

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Пудовкин Олег Петрович

РАЗРАБОТКА ПРИБОРА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
СТЕНКИ ДНИЩ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
РЕЗЕРВУАРОВ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЮ MFL

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Потапов А.И.

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 Анализ современного состояния методов и приборов неразрушающего контроля целостности стенки днищ резервуаров вертикальных стальных (РВС) для хранения нефтепродуктов.....	11
1.1 Классификация РВС для хранения нефтепродуктов. Анализ задачи выявления коррозионных повреждений.....	11
1.2 Обобщенная структура задачи контроля целостности стенок днищ РВС в процессе эксплуатации.....	17
1.3 Анализ современного состояния основных методов неразрушающего контроля, применимых для контроля целостности стенок днищ РВС.....	19
1.4 Анализ современного состояния приборов магнитного неразрушающего контроля днищ РВС.....	29
1.5 Постановка задач исследований.....	40
Глава 2 Теоретическое обоснование эффекта рассеивания магнитных полей дефектами стенок днищ РВС.....	42
2.1 Общая характеристика физических процессов намагничивания ферромагнитных объектов.....	42
2.2 Расчетно-теоретическая модель взаимодействия магнитного поля системы намагничивания MFL – преобразователя и ферромагнитного объекта контроля.....	48
2.3 Характеристика физических процессов при использовании MFL – преобразователя для выявления коррозионных повреждений. Обобщенная структурная схема MFL – преобразователя.....	53
2.4 Выводы по главе 2.....	58
Глава 3 Методические принципы расчета и оптимизации MFL-преобразователей, метод преобразования и обработки измерительной информации.....	60

3.1 Математическое моделирование системы намагничивания MFL – преобразователя и ферромагнитного листа с искусственным дефектом.....	60
3.2 Основные методические принципы построения MFL – преобразователей, обеспечивающих оптимальную чувствительность при контроле.....	64
3.3 Разработка алгоритмов формирования магнитного поля и обработки первичной измерительной информации, обеспечивающих подавление влияния мешающих параметров.....	76
3.4 Разработка методики настройки преобразователей и проведения измерений остаточной толщины стенки.....	88
3.5 Выводы по главе 3.....	95
Глава 4 Метрологическое обеспечение измерения остаточной толщины стенки днища РВС с использованием технологии MFL.....	97
4.1 Состояние метрологического обеспечения и стандартизации в области магнитного контроля с использованием технологии MFL	97
4.2 Разработка проекта схемы прослеживаемости для дефектоскопов, реализующих технологию MFL.....	98
4.3 Разработка мер моделей дефектов для калибровки и поверки дефектоскопов, реализующих технологию MFL.....	100
4.4 Выводы по главе 4.....	102
Глава 5 Экспериментальные исследования MFL – дефектоскопов	103
5.1 Средства измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующие технологию MFL.....	103
5.2 Испытания средств измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующих технологию MFL на мерах моделей дефектов.....	108

5.3 Испытания средств измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующих технологию MFL на реальных объектах.....	114
5.4 Выводы по главе 5.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Проблема обеспечения надежности и безопасности эксплуатации резервуаров, емкостей и трубопроводов в нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности с учетом все возрастающих требований и экономической эффективности становится все более актуальной. Из-за жестких условий эксплуатации и воздействия агрессивной среды возникают коррозионные и механические повреждения, которые могут привести к аварии или катастрофе. Огромную роль в обеспечении нормируемой расчетной конструктивной прочности изделий играет остаточная толщина стенки изделий. Экономические потери от коррозии металлов и разрушений конструкций составляют сотни миллионов рублей в год. В ряде случаев они приводят к авариям и катастрофам с большими экономическими потерями и человеческими жертвами. Поэтому проведение контроля целостности изделия в процессе эксплуатации является важнейшей технологической операцией.

Для контроля целостности стенки изделия в настоящее время применяют методы радиационного вида неразрушающего контроля (НК). Сложная настройка и калибровка, большие размеры рентгено-флуоресцентных анализаторов, затрудняет их использование в качестве устройства индикации дефекта. Повышенные требования безопасности, связанные с работой с источниками радиоактивного излучения и их хранением, а также необходимость использования упорного апертурного кольца преобразователя только под определенный радиус кривизны поверхности объекта измерения снижает эффективность использования дефектоскопов, основанных на β -отражения методе радиационного вида НК.

Наиболее универсальными методами НК остаточной толщины стенки ферромагнитного изделия являются методы магнитного вида НК. Магнитные сканеры могут быть выполнены в малогабаритных корпусах. В отличие от методов радиационного вида НК, применение методов магнитного вида НК экологически безопасно. Процедура калибровки магнитных сканеров

достаточно проста, а их эксплуатация не требует каких либо повышенных мер безопасности и высокой квалификации специалиста. Перечисленные обстоятельства позволяют эффективно использовать магнитные сканеры для проведения контроля целостности стенки ферромагнитного изделия, в том числе, не удаляя защитное покрытие и без специальной подготовки контролируемой поверхности, а в некоторых случаях непосредственно без остановки производства (транспортировки, хранения и т.д.)

В настоящее время пользователю не предоставляется информация о влиянии мешающих параметров, вызывающих дополнительную погрешность измерения. Это может вводить их в заблуждение относительно достоверности результатов измерений в производственных условиях. Для исключения этого, в руководстве по эксплуатации должны обязательно оговариваться не только диапазон контролируемых толщин стенок $T_{\min}$ - $T_{\max}$, но также допустимая девиация магнитной проницаемости $\mu_{\text{ок}}$ материала объекта контроля, максимальная допустимая шероховатость $R_{Z\max}$ и максимальная толщина покрытия, определяющая технологический зазор $Z_{\max}$ до поверхности объекта контроля. При этом следует учитывать, что метрологические характеристики определяются также используемыми алгоритмами преобразования первичной измерительной информации при вычислении h , где h – глубина дефекта. Исходя из этого, при проведении измерений в цеховых и полевых условиях при реальных технологических разбросах физических и геометрических параметров изделий, заявляемые производителями погрешности не обеспечиваются.

Уменьшение погрешности измерения магнитных сканеров, реализующих технологию MFL для контроля днищ цилиндрических резервуаров, является одной из главных задач магнитной дефектоскопии.

Значительный вклад в развитие магнитных методов внесли отечественные и зарубежные ученые, и специалисты В.Г. Герасимов, Э.С.Горкунов, В.К. Гарипов, И.В. Голубятников, А.Л. Дорофеев, А.Г. Ефимов, Н.Н. Зацепин, В.Д. Ивченко, А.И. Крашенинников, В.В. Клюев,

М.Н. Михеев, Ю.Я. Останин, А.Д. Покровский, Н.М. Родигин, А.Б. Сапожников, В.В. Слепцов, В.В. Сухоруков, В.В. Филинов, Л.А. Чернов, В.Е. Шатерников, Г.С.Шелихов, Ю.М. Шкарлет, П.Н. Шкатов, Е.В. Щербинин, Ф. Ферстер, Д. Вайделих, и многие другие.

Однако, до настоящего времени не разработаны принципы оптимизации параметров измерительных преобразователей, а также алгоритмы получения и обработки первичной измерительной информации, обеспечивающие заданную чувствительность с подавлением влияния мешающих параметров с целью обеспечения требуемой погрешности измерения остаточной толщины.

В связи с этим, весьма актуальной задачей дальнейшего совершенствования магнитных методов является разработка новых оптимальных геометрически подобных измерительных преобразователей и алгоритмов получения первичной измерительной информации, ее преобразования и последующей тестовой цифровой обработки с подавлением мешающих параметров. Для обеспечения требуемой высокой достоверности результатов измерений необходимо произвести теоретический анализ моделей измерительных преобразователей, рассчитать их оптимальные характеристики, разработать алгоритмы преобразования и методики применения при производстве и эксплуатации изделий, в том числе для выявления коррозионных повреждений в процессе эксплуатации, решить вопросы метрологического обеспечения разрабатываемых преобразователей и приборов.

Цель работы: Уменьшение погрешности измерения параметров коррозионных повреждений и повышение эффективности неразрушающего контроля стенки днища цилиндрического резервуара в процессе его эксплуатации на основе MFL – метода неразрушающего контроля.

Задачи исследования:

1. Провести анализ методов повышения чувствительности и отстройки от воздействия мешающих параметров на результаты измерений.

2. Разработать модель магнитной системы, обеспечивающей возможность оптимизации чувствительности MFL – преобразователя дефектоскопа.

3. Разработать способ выделения информативного параметра сигнала на фоне влияния мешающих параметров, позволяющий проводить измерения с погрешностью, не превышающей заданную.

4. Разработать средства метрологического обеспечения выявления коррозионных повреждений.

5. Провести испытания MFL – дефектоскопа.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости между геометрическими и физическими параметрами объекта контроля и геометрическими параметрами системы намагничивания первичного измерительного преобразователя, обеспечивающие максимальную чувствительность к дефектам.

2. Разработана математическая модель взаимодействия магнитной системы первичного преобразователя с ферромагнитным объектом контроля с заданными геометрическими параметрами.

3. Получены оценки влияния локальности намагничивания при выявлении дефектов в ферромагнитных изделиях с подавлением мешающих параметров на основе исследования магнитных потоков рассеяния.

Идея работы: Разработка измерительно-диагностического комплекса на базе методов и технических средств неразрушающего магнитного контроля, реализующего многопараметровый подход. Разработка метрологического обеспечения для средств неразрушающего магнитного контроля, выявляющих наличие дефектов на листовых изделиях из ферромагнитных материалов.

Практическая ценность результатов диссертационной работы:

1. предложен принцип расчета и оптимизации параметров магнитной системы MFL – преобразователей;

2. разработана модель магнитной системы MFL – преобразователя, гарантированно обеспечивающего достоверность результатов выявления;
3. предложен проект схемы обеспечения прослеживаемости для MFL – дефектоскопов;
4. разработаны меры моделей дефектов для калибровки и поверки дефектоскопов, реализующих технологию MFL;
5. разработан MFL – дефектоскоп с комплектом сменных магнитных преобразователей для контроля ферромагнитных листовых изделий, реализующий технологию MFL;
6. разработан MFL – дефектоскоп для контроля днищ цилиндрических резервуаров;

Для решения поставленных задач в диссертационной работе использованы методы анализа теории и практики применения методов контроля геометрических параметров объектов, современные методы компьютерного моделирования, методы теории измерений.

Для подтверждения достоверности предложенных методов проводились экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях с использованием дефектоскопов, реализующих технологию MFL.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принципы построения модели, расчета и оптимизации магнитной системы и величины магнитной индукции на кривой намагничивания, позволяют разработать семейство геометрически подобных первичных измерительных MFL преобразователей, обеспечивающих, при заданных габаритах, максимальную чувствительность в требуемых диапазонах толщин стенок и вариации мешающих параметров объектов контроля.

2. Разработанные и аттестованные измерительные MFL преобразователи, комплекты контрольных образцов, методики градуировки, калибровки, контроля и мониторинга (в том числе с использованием автоматизированных систем) гарантированно обеспечивают достоверность

результатов выявления поверхностных дефектов с учетом девиации мешающих параметров.

Реализация результатов работы. Полученные результаты использованы на предприятиях, занимающиеся проектированием дефектоскопов, реализующих технологию MFL, в частности в ООО «КОНСТАНТА».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы в целом, и отдельные ее разделы докладывались и получили положительные оценки на III Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-петербургский Горный институт, 2015 г), 54 - й ежегодной конференции Британского института неразрушающего контроля (Британский институт неразрушающего контроля, 2015 г), 19-ой всемирной конференции неразрушающего контроля (ICNDT Международный комитет по неразрушающему контролю, 2016 г), IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-петербургский Горный институт, 2016 г)

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СТЕНКИ ДНИЩ РЕЗЕРВУАРОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ (РВС) ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

1.1 Классификация РВС для хранения нефтепродуктов. Анализ задачи выявления дефектов

Развитие нефтяной промышленности необратимо повлекло за собой потребность в хранении больших объемов нефти и продуктов на ее основе. Для России этот этап выпал на 17-й век, когда были построены первые нефтяные хранилища. В настоящее время резервуарное оборудование для хранения нефти и нефтепродуктов распространено крайне широко и присутствует на всех этапах нефтедобычи и нефтепереработки. Резервуары устанавливаются непосредственно на месторождении нефти, промежуточных станциях по перекачиванию, предприятиях нефтепереработки и нефтехимических предприятиях, а также на местах аварийного разлива нефтепродуктов. Поскольку состав, химические и физические свойства нефтепродуктов могут меняться в зависимости от этапа, это требует применения резервуаров различной конструкции и назначения. Значительная часть бюджета нашей страны формируется за счет дохода от экспорта нефтепродуктов, поэтому пристальное внимание уделяется созданию новых и модернизации старых резервуарных парков. Современные резервуарные металлоконструкции должны отвечать довольно высоким требованиям по экологии и безопасности, в том числе с учетом таких параметров, как предотвращение утечек, минимизация испарений в атмосферу. Для хранения продуктов нефтегазового комплекса наиболее распространены, как у нас в стране, так и за рубежом, вертикальные стальные резервуары со стационарной крышей (РВС). Они представляют собой (рисунок 1.1) цилиндрический корпус, сваренный из стальных листов размером 1,5х6 м,

толщиной 4...25 мм, со щитовой конической или сферической кровлей. При изготовлении корпуса длинная сторона листов располагается горизонтально. Один горизонтальный ряд сваренных между собой листов называется поясом резервуара. Пояса резервуара соединяются между собой ступенчато, телескопически или встык. Щитовая кровля опирается на фермы и (у резервуаров большой емкости) на центральную стойку. Днище резервуара сварное, располагается на песчаной подушке, обработанной с целью предотвращения коррозии битумом, и имеет уклон от центра к периферии. Этим обеспечивается более полное удаление подтоварной воды.

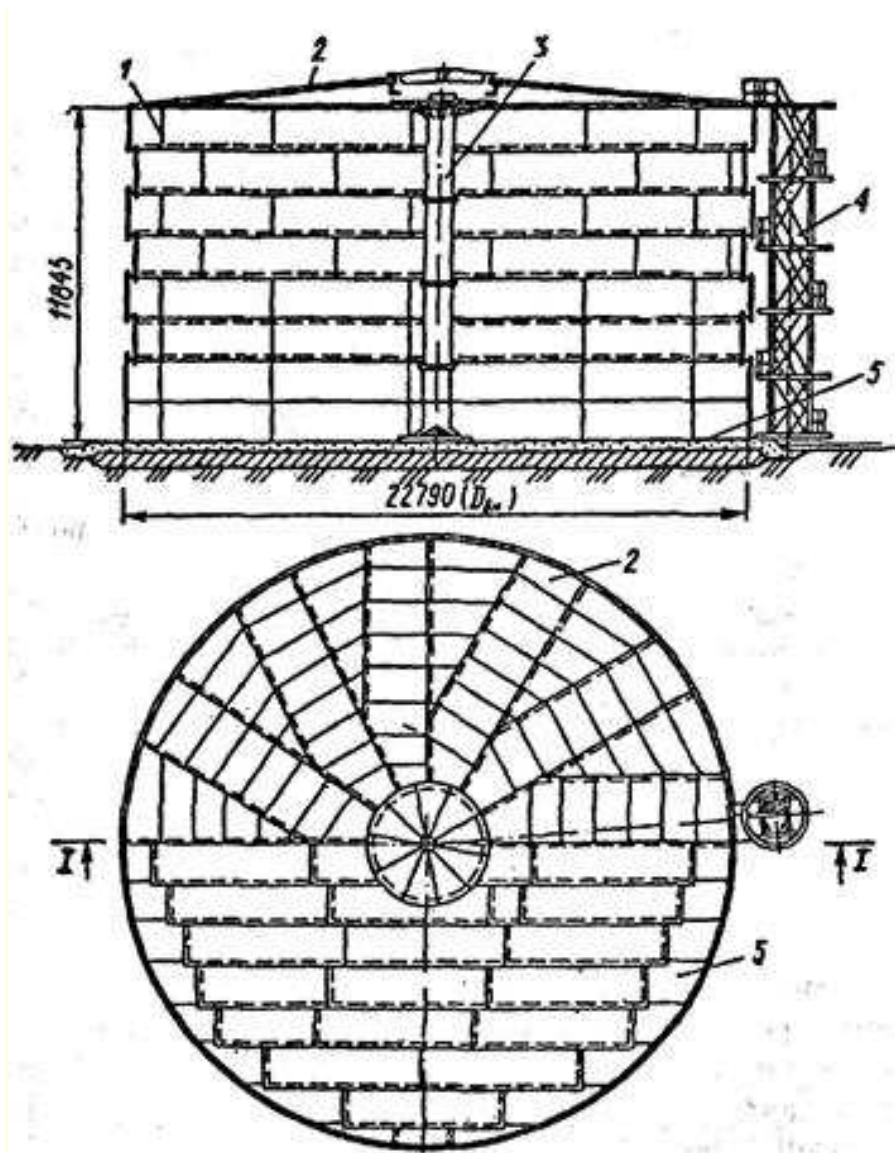


Рисунок 1.1 – Вертикальный цилиндрический резервуар со щитовой кровлей: 1-корпус; 2-щитовая кровля; 3-центральная стойка; 4-шахтная лестница; 5-днище.

В соответствии с [30], по конструктивным особенностям применяются следующие типы стальных резервуаров:

- резервуар со стационарной крышей без понтона (РВС);
- резервуар со стационарной крышей с понтоном (РВСП);
- резервуар с плавающей крышей (РВСПК).

Также, согласно правилам устройства [61] вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов, при проектировании стальных вертикальных резервуаров их подразделяют на четыре класса опасности:

- класс I – резервуары номинальным объемом более 50000 м^3 ;
- класс II – резервуары номинальным объемом от 20000 до 50000 м^3 включительно, а также резервуары номинальным объемом от 10000 до 50000 м^3 включительно, расположенные непосредственно по берегам рек, крупных водоемов и в черте городской застройки;
- класс III – резервуары номинальным объемом от 1000 и менее 20000 м^3 ;
- класс IV – резервуары номинальным объемом менее 1000 м^3 .

Одной из основных причин выхода из строя резервуаров для хранения нефти является коррозия. Коррозия не только снижает срок службы резервуара, но и непосредственно оказывает влияние на промышленную безопасность при его эксплуатации [60]. Коррозия деталей происходит в результате их химического или электрохимического взаимодействия с внешней средой [29]. Различают атмосферную, газовую, контактную, коррозию под напряжением, в неэлектролитах и электролитах. Характер коррозионных разрушений (поражений) приведен на рисунке 1.2.

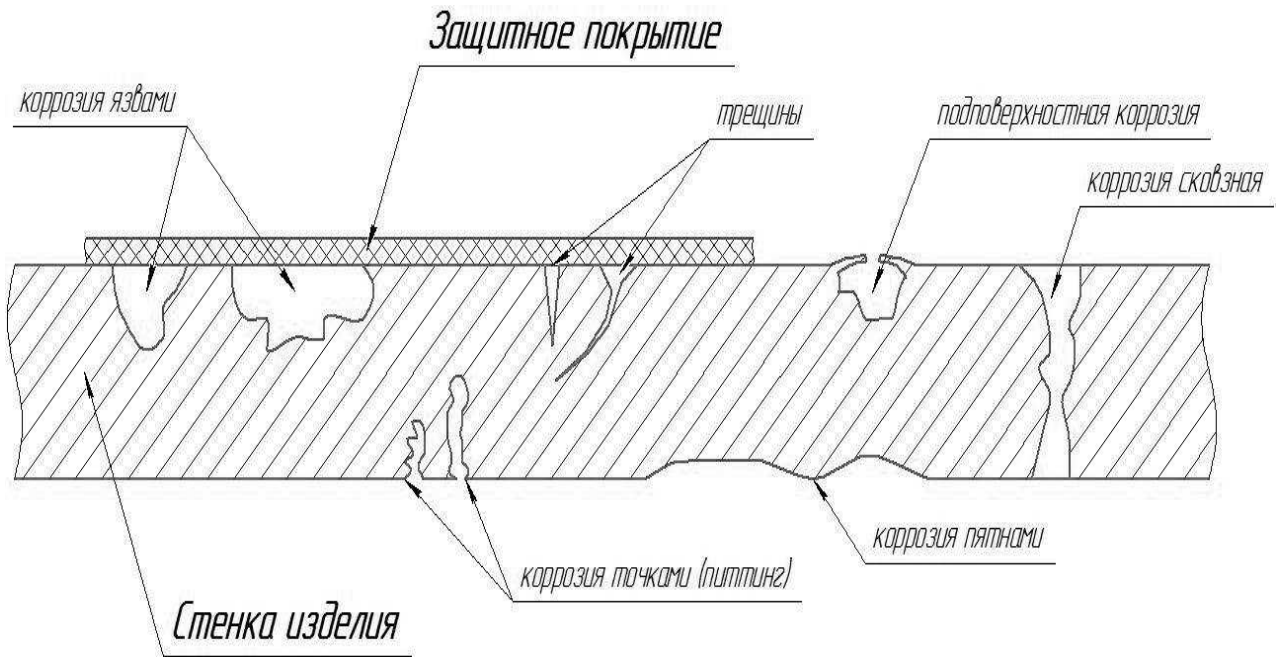


Рисунок 1.2 – Характер коррозионных повреждений.

Опыт эксплуатации таких резервуаров показывает, что внутренняя поверхность, как правило, подвергается язвенной коррозии. Наиболее уязвимым элементом конструкции резервуаров является днище, которое постоянно контактирует с пластовой водой при хранении нефти и с подтоварной водой при хранении нефтепродуктов. Эти воды, как правило, минерализованы, содержат в себе агрессивные растворы кислот, солей и газов, обуславливающих усиленную коррозию соприкасающегося с ними металла, вследствие возникновения местных электролитических процессов, которые в свою очередь вызывают язвенную коррозию. Для образования язвенной коррозии на днище резервуара на поверхности металла должна быть пассивная пленка, а в электролите ионы хлора [51]. При этом возникают полусферические поражения, и анодный ток увеличивается. Вместе с этим в местах поражений железо переходит в раствор в виде ионов Fe^{2+} , а на пассивных участках, – через образование ионов Fe^{3+} . Со временем язвенная коррозия развивается вглубь, тем самым увеличивается риск образования сквозного отверстия. Язвенная коррозия характерна для малоуглеродистых, углеродистых и низколегированных сталей. Язвенная коррозия характеризуется появлением на поверхности металла отдельных или

множественных повреждений, глубина и поперечные размеры которых соизмеримы между собой и составляют от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Металл днища в коррозионных язвах находится в активном состоянии. При этом разница потенциалов дна язвы и пассивной поверхности металла может достигать 1000 мВ. Анализы аварий резервуаров говорят о том, что именно сквозные отверстия днищ, вызванные образованием этих видов коррозий, были причиной наиболее крупных катастроф [40]. Выделяют 3 метода производства РВС. При способе производства методом рулонирования стенка, днище и крыша поставляются на площадку строительства в виде свернутых в рулоне сварных полотнищ. Способ производства методом листовой сборки заключается в том, что в заводских условиях подготавливаются листы стенки (максимальных размер листов: 2500x10000 мм), вальцованные в предусмотренный проектом радиус, и листовые детали днища. При способе производства методом комбинированной сборки, часть листовых конструкций монтируется с рулонизируемыми полотнищами. Для металлоконструкций резервуара должна применяться сталь, выплавленная электропечным, кислородно-конвертерным или мартеновским способом. В зависимости от требуемых показателей качества и толщины проката сталь должна поставляться в состоянии после горячей прокатки, термической обработки (нормализации или закалки с отпуском) или после контролируемой прокатки. При изготовлении днищ для таких резервуаров применяется малоуглеродистая, низколегированная или коррозионностойкая сталь, удовлетворяющая СП 16.13330.2011, действующим стандартам и техническим условиям, толщиной не менее 4 мм. В емкостях малого объема (до 1000 м³) днище резервуара изготавливается с уклоном от центра или в центр (рисунок 1.3). Уклон делается в отношении 1 к 100. На днище устанавливается кольцевая окрайка [30].

