера.

На Рисунке 12 приведен годограф относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия), практически полностью совпадающий с годографом от

изменения толщины плоского объекта (сплошная линия). Следовательно, сигнал ВТП при его расположении над объектом с данным характером изменения толщины и значением толщины стенки T_0 на продольной оси преобразователя, соответствует сигналу ВТП, расположенному над плоским объектом с толщиной стенки T_0.

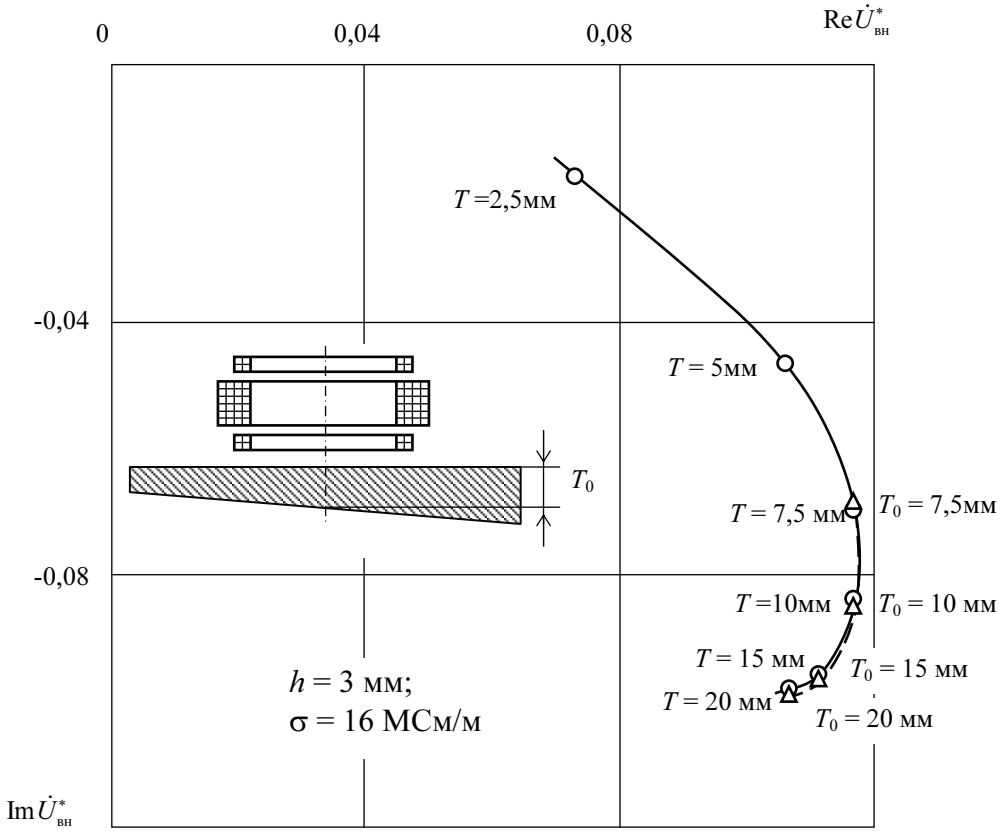


Рисунок 12 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины плоского объекта (сплошная линия) и объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия)

На Рисунке 13 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП наличия локального утонения. Здесь, как и в предыдущем случае, для большей наглядности в качестве объекта контроля рассматривалась электропроводящая пластина. Принималось, что локальное утонение имеет характер углубления сферической формы, расположенного на внутренней поверхности пластины симметрично оси ВТП. Размеры углубления задавались двумя параметрами: минимальной глубиной расположения относительно наружной поверхности T_0 и диаметром окружности d на

внутренней поверхности. Анализ представленных результатов показывает, что годографы вносимого напряжения от изменения диаметра утонения d в диапазоне от 0 до ∞ (показаны сплошными линиями) представляют собой близкие к прямым линии, соединяющие точки на годографе от изменения толщины пластины (показан пунктирной линией), соответствующие толщинам T и T_0.

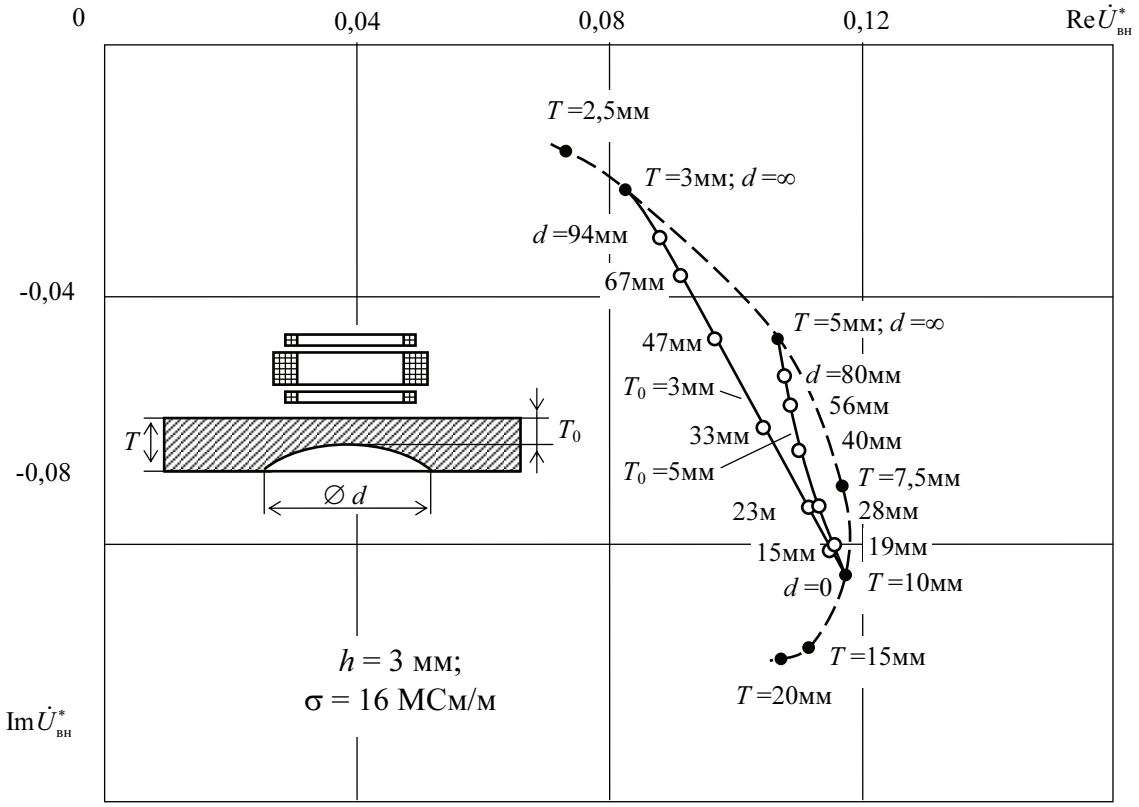


Рисунок 13 − Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения диаметра локального утонения сферической формы

На Рисунке 14 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U^*_{вн}$, обусловленного наличием утонения, от диаметра утонения d. В качестве нормирующего здесь использовано значение амплитуды вносимого напряжения при $d = 0$. Значение диаметра d нормировано по отношению к диаметру среднего витка обмотки возбуждения $D_0 = 36$ мм. Зависимость $\Delta U^*_{вн}(d)$ имеет ярко выраженный нелинейный характер. Резкое изменение сигнала ВТП, обусловленное наличием локального утонения, наблюдается при значениях d, соизмеримых с D_0.

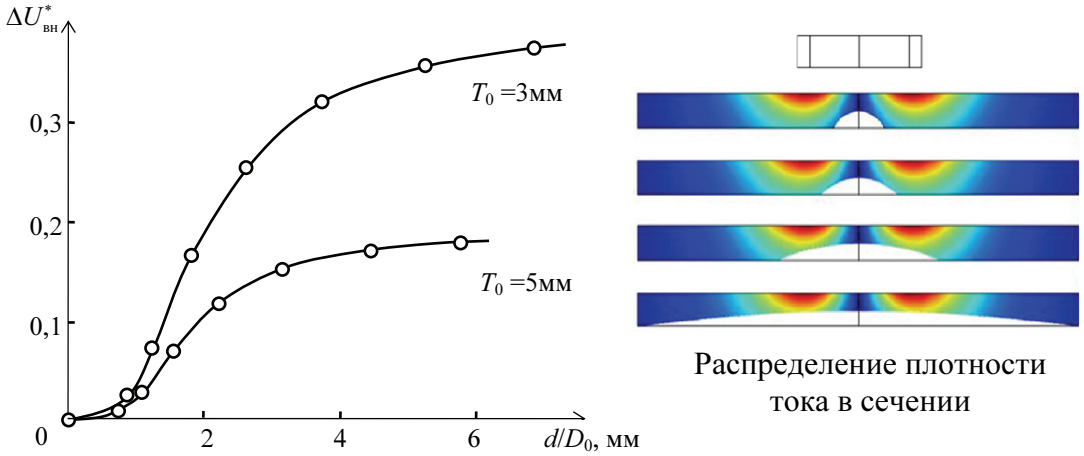


Рисунок 14 − Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U^*_{вн}$ от диаметра локального утонения

Выводы по главе 2

1. Обзор существующих методов расчета электромагнитных полей показал целесообразность и перспективу использования численных методов.

2. На примере моделирования методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой показана высокая степень адекватности результатов компьютерного и физического моделирований этого взаимодействия.

3. Проанализировано воздействие на сигнал ВТП основных влияющих факторов:

– толщины стенки трубы *T;*

– зазора между преобразователем и поверхностью трубы *h*;

– электропроводности материала σ;

а также дополнительных:

– кривизны стенки трубы;

– наличия участков с плавным изменением толщины стенки клиновидной формы;

– наличия участков с локальным утонением сферической формы;

– перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы;

– поперечного смещения оси преобразователя.

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА ВТП ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

В данной главе рассмотрен алгоритм преобразования сигнала ВТП вихретокового толщиномера, позволяющий осуществить эффективную отстройку от влияния на результат измерений толщины объекта основных влияющих факторов. На Рисунке 15 показана структурная схема предлагаемого вихретокового толщиномера, содержащего двухчастотный генератор Г, вихретоковый преобразователь ВТП, блок аналогового преобразования БАП и вычислительный блок ВБ.

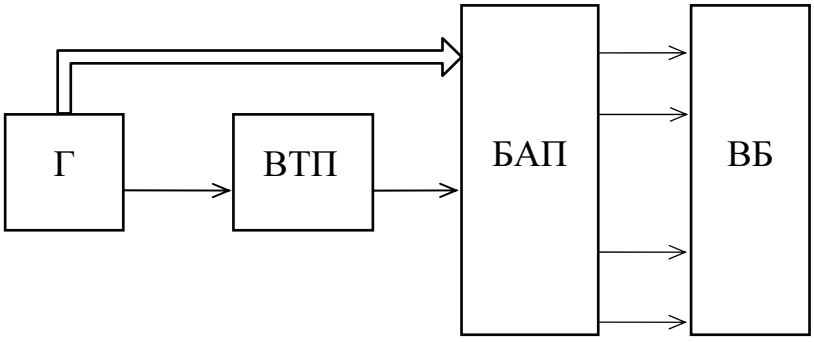


Рисунок 15 − Структурная схема вихретокового толщиномера

3.1 Алгоритм преобразования сигнала ВТП

Током обмотки возбуждения ВТП, подключенной к выходу генератора, создается двухчастотное магнитное поле. Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии вблизи ВТП электропроводящего объекта выходной сигнал вихретокового преобразователя равен нулю. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта магнитное поле возбуждения наводит в контролируемом изделии вихревые токи двух частот. Магнитное поле этих вихревых токов обуславливает возникновение выходного сигнала (вносимого напряжения) ВТП. Блоком аналогового преобразования осуществляется выделение комплексных составляющих сигнала ВТП, обусловленных каждой из двух частотных составляющих магнитного поля вихревых токов. Выходные сигналы блока аналогового преобразования пропорциональны амплитудам действительной и мнимой комплексных

составляющих вносимых напряжений высокой и низкой частот f_1, f_2 соответственно: Re $\bar{U}_{вн1}$, Im $\bar{U}_{вн1}$, Re $\bar{U}_{вн2}$, Im $\bar{U}_{вн2}$. Схема обработки сигналов в общем виде представлена на Рисунке 16.