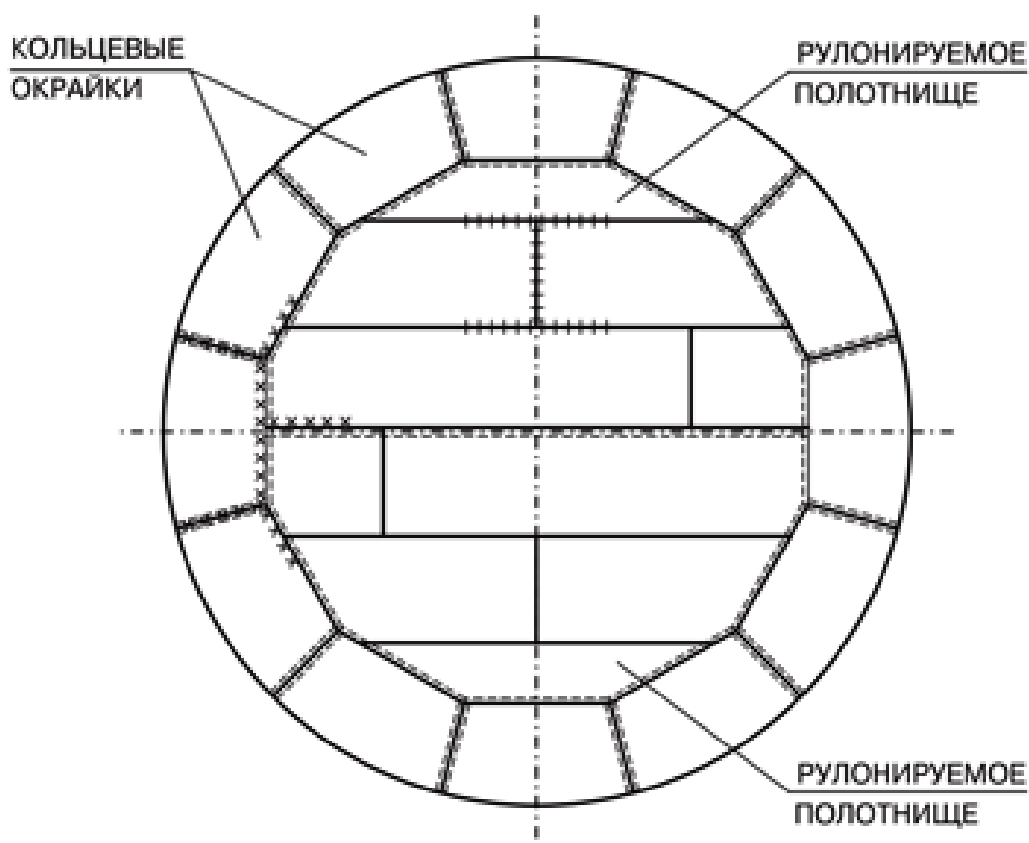


Рисунок 1.3 – Схема днища цилиндрического резервуара для хранения нефтепродукта.

Толщина стали для окрайки – от 6 до 16 мм в зависимости от толщины нижнего пояса резервуара. Зависимость показана в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Зависимость толщины кольцевой окрайки от толщины нижнего пояса резервуара.

Толщина нижнего пояса резервуара	Минимальная толщина кольцевой окрайки
До 7 мм (включительно)	6 мм
8 мм – 11 мм (включительно)	7 мм
12 мм – 16 мм (включительно)	9 мм
17 мм – 20 мм (включительно)	12 мм
20 мм – 26 мм (включительно)	14 мм
26 мм и выше	16 мм

Днище резервуара также часто оборудуется зумпфами зачистки. Они предназначены для отвода подтоварной воды, различных отложений и загрязнений и устанавливаются в специально подготовленной приемке. Если

уклон днища к центру, зумпф зачистки располагается в центре днища; если уклон от центра (или при плоской конструкции днища) – зумпф располагается рядом со стенкой на расстоянии 600 мм и выше [27].

Из вышесказанного следует, что необходимо проводить анализ промышленной безопасности стальных вертикальных резервуаров с целью установления возможности, условий и ресурса безопасной эксплуатации всего комплекса конструкций, устройств и оборудования, связанного со стальными вертикальными резервуарами для нефти и нефтепродуктов.

1.2 Обобщенная структура задачи контроля состояния целостности стенок днищ РВС в процессе эксплуатации

Согласно, [58] в систему контроля технического состояния резервуаров входят следующие мероприятия:

- надзор во время эксплуатации;
- ревизии резервуара при текущем, среднем и капитальном ремонте;
- частичное обследование резервуара с наружной стороны без выведения из эксплуатации;
- полное обследование с наружной и внутренней стороны с выведением резервуара из эксплуатации, опорожнением, зачисткой и дегазацией. Полное обследование проводится также перед вводом в эксплуатацию ранее не эксплуатирующихся резервуаров или резервуаров после капитального ремонта.

Первоочередному обследованию, как правило, должны подвергаться резервуары:

- находящиеся в аварийном состоянии или в состоянии ремонта после аварии;
- со сниженным уровнем налива или ограниченным сроком эксплуатации из-за дефектов металлоконструкций;

- с дефектами металлоконструкций, отремонтированных с использованием временных методов ремонта без выполнения сварочных работ (наклеек с помощью эпоксидных составов и др.);
- изготовленные из кипящих сталей и сваренные электродами с меловой обмазкой;
- применяемые для хранения нефти и нефтепродуктов с высокой коррозионной активностью и не имеющие внутренней антикоррозионной защиты;
- находящиеся в эксплуатации дольше нормативного срока службы [26].

При обследовании днища резервуара необходимо вывести его из эксплуатации. При выводе резервуара из эксплуатации выполняются следующие работы:

- откачка нефтепродуктов из резервуара;
- размыв и удаление донных отложений;
- пропарка резервуара;
- механическое удаление нефтешламов из резервуара;
- промывка и дегазация резервуара;
- при необходимости пескоструйная или другая механическая обработка внутренней поверхности резервуара;
- закрытие технологических задвижек на приемно-раздаточных патрубках;
- установка заглушек на фланцевых соединениях трубопроводов резервуара с составлением схемы и акта на их установку.

Неразрушающий контроль металла резервуара физическими методами производится по результатам визуально-измерительного контроля при частичном или полном обследовании резервуара для выявления мест коррозионного и других видов повреждений. Решение о применении того или иного метода контроля или их комбинации принимается экспертной организацией. Комбинация неразрушающих методов повышает

достоверность результатов контроля. В зависимости от состояния резервуара и вида хранимого продукта дефектоскопия должна также проводиться безотносительно к результатам визуально-измерительного контроля в тех местах конструкции, где внутренние дефекты наиболее вероятны и опасны. Применение методов неразрушающего контроля, квалификация специалистов неразрушающего контроля должны подчиняться требованиям соответствующих ГОСТов, руководящих документов Ростехнадзора и других нормативных материалов.

1.3 Анализ современного состояния основных методов неразрушающего контроля, применимых для контроля целостности стенок днищ РВС

На сегодняшний день контроль вертикальных стальных резервуаров осуществляется комплексно. В перечень применяемых видов неразрушающего контроля, согласно нормативным документам входят [28, 58]:

- акустико-эмиссионный контроль;
- визуально-инструментальный контроль;
- ультразвуковой контроль;
- магнитный контроль.

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации, структурных превращений в материале, образования и роста трещин, трения, а также истечения хранимого продукта через сквозные отверстия в стенке или днище резервуара. Схема АЭ контроля приведена на рисунке 1.4

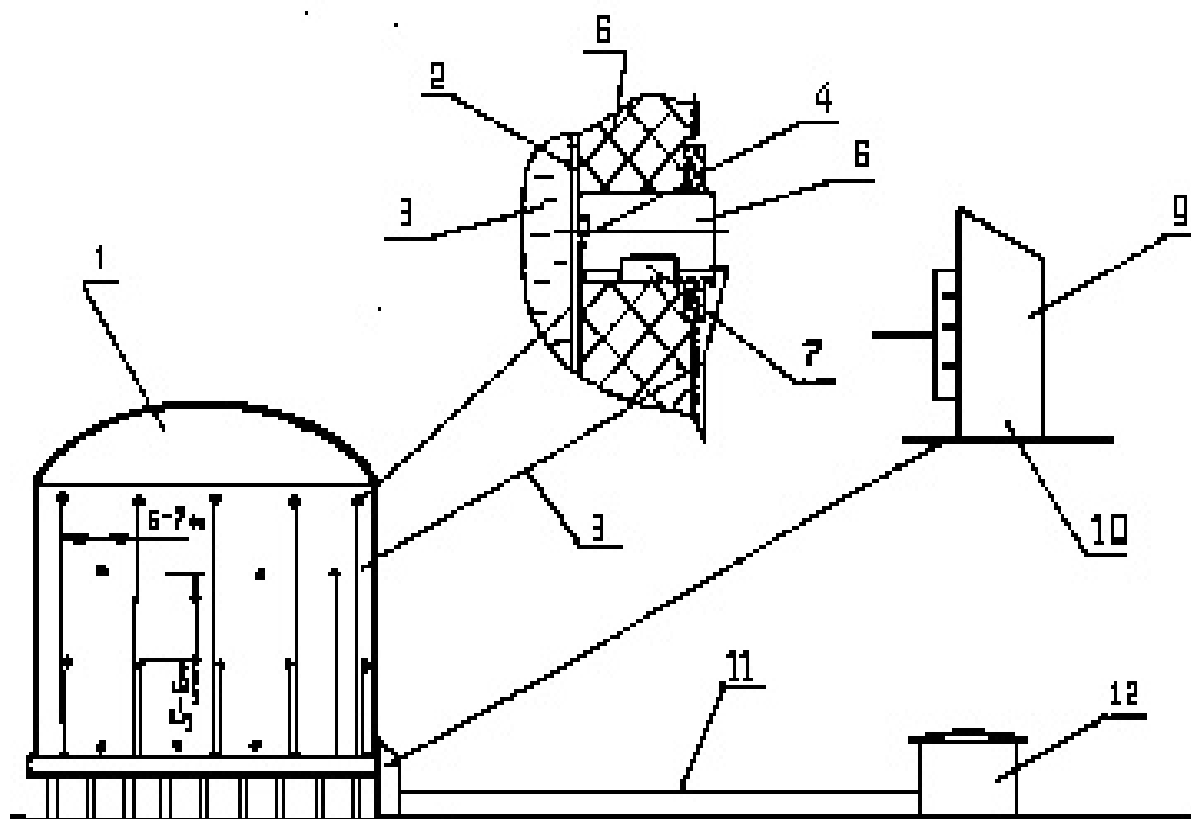


Рисунок 1.4 – Схема акустико-эмиссионного контроля РВС (1 - хранилище; 2 - корпус хранилища; 3 - товарная жидкость; 4 - пьезопреобразователь; 5 - теплоизоляция; 6 - шлюз; 7 - предусилитель; 8 - кабель; 9 - блок предварительной обработки акустико-эмиссионных сигналов; 10 - блок питания (50 гц, 220В); 11 - линия связи с ЭВМ; 12 - пультовая с размещенным приемно-анализирующим оборудованием).

Указанные свойства метода АЭ дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния, объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект. Однако, особенностью метода АЭ, ограничивающей его применение, является в ряде случаев трудность выделения сигналов АЭ из помех. Это связано с тем, что сигналы АЭ являются шумоподобными, поскольку АЭ является случайным импульсным процессом. Поэтому, когда сигналы АЭ малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу. При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов АЭ и

температура их генерации резко увеличивается, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника АЭ [57].

Визуально-измерительный контроль (ВИК) основан на получении первичной информации о контролируемом объекте при визуальном наблюдении или с помощью оптических приборов и средств измерений. Это органолептический контроль, т.е. воспринимаемый органами чувств (органами зрения) ГОСТ 23479-79 «Контроль неразрушающий. Методы оптического вида» устанавливает требования к методам контроля оптического вида. Проверяют качество подготовки и сборки заготовок под сварку, качество выполнения швов в процессе сварки и качество готовых сварных соединений. Как правило, внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Перед проведением визуального контроля поверхность в зоне контроля должна быть очищена от ржавчины, окалина, грязи, краски, масла, брызг металла, и других загрязнений, препятствующих осмотру. Визуальный контроль выполняется до проведения других методов контроля. Дефекты, обнаруженные при визуальном контроле, должны быть устранены до проведения контроля другими методами. Измерения производятся с использованием приборов и инструментов:

- лупы измерительные;
- штангенциркули;
- линейки измерительные металлические;
- угломеры;
- щупы;
- шаблоны и др.

Суть ультразвукового контроля заключается в излучении в изделие и последующем принятии отраженных ультразвуковых колебаний с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа и пьезоэлектротрансформатора и дальнейшем анализе полученных данных с целью определения наличия дефектов, а также их эквивалентного размера,

формы, вида, глубины залегания (рисунок 1.5). Параметры выявленных дефектов определяются с помощью ультразвуковых дефектоскопов. Так, например, по времени распространения ультразвука в изделии (если известна скорость распространения ультразвуковых волн в различных материалах) определяют расстояние до дефекта, а по амплитуде отраженного импульса – его относительный размер.

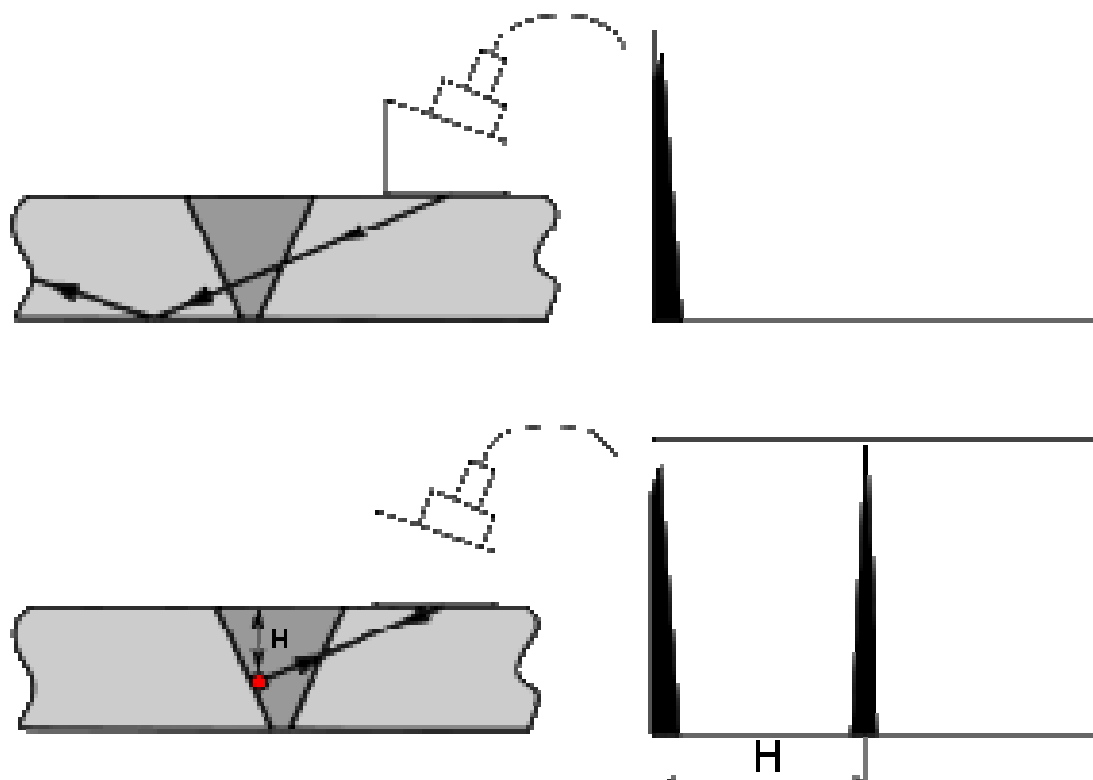


Рисунок 1.5 – Схема ультразвукового контроля стенки.

Основными преимуществами при контроле остаточной толщины днища резервуара являются:

- безопасность для человека (в отличие, к примеру, от рентгеновской дефектоскопии);
- высокая мобильность вследствие применения портативных ультразвуковых дефектоскопов.

Основными недостатками ультразвукового контроля (УЗК) является то, что при ультразвуковой дефектоскопии невозможно дать ответ на вопрос о

реальных размерах дефекта, т.к. размер дефекта определяется его отражательной способностью и поэтому по результатам контроля дается эквивалентный размер дефекта (например: имеющиеся в изделии два реальные дефекта одного размера и формы, расположенные на одной глубине, но один из которых заполнен воздухом, а другой шлаком будут давать отраженные импульсы различной амплитуды и, соответственно оценены как дефекты, имеющие различные размеры). Следует отметить, что, некоторые дефекты в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля практически невозможно выявить ультразвуковым методом. Подготовка поверхности контроля к контролю, для ввода ультразвуковых волн в металл, а именно: очистка поверхности контроля от загрязнений, отслаивающейся окалины, ржавчины, брызг расплавленного металла и др. и создание необходимой шероховатости поверхности не хуже Rz 40 и волнистости не более 0,015, т.к. даже небольшой воздушный зазор между пьезоэлектротреброобразователем (ПЭП) для проведения ультразвукового контроля и изделием может стать непреодолимой преградой для распространения ультразвуковых волн. Необходимость нанесения на контролируемый участок изделия после его зачистки непосредственно перед выполнением контроля контактных жидкостей (специальные гели, глицерин, машинное масло, и др.) для обеспечения стабильного акустического контакта [49].

Магнитные методы можно использовать при контроле деталей из ферромагнитных материалов для выявления мест нарушения сплошности материала детали, расположенных на поверхности и в подповерхностных слоях, а в отдельных случаях — и внутри детали, т. е. трещин (усталостных, шлифовочных, закалочных, сварочных, ковочных, штамповочных), волосовин, закатов, расслоений (непараллельных поверхности), флокенов, надрывов, непроваров в сварных соединениях, неметаллических включений [45]. Метод определения и оценки магнитных свойств объекта контроля. По способу получения первичной информации разделяют на несколько методов

магнитного контроля: магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, эффекта Холла [2], индукционный, пондеромоторный, магниторезисторный. Все без исключения методы магнитного НК для определения сплошности металлических изделий основаны на обнаружении локальных возмущений поля, происходящих из-за наличия дефектов в намагниченном ферромагнетике. Согласно традиционно принятым в России методам диагностического обследования днищ РВС наибольшее распространение получил УЗ контроль. Однако физические особенности УЗК не позволяют осуществить 100% контроль днища. Кроме того, применение УЗК предусматривает обязательный демонтаж защитного изоляционного покрытия независимо от его состояния. Поэтому в настоящее время применение УЗК предполагает не сплошное обследование, а контроль в дискретных точках. При этом велика вероятность пропуска дефектов, в особенности коррозионных повреждений днища, расположенных со стороны гидрофобного слоя.

Метод АСFM показывает наилучшие результаты по выявляемости и точности измерения линейных размеров усталостных трещин. Это объясняется тем, что усталостные трещины как правило, выходят на поверхность, имеют приближенную к полу эллипсу форму и склонны к росту под прямым углом к поверхности. Как правило, модели именно этих дефектов используются для расчета параметров сигналов преобразователя при его математическом моделировании.

Также хорошие результаты метод показывает при контроле коррозионных трещин напряженных конструкций. Следует отметить, что коррозионное растрескивание напряженных элементов конструкций часто представляет собой серию параллельных трещин. Малые расстояния между отдельными трещинами и их правильная параллельная ориентация может вызывать некоторые затруднения при анализе результатов контроля (бабочковой диаграммы). Однако проведенные эксперименты и полевые испытания показали, что коррозионное растрескивание выявляется с

требуемой степенью достоверности, а измерение глубины трещины путем обработки отдельных участков поверхности практически соответствует типовым измерениям элементарных дефектов.

Ведущим мировым производителем приборов неразрушающего контроля, реализующих методы ACFM является фирма *TSC* (Англия). Фирмой разработаны четыре базовых комплекса неразрушающего контроля: универсальный комплекс *Amigo*, комплекс для подводных инспекций *U31*, комплекс для инспекции железнодорожных рельсов *Walking Stick*, комплекс для неразрушающего контроля резьбы *ATI* (описан выше).

Универсальный комплекс *Amigo* представлен на рисунке 1.6. В комплект поставки входит портативный блок обработки информации с классом пылевлагозащищенности IP54, ударозащищенный ноутбук со специализированным программным обеспечением и, в зависимости от задачи, один или несколько стандартных или специализированных преобразователей.



Рисунок 1.6 – Комплекс Amigo.

Фирмой выпускается широкий спектр преобразователей, способных решать большое число задач, к их числу относятся стандартные преобразователи, мини и микро преобразователи «карандашного» исполнения, преобразователя для контроля больших поверхностей, мультисенсорные преобразователи, высокотемпературные и подводные преобразователи. Каждый из этих преобразователей может иметь частоту возбуждения 5 и 50 кГц. На рисунке 1.7 представлены некоторые типы преобразователей для комплекса *Amigo*.

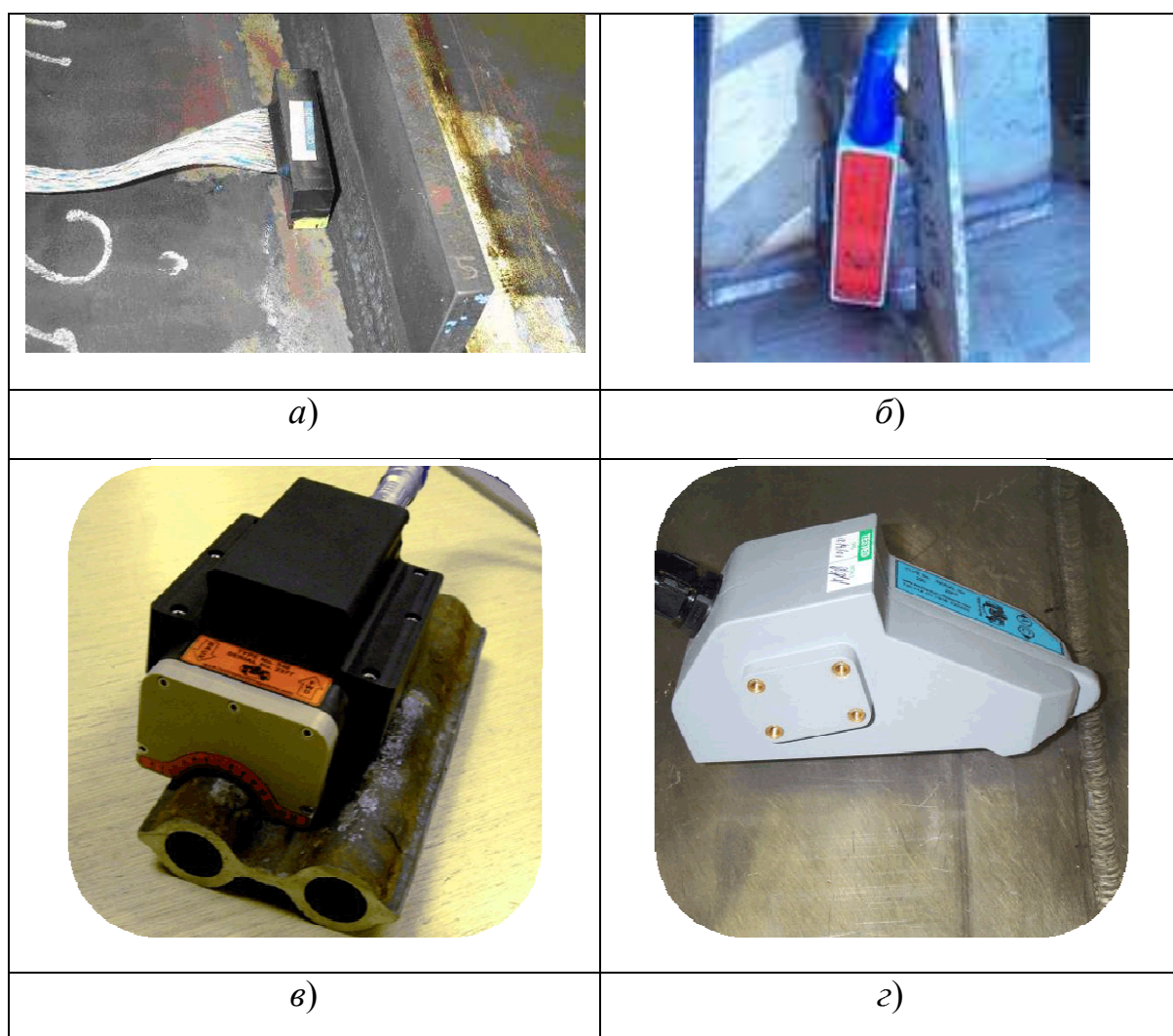


Рисунок 1.7 – Преобразователи для комплекса *Amigo*: многоэлементный преобразователь для контроля плоских поверхностей (а), одноэлементный подводный преобразователь (б), преобразователь для контроля гофрированной поверхности котлов (в), преобразователь для контроля элементов ядерного реактора (г).

Комплекс для подводных инспекций изображен на рисунке 1.8.

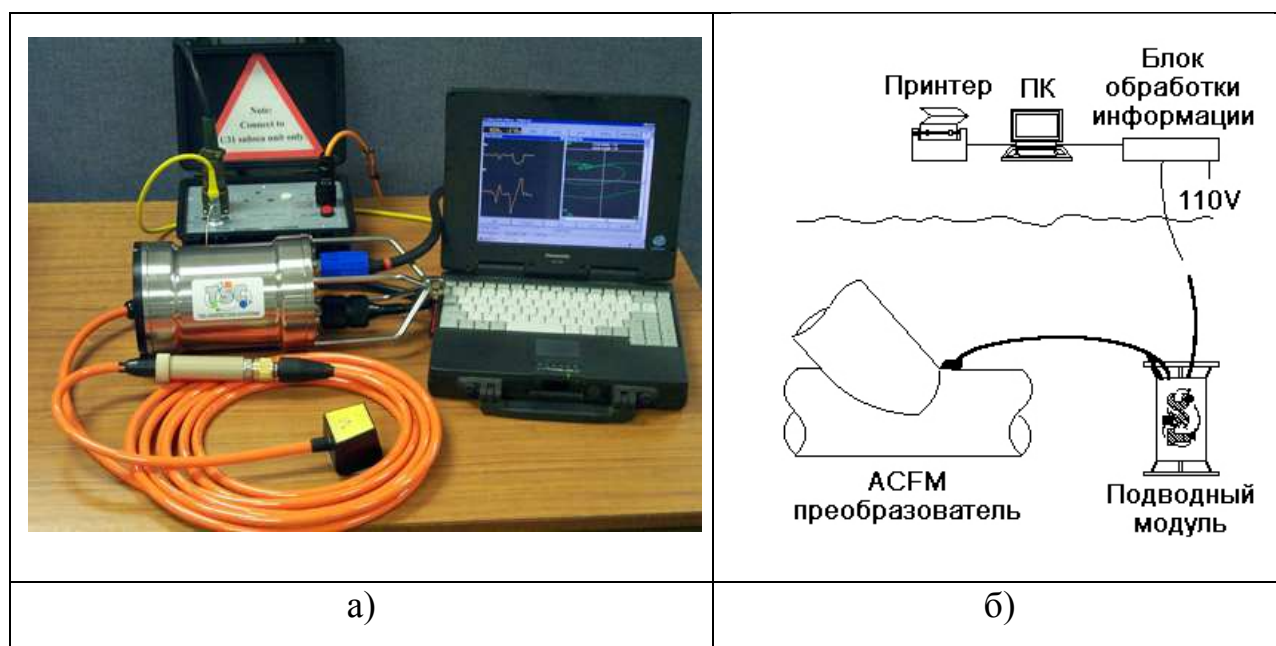


Рисунок 1.8 – Комплекс для подводных инспекций *U31*: оборудование комплекса *U31* (а), схема проведения контроля (б).

Для проведения глубоководных инспекций в комплекс *U31* дополнительно входит специализированный подводный модуль, выполняющий функции усилителя, для передачи измерительных сигналов по длинным соединительным линиям. Вес подводного модуля на суше составляет 7,6 кг, максимальная длина соединительных линий определяет максимально возможную глубину погружения и составляет 300 метров в стандартном исполнении или 2000 метров в специализированном глубоководном исполнении. На рисунке 1.9. представлены кадры с подводной инспекции опоры нефтяной платформы.



Рисунок 1.9 – Кадры с подводной инспекции с использованием комплекса *U31* производства компании *TSI*.

Метод АСФМ является одним из направлений развития электромагнитных методов неразрушающего контроля. Относительно долгое время данный метод не получал практической реализации из-за сложностей в обработке большого количества маломощных измерительных сигналов, однако современная элементарная база позволила решить эту проблему. Метод АСФМ обладает рядом достоинств по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. С течением времени он сможет существенно дополнить или даже заменить, например, ультразвуковой и магнитный контроль в некоторых областях промышленности [50].

Однако на данный момент этот метод применяется только за рубежом для решения ограниченного ряда задач. Это объясняется, в том числе и недостаточной проработкой методической и нормативно-технической базы. В частности отсутствуют стандарты на сам метод АСФМ и на средства его метрологического обеспечения.

Опыт диагностического обследования днищ резервуаров показывает, что не менее 30% РВС подвержены возникновению указанных дефектов, которые при традиционном подходе к осуществлению контроля не могут быть выявлены. Результат сравнительного анализа возможностей различных технологий, используемых при диагностическом обследовании днищ РВС приведен в таблице 1.2 [18].

Таблица 1.2 – Сравнение технологий НК днищ РВС

№	Свойство	Сравнение технологий НК днища				
		АЭ	ВИК	УЗК	МК	ACFM
1	Контроль без демонтажа защитного покрытия	+	-	-	+	+
2	Контроль 100% площади днища	+	+	-	+	-
5	Определение местоположения дефектов (внешний/внутренний)	-	-	+	+	+
6	Определение координаты дефектов	-	+	+	+	+
7	Оценка размеров дефектов	+	-	+	+	+
8	Определение остаточной толщины металла днища	-	-	+	+	+
9	Оценка толщины защитного покрытия	-	-	-	+	+

1.4 Анализ современного состояния приборов магнитного неразрушающего контроля и мониторинга целостности стенок днищ РВС

На рисунке 1.10 представлен восемнадцатиканальный ручной измерительный и блок контроля, являющиеся элементами системы *HANDSCAN* для контроля плоских поверхностей (например, днищ резервуаров).



Рисунок 1.10 – Восемнадцатиканальный ручной преобразователь для контроля плоских поверхностей:

а) вид снизу; б) вид в сборе с блоком контроля.

В процессе контроля оператор за ручку перемещает преобразователь по поверхности листа и следит за световой и звуковой индикацией на блоке контроля. В местах дефектов контроль прерывается и маркером или мелом обозначается место дефекта для последующего более тщательного анализа, например, с использованием ультразвукового толщиномера.

В состав преобразователя входят 18 чувствительных элементов Холла, обеспечивающих ширину зоны контроля 150 мм. Скорость контроля до 500 мм/с. Максимальная контролируемая толщина металла составляет 15 мм, при допустимой толщине неферромагнитного покрытия до 6 мм. Вес системы 18 кг.

Механизированная 36-ти канальная моноблочная моторизованная система контроля *MFL2000* представлена на рисунке 1.11. Отличительной особенностью системы являются наличие электропривода с питанием от сменной аккумуляторной батареи 12 В, обеспечивающего производительность контроля до 800 м² за смену. Максимальная контролируемая толщина металла 20 мм при толщине покрытия до 6 мм. Вес системы 47 кг.

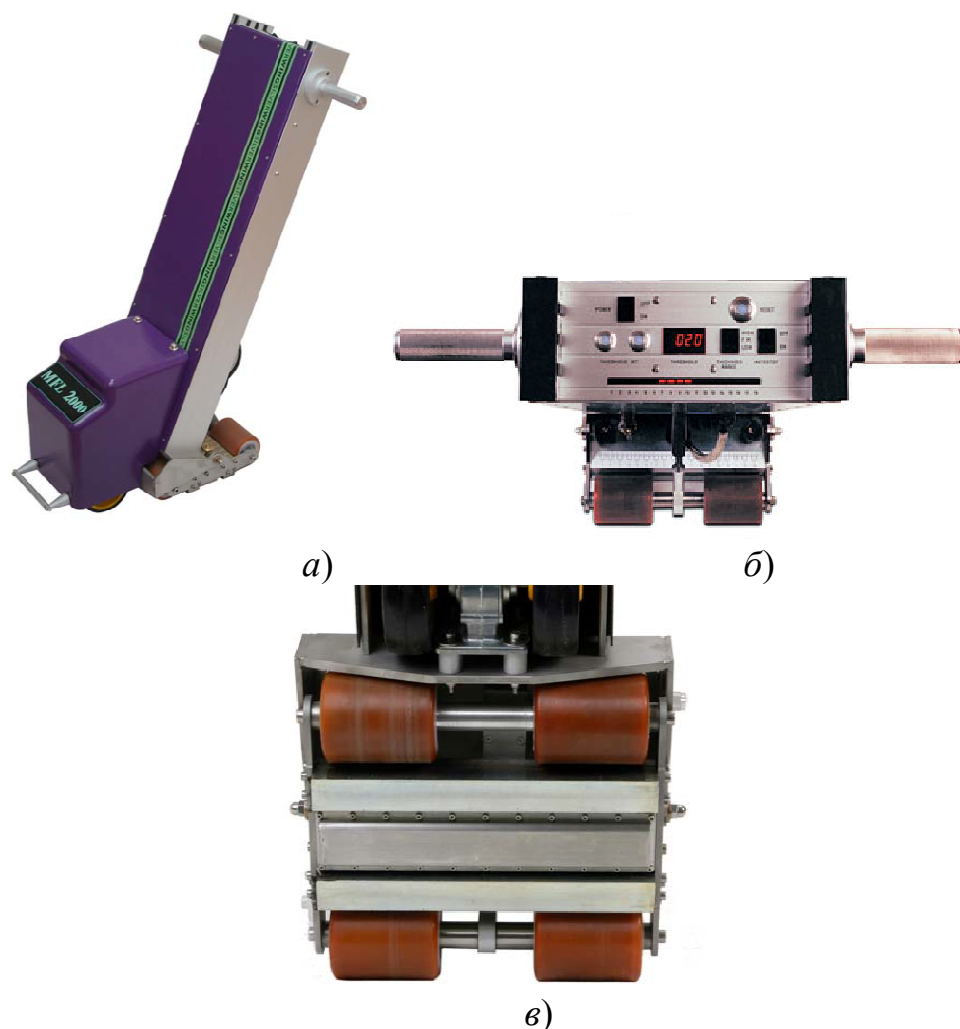


Рисунок 1.11 – Механизированная 36-ти канальная моноблочная моторизованная система контроля *MFL2000*: внешний вид (а); вид сверху на блок контроля (б); вид сканера снизу (в).

Алгоритм контроля предусматривает автоматическую остановку сканера в месте нахождения дефекта и продолжение движения по команде оператора. Разметка дефектных участков производится вручную.

Для контроля больших площадей с высокой производительностью оптимальным является использование автоматизированных систем *FLOORMAPVS2i* и *FLOORVFP3D* (рисунки 1.12 и 1.13), использующих технологию *STARS* для автоматического распознавания, с какой стороны листа расположен дефект. Отличительными особенностями систем являются использование промышленного компьютера с технологией *touch screen* для обработки информации и представления результатов в виде картограмм

объектов с расшифровкой дефектов и большое число чувствительных элементов (32 для *FLOORMAPVS2i* и 256 для *FLOORVFP 3D* с шириной зоны контроля 250 и 300 мм, соответственно). Скорость сканирования до 0,5 м/с. Производительность контроля с использованием систем до 1440 м² за смену.



Рисунок 1.12 – Внешний вид систем *FLOORMAP3D* и *FLOORMAPVS2*.



Рисунок 1.13 – Внутренне устройство сканера системы *FLOORMAPVS2*.

Полностью цифровая система калибровки устраняет необходимость регулировать высоту сканера для листов различной толщины, обеспечивая мгновенное изменение чувствительности между листами пола различной толщины. Цифровая калибровка автоматически сохраняется в каждом файле результатов контроля листа, обеспечивая возможность инспекционного

контроля при идентичных параметрах настройки.

Системы позволяют со стопроцентной достоверной вероятностью выявлять 20 процентные утонения при толщине листа 6 мм с погрешностью определения глубины коррозии не более $\pm 5 \%$, что превосходит требования стандарта API 653. Системы позволяют выявлять сквозные отверстия диаметром менее 3 мм. Вывод результатов контроля производится в режиме реального времени при сканировании (рисунок 1.14)

Система *FLOORVFP3D* снабжена программой SIMS, автоматически формирующей картину расположения дефектов с привязкой к чертежу поля (рисунки 1.15 и 1.16) [50].

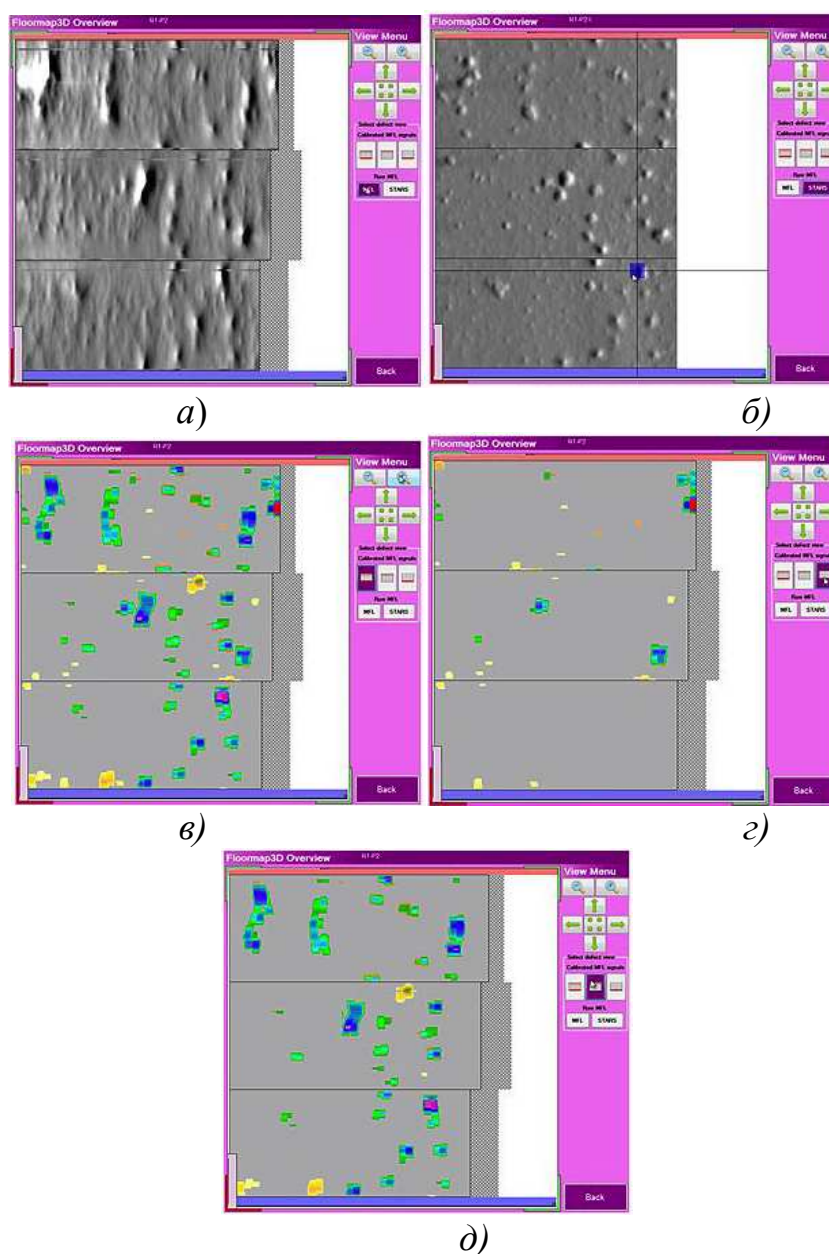


Рисунок 1.14 – Представление результатов контроля (в том числе с использованием технологии STARS): а) 3D представление информации о дефектах; б) 3D представление информации о дефектах после обработки с использованием технологии STARS; в) дефектограмма без разбиения дефектов по сторонам стенки; г) дефекты на внутренней стороне стенки изделия; д) дефекты на внешней стороне стенки изделия.

К отчету могут быть добавлены фотографии и видео файлы. Это позволяет производить мониторинг и оценивать развитие коррозии во времени.

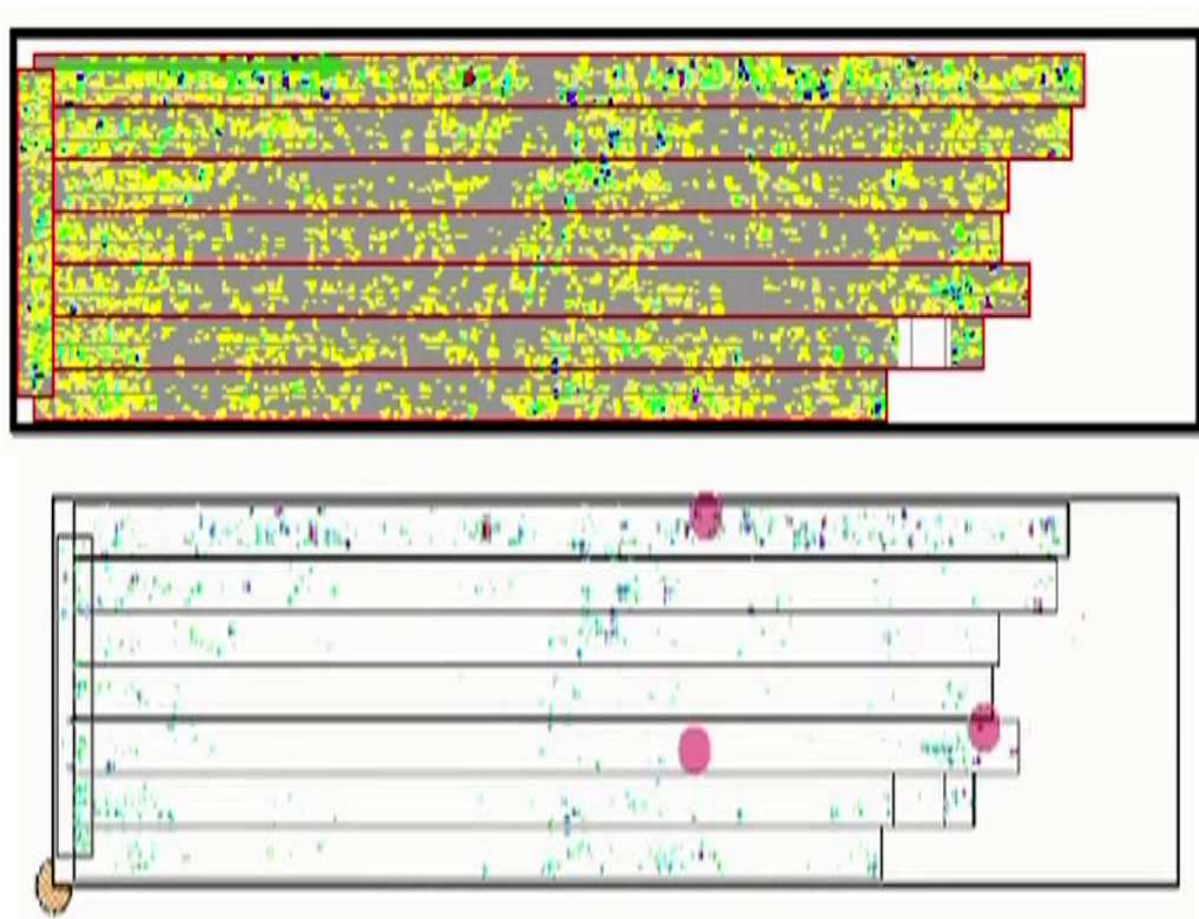
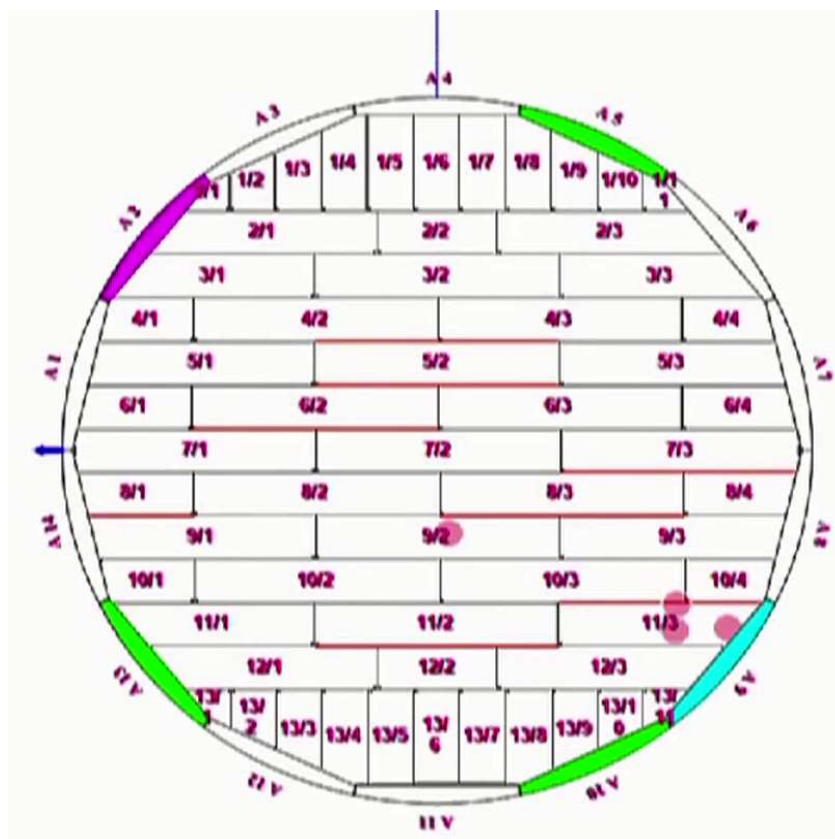
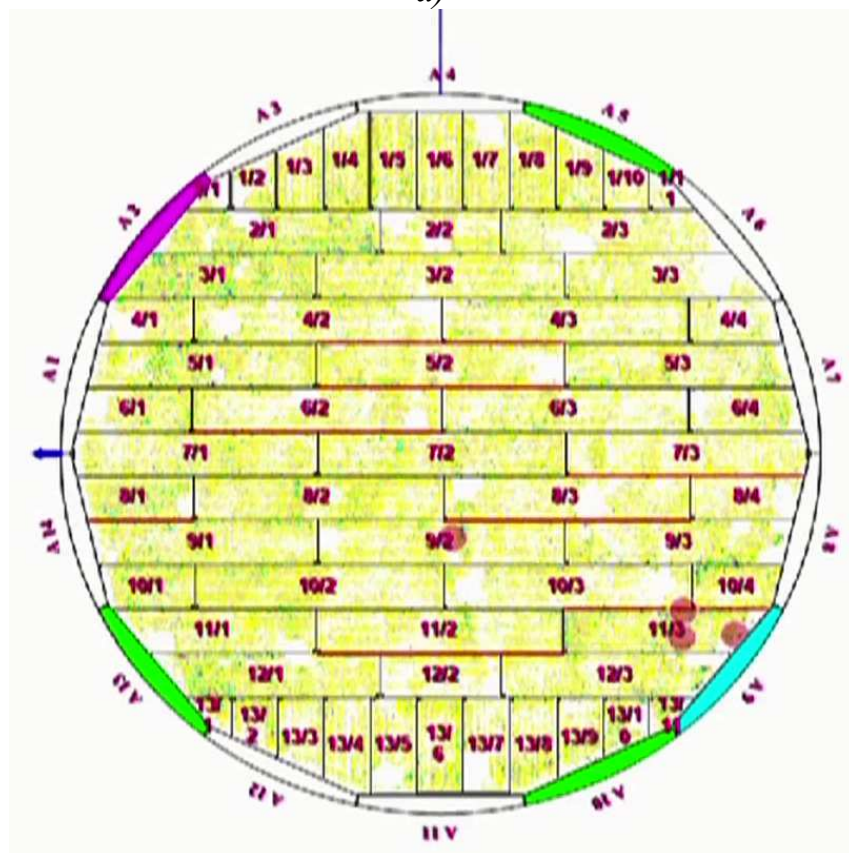


Рисунок 1.15 – Представление результатов контроля после сканирования листа (семь «горизонтальных» и один «вертикальный» проход) с отметкой красным критических мест.