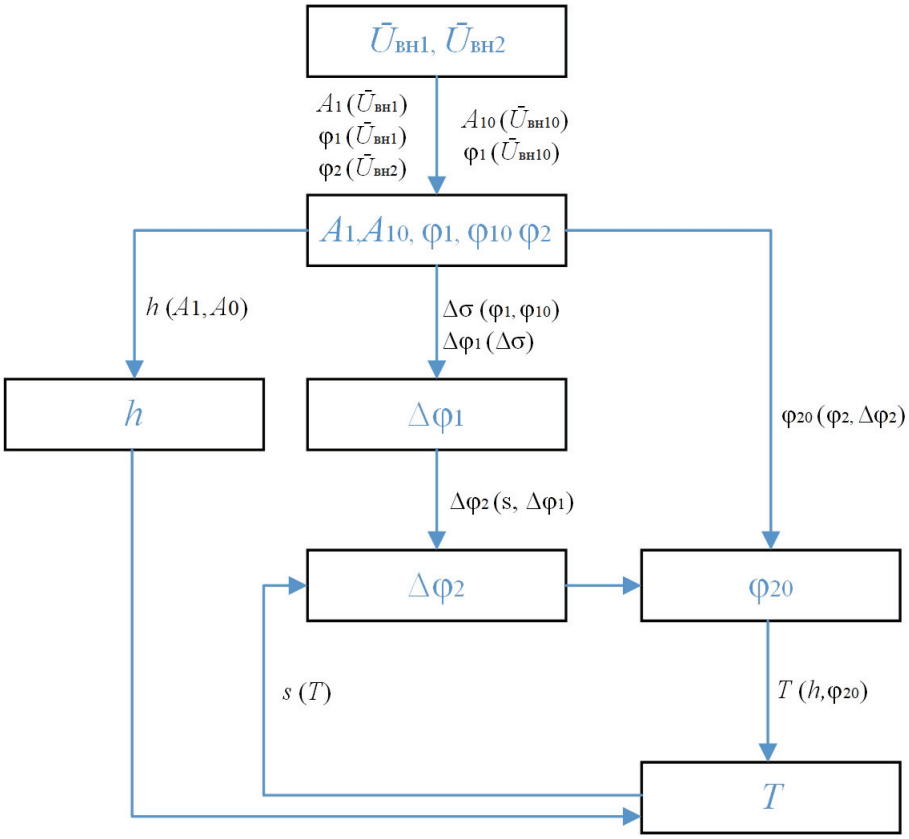


Рисунок 16 − Схема обработки сигналов вихретокового толщиномера

Вычислительным блоком осуществляется преобразование выходных сигналов блока аналогового преобразования в измеряемое значение контролируемого параметра. Для этого вычисляются амплитуда и фаза вносимого напряжения первой (2500 Гц) частоты A_1 и φ_1, и фаза второй (125 Гц) частоты φ_2:

$$A_1 = \sqrt{\left(\mathrm{Re}\bar{U}_{вн1}\right)^2 + \left(\mathrm{Im}\bar{U}_{вн1}\right)^2};$$

$$\varphi_1 = \mathrm{arctg}\left(\frac{\mathrm{Im}\bar{U}_{вн1}}{\mathrm{Re}\bar{U}_{вн1}}\right);\ \varphi_2 = \mathrm{arctg}\left(\frac{\mathrm{Im}\bar{U}_{вн2}}{\mathrm{Re}\bar{U}_{вн2}}\right)$$

Дальнейшее вычислительное преобразование сигналов измерительной информации осуществляется при помощи функций преобразования, определенных экспериментально на образцах труб различной толщины T с

фиксированной удельной электрической проводимостью материала σ_0 при различных значениях зазора h. В данном случае использованы функциональные зависимости для ЛБТ из сплава Д16Т с наружным диаметром 147 мм и толщиной стенки в диапазоне 5…15 мм, удельной электрической проводимостью материала 16 МСм/м и изменением значения зазора в диапазоне 0…15 мм.

На первом этапе вычислительного преобразования информативных параметров сигнала ВТП выполняется вычисление значения зазора h. Для этого используется функция обратного преобразования относительного значения амплитуды A_1 вносимого напряжения первой частоты в значение зазора h, определяемая путем численного анализа экспериментальной зависимости амплитуды A_1 от зазора h. Данная функция аппроксимируется зависимостью вида:

$$h = a \ln\left(\frac{A_1}{A_{10}}\right),$$

где a – коэффициент, зависящий от наружного диаметра трубы, конструктивных параметров ВТП и диапазона изменений зазора h; A_{10} – значение амплитуды при $h = 0$.

Здесь необходимо отметить, что при потенциальном использовании третьей частоты, выбранной таким образом, что амплитуда вносимого напряжения практически не будет зависеть от электропроводности материала, возможно реализовать алгоритм без записи значения A_{10} при каждой рабочей настройке, так как оно будет определяться амплитудой сигнала третьей частоты, упрощая процедуру контроля для оператора [53].

Далее проводится вычисление промежуточного значения толщины стенки T в предположении, что удельная электрическая проводимость материала трубы σ равна удельной электрической проводимости образцов σ_0. Для этого используется функциональная зависимость толщины стенки трубы T от зазора h и фазы φ_2. Для определения значения T сначала определяют ближайшие к измеренному значению h его дискретные значения h_i и h_{i+1}, соответствующие толщинам образцов, использованных для определения зависимостей. Далее производится расчет соответствующих значений $T_i(h_i,\varphi_2)$ и $T_{i+1}(h_{i+1},\varphi_2)$. Значение

толщины T вычисляется в предположении линейности зависимости в малом диапазоне изменений зазора h:

$$T = T_i(h_i, \varphi_2) + \frac{T_{i+1}(h_{i+1}, \varphi_{20}) - T_i(h_i, \varphi_2)}{h_{i+1} - h_i}(h - h_i)$$

Дальнейшие вычислительные преобразования обеспечивают отстройку от влияния на результат контроля изменений удельной электрической проводимости материала σ.

3.2 Программная отстройка от влияния электропроводности материала объекта контроля

Экспериментальная зависимость фазы φ_{10} от зазора h, показанная на Рисунке 17, с высокой степенью приближения аппроксимируется функцией:

$$\varphi_{10} = -q \exp(b + ch + dh^2),$$

где b, c и d – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от наружного диаметра трубы, частоты f_1, значения удельной электрической проводимости σ_0 и конструктивных параметров ВТП.

Значение фазы φ_{10} вносимого напряжения первой частоты при измеренном зазоре h и значении удельной электрической проводимости σ_0, определяется в соответствии с используемыми для определения функций преобразования образцами.

Далее вычисляется разность фаз $\Delta\varphi_1$ между измеренным значением фазы φ_1 вносимого напряжения первой частоты и ее значением φ_{10} для используемых при определении функций преобразования образцов труб:

$$\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{10}.$$

Следующей вычислительной операцией является определение разности фаз $\Delta\varphi_2$ между измеренным значением фазы φ_2 вносимого напряжения второй частоты и ее значением φ_{20} для используемых при определении функций преобразования образцов.

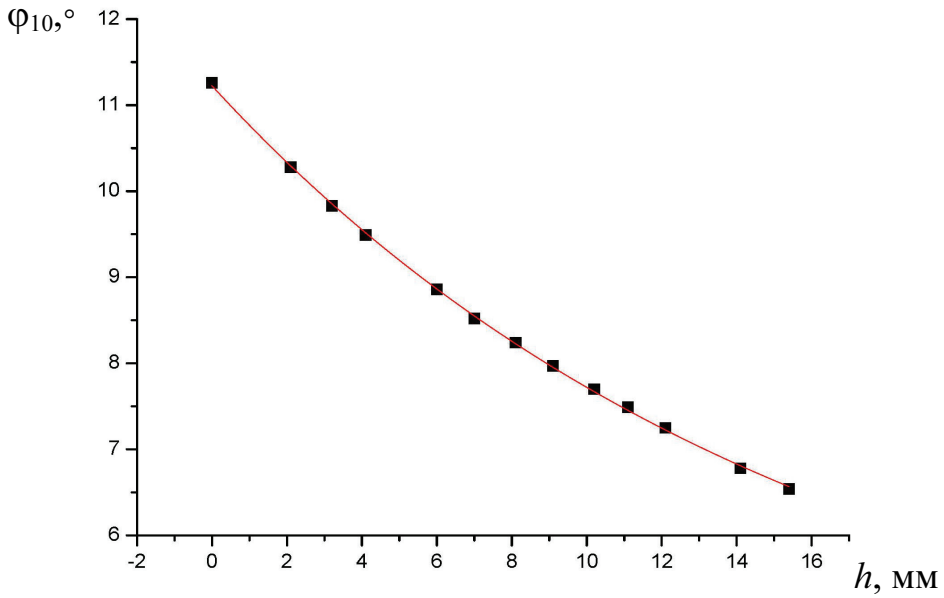


Рисунок 17 − Экспериментальная зависимость фазы φ_{10} от зазора h

Разность фаз $\Delta\varphi_2$, обусловленная отличием значения удельной электрической проводимости материала контролируемой трубы σ от ее значения σ_0, соответствующего используемым для определения функций преобразования образцам, связана с разностью фаз $\Delta\varphi_1$, обусловленной этой же причиной, линейной зависимостью вида:

$$\Delta\varphi_2 = s\Delta\varphi_1,$$

где множитель s является функцией толщины стенки трубы T: $s = s(T)$.

При изменении толщины стенки в интервале 5…15 мм значение s изменяется в диапазоне 2,5…4,3.

Экспериментальные зависимости изменения фазы $\Delta\varphi_2$ от $\Delta\varphi_1$ для нескольких образцов толщин при изменении электропроводности материала объекта контроля σ показаны на Рисунке 18. Здесь можно заметить, что угол α меняется при изменении толщины стенки T. Зависимость $s(T)$ с высокой степенью приближения описывается функцией:

$$s(T) = \exp(k + mT + nT^2),$$

где k, m и n – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от наружного диаметра трубы, значения удельной электрической проводимости σ_0, значений первой f_1 и второй f_2 частот, конструктивных параметров ВТП.