а)



б)

Рисунок 1.16 – Чертеж пола нефтехранилища (а) и его дефектограмма (б) с координатной привязкой (красным отмечены места недопустимых утонений).

Компания Tes Tech, Inc. (США) специализируется на разработке оборудования для неразрушающего контроля таких объектов промышленных предприятий, как котлы, теплообменники, конденсоры, трубопроводы, сосуды, работающие под давлением, резервуары (рисунок 1.17). Принцип действия систем семейства сканеров Falcon основан на использовании низкочастотного поля вихревых токов (LFET – Low Frequency Electromagnetic Technique), что позволяет преодолеть ограничения, присущие традиционным вихретоковым дефектоскопам при контроле объектов с высокой магнитной проницаемостью. Главным преимуществом этих систем является то, что при определенных условиях контролировать можно толщину листов до 22 мм. Также, в комплектацию к дефектоскопам входит программный продукт TF-MAp, который позволяет строить карты толщин контролируемых объектов. Однако, при использовании систем Falcon пользователь сталкивается с такими проблемами, как большой вес и габариты сканеров, а также необходимость использования ПК для визуализации дефектов [11]. Стоит заметить, что производитель не дает никакой информации по поводу погрешности измерений дефектоскопа.



а)

б)

Рисунок 1.17 – а) внешний вид системы Falcon Wing; б) вид системы Falcon Wing со стороны оператора.

Системы Testex позволяют проводить сплошной высокопроизводительный контроль объектов через покрытие или зазор без тщательной подготовки и зачистки поверхности. Проблема традиционных методов контроля, таких как ультразвуковая толщинометрия и ультразвуковой контроль, состоит в необходимости подготовки поверхности объекта, что требует дополнительного времени на ремонт.

Российская компания ООО «Интрон Плюс» имеет большой опыт разработки, изготовления и применения магнитных дефектоскопов для неразрушающего контроля различных объектов. Компанией разработан и внедрен ряд таких приборов, начиная с дефектоскопов стальных канатов и

резинотросовых лент и заканчивая внутритрубными магнитными дефектоскопами для контроля труб. Для контроля стальных резервуаров компанией был разработан дефектоскоп Интрокор М-150 (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – Внешний вид дефектоскопа Интрокор М-150.

Прибор предназначен для магнитного неразрушающего контроля стальных листов стенок/днищ резервуаров. Интрокор позволяет с высокой производительностью обнаруживать коррозионные поражения днища и стенок, производить оценку размеров дефектов, документировать результаты контроля, составлять карты толщин. Дефектоскоп обнаруживает поражения внутренней и наружной поверхностей (точечную и общую коррозию, трещины, риски) в диапазоне толщин от 4 до 14 мм. Контроль может производиться через защитное покрытие толщиной не более 6 мм, при этом

определяется толщина покрытия. Дефектоскоп состоит из магнитного сканера с шириной сканирования 150 мм и даталоггера. В комплект входит специальная программа Wintrosog для визуализации и обработки данных на ПК. Питание дефектоскопа осуществляется от аккумуляторов. Производитель заявляет, что дефектоскоп способен определять толщину листа с погрешностью 15%.

Анализ показывает, что при проведении измерений в цеховых и полевых условиях при реальных технологических разбросах физических и геометрических параметров изделий вероятно ни у одного производителя заявляемые значения погрешности не обеспечиваются [46]. В связи с этим разработка более совершенных и универсальных магнитных дефектоскопов для выявления коррозионных повреждений на стенках днищ резервуаров является актуальной научной и практически значимой задачей.

1.5 Постановка задачи исследований

Для эффективного обнаружения коррозионных повреждений днищ РВС в производственных условиях необходимо применение портативных, простых в эксплуатации средств НК целостности, обеспечивающих требуемую погрешность измерения в реальных условиях применения, характеризующихся разбросом физических и геометрических параметров стенки изделий.

Целью данной работы, является уменьшение погрешности измерения параметров дефектов для повышения достоверности оценки технического состояния и целостности изделий из ферромагнитных материалов в процессе их эксплуатации на основе MFL – метода неразрушающего контроля.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. провести анализ методов повышения чувствительности и отстройки от воздействия мешающих параметров на результаты измерений;

2. разработать модель магнитной системы обеспечивающей возможность оптимизации чувствительности MFL – преобразователя дефектоскопа;
3. разработать способ выделения информативного параметра сигнала на фоне влияния мешающих параметров, позволяющий проводить измерения с погрешностью, не превышающей заданную;
4. разработать средства метрологического обеспечения выявления коррозионных повреждений;
5. провести испытания MFL – дефектоскопа;
6. провести внедрение результатов работы на промышленных предприятиях.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАССЕЙВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЕФЕКТАМИ СТЕНОК ДНИЩ РВС

2.1 Общая характеристика физических процессов намагничивания ферромагнитных объектов

Классическая теория ферромагнетизма была разработана физиками П. Вейсом, П. Ланжевеном, Б. Розингом, Л. Ландау, Е. Лифшицем.

Характерной особенностью ферромагнетиков является сложная нелинейная зависимость между величиной магнитной индукции $\vec{B}$ и напряженностью магнитного поля $\vec{H}$ (рисунок 2.1).

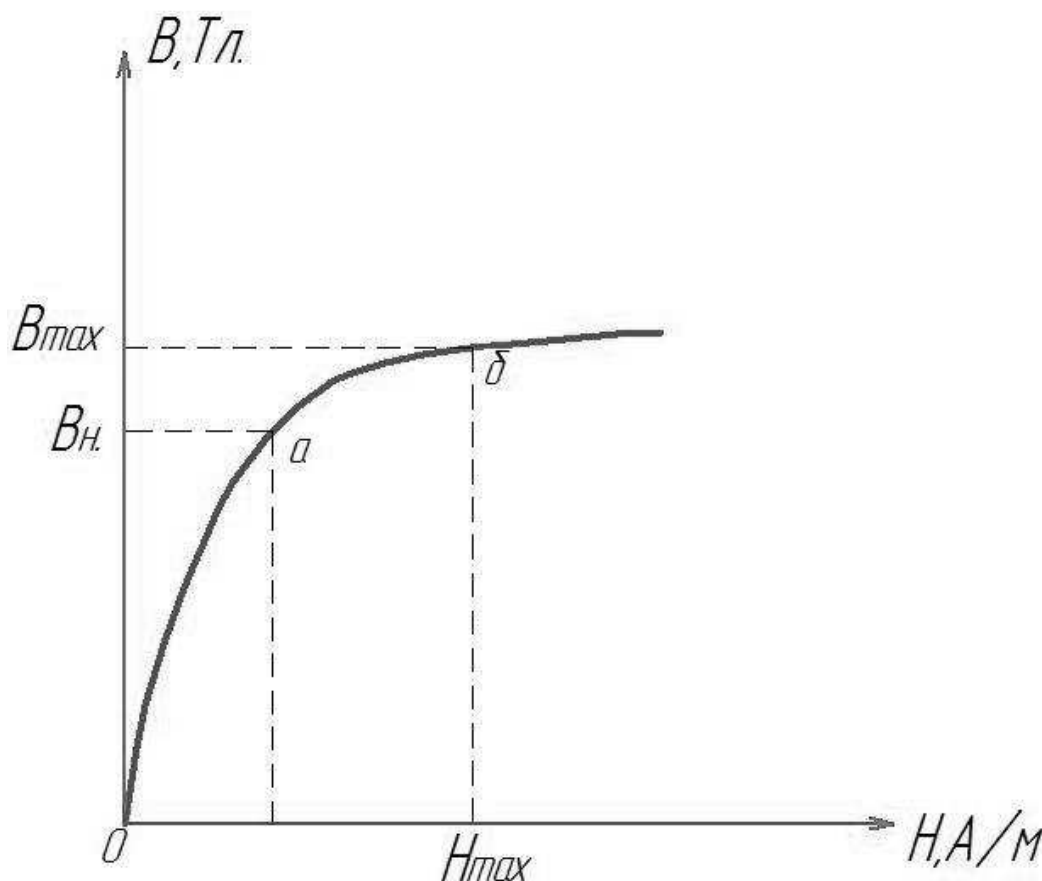


Рисунок 2.1 – Кривая намагничивания ферромагнитного материала.

Кривую намагничивания можно разбить на три основных участка: Oa , на котором магнитная индукция возрастает почти пропорционально напряженности поля $\vec{B} = \vec{B}_S$; $a-b$, на котором рост магнитной индукции

замедляется («колени» кривой намагничивания), и участок магнитного насыщения за точкой b , где зависимость $B(H)$ становится опять прямолинейной, но характеризуется медленным нарастанием магнитной индукции при увеличении напряженности поля по сравнению с первым и вторым участками кривой.

Магнитная индукция в образце

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1)$$

Однако теперь магнитную проницаемость μ следует рассматривать не как определенную постоянную величину, а как функцию напряженности магнитного поля H (Рисунок 2.2)

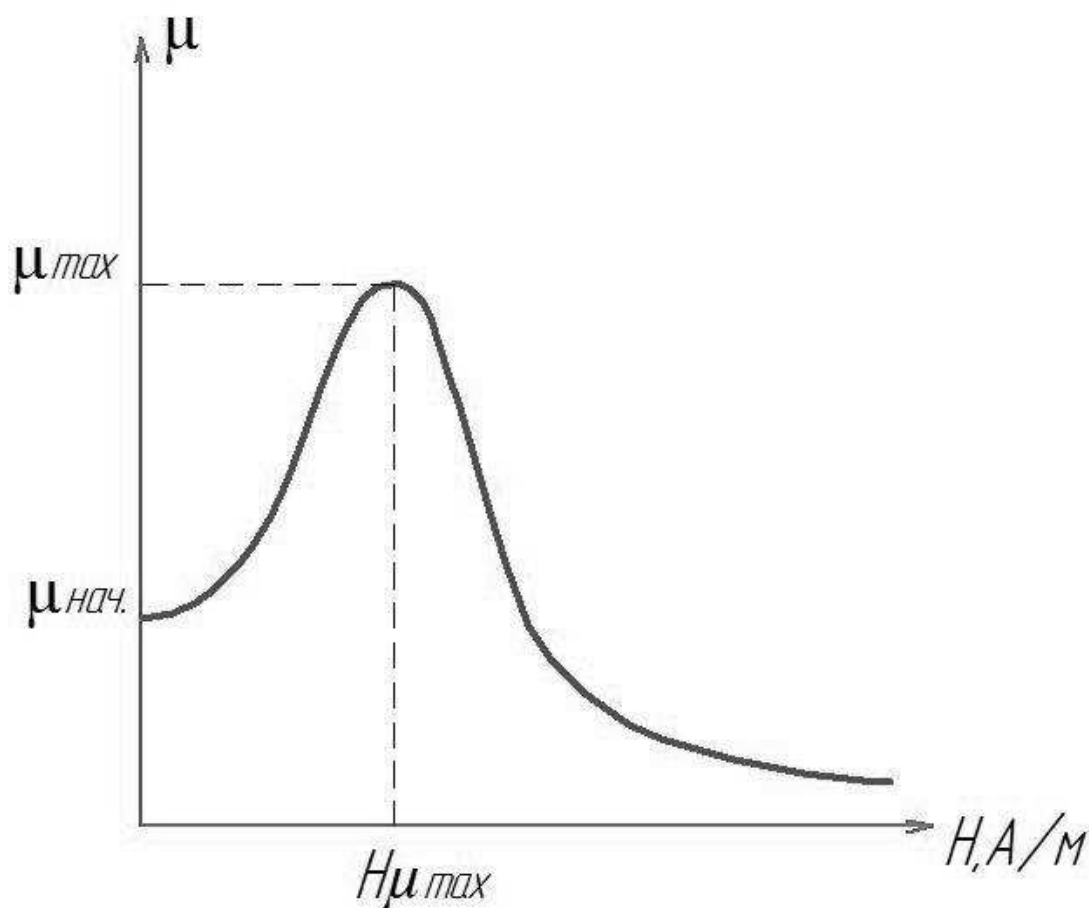


Рисунок 2.2 – Кривая зависимости магнитной проницаемости (μ) от намагниченности поля (H)

Эта функция μ сначала возрастает с увеличением поля, проходит через максимум при достижении в материале намагниченности насыщения и стремится в сильных полях к единице ($\mu \rightarrow 0$).

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (2)$$

Значения проницаемости μ в максимуме для большинства ферромагнетиков достигают тысяч единиц (чистое железо – 5000), а для некоторых специальных сплавов приближаются к миллиону (супермалой – 800000) [25].

Согласно основным теоретическим положениям [13, 16, 36, 54], весь объем ферромагнитного образца разбит на домены, самопроизвольно намагниченные до насыщения, ориентированные в ненамагниченном материале случайным образом. Деление ферромагнетика на домены происходит потому, что этот процесс энергетически выгоден. Он является следствием конкуренции двух видов взаимодействий: обменного, имеющего существенно квантово-механическую природу, и магнитного (диполь - дипольного взаимодействия магнитных моментов). Минимум суммарной энергии этих взаимодействий определяет устойчивую конфигурацию внутренней структуры магнетика. Обменное взаимодействие – короткодействующее (радиус действия $\sim$ размеров атомов). Оно стремится установить магнитные моменты атомов параллельно и ответственно за однородную намагниченность в доменах. Минимум энергии обменного взаимодействия электронов достигается при намагничивании всего ферромагнетика в определенном направлении. Однако такому состоянию магнетика соответствует значительная энергия создаваемого им магнитного поля. Диполь - дипольное взаимодействие не может конкурировать с обменным взаимодействием в пределах домена [31]. Однако, являясь дальнодействующим, оно ориентирует антипараллельно векторы намагниченности соседних доменов. Тем самым магнитное поле, возбуждаемое ферромагнетиком, ослабляется, и уменьшается соответствующая ему энергия. Благодаря короткодействующему характеру обменных сил, энергия обменного взаимодействия остается неизменной для всех электронов, за исключением электронов на границах доменов. Энергия

этих электронов возрастает из-за различной ориентации электронных спинов атомов, принадлежащих соседним доменам. Энергия обменного взаимодействия атомов, расположенных на границах доменов, пропорциональна полной площади поверхностей, вдоль которых граничат домены, и носит название поверхностной энергии. По мере увеличения числа доменов поверхностная, а с ней и полная энергия обменного взаимодействия возрастает, но убывает энергия магнитного поля ферромагнетика [65]. Образование доменов прекращается, когда сумма обменной и магнитной энергий достигает минимума. Этим условием определяется и размер доменов. При некоторых критически малых размерах ферромагнитных образцов образование в них нескольких доменов может стать энергетически невыгодным. Тогда такие мелкие ферромагнитные частицы при $T < T_c$ оказываются однородно намагниченными [39]

Процесс намагничивания ферромагнетиков во внешнем поле, в общем случае, разделяют на несколько этапов [42], представленных на (рисунок 2.3).

I этап - обратимое смещение границ доменов, для которого характерно то, что при снятии внешнего поля, границы доменов вернутся в исходное положение.

II этап – необратимое смещение границ доменов. При снятии внешнего поля границы доменов не вернутся в исходное положение.

III этап – процесс вращения границ доменов. Намагниченность достигает величины технического насыщения.

IV этап – парапроцесс. Магнитные моменты (спины) доменов достигают параллельной ориентации.

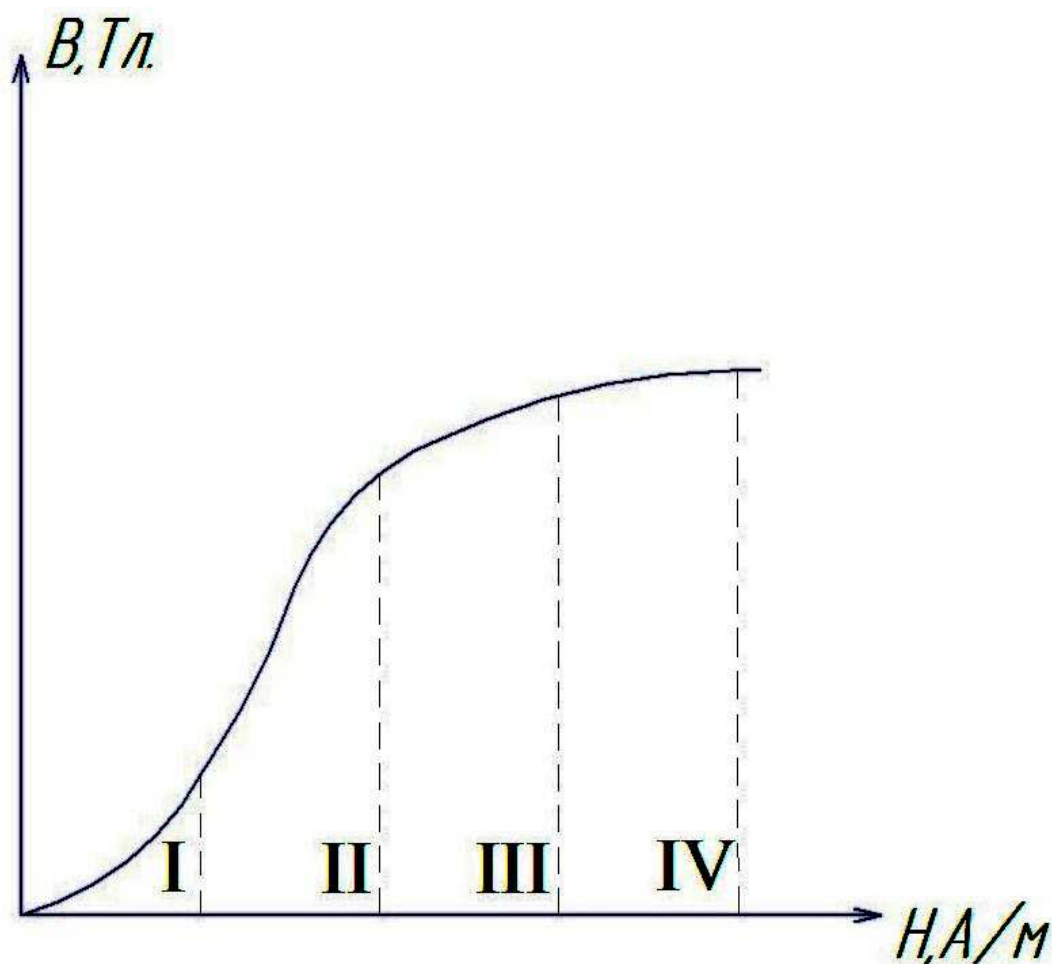


Рисунок 2.3 – Этапы намагничивания ферромагнетика, где B -магнитная индукция, H -напряженность магнитного поля.

Обменное взаимодействие в пределах монокристалла изотропно по своей природе [43]. Однако, из-за анизотропии свойств ферромагнетиков и обусловленной ей энергией анизотропии в пределах монокристалла [39] вектор намагниченности в пределах его объема выстраивается не произвольно, а в строго определенных направлениях (рисунок 2.4). В кубических кристаллах α -железа (сталях) кристаллографические направления $\{100\}$ и $\{110\}$ являются направлениями легкого намагничивания, а направления $\{111\}$ – направлениями трудного намагничивания [39].

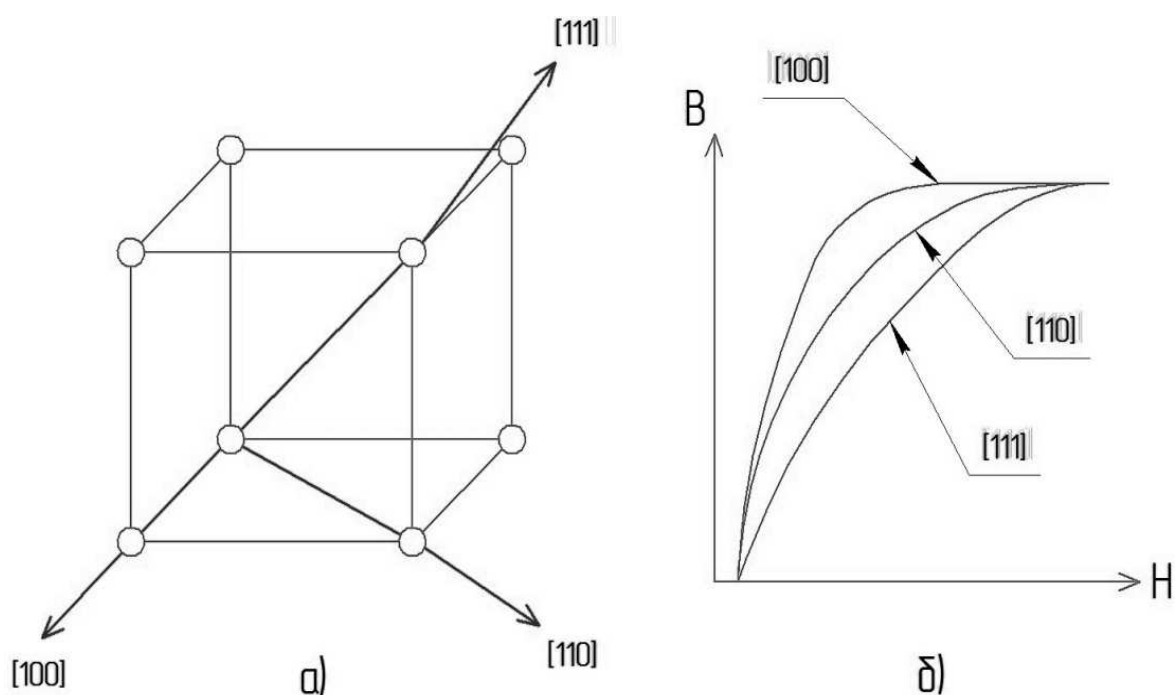


Рисунок 2.4 – Примерный вид кривых намагничивания монокристалла α -железа в различных направлениях.

Существование направлений легкого и трудного намагничивания связано с величиной перекрытия электронных орбит [16]. Магнитные (спиновые) моменты взаимодействуют с орбитальными из-за наличия спин-орбитальной связи, а орбитальные моменты, в свою очередь, взаимодействуют с кристаллической решеткой за счет существующих в ней электростатических полей и перекрытия волновых функций соседних атомов [36].

Энергия анизотропии и обменная энергия должны зависеть от намагниченности ферромагнетика [39]. Намагниченный до насыщения ферромагнитный образец с конечными размерами из-за обменного взаимодействия станет постоянным магнитом при $T \ll T_C$. При этом он будет создавать вокруг себя магнитное поле, с которым связана некоторая энергия магнитодипольного взаимодействия W_m , пропорциональная объему ферромагнетика [43].

2.2 Расчетно-теоретическая модель взаимодействия магнитного поля системы намагничивания MFL – преобразователя и ферромагнитного объекта контроля

Рассмотрим расчетную модель системы намагничивания и полупространства из ферромагнитного материала с дефектом, представляющим собой пропил с прямоугольным профилем в поперечном сечении (рисунок 2.5)

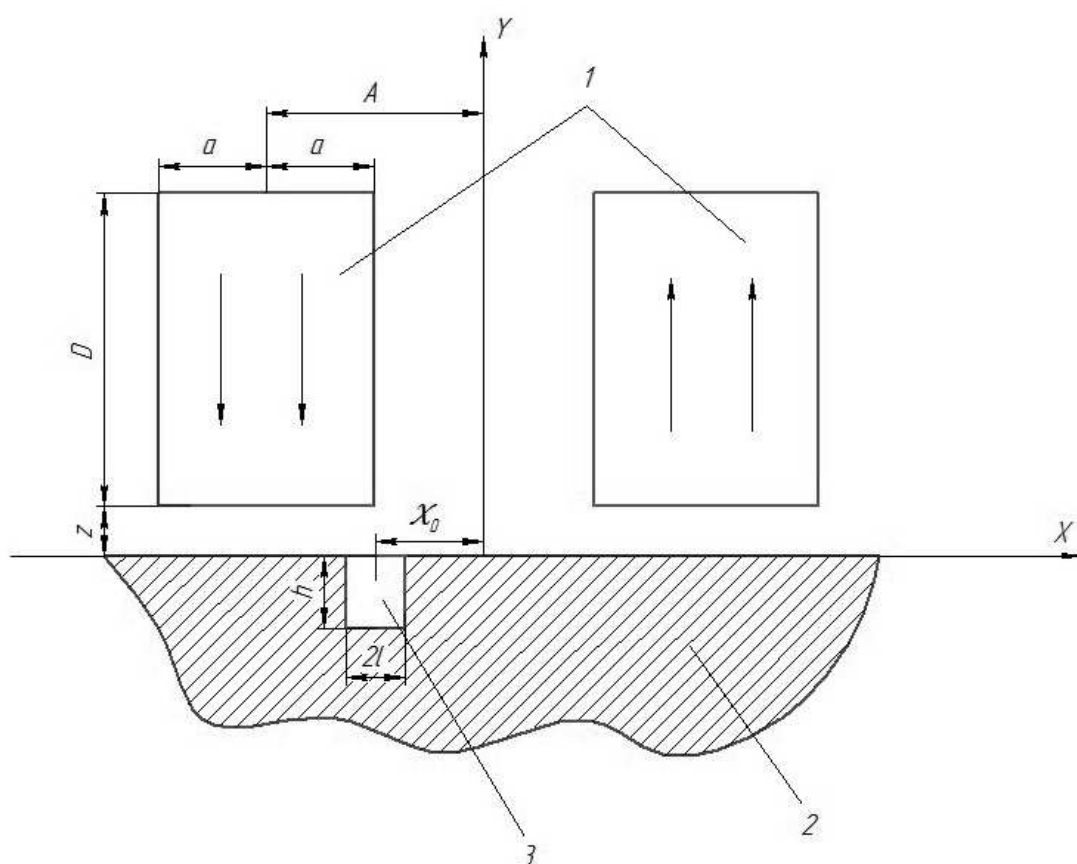


Рисунок 2.5 – Расчетная модель: 1-магниты; 2-ферромагнитный объект контроля; 3-дефект.

Источником намагничивающего поля является система из двух магнитов шириной $2a$ и высотой D , расположенных симметрично относительно начала координат на расстоянии $2(A-a)$ друг от друга и с зазором z до поверхности ферромагнитного объекта контроля. Поверхностный дефект шириной $2l$ и глубиной h смещен относительно центра намагничивающей системы на величину x_0 . Плотность $\sigma(x', y')$

магнитных зарядов образующихся на поверхности, при ряде допущений приближенно можно принять пропорциональной проекции H_0 на нормаль к поверхности в точке (x', y') , то есть $\sigma(x', y') = \kappa H_{0n}(x', y')$, где κ -коэффициент, зависящий от μ материала. Для упрощения расчетов примем также, что намагничивающее поле в полости дефекта однородно и равно значению поля в геометрическом центре дефекта.

В этом случае нормальными к граням дефекта составляющими напряженности намагничивающего поля являются составляющие $H_{0x}(x_0, h/2)$ и $H_{0y}(x_0, h/2)$, которые в случае задания H_0 с помощью магнитных зарядов σ_0 , распределенных на торцах магнитов имеют вид [32]:

$$H_{0x} = \sigma_0 \left\{ \ln \frac{[(x_0 - A_2)^2 + D_1^2][(x_0 - A_1)^2 + D_2^2]}{[(x_0 - A_1)^2 + D_1^2][(x_0 - A_2)^2 + D_2^2]} + \ln \frac{[(x_0 - A_2)^2 + D_1^2][(x_0 - A_1)^2 + D_2^2]}{[(x_0 - A_1)^2 + D_1^2][(x_0 - A_2)^2 + D_2^2]} \right\}; \quad (3)$$

$$H_{0y} = 2\sigma_0 \left\{ \operatorname{arctg} \frac{2aD_1}{D_1^2 + (x_0 - A)^2 - a^2} - \operatorname{arctg} \frac{2aD_1}{D_1^2 + (x_0 + A)^2 - a^2} + \operatorname{arctg} \frac{2aD_2}{D_2^2 + (x_0 + A)^2 - a^2} - \operatorname{arctg} \frac{2aD_2}{D_2^2 + (x_0 - A)^2 - a^2} \right\}, \quad (4)$$

$$\text{где } A_1 = A + a; A_2 = A - a; D_1 = 0,5h - D - z; D_2 = 0,5h - z.$$

Учитывая, что в выражении напряженности поля от заряженного элемента ds' поверхности дефекта $dH = 2\kappa H_{0n} ds'$ величина H_{0n} принимает два значения: H_{0x} — для вертикальных граней дефекта и H_{0y} — для параллельных поверхности объекта контроля граней, то указанное выражение можно переписать в более удобном для интегрирования виде:

$$dH = 2\kappa \left[H_{0x} \frac{r_i}{r_i^2} dy' + H_{0y} \frac{r_j}{r_j^2} dx' \right] \quad (5)$$

Индексы i и j означают суммирование по противоположащим граням, а r - радиус-вектор от элементарного заряда в точку наблюдения. Составляющие напряженности магнитного поля дефекта после интегрирования запишутся в виде:

$$H_x = \kappa \left\{ 2H_{0x} \left[\arctg \frac{hx_1}{x_1^2 + y(y+h)} - \arctg \frac{hx_2}{x_2^2 + y(y+h)} \right] - H_{0y} \ln \frac{(x_1^2 + y^2)[x_2^2 + (y+h)^2]}{(x_2^2 + y^2)[x_1^2 + (y+h)^2]} \right\}; \quad (6)$$

$$H_y = \kappa \left\{ H_{0x} \ln \frac{[x_1^2 + (y+h)^2](x_2^2 + y^2)}{[x_2^2 + (y+h)^2](x_1^2 + y^2)} - 2H_{0y} \left[\arctg \frac{2ly}{x_1x_2 + y^2} - \arctg \frac{2l(y+h)}{x_1x_2 + (y+h)^2} \right] \right\}, \quad (7)$$

где $x_1 = x - x_0 + l$; $x_2 = x - x_0 - l$.

Характерным в структуре полученных выражений является наличие функций двух типов: а) характеризующих поле намагничивающей системы (H_{0x} и H_{0y}) и б) характеризующих поле дефекта ($\ln$ и $\arctg$). Первые являются в (3) и (4) весовыми функциями, вторые описывают непосредственно распределение поля дефекта. Характерным является также наличие в (6) и (7) величины $x' = x - x_0$, являющейся координатой подвижной системы $X'OY$, связанной с центром дефекта [32].

В стационарном (постоянном) магнитном поле часть магнитных силовых линий прерывается на границе раздела двух сред (магнит – воздух и воздух–стенка изделия) с отличающимися значениями абсолютной магнитной проницаемости μ_i , причем нормальная H_{ni} составляющая напряженности H магнитного поля испытает скачок:

$$\begin{cases} \operatorname{div} B = \operatorname{div} \mu H \\ \operatorname{div} B = \mu_1 H_{n1} - \mu_2 H_{n2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Отсюда следует, что

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2} \quad (9)$$

Следовательно, на границе раздела двух сред происходит преломление магнитных силовых линий по закону тангенсов (рисунок 2.6).

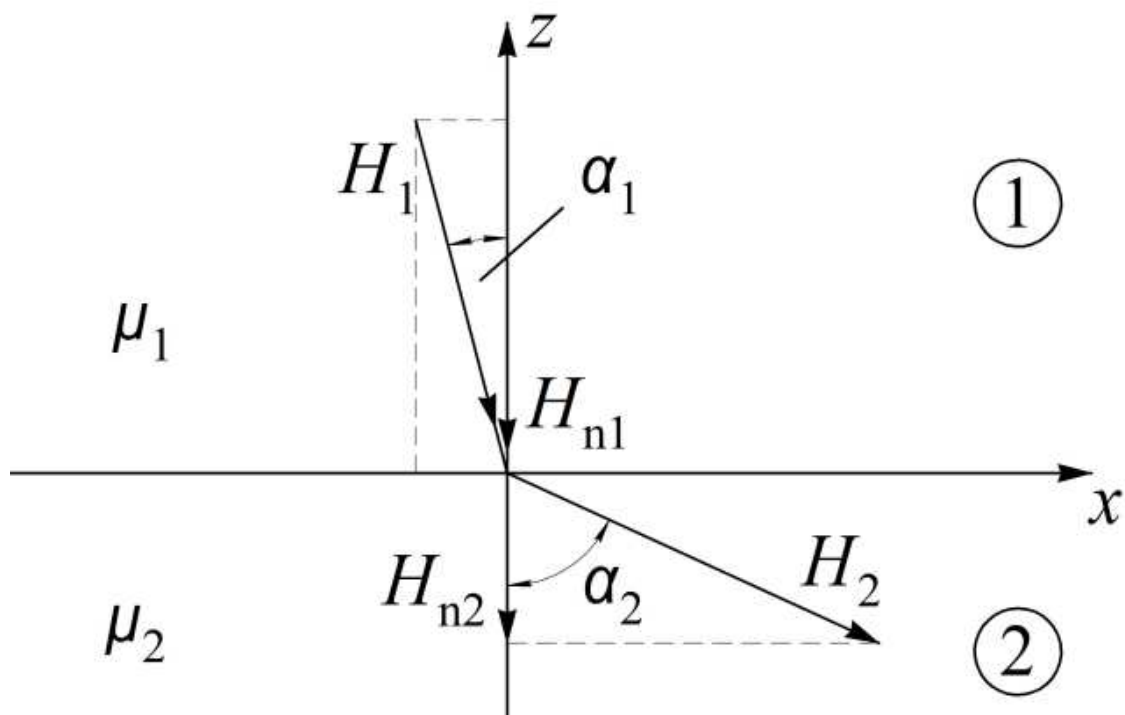


Рисунок 2.6 – Преломление (скачок) силовых линий на границе раздела двух сред.

На (рисунке 2.7 а, б) приведена картина магнитного поля постоянного магнита над ферромагнитным листом с относительной магнитной проницаемостью $\mu_{ст}$ [17]

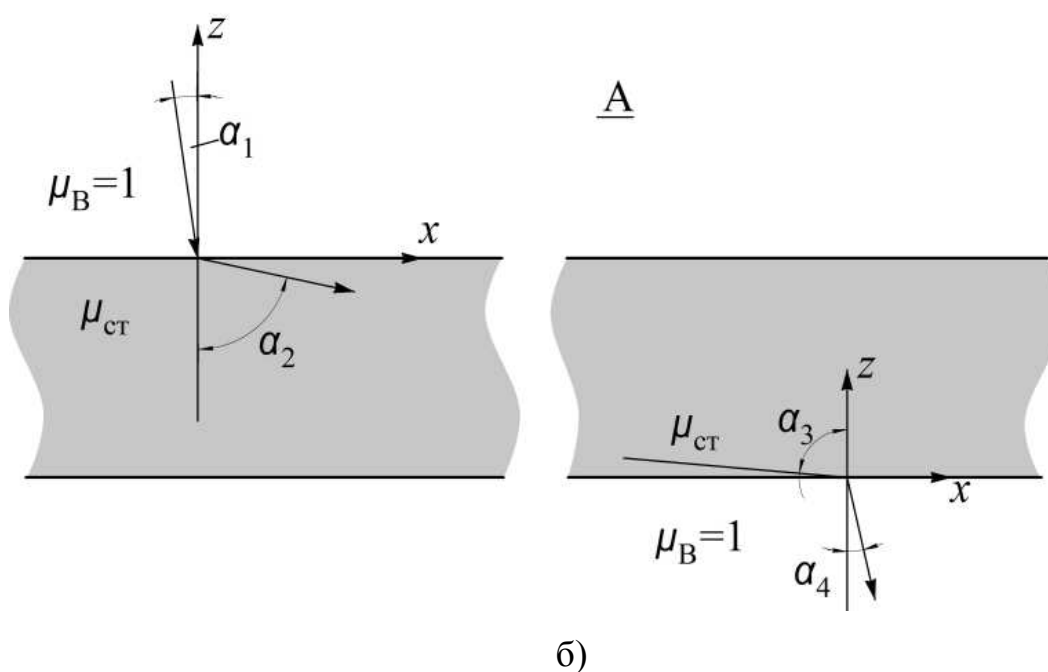
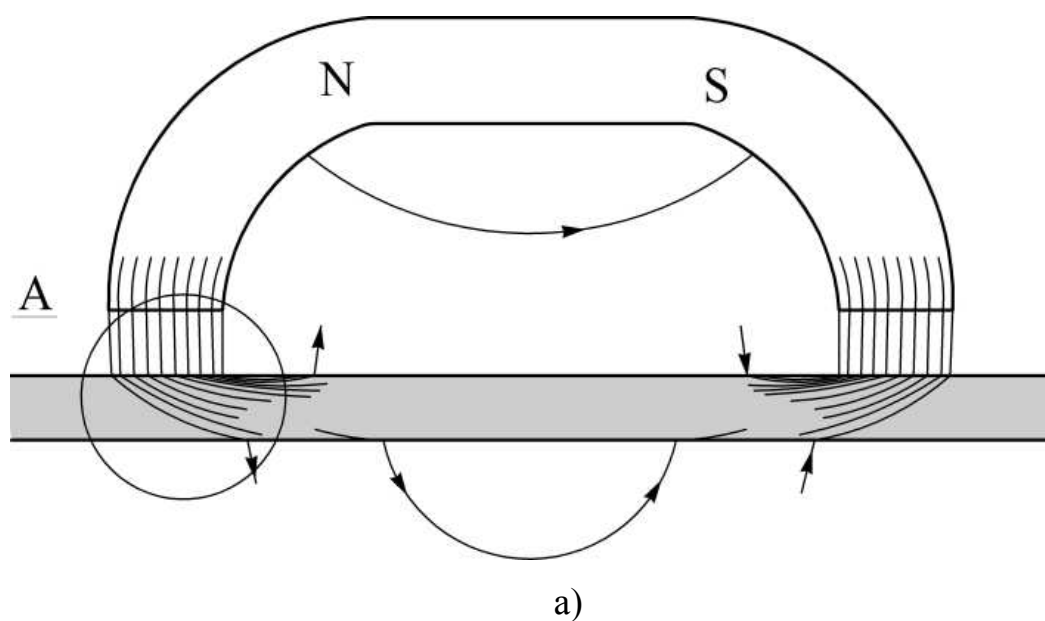


Рисунок 2.7– Картина силовых линий магнитного поля магнита над ферромагнитным листом (а) и увеличено участка А под полюсом магнита (б)

В сильных магнитных полях высокое значение магнитной проницаемости $\mu_{ст.} = \mu_{max}$ сталей приводит к тому, что снаружи (в воздухе, магнитная проницаемость которого $\mu_{в} = 1$) на границе раздела воздух/сталь силовые линии направлены перпендикулярно к поверхности, в то время как в материале изделия они стремятся проходить параллельно поверхности, что обеспечивает минимальное сопротивление магнитной цепи (рисунок 2.8.) [50].

В соответствии выше изложенным можно записать:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_4}{\operatorname{tg} \alpha_3} = \frac{1}{\mu_{\text{ст}}} \quad (10)$$

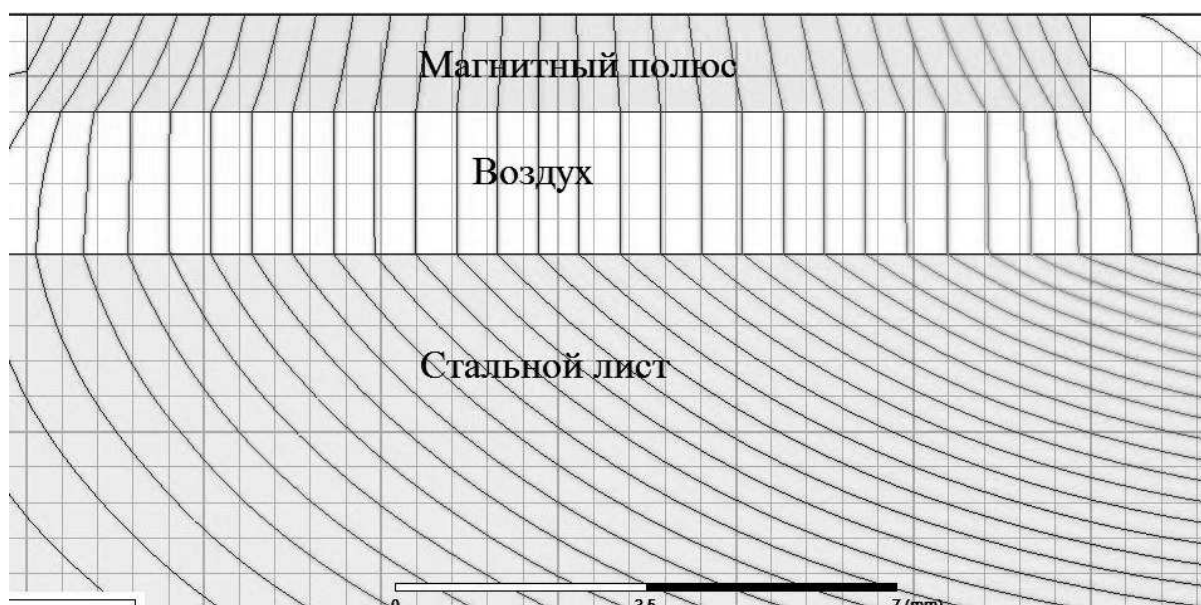


Рисунок 2.8 – Графическая схема направления силовых линий при переходе из одной среды в другую.

2.3 Характеристика физических процессов при использовании MFL – преобразователя для выявления коррозионных повреждений.

Обобщенная структурная схема MFL – преобразователя

Из вышесказанного, по аналогии, следует, что если в магнитное поле постоянного П-образного магнита поместить ферромагнитный лист с поверхностным дефектом, имитирующим коррозионное повреждение, то произойдет перераспределение магнитного потока Φ как в пределах профиля дефекта, так и в окружающей его зоне (рисунок 2.9)

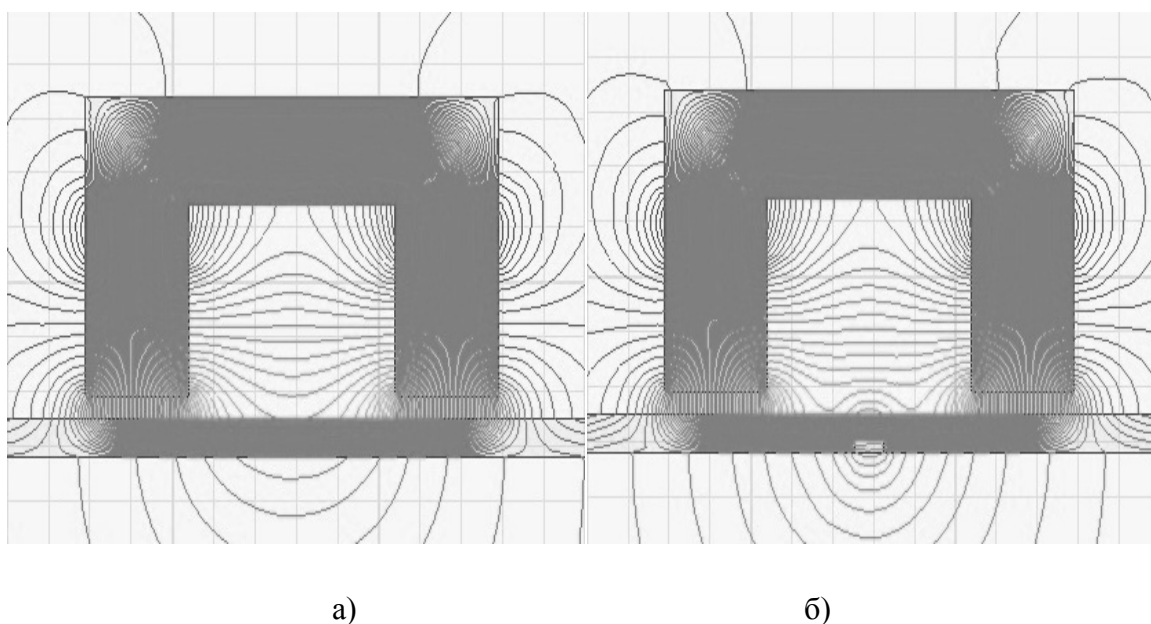


Рисунок 2.9 – Расчетная картина силовых линий магнитного поля на бездефектном участке стального листа (а) и линий магнитного поля рассеяния в районе искусственного дефекта (б).