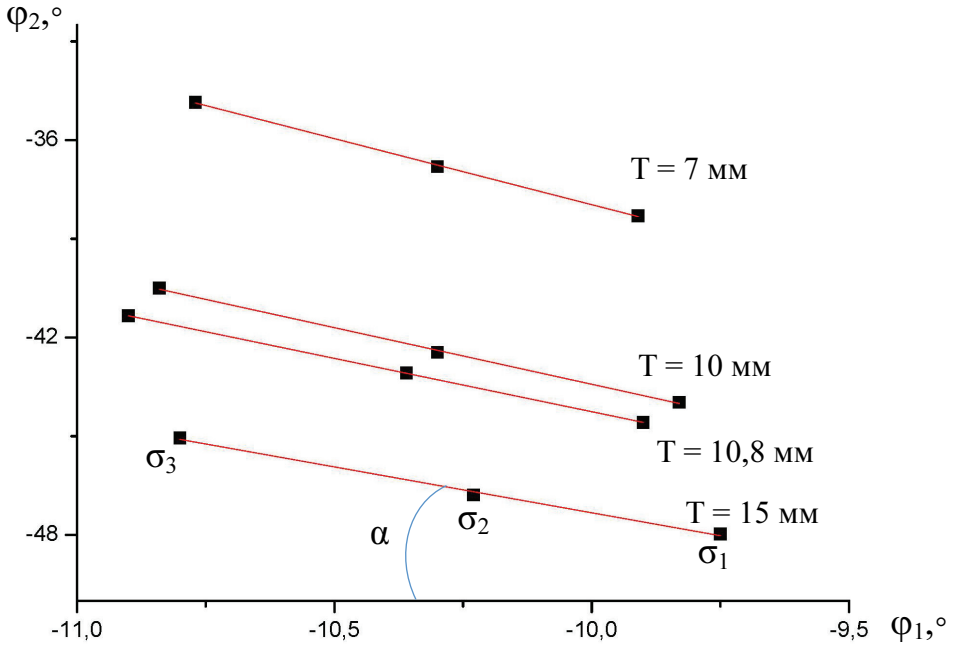


Рисунок 18 − Экспериментальные зависимости изменения фазы $\Delta\varphi_2$ от $\Delta\varphi_1$ при изменении электропроводности материала объекта контроля σ

При определении значения множителя *s*, необходимого для вычисления значения $\Delta\varphi_2$, используется рассчитанное ранее значение толщины *T*. Затем вычисляется скорректированное значение фазы вносимого напряжения второй частоты, соответствующее используемым для определения функций преобразования образцам:

$$\varphi_{20} = \varphi_2 - \Delta\varphi_2$$

Далее осуществляется повторное вычисление значения толщины *T*. Найденное уточненное значение толщины *T* вновь используется для последовательных вычислений значений *s*, $\Delta\varphi_2$, φ_{20} и нового значения толщины *T*. Описанный цикл вычислений повторяется несколько раз. Значение толщины *T*, рассчитанное в последнем цикле, принимается в качестве результата измерения контролируемого параметра *T*.

Выводы по главе 3

1. Результаты математического и физического моделирования показали, что влияние основных мешающих факторов, зазора между ВТП и поверхностью

объекта контроля и электропроводности материала, в том числе при изменении температуры, существенным образом отражаются на результате измерений.

Для отстройки от указанных параметров и вычисления толщины стенки с требуемой точностью предложен алгоритм обработки измерительного сигнала, позволяющий компенсировать эти факторы в широком диапазоне.

2. Новизной и особенностью предложенного алгоритма является использование в качестве функции преобразования экспериментальной зависимости фазы вносимого напряжения нижней частоты от значения зазора и толщины стенки, корректируемой при изменении фазы вносимого напряжения верхней частоты, обусловленного изменением электропроводности материала.

Для экспериментальных зависимостей с высокой точностью подобраны аппроксимирующие функции обратного преобразования, записываемые в вычислительный блок для дальнейшей работы, и являющиеся базовыми в предложенном алгоритме.

3. Показана необходимость использования нескольких частот (для настоящего случая – двух), информативным параметром первой из которых является амплитуда вносимого напряжения – для определения зазора, фаза вносимого напряжения – для отстройки от изменения электропроводности, а второй – фаза вносимого напряжения – для определения толщины стенки.

4. Предложенный способ в совокупности позволяет измерять толщину стенки немагнитной трубы в условиях значительного изменения зазора и удельной электрической проводимости материала, что показано на примере измерений стенки ЛБТ диаметром 147 мм в диапазоне 5…15 мм с погрешностью в пределах 5% при изменении удельной электрической проводимости материала 10…25 МСм/м и значения зазора в диапазоне 0…15 мм.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ И АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

В настоящей главе рассматриваются особенности технических решений программной и аппаратной реализации вихретокового толщиномера.

4.1 Структурная схема вихретокового толщиномера

На Рисунке 19 показана структурная схема устройства, реализующего двухчастотный метод контроля. Толщиномер содержит два генератора 1 и 2 гармонических сигналов частот f_1 и f_2, схему синхронизации 3, сумматор 4, ВТП с возбуждающей 5, измерительной 6 и компенсационной 7 обмотками, вычитающее устройство 8, амплитудно-фазовые детекторы 9–12, интегрирующие дискретизаторы 13–16, вычислительный блок 17 и устройство индикации 18.

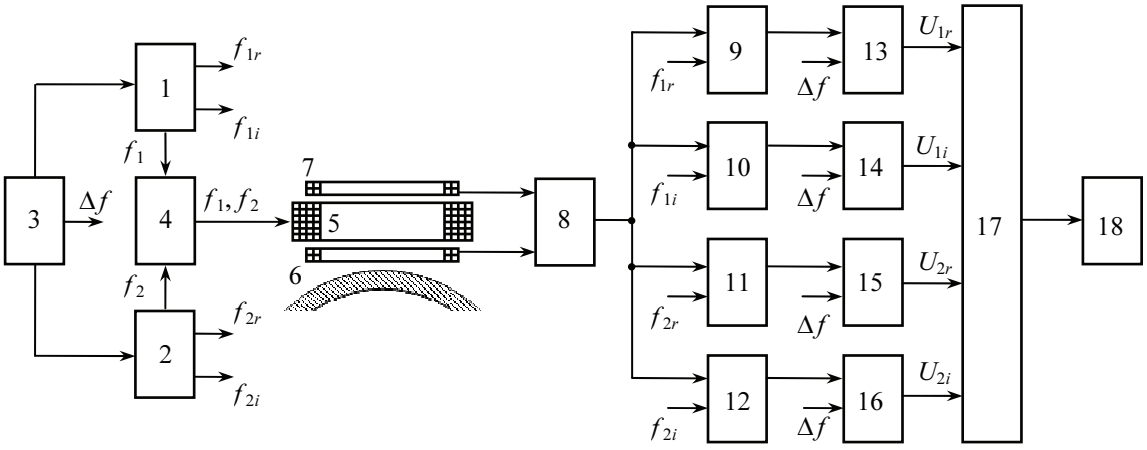


Рисунок 19 − Структурная схема двухчастотного вихретокового толщиномера

Особенностью является то, что в объекте контроля осуществляется возбуждение вихревых токов двух синхронизированных частот, благодаря чему поддерживается стабильной разность частот:

$$f_1 - f_2 = a \cdot \Delta f \,,$$

где a – целое число, Δf – частота сигнала управления схемы синхронизации.

Такое возбуждение позволяет осуществить качественное разделение сигналов ВТП, обусловленных каждой в отдельности частотной составляющей

вихревых токов. Гармонические сигналы генераторов складываются в определенной пропорции сумматором. Током обмотки возбуждения ВТП, подключенной к выходу сумматора, создается двухчастотное магнитное поле. Измерительная и компенсационная обмотки ВТП подключены к входам вычитающего устройства. При отсутствии вблизи ВТП электропроводящего объекта выходные сигналы измерительной и компенсационной обмоток ВТП равны и, соответственно, в этом случае будет равен нулю выходной сигнал вычитающего устройства. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта магнитное поле возбуждения наводит в контролируемом изделии вихревые токи двух частот. Магнитное поле этих вихревых токов обуславливает возникновение выходного сигнала (вносимого напряжения) ВТП.

Далее осуществляется выделение комплексных составляющих сигнала ВТП, обусловленных каждой из двух частотных составляющих магнитного поля вихревых токов. Для выполнения этой функции в состав толщиномера входят четыре одинаковых измерительных канала, каждый из которых содержит амплитудно-фазовый детектор и интегрирующий дискретизатор. Амплитудно-фазовыми детекторами осуществляется синхронное с соответствующей частотой управления f_j детектирование вносимого напряжения ВТП. Детекторы управляются квадратурными опорными напряжениями действительной f_{jr} и мнимой f_{ji} составляющих, формируемыми генераторами. Интегрирующий дискретизатор выполняет усреднение выходного сигнала амплитудно-фазового детектора за время $T = 1/\Delta f$, формируемого схемой синхронизации. Схемотехнически интегрирующий дискретизатор состоит из последовательно соединенных схем аналогового интегратора и запоминающего устройства, охваченных общей отрицательной обратной связью, и представляет собой импульсный фильтр нижних частот с конечной импульсной характеристикой. Благодаря такой структуре амплитудно-частотная характеристика измерительного канала толщиномера имеет нулевые показания на частотах, отличающихся от f_j на значения, кратные Δf (Рисунок 20) [24]. Таким образом, обеспечивается качественное разделение сигналов разных частот без

использования избирательных резонансных усилителей, уменьшение полосы пропускания которых ограничено нестабильностью частотозадающих элементов, характеристики которых даже при тщательном их подборе в значительной мере подвержены влиянию изменений температуры окружающей среды.

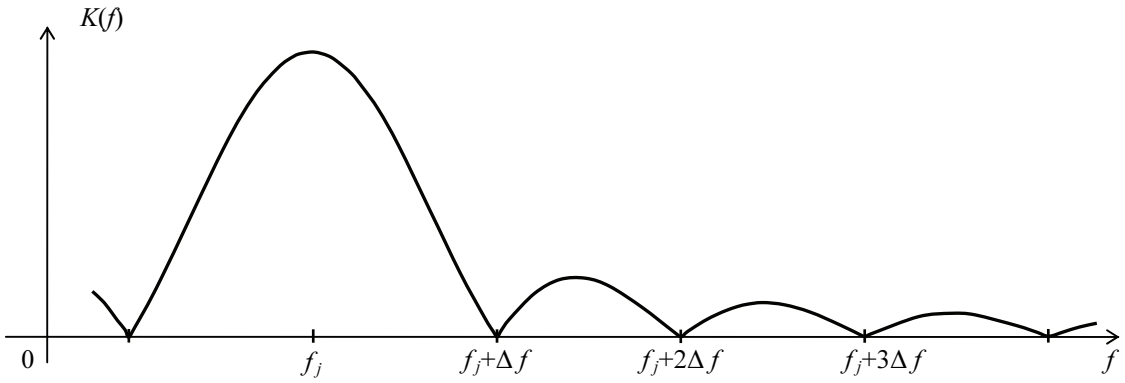


Рисунок 20 − Амплитудно-частотная характеристика измерительного канала толщиномера

Выходные сигналы интегрирующих дискретизаторов пропорциональны амплитудам действительной и мнимой комплексных составляющих вносимых напряжений частот f_1 и f_2: U_{1r} U_{1i} U_{2r} U_{2i}.

Выделенные составляющие сигнала ВТП на первой частоте зависят только от зазора h и удельной электропроводности материала σ, а составляющие сигнала на второй частоте – от зазора h, удельной электропроводности материала σ и толщины стенки T. Таким образом, использование двух частот позволяет разделять влияющие параметры и получать количественную информацию о толщине стенки, зазоре между ВТП и поверхностью объекта контроля h, одновременно отстраиваясь от последнего и электропроводности материала объекта контроля σ, используя предложенный в настоящей работе алгоритм обработки. Комплексный подход к решению поставленной задачи позволяет не только измерять толщину стенки от 5 до 15 мм, но и отстраиваться от мешающих факторов в широком диапазоне.

Предлагаемый метод разделения частот увеличивает достоверность контроля за счет более качественного разделения реакций ВТП на взаимодействие с объектом каждой в отдельности частотных составляющих возбуждающего

магнитного поля. Благодаря исключению из схемы устройства избирательных усилителей, синхронизации частот генераторов и использованию интегрирующих дискретизаторов, достигается более качественное разделение реакций ВТП на взаимодействие с объектом каждой в отдельности частотных составляющих возбуждающего магнитного поля. Ранее предлагаемый метод разделения частот был эффективно применен в дефектоскопии магнитных изделий [13].

Вычислительное преобразование сигналов измерительных каналов осуществляется блоком 17, при этом алгоритмы преобразования могут быть легко изменены и доработаны. Устройство индикации 18 позволяет визуализировать запрограммированный интерфейс вихретокового толщиномера и вывести необходимые данные для оператора.

4.2 Интерфейс вихретокового толщиномера

На Рисунке 21 показан внешний вид толщиномера, включающего в себя ВТП, установленный на специальной площадке на образце трубы; блок аналогового преобразования; многофункциональное устройство ввода-вывода USB-6002, содержащее 8 аналоговых входов (16 бит, 50 кВыб/с), 2 аналоговых выхода (5 кВыб/с/канал) и 13 цифровых вводов-выводов, имеющее легкий малогабаритный корпус и шину с винтовыми клеммами для подключения датчиков, комплектный драйвер NI-DAQmx, утилиту конфигурации, упрощающую процесс настройки и измерений, синхронизацию с интерфейсом программы на базе LabView. Вычислительный блок представляет собой портативный компьютер с программой для обработки и визуализации данных. Интерфейс прибора представлен на Рисунке 22.

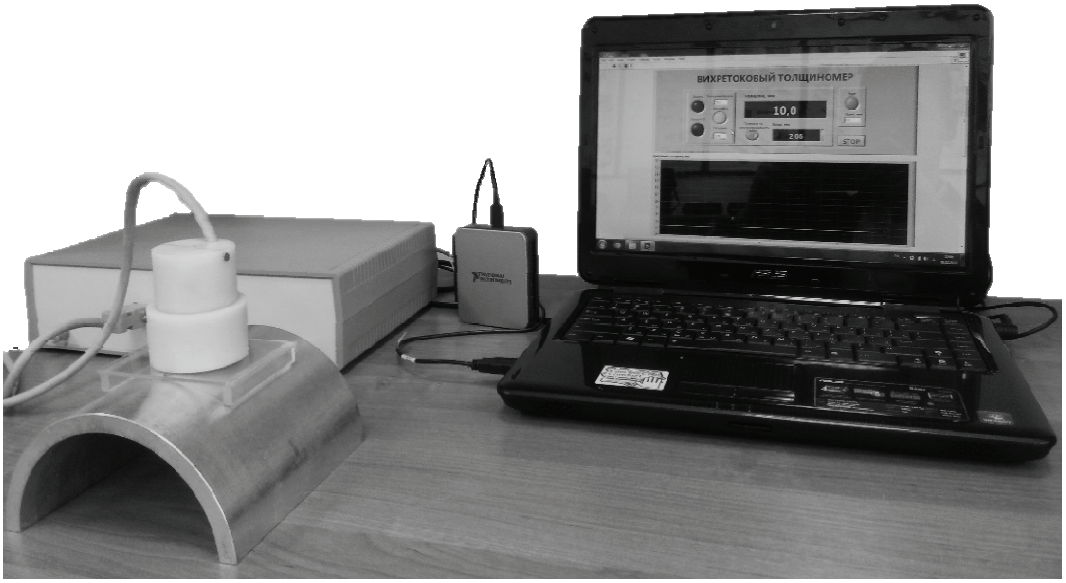


Рисунок 21 − Вихретоковый толщиномер. Внешний вид

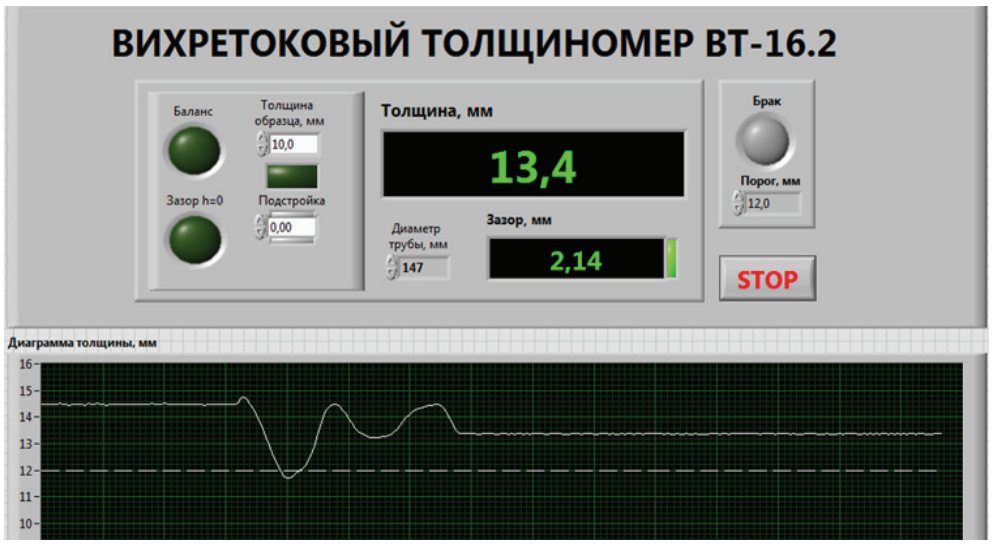


Рисунок 22 − Интерфейс вихретокового толщиномера

В интерфейсе толщиномера отображается следующая информация:

– значение измеряемой толщины стенки трубы (индикатор «Толщина, мм»);

– значение зазора между трубой и ВТП (индикатор «Зазор, мм»);

– кнопка «Баланс» – для балансировки ВТП при отсутствии взаимодействия с объектом контроля;

– кнопка «Зазор h_0» – для выполнения настройки толщиномера при нулевом значении зазора;

– регулятор «Толщина образца» и кнопка включения/отключения функции подстройки;

– регулятор «Диаметр трубы» – для выбора диаметра контролируемой трубы;

– индикатор «Брак», сигнализирующий о снижении измеренного значения толщины менее установленного с помощью регулятора «Порог, мм»;

– табло «Диаграмма толщины, мм», на котором отображаются текущие измерения толщины, служит для просмотра изменения значений во времени (режим сканирования);

– кнопка «STOP», для остановки измерений.

Дополнительно предусмотрена автоматическая запись данных для сохранения и дальнейшего анализа результатов контроля. Сложность системы обработки сигнала, но при этом простота в управлении и настройке позволяют считать перспективным внедрение подобных систем для контроля в условиях буровой площадки.

Следует отметить, что разработанные решения являются «базой» для создания более сложных автоматизированных систем контроля толщины стенки ЛБТ. На Рисунке 23 представлен один из таких вариантов: четырехканальная система вихретокового контроля, позволяющая непрерывно измерять толщину стенки «от замка до замка» по четырем образующим, что обеспечивает высокую производительность и достоверность контроля. Мобильный сканирующий комплекс для контроля толщины стенки ЛБТ в условиях буровой площадки разработан ООО «НПК Интроскопия» (г. Томск) и в настоящее время проходит опытную эксплуатацию.

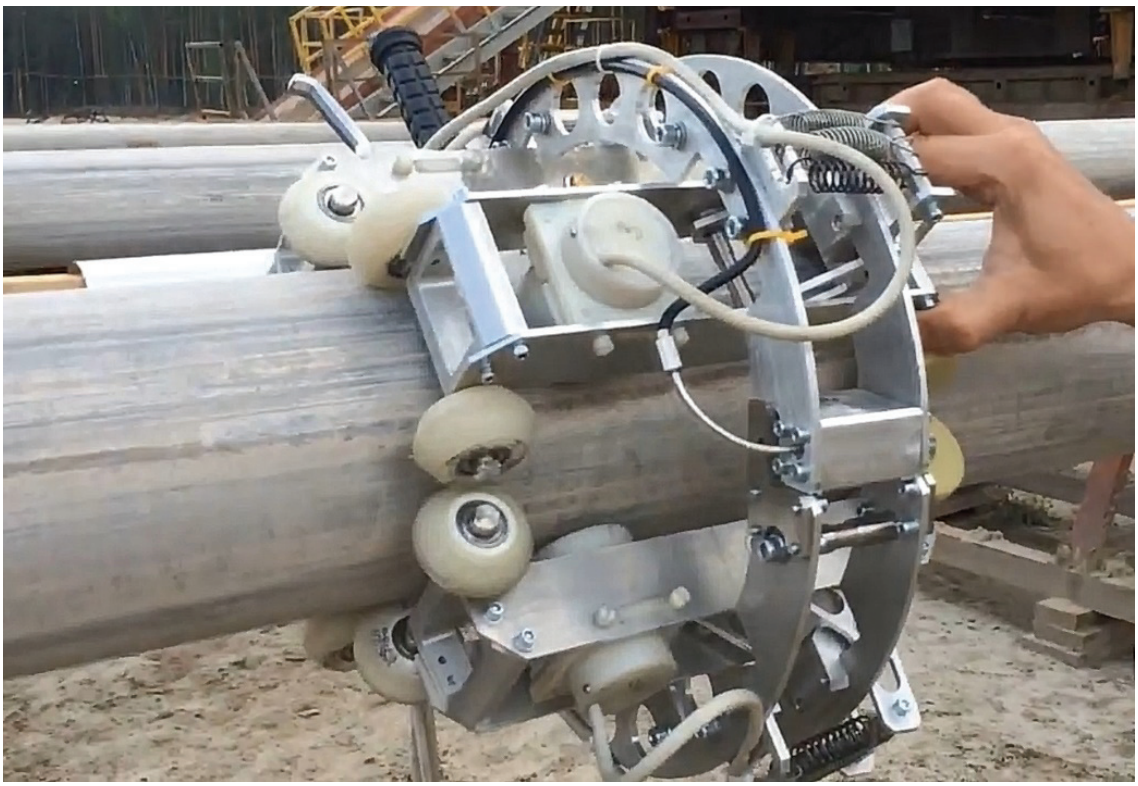


Рисунок 23 − Четырехканальная автоматизированная система вихретоковой толщинометрии

Выводы по главе 4

1. Предложенная схема обработки сигналов вихретокового толщиномера подтверждает эффективность использования в многочастотных вихретоковых толщиномерах метода разделения частот сигнала ВТП, основанного на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

2. Разработаны программа обработки сигнала и интерфейс вихретокового толщиномера, позволяющий осуществлять настройку прибора, визуализировать измеренные значения толщины стенки T и зазора h, сигнализировать о пересечении установленного уровня отбраковки толщины T. Диаграмма толщины позволяет в непрерывном режиме получать информацию о толщине стенки, что используется при контроле в режиме сканирования. Автоматическая запись данных позволяет анализировать результаты контроля после проведения инспекции в условиях производственной лаборатории.