Это обусловлено тем, что в части сечения листа, прерванного дефектом, из-за более высокого магнитного сопротивления в его воздушной полости плотность линий существенно снизится. Произойдет перераспределение магнитного потока в объеме образца и в прилегающей к дефекту области. При этом часть магнитных линий преодолеет дефект снаружи по воздуху, магнитное поле как бы «вытиснится» за поверхность образца. Каждый выход и вход силовых линий формирует магнитные полюсы, что соответствует классическим представлениям магнитостатики [34, 43, 44], когда каждый конец линии магнитной индукции на границе раздела ферромагнитный материал – воздух рассматривается как положительный «магнитный заряд» (северный полюс N) и, соответственно, отрицательный «магнитный заряд» (южный полюс S) на границе раздела воздух – ферромагнитный материал. Происходит магнитная поляризация стенок листа в районе дефекта и в примыкающей к нему области материала [19]. Каждый положительный «магнитный заряд» создает магнитное поле, направленное из него. При этом магнитные линии поля, выходящие за

пределы образца, снова входят в него, замыкаясь с отрицательными «магнитными зарядами».

В результате над поверхностью в зоне дефекта с обеих сторон намагниченной пластины формируется суммарное поле рассеяния H_d «магнитных зарядов» (рисунок 2.10.).

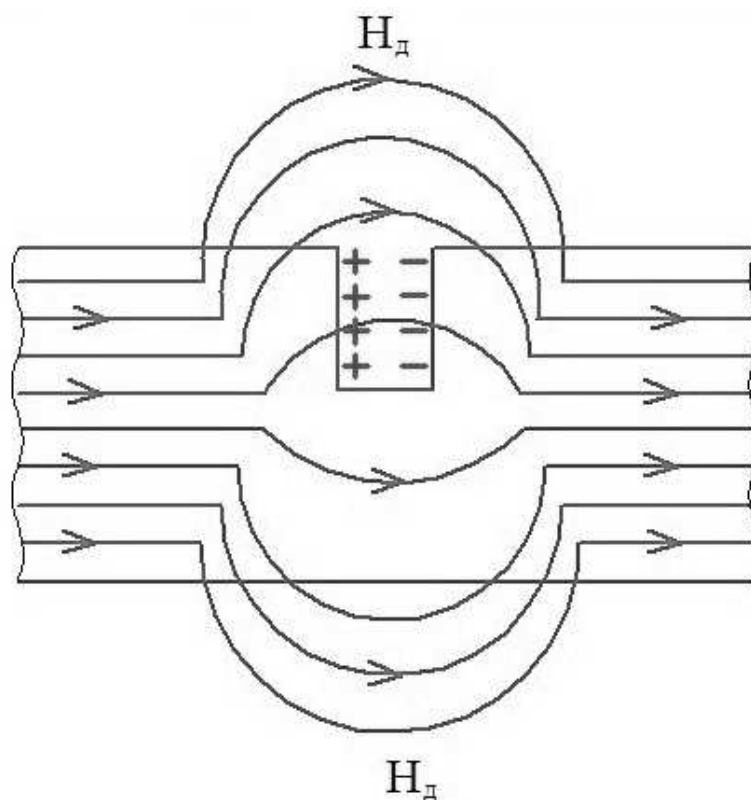


Рисунок 2.10 – Картина рассеивания суммарного поля H_d .

Суммарное поле H_d в соответствии с ГОСТ 24450 именуется магнитным полем рассеивания дефекта или полем дефекта. При «недостаточном» намагничивании бездефектного ферромагнитного листа в области дефекта не выявляются магнитные силовые линии на участках I-II, II-III. При «введении» бездефектного ферромагнитного листа в состояние, близкое к насыщению и в насыщении (участок IV) будут появляться «ложные» сигналы из-за локальной девиации магнитной проницаемости, шероховатости поверхности, наличия технических утонений и т.д. (мешающих параметров) [14].

Рассмотрим модель преобразователя (рисунок 2.11) со следующими размерами: длина магнита A , высота магнита C , высота ярма E , высота полюса D , расстояние между полюсами L , технологический зазор Z . Преобразователи предназначены для выявления плоскостной и питинговой коррозии изделий с толщиной T стенки от 6 до 16 мм. При $l \approx T$ гарантированно выявляются искусственные дефекты глубиной от $h = 1,8$ мм

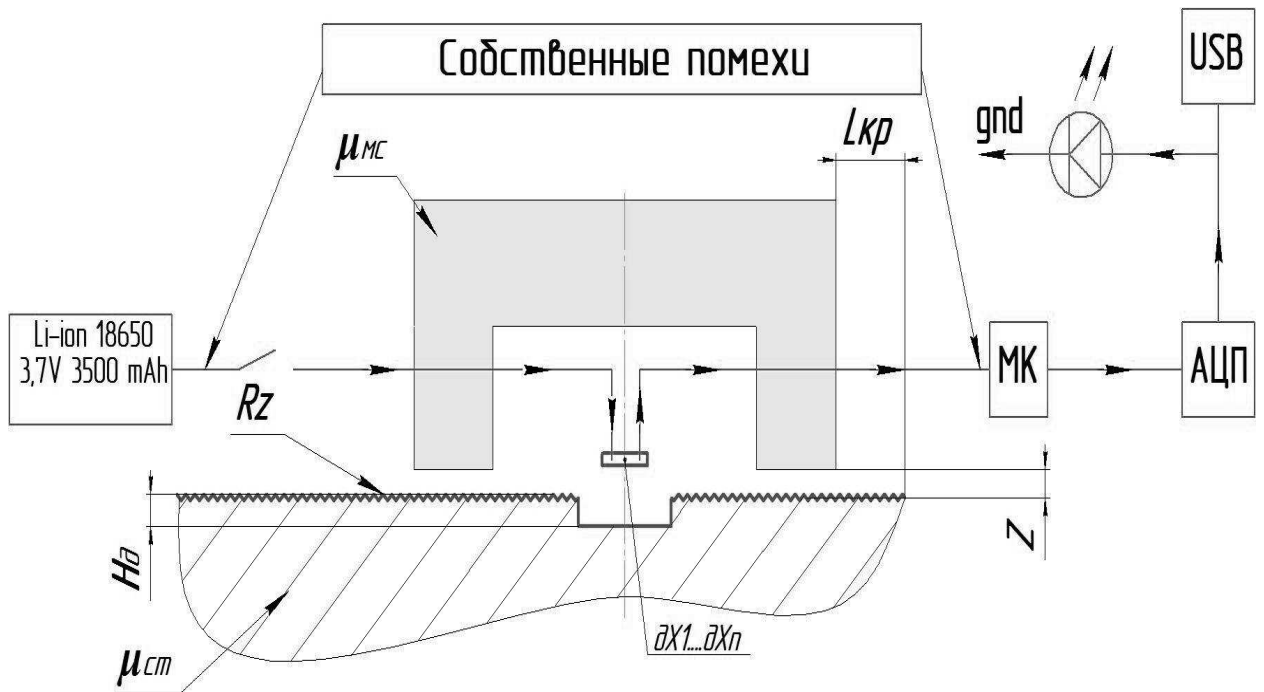


Рисунок 2.12 – Обобщенная структурная схема MFL – преобразователя. Контролируемый и мешающие параметры.

Для MFL – преобразователя можно выделить следующие основные мешающие параметры [63]:

- собственные помехи элементов схемы;
- шероховатость R_z поверхности объекта контроля;
- девиация зазора Z (в том числе за счет радиуса кривизны ОК);
- девиация магнитной проницаемости магнитной системы и ОК;
- расстояние $L_{кр.}$ от края магнитной системы преобразователя до края ОК (краевой эффект);

2.4 Выводы по главе 2

1. Рассмотрена технология магнитного вида неразрушающего контроля применительно к рассматриваемой задаче измерения остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров.
2. Представлена расчетно-теоретическая модель взаимодействия системы намагничивания MFL – преобразователя и объекта контроля.

3. Представлена структурная схема системы намагничивания MFL – преобразователя и объект контроля с искусственным дефектом в виде поперечного пропила, имитирующим коррозионное повреждение стенки.

4. Составлена обобщенная структурная схема MFL – преобразователя, с учетом контролируемого и мешающих параметров.

ГЛАВА 3 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ MFL - ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

3.1 Математическое моделирование системы намагничивания MFL – преобразователя и ферромагнитного листа с искусственным дефектом

В связи с появлением достаточно мощных вычислительных средств на базе ЭВМ в последнее время широкое распространение получили модели, построенные на основании численных методов. С помощью численных методов возможно моделирование магнитных полей рассеяния в объектах произвольной формы.

На сегодняшний день широко применяются три основных универсальных метода численного решения задач магнитостатики: метод конечных элементов (МКЭ), конечно-разностный метод (МКР) и метод интегральных уравнений (МИУ). Довольно трудно однозначно сказать какой из методов расчета предпочтительней, однако, в области расчета магнитных полей применительно к задачам намагничивания различных изделий лучшие практические результаты получены при использовании МКЭ.

Главная идея МКЭ заключается в том, что искомая непрерывная в области функция аппроксимируется дискретной моделью, построенной на множестве простейших функций в конечном числе подобластей. МКЭ относится к вариационно-сеточному методу, состоящему в удовлетворении искомой функции тождеству для обобщенного решения рассматриваемой задачи на множестве кусочно-полиномиальных функций [37]. Сложная криволинейная область сравнительно просто аппроксимируется с помощью прямолинейных элементов или описывается точно криволинейными элементами. Не представляют труда измельчение сетки в области повышенных градиентов поля и учет граничных условий различного типа.

Существенными недостатками МКЭ, являются необходимость введения сетки и расчет значений функций в узловых точках во всей области, ограничение которой возможно либо при известных граничных значениях функций, либо при начальном приближении задании граничных значений и последовательной их коррекции в процессе расчета. Формирование матриц расчетных уравнений и определение выходных параметров в МКЭ сводится к простейшим алгебраическим операциям и не приводит к большим вычислительным затратам, в чем просматривается одно из основных преимуществ этого метода. Матрицы получаются ленточными.

Анализ точности и производительности того или иного численного метода представляет большой научный интерес, однако в данной работе они используются лишь как средство для решения поставленных задач и в дальнейшем не рассматриваются [21].

На сегодняшний день, наиболее популярными программами для решения задач магнитостатики, использующие численные методы, являются *FEMM* [4], *Maxwell* [1], *MagNet* [5] и многие другие.

На рисунке 3.1 представлена модель магнитной системы и стального листа с сконфигурированной сеткой конечных элементов в программе *Maxwell* 14.0 с использованием встроенного класса функций *Magnetostatic*. Стальной лист толщиной 6 мм с длиной 500 мм и бесконечной шириной.

Магнитная система MFL – дефектоскопа, с чувствительным элементом в точке наблюдения описывается двухмерной осесимметричной моделью.

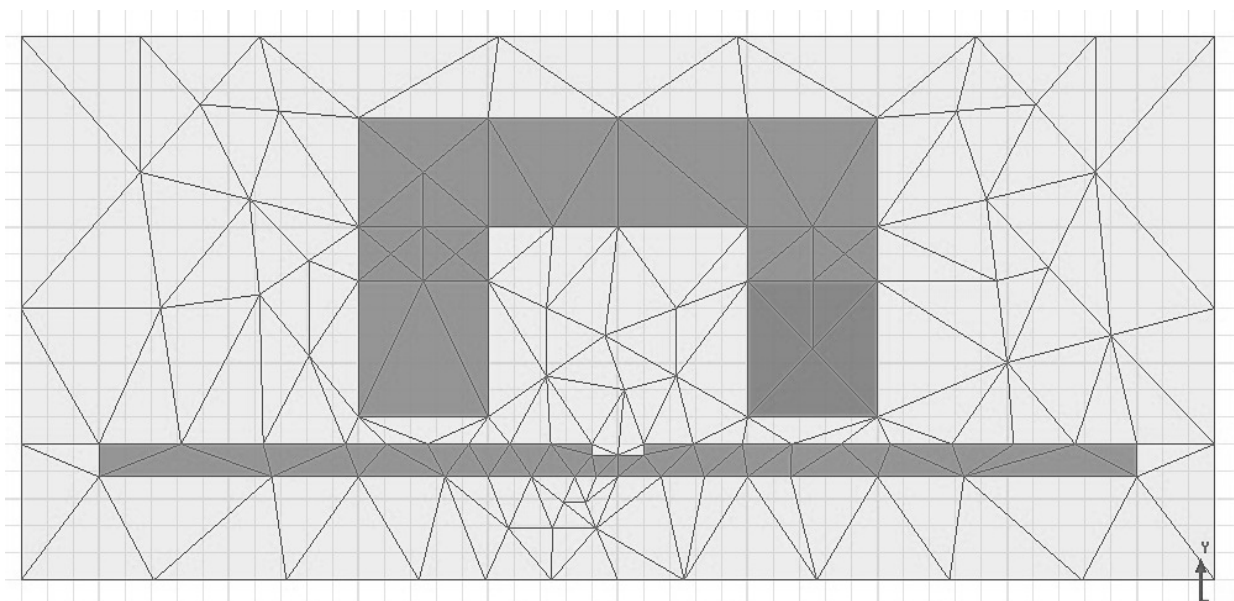


Рисунок 3.1 – Модель магнитной системы и стального листа с сконфигурированной сеткой конечных элементов.

Искомые значения параметров будем рассчитывать в узловых точках (узлах) – общих точках конечных элементов [12]. Скалярный магнитный потенциал φ^M каждого конечного элемента представим в виде полинома, с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами

$$\varphi^M = a_i + b_i x + c_i y \quad (11)$$

Основная задача расчета методом конечных элементов – определить коэффициенты a_i , b_i , c_i . После нахождения коэффициентов появляется возможность рассчитать магнитный потенциал в любой точке пространства модели. Исходные данные, дополненные граничными условиями, и энергетические зависимости приводят к системе алгебраических уравнений, которая позволяет рассчитать искомые коэффициенты полиномов во всех конечных элементах [55].

Применительно к рассматриваемой задаче при граничных условиях первого рода (условия Дирихле) минимизируемым функционалом является величина, пропорциональная запасенной в пространстве магнитной энергии:

$$W_M = 0,5 \cdot \int \mu \mu_0 H^2 dv, \quad (12)$$

Так как $H = -\text{grad}\varphi^M$, то минимизируемый функционал можно записать в виде:

$$W_M = 0,5 \cdot \int \mu \mu_0 (\text{grad}\varphi^M)^2 dv, \quad (13)$$

а искомой (минимизирующей) функцией будет $\varphi^M(\xi, \zeta, \eta)$, при которой $W_M\{\varphi^M\} \Rightarrow \min$. В качестве функционала выступает сумма магнитных энергий, накопленных во всех конечных элементах. В данной модели элементы соприкасаются в общих, узловых, точках. Энергия элементов определяется магнитными потенциалами узловых точек $W = W\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$, где N – число точек [8].

На основании анализа и определения магнитных потенциалов [3], общих узловых, точек, при которых W_M минимальна, формируется система алгебраических уравнений, рассчитываются магнитные потенциалы, вычисляются магнитная индукция и напряженность магнитного поля [7].

При рассмотрении модели можно принять следующие допущения [6]:

- в достаточно удаленной от преобразователя зоне создаваемое им магнитное поле бесконечно мало;
- модель полностью стационарна (отсутствует временной и температурный дрейф физических характеристик преобразователя);
- отсутствуют внешние магнитные поля;
- характеристика намагничивания ферромагнитных частей модели преобразователя не линейная, характерен гистерезис.
- относительная магнитная проницаемость стали $\mu_{ст} = 4000$, относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu_{в} = 1$, все среды изотропны.
- отсутствуют вихревые токи.

Согласно первым двум допущениям, в качестве граничных условий для моделей, рассматриваемых преобразователей можно назначить граничные условия первого рода. В рассматриваемой задаче это граничное условие применимо для задания нулевого значения нормальной составляющей вектора магнитной индукции на оси симметрии (в точке наблюдения) и для

указания полного затухания поля на условно бесконечно удаленных от преобразователя границах. Варьируемыми параметрами будут толщина листа T , относительная координата $x^* = x/T$, относительная глубина $h^* = h/T$ при постоянной относительной ширине пропила $l^* = l/T = 1$. При расчетах примем величину конструктивную зазора $Z = 5$ мм, а магнитную индукцию в магнитопроводе $B_m \approx 1,12$ Тл. [10].

На рисунке 3.2 представлена цветовая картина направления и распространения плотности магнитного потока.

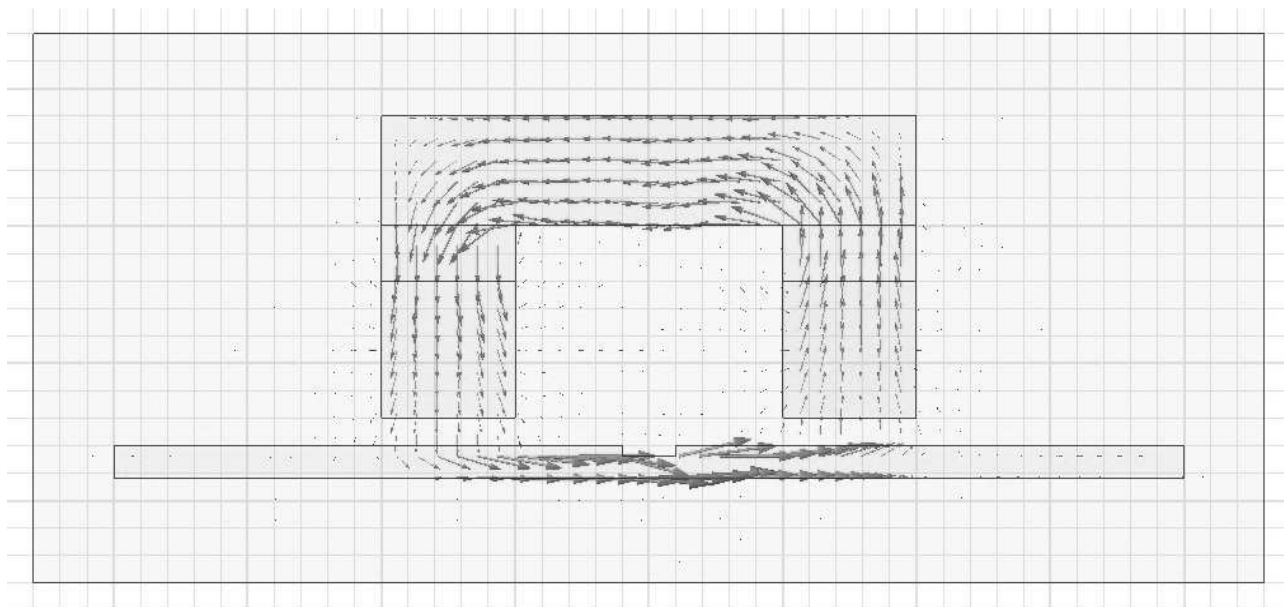


Рисунок 3.2 – Картина направления и распространения плотности магнитного потока.

Плотность магнитного потока максимальна между магнитными полюсами, и убывает при увеличении объема стального листа.

3.2 Основные методические принципы построения MFL – преобразователей, обеспечивающих оптимальную чувствительность при контроле

В [9] показано, что эффективное использование технологии MFL для конкретных объектов предполагает проектирование оптимальной, отвечающей конкретной задаче, измерительной системы, применение

специальных методов обработки измерительной информации и адекватной интерпретации результатов.

Вероятно, что не для всех точек диапазонов изменения T и h чувствительность преобразователя, характеризуемая изменением амплитуды $B_z(h)$ в зоне коррозионного повреждения, будет оптимальной.

Исходя из этого, необходимо произвести расчеты и проанализировать полученные изменения магнитной проницаемости μ в области намагничивания объекта контроля (стального листа). Для этого была построена модель магнитной системы MFL преобразователя и объекта контроля в виде бездефектного стального листа, а также расставлены точки наблюдения, в которых проводились расчеты магнитной проницаемости (рисунок 3.3).

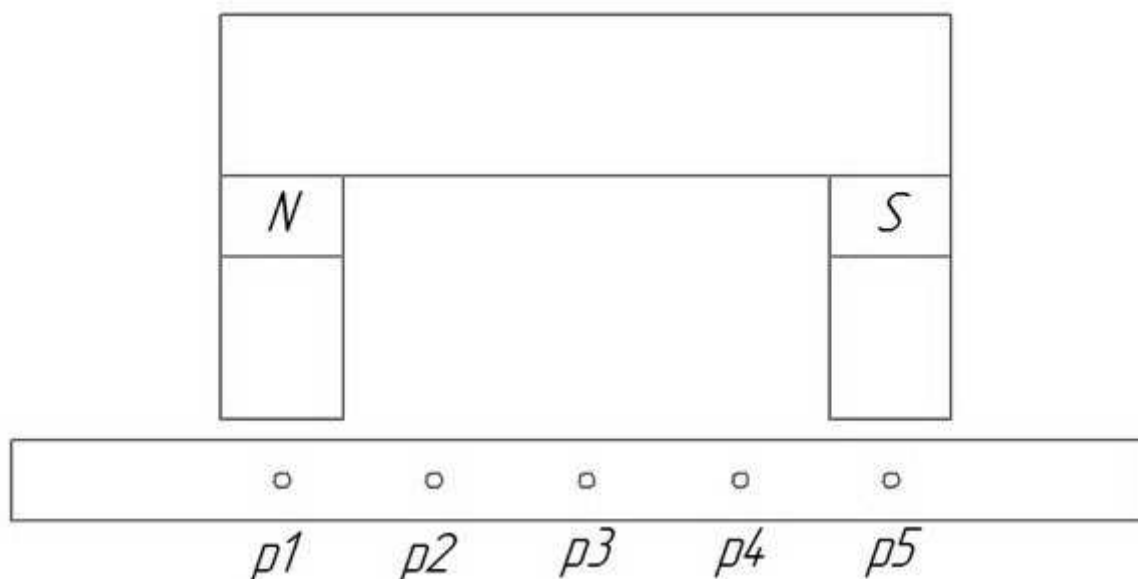


Рисунок 3.3 – Схема расположения точек, в которых производились замеры магнитной проницаемости.

При расчетах варьировалась толщина объекта контроля 2, 4, 6, 10 мм. На рисунке 3.4 видно, как меняется магнитная индукция в области намагничивания. При толщинах 2 и 4 мм $\mu \rightarrow 1$ следовательно, плотность магнитного потока возрастает и состояние материала листа близится к насыщению.

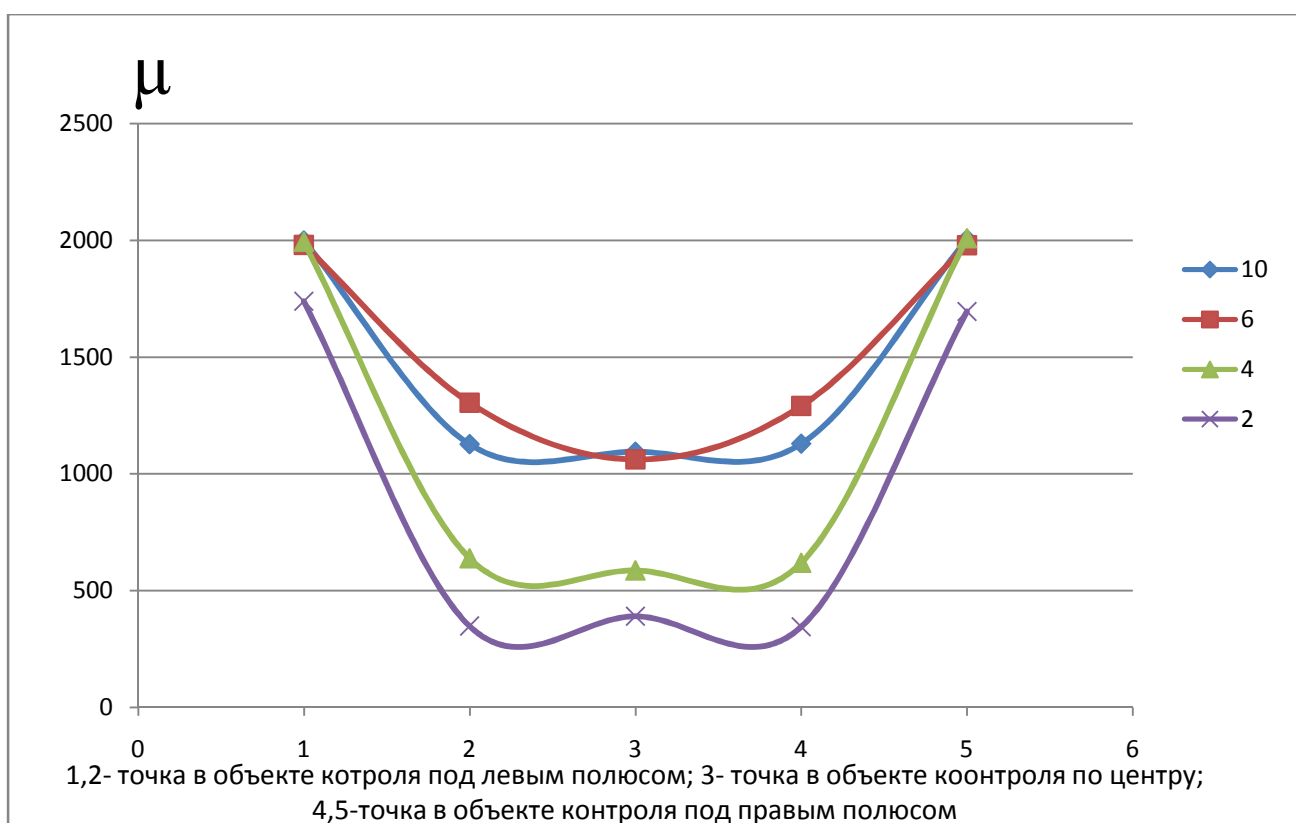


Рисунок 3.4 – Зависимость магнитной проницаемости μ от положения точки наблюдения при намагничивании бездефектного стального листа.

Из вышесказанного следует, что при наличии дефекта 40% на образцах толщиной 2 и 4 мм магнитное поле рассеивания дефекта и количество вытесненных силовых линий будут больше, т.к. плотность магнитного потока в материале листа выше (рисунок 3.5)

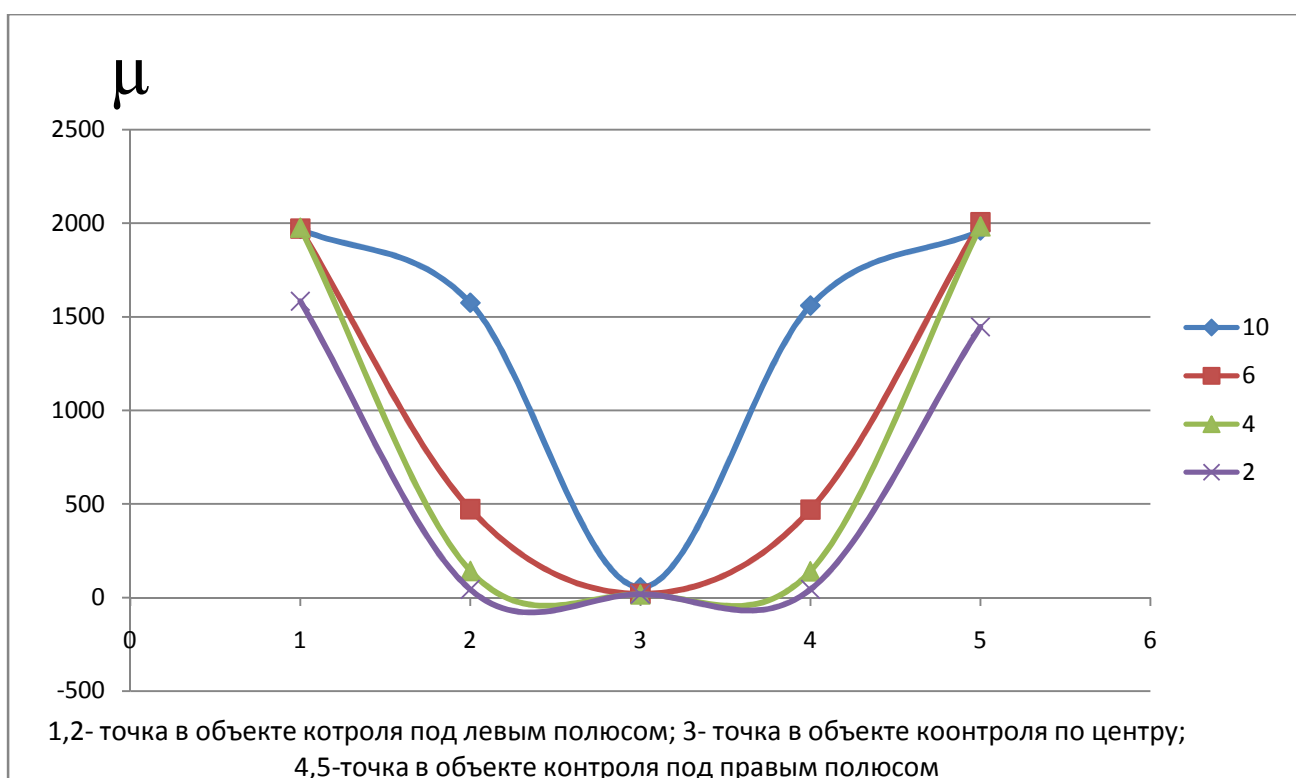


Рисунок 3.5 – Зависимость магнитной проницаемости μ от положения точки наблюдения при намагничивании стального листа с дефектом 40% в виде поперечного пропила.

При построении магнитной системы необходимо учитывать такие параметры, как величина зазор Z и расстояние между магнитными полюсами L .

На рисунке 3.6 представлена зависимость видно, чем меньше высота зазора, тем больше индукция в точке измерения. Это связано с тем, что при приближении полюсов магнитов большее количество силовых линии проникают в стальной лист, следовательно, при их вытеснении в области дефекта увеличивается плотность потока рассеивания.

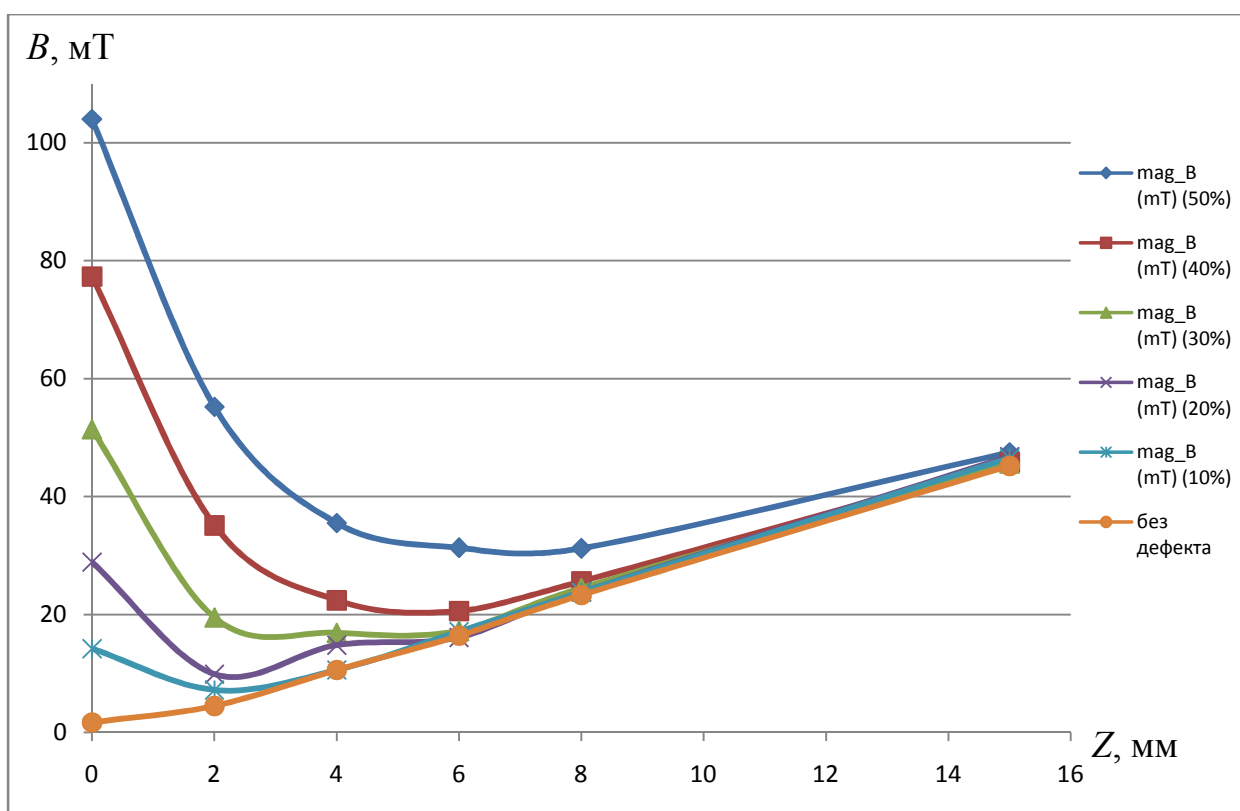


Рисунок 3.6 – График зависимости магнитной индукции B от изменения зазора Z , при наличии дефектов 10,20,30,40,50% и на без дефектом участке стального листа.

Анализ расчетов показал, что при большом удалении от объекта контроля, магнитная индукция начинает расти, это связано с тем, что большая часть силовых линий, которые направлены не в сторону объекта контроля пронизывает чувствительный элемент (рисунки 3.7 и 3.8).

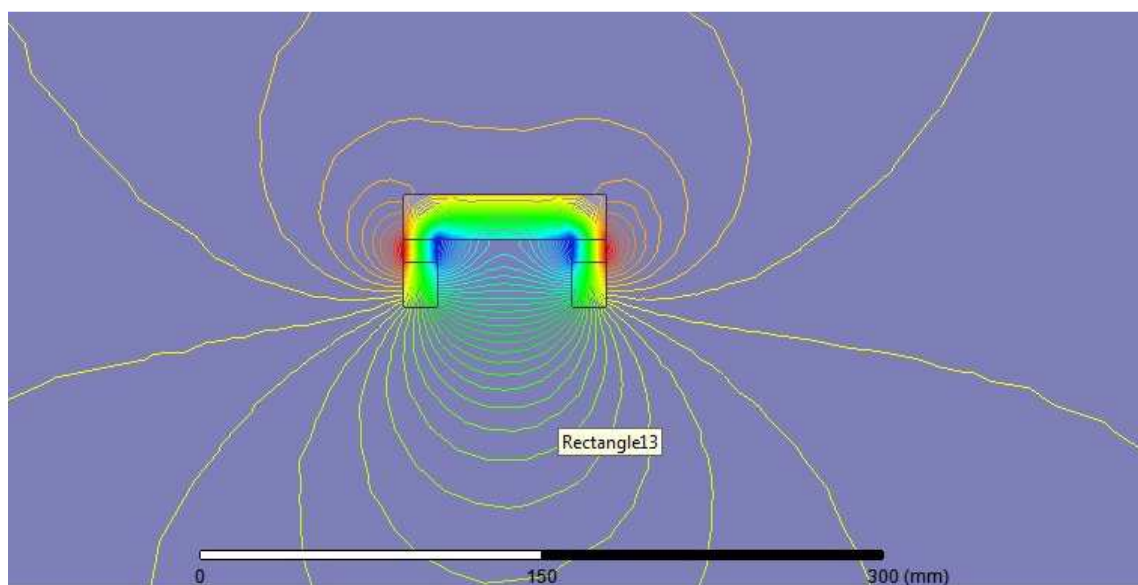


Рисунок 3.7 – Картина линий магнитного поля без объекта контроля.

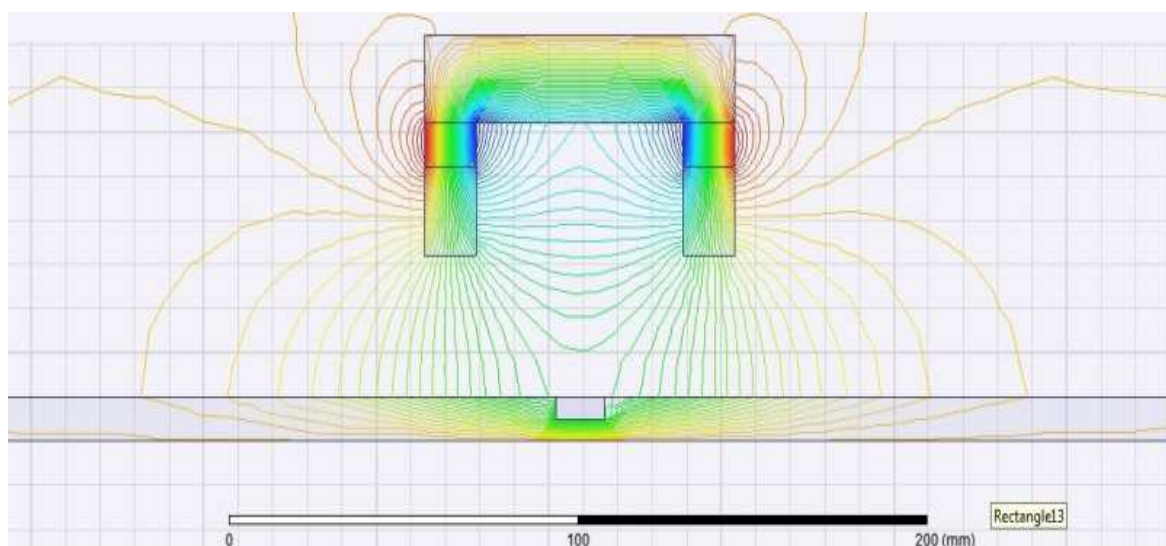


Рисунок 3.8 – Картина линий магнитного поля вдали от объекта контроля.

Изменялись расстояние между полюсами L и глубина дефекта h при этом измерялась магнитная индукция в месте расположения чувствительного элемента. Расстояния L между полюсами выбирались 20, 40, 60, 80, 100, 150 мм.

Глубина дефекта h выбиралась 0, 10, 20, 30, 40, 50 % от толщины объекта контроля.

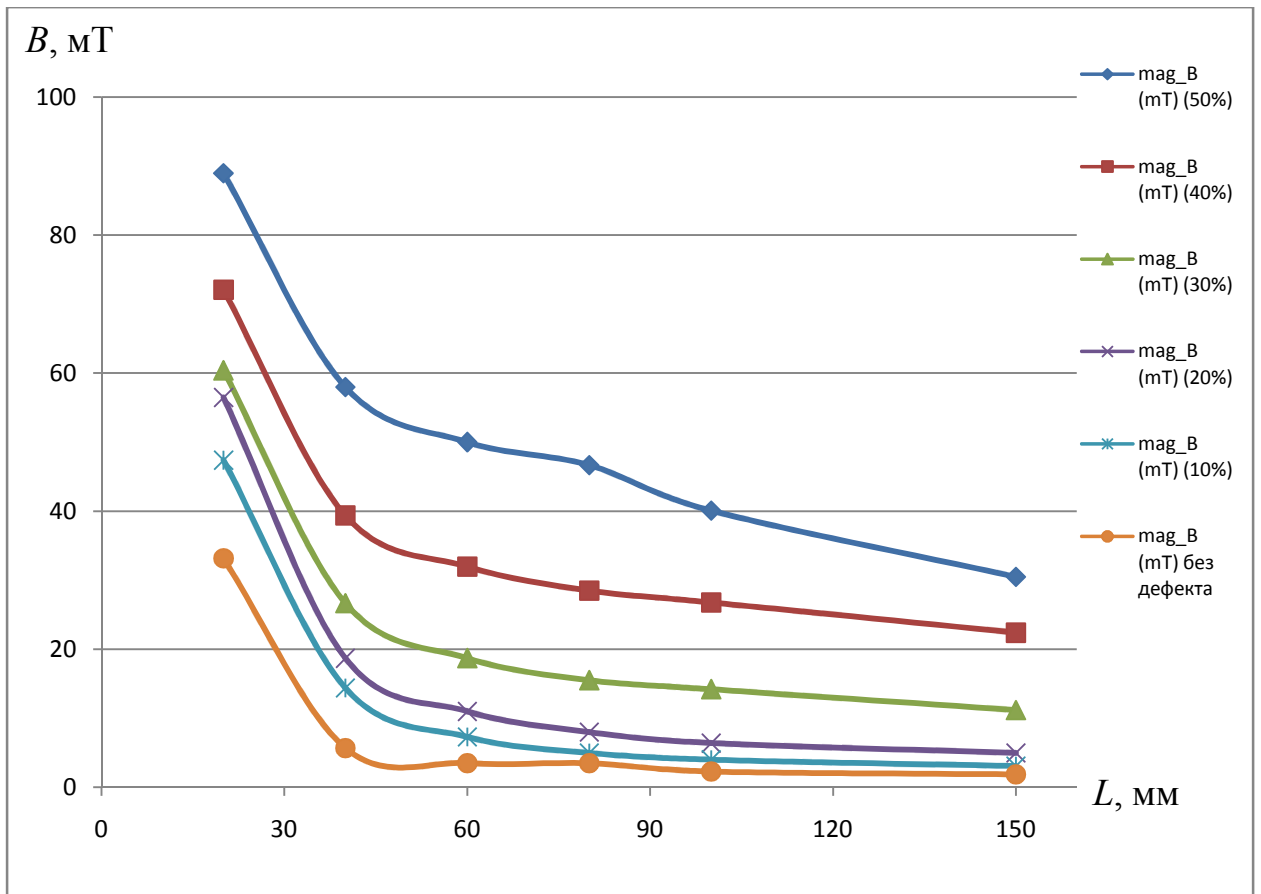


Рисунок 3.9 – Зависимости изменения магнитной индукции B от расстояния между магнитными полюсами L на стальном листе с дефектами 10%, 20%, 30%, 40%, 50%.

На рисунке 3.9 видно, что при наименьшем расстоянии между полюсами магнита значение магнитной индукции растет. Оптимальным является расстояние от 40 до 60 мм. При L более 60 мм значение магнитной индукции B значительно уменьшается, а при L менее 40 мм силовые линии начинают проходить напрямую между полюсами магнитов.

Основные показатели качества преобразователей :

- чувствительность преобразователя $d/dh(B_z(h, T))$, определяющая погрешность измерения $\Delta h(h, T)$, а также диапазон измерения $h_{\min}$ - $h_{\max}$;
- минимально возможные размеры магнитопровода, обеспечивающие заданные $\Delta h(h, T)$ и $h_{\min}$ - $h_{\max}$ в требуемом диапазоне толщин $T_{\min}$ - $T_{\max}$;
- массогабаритные и эргономические характеристики.

На рисунке 3.10 в качестве примера представлены расчетные зависимости $B_z(h^*, x^*)$ при симметричном относительном пропила

положении преобразователя для $Z = 5$ мм и $T = 8$ мм, из которых видно, что максимальное значение $B_{zm}(h^*)$ достигается на краях пропила при $|x^*| \approx 0,5$, а в области центра пропила $B_z(h^*, x^* = 0) \approx 0$ [53].

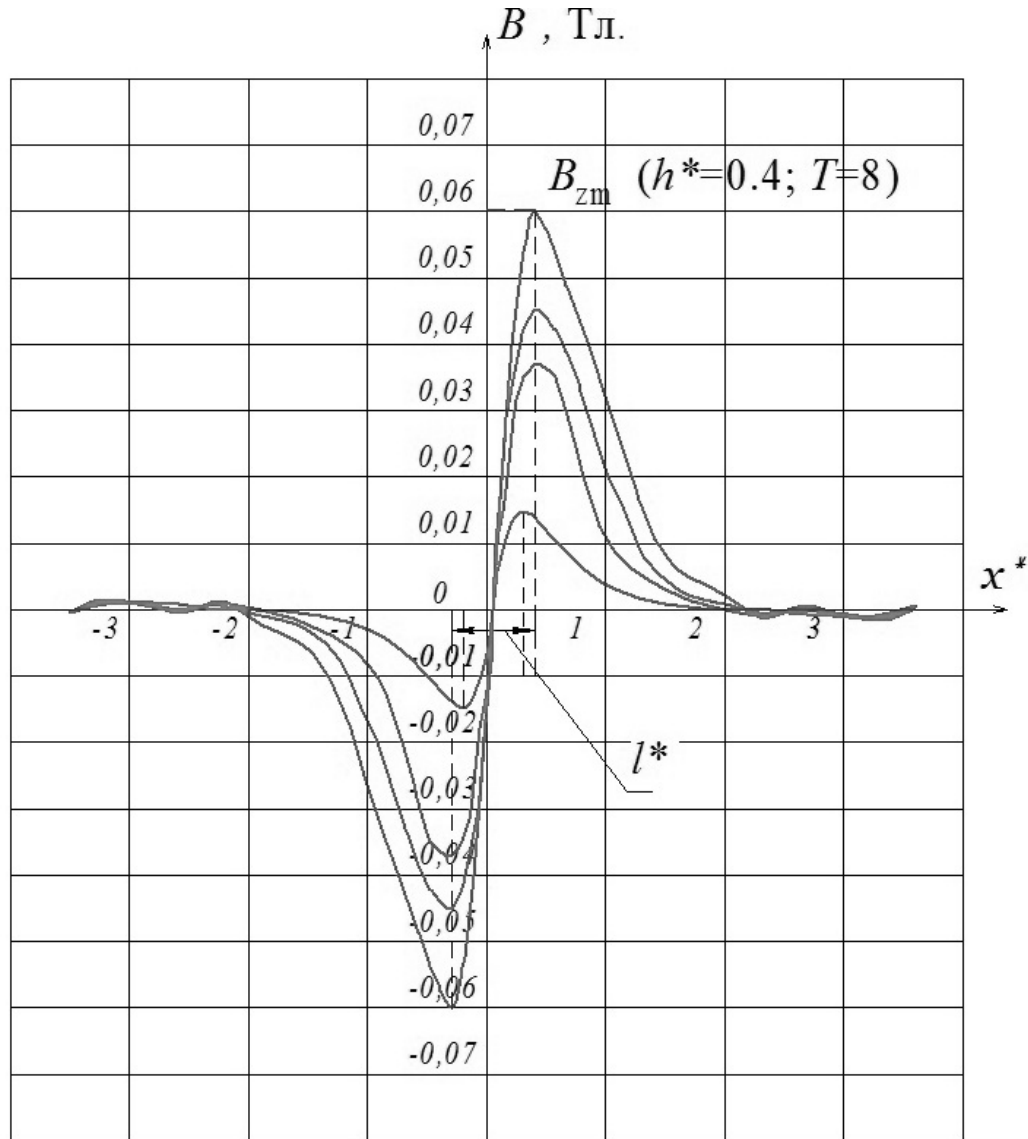


Рисунок 3.10 – Зависимость $B_z(h^*, x^*)$ над листом из стали 1010 толщиной $T = 8$ мм в районе поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм.