ГЛАВА 5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

Корректная работа в соответствие заявленным техническим характеристикам измерительных приборов и систем невозможна без метрологического обеспечения. По этой причине необходимо произвести подготовку прибора. Для разрабатываемого вихретокового толщиномера такая процедура включает в себя первичную настройку и рабочую настройку [43]. С целью сопоставления метрологических характеристик и определения пригодности прибора к использованию выполняется калибровка [19, 21].

Проведенные процедуры настройки вихретокового толщиномера должны обеспечивать требуемые технические характеристики прибора: контроль стенки ЛБТ в диапазоне толщин 5…15 мм с погрешностью измерений ±5%; отстройку от изменения воздушного зазора до 15 мм, позволяющую выполнять контроль без контакта ВТП и трубы, а также компенсировать вибрации в режиме сканирования; отстройку от изменения электрической проводимости, вызванную не только различием марок материала объекта контроля, но и изменением температурных условий.

5.1 Первичная настройка

Первым этапом после сборки прибора и проверки работоспособности измерительных каналов вихретокового толщиномера является проведение первичной настройки. Вычислительный блок, осуществляющий программную обработку, реализует базовую функцию обратного преобразования для определения толщины стенки T следующего вида:

$$T = k \exp\left(b + c\varphi_2 + d{\varphi_2}^2\right),$$

где b, c и d – экспериментально определяемые коэффициенты, зависящие от наружного диаметра трубы, частоты тока возбуждения, значения удельной электрической проводимости σ, конструктивных параметров ВТП и зазора h. При первичной настройке происходит запись фазы нижней частоты φ_2 для

всех значений используемых пар зазоров h и толщин T контрольных образцов, и определяются коэффициенты b, c, d для каждой аппроксимирующей функции $T(\varphi_2, h)$, подробно описанной в Главе 3 [18].

Контрольные образцы толщины (Рисунок 24) представляют собой сегмент трубы, идентичной по физическим характеристикам и геометрии контролируемому объекту. Образец не должен иметь дефектов [17]. Длина образца может варьироваться, однако, ввиду возможного влияния краевого эффекта [38, 55], рекомендуется использовать сегмент длиной не менее трех диаметров обмотки возбуждения ВТП.

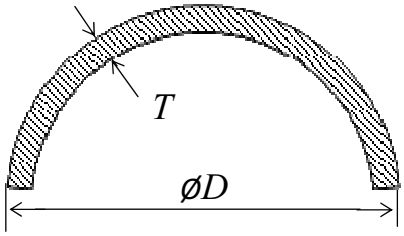


Рисунок 24 − Контрольный образец: T – толщина стенки образца, D – диаметр

Вычислительный алгоритм преобразования сигнала в значение толщины подробно изложен в Главе 3. Коэффициенты функций обратного преобразования записываются для каждого ВТП и типоразмера ЛБТ в вычислительный блок и выбираются перед началом работы в соответствующих настройках прибора. Количество используемых образцов толщин и зазоров определяется требуемой точностью получения базовой характеристики, для текущей задачи контроля десять.

В настоящей работе рассмотрены функциональные зависимости для широко распространенной ЛБТ из дюраля Д16Т с наружным диаметром 147 мм и толщиной стенки в диапазоне 5…15 мм. Обеспечение необходимого зазора между ВТП и поверхностью трубы осуществлялось с применением диэлектрических пластин. Значения толщин T, зазоров h, и соответствующие им значения фазы нижней частоты φ_2, использованные при первичной настройке, приведены в Таблице 4.

Таблица 4 – Значения измеренных фаз φ_2 для настроечных образцов

h, мм / T, мм	0	2,1	3,2	4,1	6,0	7,0	8,1	9,1	10,2	11,1	12,1	14,1	15,4
5,1	–29,65	–31,08	–31,84	–32,43	–33,63	–34,46	–34,95	–35,60	–36,28	–37,00	–37,51	–38,78	–39,21
6,2	–33,01	–34,53	–35,40	–36,04	–37,39	–38,19	–38,79	–39,50	–40,18	–40,84	–41,47	–42,58	–43,15
7,0	–35,45	–37,03	–37,84	–38,50	–39,84	–40,67	–41,30	–41,99	–42,65	–43,33	–43,99	–45,10	–45,62
7,8	–36,97	–38,60	–39,50	–40,17	–41,51	–42,50	–43,04	–43,86	–44,43	–45,16	–45,88	–47,10	–47,62
8,3	–38,19	–39,86	–40,77	–41,42	–42,83	–43,67	–44,32	–45,05	–45,72	–46,50	–47,12	–48,30	–48,92
9,0	–39,60	–41,32	–42,22	–42,93	–44,31	–45,15	–45,83	–46,59	–47,26	–47,99	–48,66	–49,82	–50,40
10,0	–40,90	–42,63	–43,57	–44,30	–45,72	–46,53	–47,26	–48,01	–48,68	–49,42	–50,10	–51,24	–51,83
10,8	–41,50	–43,23	–44,17	–44,96	–46,31	–47,15	–47,84	–48,62	–49,30	–50,04	–50,78	–51,98	–52,53
11,9	–42,57	–44,35	–45,29	–46,00	–47,42	–48,22	–48,98	–49,72	–50,42	–51,16	–51,80	–53,10	–53,68
13,0	–43,79	–45,50	–46,47	–47,20	–48,65	–49,53	–50,23	–50,99	–51,70	–52,43	–53,08	–54,32	–54,90
15,0	–44,97	–46,82	–47,87	–48,48	–50,00	–50,84	–51,60	–52,35	–53,08	–53,77	–54,48	–55,80	–56,43

Измерения толщин контрольных образцов и зазоров выполнены цифровым индикатором часового типа, имеющим предел измерения 0−25,4 мм с суммарной ошибкой не более ±6 мкм. Некоторые из полученных зависимостей проиллюстрированы на Рисунке 25.

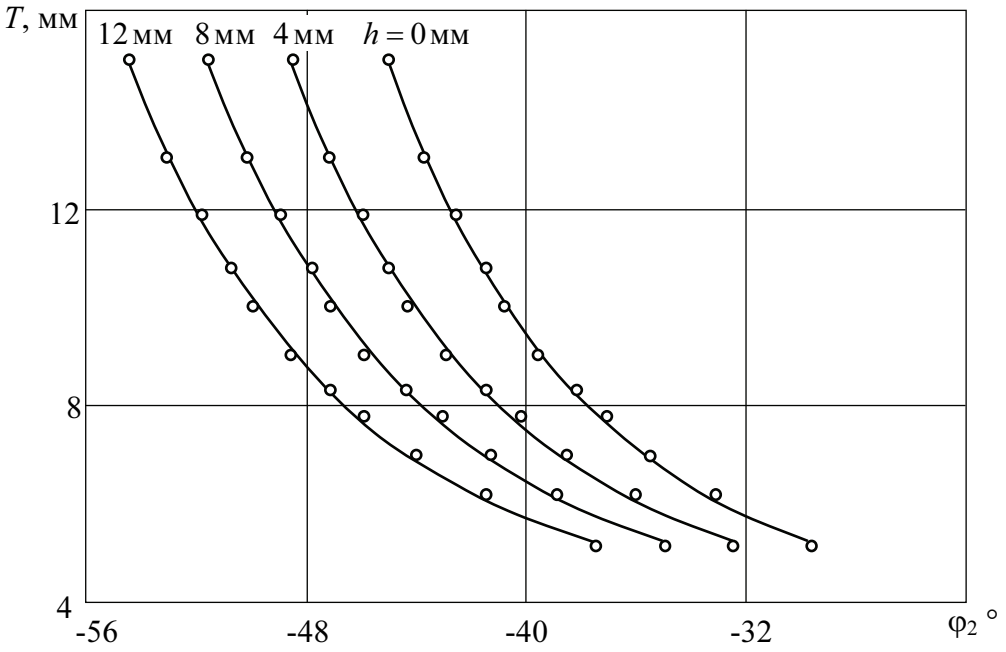


Рисунок 25 − Функция обратного преобразования фазы φ_2 вносимого напряжения нижней частоты в значение толщины стенки трубы T для разных значений зазора h при фиксированном значении σ

Определение коэффициентов b, c, d функций $T(\varphi_2, h)$ осуществляется с помощью программного пакета, с высокой степенью приближения позволяющего определять аппроксимирующие функции на основе данных из матрицы (см. Таблицу 4). Статистические данные, характеризующие результаты аппроксимации, показаны на Рисунке 26.

Statistics

	T, mm
Number of Points	11
Degrees of Freedom	8
Reduced Chi-Sqr	0,03215
Residual Sum of Squares	0,2572
Correlation	0,99859
R Value	0,99859
R-Square(COD)	0,99718
Adj. R-Square	0,99648
Root-MSE (SD)	0,1793
Norm of Residuals	0
Fit Status	Succeeded(100)

Рисунок 26 − Результаты построения аппроксимирующей функции $T(\varphi_2, h)$

Из Рисунка 26 видно, что коэффициент корреляции составляет 0,999.

Процедура первичной настройки выполняется один раз в условиях лаборатории, при этом запись всей матрицы значений должна выполняться в постоянном температурном режиме. Такая процедура является базовой, но недостаточной для обеспечения требуемой точности измерений. Для корректной работы прибора перед началом контроля каждый раз необходимо проводить рабочую настройку.

5.2 Рабочая настройка

Данная процедура представляет собой комплекс операций по программной корректировке измеряемого значения. В рамках этой настройки проводится балансировка ВТП при отсутствии объекта контроля, а также записываются значения амплитуды A_{10} при $h = 0$, которые используется для вычисления зазора в соответствии с функцией

$$h = b \ln\left(\frac{A_1}{A_{10}}\right),$$

подробно описанной в Главе 3. Затем проверяется отклонение показаний прибора от действительного значения толщины образца и реализуется подстройка фазы нижней частоты φ_2 до соответствия показаний прибора с толщиной контрольного образца. Добавочное значение $\Delta\varphi_2$ записывается в память устройства и хранится до проведения следующей рабочей настройки. Толщина стенки контрольного образца по умолчанию выбирается из середины диапазона и составляет 10 мм. Панель рабочей настройки показана на Рисунке 27.

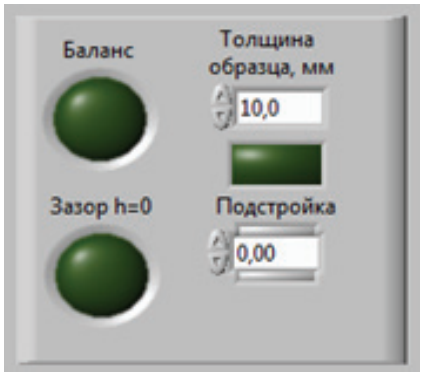


Рисунок 27 − Панель рабочей настройки вихретокового толщиномера

5.3 Калибровка

Определение действительных значений метрологических характеристик (соответствия заявленным параметрам), вихретокового толщиномера, с последующим заключением о пригодности к дальнейшей эксплуатации, осуществляется при помощи калибровки [21]. Калибровка выполняется с определенной, заранее установленной при утверждении типа средств измерительной техники либо метрологической аттестации, периодичностью, называемой межкалибровочным интервалом. Основным фактором выбора последнего является воспроизведение заявленных метрологических характеристик в течение этого промежутка времени.

Для вихретокового толщиномера рекомендуется проводить калибровку не реже одного раза в год, а также во внеочередном порядке: при вводе в эксплуатацию, после ремонта, при выявлении явных погрешностей измерений в процессе эксплуатации.

В общем случае различают несколько видов калибровки:

– первичная калибровка – осуществляется на этапе выпуска с производства измерительной техники;

– периодическая калибровка – производится для эксплуатируемых измерительных средств в соответствии с межкалибровочным интервалом;

– внеочередная калибровка – производится вне зависимости от установленного интервала с целью определения настоящих метрологических характеристик измерительных средств, при возникновении подозрений в отклонении от заявленных производителем параметров, подтвержденных соответствующей документацией.

Первичная калибровка производится в условиях лаборатории или специального производственного помещения, как и первичная настройка. Периодическая и внеочередная калибровки осуществляются в процессе эксплуатации прибора, как и рабочая настройка.

Образцы для проведения калибровки используются такие же, как и для проведения рабочей настройки, их параметры описаны выше.

Калибровка заключается в сопоставлении действительного значения толщины контрольного образца и измеренного значения, и определение погрешности измерений. Для вихретокового толщиномера предложена следующая методика:

1. После проведения рабочей настройки ВТП устанавливается на контрольный образец толщиной $T_д$.

2. Записываются измеренные значения толщины стенки $T_и$ для нескольких значений зазоров h, соответствующих минимальному, максимальному и среднему значению диапазона измерений.

3. Указанная процедура проделывается на трех контрольных образцах, толщину которых рекомендуется выбирать минимальным, средним и максимальным значением диапазона. В общем случае для разработанного вихретокового толщиномера − 5, 10 и 15 мм соответственно.

4. Полученные значения записываются в таблицу (Таблица 5).

5. Абсолютная ΔT и относительная δT погрешность измерений определяется по формулам:

$$\Delta T = |T_и - T_д|;$$

$$\delta T = \frac{\Delta T}{T_д} \times 100.$$

Таблица 5 − Калибровка вихретокового толщиномера

№	№ образца	$T_д$, мм	h, мм	$T_и$, мм	ΔT, мм	δT, %
1	01	5,1	0	5,2	0,1	2,0
2	01	10,0	0	10,0	0	0
3	01	15,0	0	14,9	0,1	0,7
4	02	5,1	6	5,2	0,1	2,0
5	02	10,0	6	10,1	0,1	1,0
6	02	15,0	6	14,8	0,2	1,3
7	03	5,1	15,4	5,2	0,1	2,0
8	03	10,0	15,4	10,2	0,2	2,0
9	03	15,0	15,4	14,7	0,3	2,0

Если максимальное значение относительной погрешности δT_{max} из Таблицы 3 оказывается в пределах заявленной техническими характеристиками

вихретокового толщиномера 5%, то прибор работает исправно и годен к дальнейшей эксплуатации. При превышении этого значения необходимо выполнить рабочую настройку и повторную калибровку. Если такая процедура не привела к требуемому результату, прибор подлежит ремонту и настройке техническими специалистами организации-изготовителя.

На примере калибровки вихретокового толщиномера в Таблице 5 записаны значения по описанному алгоритму. Максимальное отклонение от действительного значения δT_{max} составило 2%, что позволяет говорить о корректности работы прибора и соответствии заявленным характеристикам. График отклонения измеренного значения толщины стенки T от действительного показан на Рисунке 28.

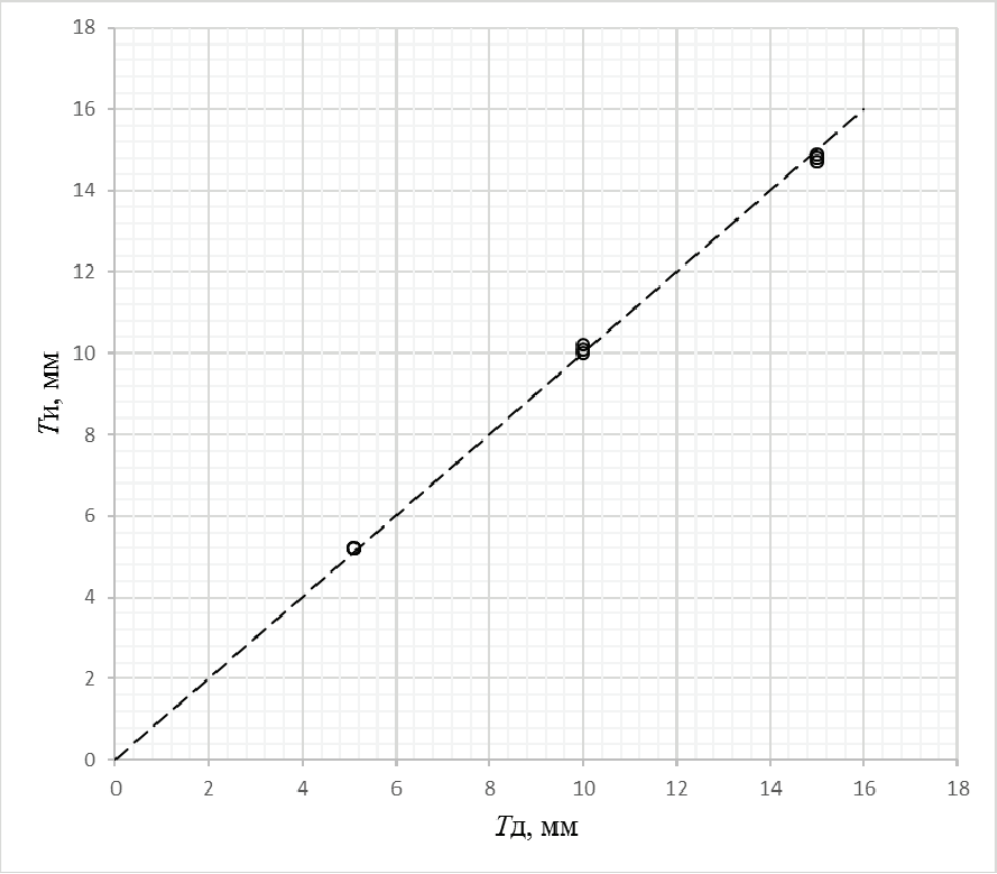


Рисунок 28 − Отклонение измеренного значения толщины стенки T от действительного при калибровке

При возникновении сомнений оператора во время эксплуатации прибора в достоверности измерений толщины или зазора, необходимо прекратить эксплуатацию и провести внеочередную калибровку.

Выводы по главе 5

1. Разработана методика первичной настройки вихретокового толщиномера, позволяющая задать коэффициенты для базовой функции обратного преобразования фазы φ_2 в толщину стенки T.

2. Предложены образцы для проведения первичной настройки, рабочей настройки и калибровки.

3. Разработана методика рабочей настройки, предусматривающая балансировку ВТП, определение коэффициента A_{10} для функции вычисления зазора h, корректировку показаний вихретокового толщиномера с целью увеличения точности измерений.

4. Предложена методика проведения калибровки вихретокового толщиномера с использованием контрольных образцов.

5. Проведение указанных мероприятий позволяет обеспечивать измерения толщины стенки в диапазоне 5…15 мм в пределах 5% и условиях изменения влияющих факторов в широком диапазоне.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель с использованием МКЭ для исследования различных вариантов взаимодействия ВТП и объекта контроля, позволяющая определить влияние исследуемых параметров на результат измерений, определить и оптимизировать функции преобразования.

2. Проанализировано влияние на сигнал ВТП основных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, кривизны стенки трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

3. Предложен и реализован алгоритм преобразования сигнала в условиях изменения влияющих факторов, таких как изменение электропроводности объекта контроля, зазора между ВТП и поверхностью контролируемой трубы в широком диапазоне.

4. Доказана эффективность использования в многочастотных вихретоковых толщиномерах метода разделения частот сигнала ВТП, основанного на возбуждении в объекте контроля вихревых токов синхронизированных частот и разделении частотных составляющих с использованием импульсных фильтров нижних частот с конечными импульсными характеристиками.

5. Разработан вихретоковый толщиномер, позволяющий измерять толщину стенки ЛБТ в диапазоне 5…15 мм с погрешностью ±5% при изменении зазора 0…15 мм и отстройкой от изменения электропроводности объекта контроля.

6. Предложена методика проведения настройки прибора для обеспечения корректных результатов измерений в пределах заявленной погрешности, включающая первичную настройку для обеспечения необходимой функции преобразования и рабочую настройку.

7. Проведены испытания вихретокового толщиномера в лабораторных и полевых условиях. На основе выполненных исследований и результатов организацией-партнером ООО «НПК Интроскопия» (г. Томск) разработан мобильный сканирующий комплекс контроля толщины стенки ЛБТ в условиях буровой площадки, который в настоящее время проходит опытную эксплуатацию.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ*

1. *Абсолютный вихретоковый преобразователь* (absolute eddy current probe) – вихретоковый преобразователь, сигнал которого определяется абсолютным значением параметра объекта контроля.

2. *Вихретоковый дефектоскоп* (eddy current flaw detector) – прибор, основанный на методах вихретокового неразрушающего контроля и предназначенный для выявления дефектов объекта контроля типа нарушений сплошности.

3. *Вихретоковый контроль* (eddy current testing) – неразрушающий контроль, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем.

4. *Вихретоковый преобразователь* (eddy current probe) – устройство, состоящее из одной или нескольких индуктивных отметок, предназначенных для возбуждения в объекте контроля вихревых токов и преобразования зависящего от параметров объекта электромагнитного поля в сигнал преобразователя.

5. *Вихретоковый толщиномер* (eddy current thickness gauge) – прибор, основанный на методах вихретокового неразрушающего контроля и предназначенный для измерения толщины объекта контроля.

6. *Вносимое напряжение вихретокового преобразователя* (added voltage of eddy current probe) – приращение напряжения на выводах измерительной обмотки вихретокового преобразователя, обусловленное внесением в его электромагнитное поле объекта контроля.

7. *Глубина проникновения электромагнитного поля вихретокового преобразователя* (electromagnetic field penetration depth of eddy current probe), –- расстояние от поверхности объекта контроля до слоя, в котором плотность вихревых токов в e раз меньше, чем на поверхности, где e = 2,7183 (основание натурального логарифма).

8. *Годограф вихретокового преобразователя* (hodograph diagram of eddy current probe) – Геометрическое место концов вектора ЭДС или напряжения на

комплексной плоскости преобразователя, полученное в результате изменения частоты, удельной электрической проводимости, относительной магнитной проницаемости, размеров объекта контроля, размеров преобразователя, других влияющих факторов или образованных из них обобщенных переменных величин.

9. *Дифференциальный вихретоковый преобразователь* (differential eddy current probe) – вихретоковый преобразователь, сигнал которого определяется приращением параметра объекта контроля.

10. *Зазор вихретокового преобразователя* (eddy current probe lift-off) – расстояние между торцевой плоскостью вихретокового преобразователя и поверхностью объекта контроля.

11. *Измерительная обмотка вихретокового преобразователя* (measuring winding of eddy current probe) – обмотка преобразователя, предназначенная для преобразования электромагнитного поля вихревых токов в сигнал преобразователя.

12. *Компенсационная обмотка вихретокового преобразователя*, или *компенсационная обмотка* (compensating winding of eddy current probe) – обмотка преобразователя, предназначенная для создания дополнительного напряжения, суммируемого с напряжением измерительной обмотки.

13. *Компенсирующее напряжение вихретокового преобразователя* (compensating voltage of eddy current probe) – напряжение, суммируемое с напряжением вихретокового преобразователя для его компенсации.

14. *Контролируемый параметр при вихретоковом контроле* (test parameter of eddy current testing) – параметр объекта, подлежащий контролю путем преобразования в сигнал вихретокового преобразователя.

15. *Краевой эффект при вихретоковом контроле* (end effect at eddy current testing) – изменение сигнала вихретокового преобразователя, обусловленное краевыми участками объекта контроля.

16. *Локальность вихретокового контроля* (locality of eddy current testing) – площадь поверхности объекта контроля, в пределах которой контролируемый

параметр интегрируется преобразователем, и его среднее значение принимается за значение параметра в зоне измерений.

17. *Мешающий параметр вихретокового контроля* (stray parameter of eddy current testing) – параметр объекта, не подлежащий контролю, изменение которого оказывает влияние на результаты контроля.

18. *Многочастотный метод вихретокового неразрушающего контроля* (multi frequency method of eddy non-destructive testing) – метод вихретокового неразрушающего контроля, основанный на анализе и (или) синтезе сигналов вихретокового преобразователя, обусловленных взаимодействием электромагнитного поля различной частоты с объектом контроля.

19. *Накладной вихретоковый преобразователь* (surface eddy current probe) – вихретоковый преобразователь, расположенный вблизи одной из поверхностей объекта контроля.

20. *Начальное напряжение вихретокового преобразователя* (initial voltage of eddy current probe) – напряжение на выводах разомкнутой измерительной обмотки внхретокового преобразователя при отсутствии объекта контроля.

21. *Обмотка возбуждения вихретокового преобразователя* (drive winding of eddy current probe) – обмотка преобразователя, предназначенная для возбуждения в объекте контроля вихревых токов.

22. *Опорное напряжение вихретокового преобразователя* (reference voltage of eddy current probe) – синхронное с сигналом вихретокового преобразователя переменное напряжение, подаваемое на один из входов фазочувствительного устройства.

23. *Относительное вносимое напряжение вихретокового преобразователя* (added relative voltage of eddy current probe) – отношение вносимого напряжения вихретокового преобразователя к начальному.

24. *Отношение сигнал/шум вихретокового преобразователя* (signal-to-noise ratio of eddy current probe) – отношение пикового значения сигнала преобразователя, вызванного изменением контролируемого параметра, к среднему квадратическому значению амплитуды шумов, обусловленных влиянием мешающих параметров объекта контроля.

25. *Отстройка при вихретоковом контроле* (suppression at eddy current testing) – подавление влияния на результаты контроля изменения мешающего параметра.

26. *Сигнал вихретокового преобразователя* (eddy current probe signal) – сигнал (ЭДС, напряжение или сопротивление преобразователя), несущий информацию о параметрах объекта контроля и обусловленный взаимодействием электромагнитного поля преобразователя с объектом контроля.

27. *Скоростной эффект при вихретоковом контроле* (velocity effect at eddy current testing) – изменение сигнала вихретокового преобразователя, обусловленное вихревыми токами, возникающими в результате движения объекта контроля в магнитном поле вихретокового преобразователя.

28. Трансформаторный вихретоковый преобразователь (transformer eddy current probe) – вихретоковый преобразователь, содержащий не менее двух индуктивно связанных обмоток (возбуждающую и измерительную) и преобразующий контролируемый параметр в ЭДС измерительной обмотки.

29. *Чувствительность к контролируемому параметру при вихретоковом контроле* (sensitivity to test parameter at eddy current testing) – отношение приращения сигнала вихретокового преобразователя к вызвавшему его малому приращению контролируемого параметра.

30. *Эффект зазора при вихретоковом контроле* (lift-off effect at eddy current testing) – изменение сигнала вихретокового преобразователя, обусловленное изменением зазора.

⁎ Примечание. ГОСТ Р 55611-2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акватик – Бурильные трубы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: akvatik-dp.ru. Дата обращения 15.04.2018.

2. Алтес [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.scaruch.ultes.info. Дата обращения 25.04.2018.

3. Алхимов Ю. В., Лобанов Ф. П., Алхимов В. Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния легкосплавной бурильной трубы // Вестник науки Сибири. – 2013. – №3(9). – С. 49–54.

4. Басович В. А., Буяновский И. Н., Сапунжи В. В. Применение трубных изделий из алюминиевых сплавов в нефтегазодобывающей отрасли // Oil &Gas Eurasia. – 2013. – №6. – С. 7.

5. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. – 640 с.

6. Беда П.И. Исследование сигнала накладного датчика в зависимости от изменения размеров и расположения дефектов типа трещин // Дефектоскопия. – 1970. – №1. – С. 62–67.

7. Бровин Б. З., Парфёнов А. И., Гуфранов М. Г. Некоторые результаты исследования технического состояния скважин в объединении «Сургутнефтегаз» // БашНИПИнефть. – 1983. – №13. – С. 115–122.

8. Булатов А. И., Проселков Ю. М., Шаманов С. А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин: Учеб. для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 1007 с.

9. Булгаков В. Ф., Толмачев И. И. Вихретоковые толщиномеры для автоматического контроля легкосплавных бурильных труб // Дефектоскопия. – 1993. – №5. – С. 72–74.

10. Вихретоковое устройство для неразрушающего контроля электропроводных изделий: патент 1569527 СССР: МПК G01B 7/06, G01N 27/90 / Булгаков В. Ф., Толмачев И. И. – Опубл. 07.06.1990.

11. Власов В. В., Комаров В. А. Магнитное поле вихревых токов над поверхностной трещиной в металле при возбуждении их накладным индуктором

// Дефектоскопия. – 1971. – №6 – С. 63–75.

12. Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В. Решение некоторых задач вихретоковой дефектоскопии посредством математического моделирования. – В кн.: Электромагнитные методы неразрушающего контроля. – Минск: Наука и техника, 1971. – С. 110–120.

13. Гольдштейн А. Е., Булгаков В. Ф., Крёнинг Х.-М. В. А. Метод вихретоковой дефектоскопии прутков и труб на основе использования комбинированного вихретокового преобразователя с возбуждением разночастотных пространственных компонент магнитного поля // Дефектоскопия. – 2011. – №11. – С. 39–47.

14. ГОСТ 18482-79. Трубы прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 27 с.

15. ГОСТ 23786-79 (ИСО 5226-85). Трубы бурильные из алюминиевых сплавов. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). – Введ. 01.01.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 22 с.

16. ГОСТ 24289-80. Контроль неразрушающий вихретоковый, термины и определения. Введ. 01.07.1988. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004. – 9 с.

17. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 1986.01.01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 76 с.

18. ГОСТ 8.315-97. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. – Введ. 1998.07.01. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 45 с.

19. ГОСТ Р 51288-99. Средства измерений электрических и магнитных величин. Эксплуатационные документы. – Введ. 2000.07.01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 60 с.

20. ГОСТ Р 53697-2009. Контроль неразрушающий, основные термины и определения. – Введ. 2011.01.01. – М.: Стандартинформ, 2010. – 19 с.

21. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства

измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Введ. 2015.01.01. – М.: Стандартинформ, 2014. –12 с.

22. ГОСТ Р ИСО 12718-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 01.12.2010. – М.: Стандартинформ, 2011. – 35 с.

23. ГОСТ Р ИСО 15549-2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. – Введ. 01.01.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 7 с.

24. Гутников В. С. Методы реализации специальных весовых функций в измерительных устройствах // Измерение, контроль, автоматизация. – 1983. – №2. – С. 3–15.

25. Демирчян К. С. Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.

26. Дорофеев А. Л. Электроиндуктивная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1967. – 231 с.

27. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. Индуктивная толщинометрия. – М.: Энергия, 1978. – 186 с.

28. Дякин В. В., Сандовский В. А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 135 с.

29. Ивченко Алексей Валерьевич. Разработка адаптивных вихретоковых средств контроля коррозионных поражений обшивки планера летательных аппаратов. – Дис. … канд. техн. наук. – М., 2006. – 177 с.

30. Инспекция бурильных колонн. Стандарт DS-1. 3-е изд., Т. 3. – Т. H. Hill Associates Inc., 2004. – 253 с.

31. Клюев Владимир Владимирович. Исследование электромагнитных методов и разработка комплекса приборов для неразрушающего контроля дефектов, толщины и смещений изделий в процессе производства и технологических испытаний. – Дис. … д-ра техн. наук. – М., 1972.

32. Клюев В. В., Мужицкий В. Ф., Безлюдько Г. Я., Надымов Н. П., Рогов А. Б. Бесконтактный ультразвуковой толщиномер для измерения толщины

стенки насосно-компрессорных труб (КРМ-Ц-Дельта) // Контроль. Диагностика. – 2002. – №4. – С. 43–44.

33. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 832 с.

34. Косых В. В., Юткин Г. Г., Булгаков В. Ф., Жуков В. К., Толмачев И. И. Толщиномер ВТ-01 для бесконтактного измерения толщины стенок бурильных труб // Нефтяное хозяйство. – 1990. – №11. – С. 64–66.

35. Куликов Станислав Сергеевич. Комплексный неразрушающий контроль легкосплавных бурильных труб повышенной надежности в процессе их эксплуатации. – Дис. … канд. техн. наук. – М.: МГУПИ, 2010. – 110 с.

36. Локшина Н. Н., Шкарлет Ю. М. Приближенная методика расчета накладных вихретоковых датчиков // Дефектоскопия. – 1970. – №1. – С. 41–45.

37. Миллер А. А., Миллер А. В., Епископосов К. С., Мурзаков Г. Е., Епископосов Д. К. Прямые измерения проводимости обсадных труб и НКТ, используемых в качестве моделей толщины // НТВ «Каротажник». – 2002. – №101. – С. 68–74.

38. Неразрушающий контроль / Справочник. Под ред. В. В. Клюева: в 7 томах. Т. 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.

39. НИИИН МНПО «Спектр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.niiin.ru. Дата обращения 12.03.2018.

40. Никитин А. И. Бесконтактный контроль толщины стенки сферических изделий и труб в потоке. – Дис. … канд. техн. наук. – М.: ВИАМ, 1967. – 280 с.

41. Поздеев Ж. А., Куц Ю. А., Игнатов А. Ю., Кокшаров В. З. Возможные причины повреждения обсадных колонн // НТВ «Каротажник». – 1998. – №48. – С. 56-63.

42. РД 41-01-25-89. Неразрушающий контроль бурового инструмента и оборудования при эксплуатации. Организация и порядок проведения работ. –

Введ. 1989.12.12. – Львов, 1990. – 121 с.

43. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – Введ. 2015.01.01. – М.: Стандартинформ, 2004. – 28 с.

44. Сандовский В. А. Измерение толщины и удельной электрической проводимости немагнитных пластин вихретоковым методом // Измерительная техника. – 2012. – №10. – С. 55–60.

45. Сапожников А. Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – 308 с.

46. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики (для контроля методом вихревых токов). – Новосибирск: Наука, 1967. – 144 с.

средств контроля коррозионных поражений обшивки планера летательных аппаратов. – Дис. канд. … техн. наук. – М., 2006.

47. Теплухин В. К., Миллер А. В., Казакова О. М., Миллер А. А. Вопросы скважинной электромагнитной толщинометрии при контроле технического состояния нефтегазовых скважин // Геофизические исследования в нефтегазовых скважинах. – Сб. статей. – Уфа: Изд-во Башкир. ун-та, 1998. – С. 187–209.

48. Теплухин В. К., Шараев А. П., Миллер А. В., Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д. Миннуллин Р. М., Мусаев Г. Л., Нуретдинов Я. К. Совершенствование технологии обследования технического состояния нефтегазовых скважин // II Технология ТЭК: Специальное приложение к журналу «Нефть и капитал». – 2002. – №7. – С. 49–53.

49. Тетерко А. Я. Исследование электромагнитного поля поверхностных дефектов и разработка средств электромагнитной дефектоскопии. – Дис. … канд. техн. наук. – Львов, 1976.

50. Ткаченко А. К., Калташев С. А. Электромагнитная дефектоскопия-толщинометрия – составная часть геофизических исследований технического состояния нефтегазовых скважин // НТВ «Каротажник». – Тверь: Изд-во «АИС», 2002. – Вып. 93. – С. 36–37.

51. Тозони О. В. Расчет электромагнитных полей на вычислительных машинах. – Киев: Техника, 1967. – 252 с.

52. Трехпараметровый способ вихретокового контроля металлических немагнитных объектов: Патент 1176231 СССР: МПК4 G01N 27/90 / Федосенко Ю. К. – Опубл. 30.08.1985. – Бюл. №32.

53. Устройство для вихретокового контроля металлических немагнитных объектов: Патент 2629711 РФ: МПК G01B 7/06, G01N 27/90 / Гольдштейн А. Е. Белянков В. Ю. – Опубл. 31.08.2017. – Бюл. №25.

54. Федосенко Ю. К. Вопросы теории вихретоковой дефектоскопии накладными преобразователями. Строгое математическое решение двумерных задач // Дефектоскопия. – 1982. – №2. – С. 1–10.

55. Федосенко Ю. К. Электромагнитная толщинометрия стенок металлических изделий // Контроль. Диагностика. – 2009. – №4. – С. 26–29.

56. Формалев В. Ф., Ревизников Д. Л. Численные методы. М.: Физматлит, 2004. – 400 с.

57. Шатерников В. Е. Вихретоковый контроль металлических изделий сложной формы // Дефектоскопия. – 1979. – №9. – С. 5–11.

58. Шкатов П. Н., Куликов С. С. Оценка технического состояния легкосплавных бурильных труб повышенной надежности в процессе их эксплуатации // Приборы. – 2010. – №5. – С. 26–30.

59. Шубочкин А. Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – 288 с.

60. Anderson E. R. Aluminum alloy drill pipe in geothermal drilling. Technical and economical opportunities / Iceland: The school for renewable energy science, 2009. – 126 p.

61. ANSYS [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ansys.com. Дата обращения 10.10.2017.

62. Assous F., Degond P., Heitze E., Raviart P.A., Segre J. On a finite-element method for solving the three-dimensional Maxwell equations // J. Comp. Phys.

– 1993. – N 109. – P. 222–237.

63. Assous F., Degond P., Segre J. Numerical approximation of the Maxwell equations in inhomogeneous media by P1 conforming finite element method // J. Comp. Phys. – 1996. – N 128. – P. 363–380.

64. Baker Hughes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bakerhughes.com. Дата обращения 20.03.2018.

65. Benoit de Halleux, Bruno de Limburg Stirum, Andrei I'tchelintsev. Eddy current measurement of the wall thickness and conductivity of circular non-magnetic conductive tubes // NDT & E International. – 1996. – N 29(2). – P. 103–109.

66. CIVA EXTENDE [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.extende.com. Дата обращения 15.10.2017.

67. Cobham Technical Services (Opera) [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.cobham.com. Дата обращения 10.10.2017.

68. Comsol Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: comsol.com. Дата обращения 14.03.2018.

69. Egorov A. V. et al. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // Defence Technology. – 2015. – N 11. – P. 99–103.

70. ELCUT [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elcut.ru. Дата обращения 22.10.2017.

71. Gelfgat M., Basovich V., Adelman A. Aluminum may be key to long, deepwater wells // Offshore. – 2007. – N 67(9). – P. 131–137.

72. George W. Collins II. Fundamental Numerical methods and Data Analysis. – 2003. – 259 p.

73. Halliburton [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.halliburton.com. Дата обращения 20.04.2018.

74. Hermeline F. Two coupled particle-finite volume methods using delaunay-voronoi meshes for the approximation of Vlasov-Poisson and Vlasov-Maxwell equations // J. Comp. Phys. – 1993. – T 106. – P. 1–18.

75. INTEGRATED Engineering Software [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.integratedsoft.com. Дата обращения 16.10.2017.

76. ISO 15546-2011. Petroleum and natural gas industries – Aluminium alloy drill pipe. – Введ. 15.09.2011. – М.: Стандартинформ, 2011. – 52 с.

77. Livermore Software Technology Corporation (LS-DYNA) [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.lstc.com. Дата обращения 15.10.2017.

78. MSC Software Corporation (MSC Nastran) [электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mscsoftware.com. Дата обращения 15.10.2017.

79. Munz C.-D., Schneider R., Vos U. A finite-volume method for the Maxwell equations in the time domain. – Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe «Technik und Umwelt». – 1996.

80. Nondestructive Testing Handbook. / ed. Moore P. O. Vol. 5. Electromagnetic Testing (ET). 3rd ed. – Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2004. – 524 p.

81. Olympus NDT instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.olympus-ims.com. Дата обращения 20.09.2017.

82. Rosado L. S., Santos T. G, Ramos P. M., Vilaça P., Piedade M. A differential planar eddy currents probe: Fundamentals, modeling and experimental evaluation // NDT & E International. – 2012. – N 51. – P. 85–93.

83. Sandovskii V.A. Measurements of the thickness and electrical conductivity of nonmagnetic plates by an eddy-current method // Measurement Techniques. – 2013. – 55(10). – P. 1201–1208.

84. Schlumberger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.slb.com. Дата обращения 20.09.2017.

85. Songling H., Shen W. New Technologies in Electromagnetic Non-destructive Testing. – Springer, Singapore, 2016. – 221 p.

86. SU 1226024 A1, МПК4 G01B 7/06, опубл. 23.04.1986, бюл. №15.

87. SU 375468 A1, МПК6 G01B 7/06, опубл. 23.03.1973, бюл. №16.

88. TesTex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: testex-ndt.com. Дата обращения 17.04.2018.

89. Wong L. F., Hanneman R. E. Deep drilling with aluminum drill pipe // Drilling. – 1983. – IX, vol. 44. – P. 53–55, 59.

90. Xuefei M., Yinzhao L. Analytical solutions to eddy current field excited by a probe coil near a conductive pipe // NDT & E International. – 2013. – N 54. – P. 69–74.

91. Yating Y, Pingan D, Lichuan X. Coil impedance calculation of an eddy current sensor by the finite element method. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – 44(4). – P. 296–302.

ПРИЛОЖЕНИЯ

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations): 02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration) 7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

28.06.2018 № 02/4060

на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по образовательной деятельности ТПУ
_____ / А.Р. Вагнер /
«___» _____ 2018 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Белянкова В.Ю. «Вихретоковый контроль толщины стенки легкосплавных бурильных труб», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебной и научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Составлен комиссией:

Председатель – руководитель отделения КД ИШНКБ Суржиков А.П.

Члены комиссии: доцент отделения КД ИШНКБ И.В. Плотникова;
доцент отделения КД ИШНКБ А.Н. Калиниченко.

В период с 04.06.2018 по 06.06.2018 комиссия провела проверку и установила, что результаты диссертационной работы Белянкова В.Ю. внедрены в учебный процесс и используются при выполнении УИРС, НИРС и ВКР студентами ИШНКБ ТПУ.

1. Основные результаты диссертационного исследования Белянкова В.Ю. использовались при разработке оборудования учебно-научной лаборатории "Магнитный, электрический, вихретоковый контроль". Технические решения и оборудование, разработанные диссертантом, используются при проведении лабораторных работ программы подготовки бакалавров и магистров направления «Приборостроение» в рамках дисциплин «Методы неразрушающего контроля», «Неразрушающий контроль и диагностика», «Электромагнитный, радиоволновой, тепловой контроль и диагностика».
2. Разработанный диссертантом Белянковым В.Ю. вихретоковый толщиномер ВТ-16.2 используется для проведения УИРС и НИРС программы подготовки бакалавров и магистров направления «Приборостроение», а также при обучении специалистов II уровня по вихретоковому контролю.
3. По теме диссертации Белянкова В.Ю. выполнено 2 магистерских диссертации и 2 бакалаврских ВКР.

Председатель комиссии А.П. Суржиков

Члены комиссии И.В. Плотникова

А.Н. Калиниченко

Общество с ограниченной ответственностью

«НПК Интроскопия»

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ ИНТРОСКОПИЯ»
ОКПО 61214695, ОГРН 1097017015259, ИНН/КПП 7017246319/701701001.
Р/с 40702810106290004425 в ОАО «ТОМСКПРОМСТРОЙБАНК» г.Томск, К/с 30101810500000000728, БИК 046902728
634029, г. Томск, ул. Никитина 20-52, тел/факс 8(3822) 789-371, e- mail: npkin@mail.ru

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «НПК Интроскопия», к.т.н.

Ю.В. Алхимов
«25» 05 2018 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Белянкова Василия Юрьевича «Вихретоковый контроль толщины стенки легкосплавных бурильных труб».

Комиссия в составе:
председателя директора, к.т.н. Алхимова Ю.В.
членов комиссии: тех.директора, к.т.н., Алхимова В.Ю.,
зав.лаб.НК Каримова Т.Н.

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Вихретоковый контроль толщины стенки легкосплавных бурильных труб», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы в научно-производственной деятельности ООО «НПК Интроскопия» при разработке четырехканальной системы вихретокового контроля толщины стенки легкосплавных бурильных труб в виде:

1. Результатов физического и математического моделирования влияния на выходной сигнал вихретокового преобразователя основных и дополнительных влияющих параметров объекта контроля.
2. Разработанного метода измерения толщины стенки труб в условиях изменения влияющих параметров объекта контроля в широком диапазоне.
3. Алгоритма вычислительного преобразования сигналов измерительной информации и его программной реализации.
4. Методики первичной и рабочей настроек системы вихретокового контроля толщины.
5. Макетного варианта одноканальной системы вихретокового контроля толщины.

Использование указанных результатов и рекомендаций позволяет обеспечить высокие метрологические и эксплуатационные характеристики системы вихретокового контроля толщины в условиях буровой площадки при изменении основных влияющих параметров в широком диапазоне.

В дальнейшем планируется использовать предложенный в диссертационной работе эффективный метод разделения частотных составляющих сигнала вихретокового преобразователя, обеспечивающий существенное уменьшение зависимости результатов контроля от влияния внешних факторов.

Новизна предложенных решений подтверждена двумя патентами РФ на изобретение.

Председатель комиссии /Ю.В. Алхимов/

Члены комиссии /В.Ю.Алхимов/
/Т.Н.Каримов/