На рисунке 3.11 представлены расчетные зависимости $B_{zm}(h^*, T)$ для рассматриваемой модели преобразователя над ферромагнитным листом из стали 1010 (аналог Ст10) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила.

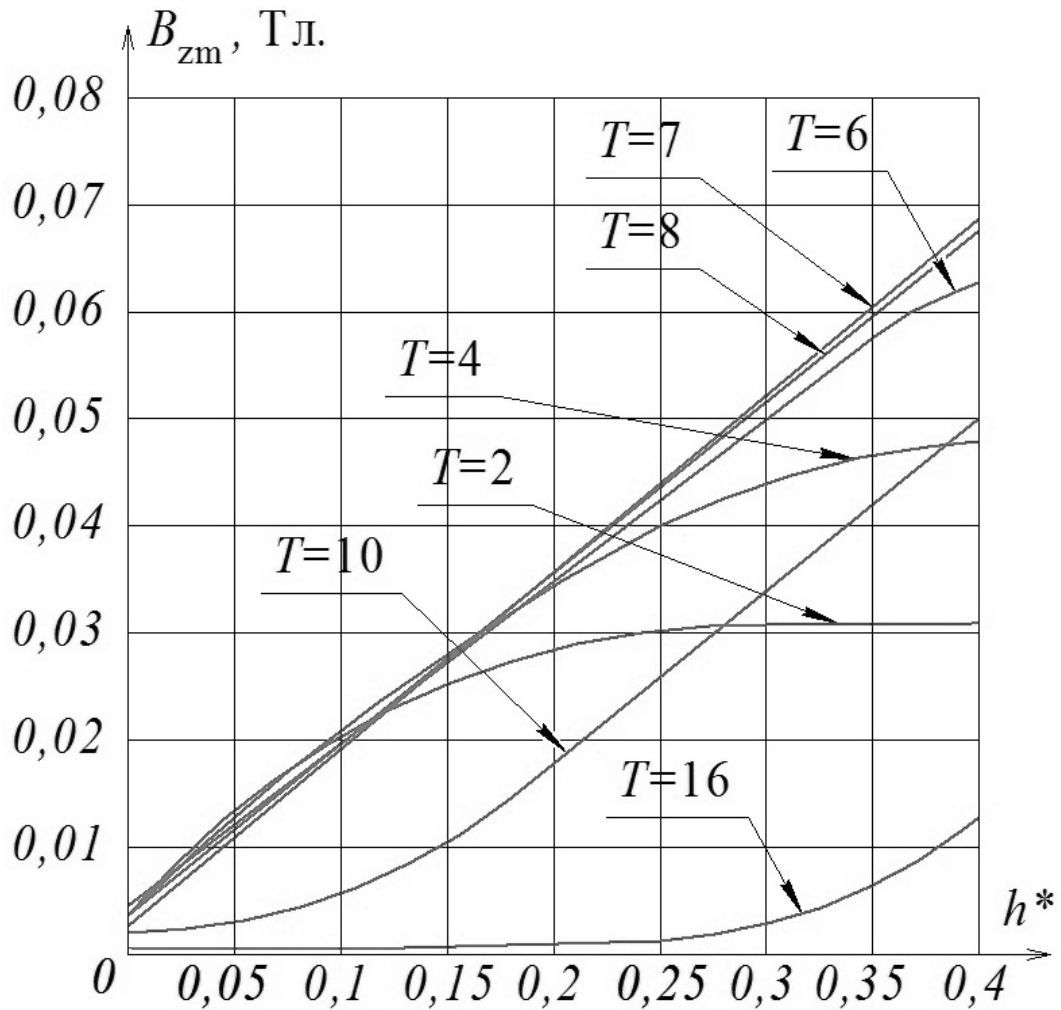


Рисунок 3.11 – Зависимость $B_{zm}(h^*, T)$ над листом из стали 1010 с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм.

Из рисунка 3.11 видно, что в диапазоне $h^* \approx 0,05 - 0,4$ преобразователь имеет наибольшую чувствительность при $T \approx 6 - 8$ мм. Если $T < 4$ мм, то наблюдается существенная нелинейность характеристики и уменьшение чувствительности при $h^* > 0,1 - 0,2$. Это объясняется тем, что вследствие полного насыщения стального листа, часть магнитного потока начинает проходить по воздуху от полюса к полюсу, при этом возникают магнитные поля создающие помехи (рисунок 3.12).

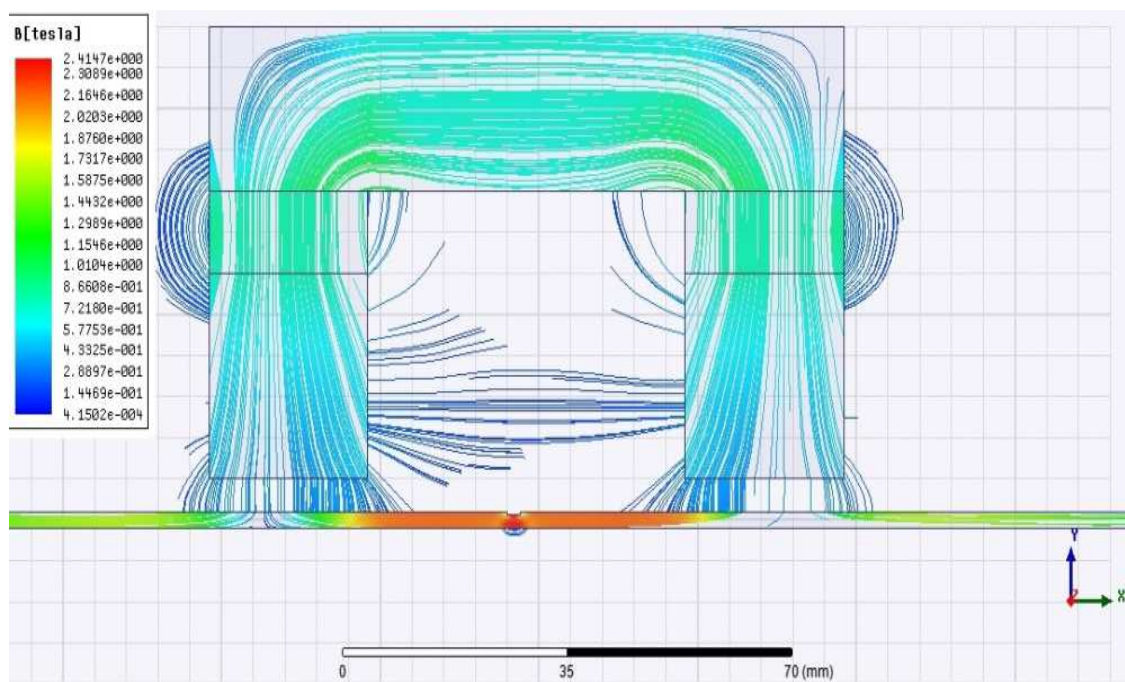


Рисунок 3.12 – Цветовая картина распространения плотности магнитного потока в объеме стального листа $T = 3$ мм.

При $T > 10$ преобразователь практически полностью теряет чувствительность в области $h^* < 0,15$. Это связано с тем, что плотности магнитного потока не достаточно для рассеяния (рисунок 3.13.). Объект контроля не находится в состоянии близком к насыщению.

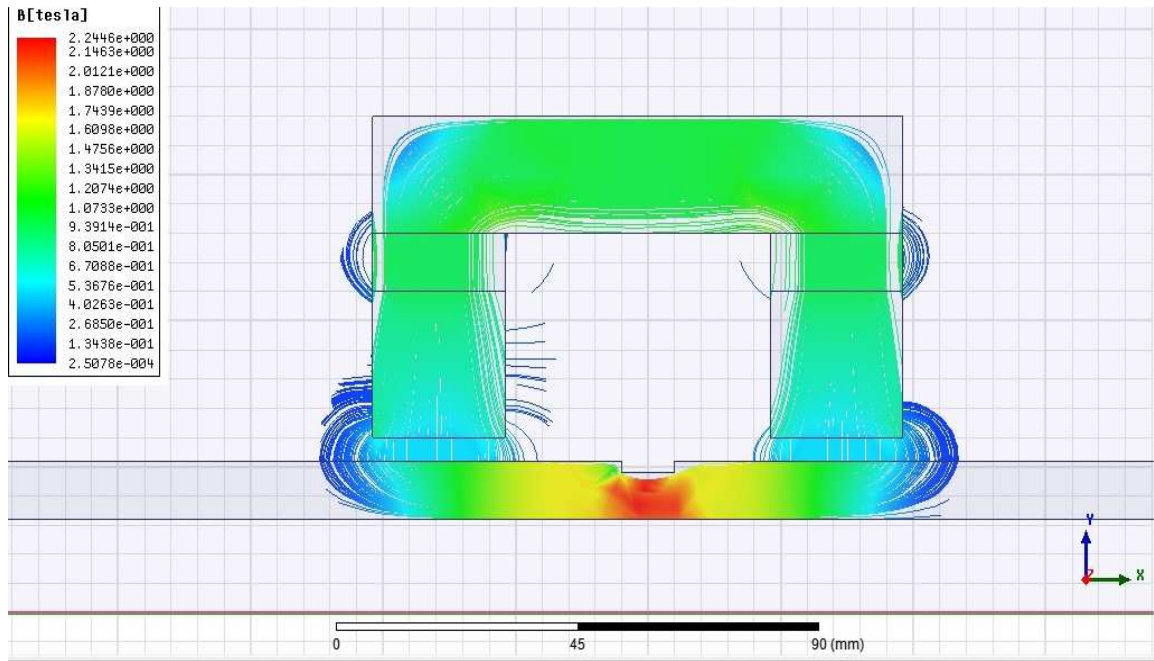


Рисунок 3.13 – Цветовая картина распространения плотности магнитного потока в объеме стального листа $T = 12$ мм.

Расчеты показывают, что для $h^* \approx 0,05 - 0,35$ близкие характеристики обеспечиваются в диапазоне $T \approx 5 - 9$ мм. Из этого можно сделать вывод о величине оптимальной намагниченности металла для проведения контроля.

На рисунке 3.14 приведены расчетные значения магнитной индукции $B_m(a)$ и относительной магнитной проницаемости μ (б) металла листа при его намагничивании преобразователем, в зависимости от T , для сталей марок 1010 и 1008 (близкой по характеристикам к Ст. 10) в зоне установки чувствительного элемента при $h^* = 0$. В соответствии с выше сказанным оптимальной является величина $1,9 < B_m < 2,05$ Тл. Для проведения контроля металл следует намагничивать до величины, соответствующей $30 < \mu < 70$ [53].

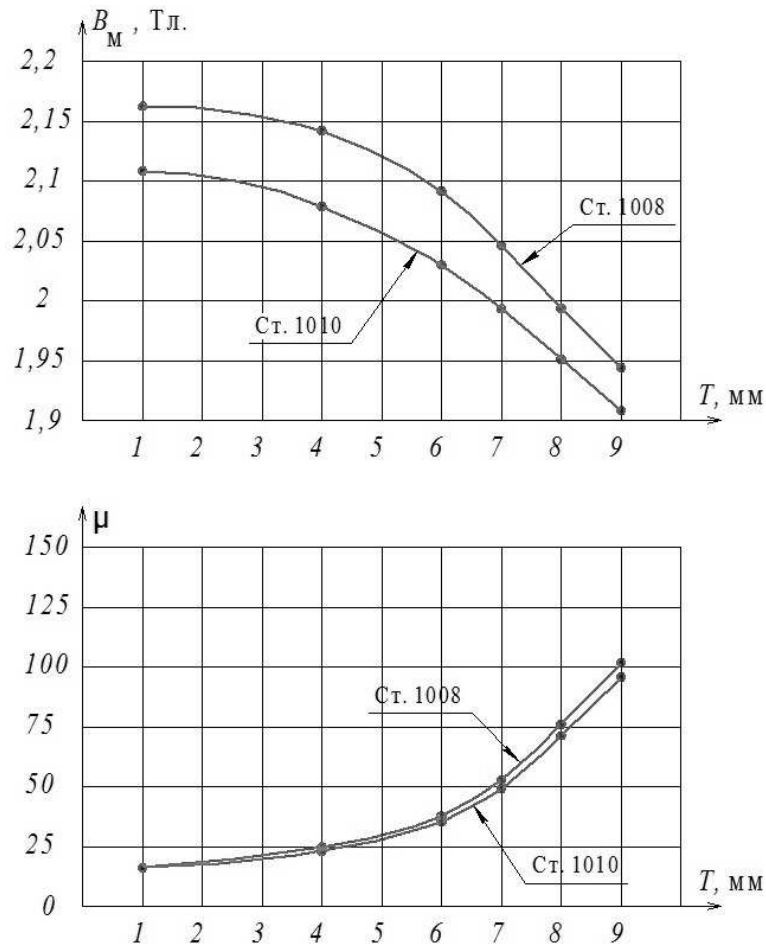


Рисунок 3.14 – Зависимость магнитной индукции B_m (а) и относительной магнитной проницаемости μ (б) в металле листа от его толщины T в зоне установки чувствительного элемента.

Введем относительные размеры преобразователя: $A^* = A/T$, $C^* = C/T$, $E^* = E/T$, $D^* = D/T$, $L^* = L/T$, $Z^* = Z/T$. При $T_0 = 7$ мм для рассматриваемого преобразователя обозначим как оптимальные: $A_0^* = 3,57$, $C_0^* = 1,43$, $E_0^* = 2,86$, $D_0^* = 3,57$, $L_0^* = 7,14$, $Z_0^* = 0,71$. В диапазоне контроля ΔT от 5 до 9 мм относительные размеры преобразователя будут изменяться в пределах: $\Delta A^* \sim (5 - 2,77)$, $\Delta C^* \sim (2 - 1,11)$, $\Delta E^* \sim (4 - 2,22)$, $\Delta D^* \sim (5 - 2,77)$, $\Delta L^* \sim (10 - 5,55)$, $\Delta Z^* \sim (1 - 0,55)$.

При условии геометрического подобия магнитных систем преобразователей, можно разбить весь диапазон контролируемых толщин T на поддиапазоны, для каждого из которых относительные размеры преобразователей будут соответствовать оптимальным и изменяться в

установленных для них пределах. В таблице 3.1 приведены рассчитанные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны измерения, соответствующие сформулированным требованиям [56].

Таблица 3.1 – Расчетные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны контролируемых толщин

N	T_0 , мм	A , мм	C , мм	E , мм	D , мм	L , мм	Z , мм	ΔT , мм
1	3,8	13,6	5,4	10,8	13,6	27,2	2,7	2,7 - 5,3
2	7	25	10	20	25	50	5	5 - 9
3	12	42,8	17,1	34,3	42,8	85	8,5	9,2 - 15,9

3.3 Разработка алгоритмов формирования магнитного поля и обработки первичной измерительной информации, обеспечивающих подавление влияния мешающих параметров

На рисунке 3.15, в соответствии с рассматриваемой моделью первичного преобразователя, приведены расчетные зависимости, иллюстрирующие влияние шероховатости внешней поверхности в диапазоне $Rz = 0-400$ мкм на величину магнитной индукции B_{zm} . Видно, что с увеличением Rz чувствительность преобразователя к дефектам снижается, а дополнительная погрешность измерения $\Delta h(Rz)$ увеличивается. В частности, для листа толщиной $T = 6$ мм с дефектом глубиной $h^* \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz=100) = 3\Delta h_d$. Соответственно, для листа толщиной $T = 10$ мм с дефектом глубиной $h^* \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz=100) = 2\Delta h_d$ и для $h^* \approx 0,2$ дополнительная погрешность $\Delta h(Rz=100) = 4\Delta h_d$.

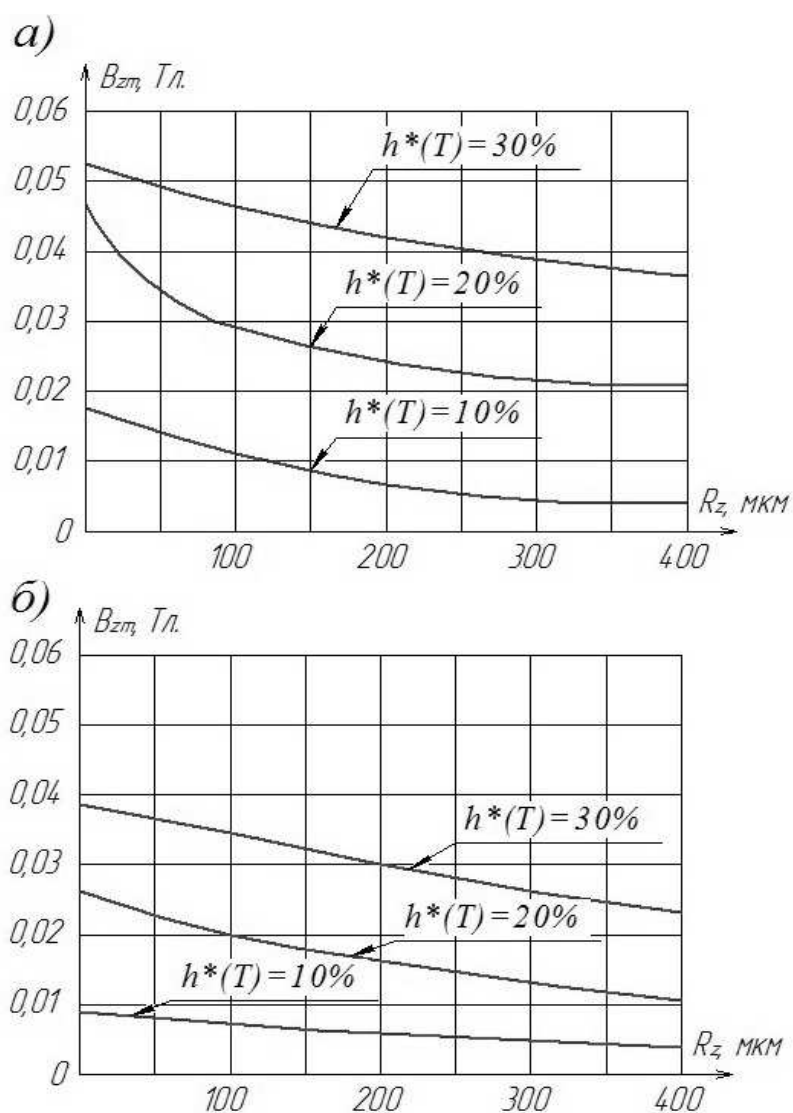


Рисунок 3.15 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости поверхности R_z для листа толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) мм с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность со стороны точки наблюдения).

Если шероховатой является поверхность с обратной стороны стенки объекта контроля, существенных изменений ее влияния не будет (рисунок 3.16).

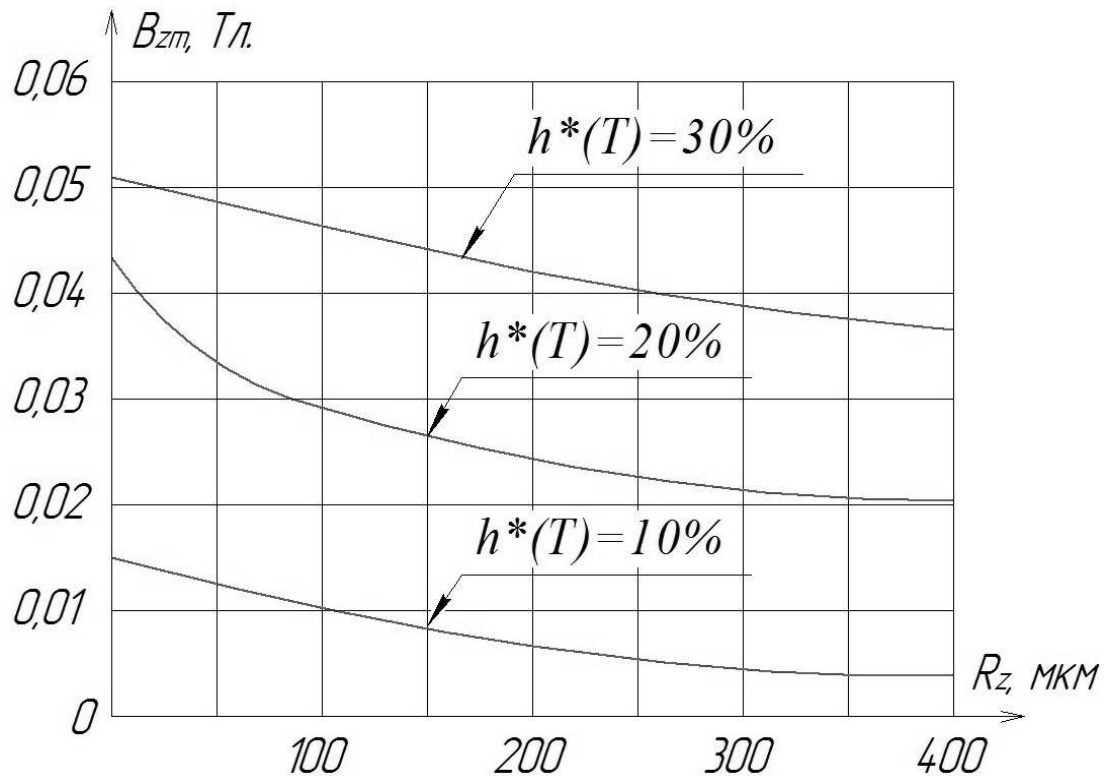


Рисунок 3.16 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости R_z для листа толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) мм с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность с противоположной стороны от точки наблюдения).

Девияция зазора Z при изменении толщины защитного покрытия в процессе сканирования также будет приводить к изменению чувствительности преобразователя, и вызывать дополнительную погрешность измерения $\Delta h(\Delta Z)$, так как $B_{zm} \sim 1/Z$ при прочих равных условиях [53]. На рисунке 3.17 приведены расчетные значения магнитной индукции B_{zm} в зависимости от зазора Z при базовом значении $Z = 5$ мм. При $h^* \approx 0,2$ для $T=6$ мм дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta Z=1) = 2\Delta h_d$, а для $T=10$ мм $\Delta h(\Delta Z=1) = 3\Delta h_d$.

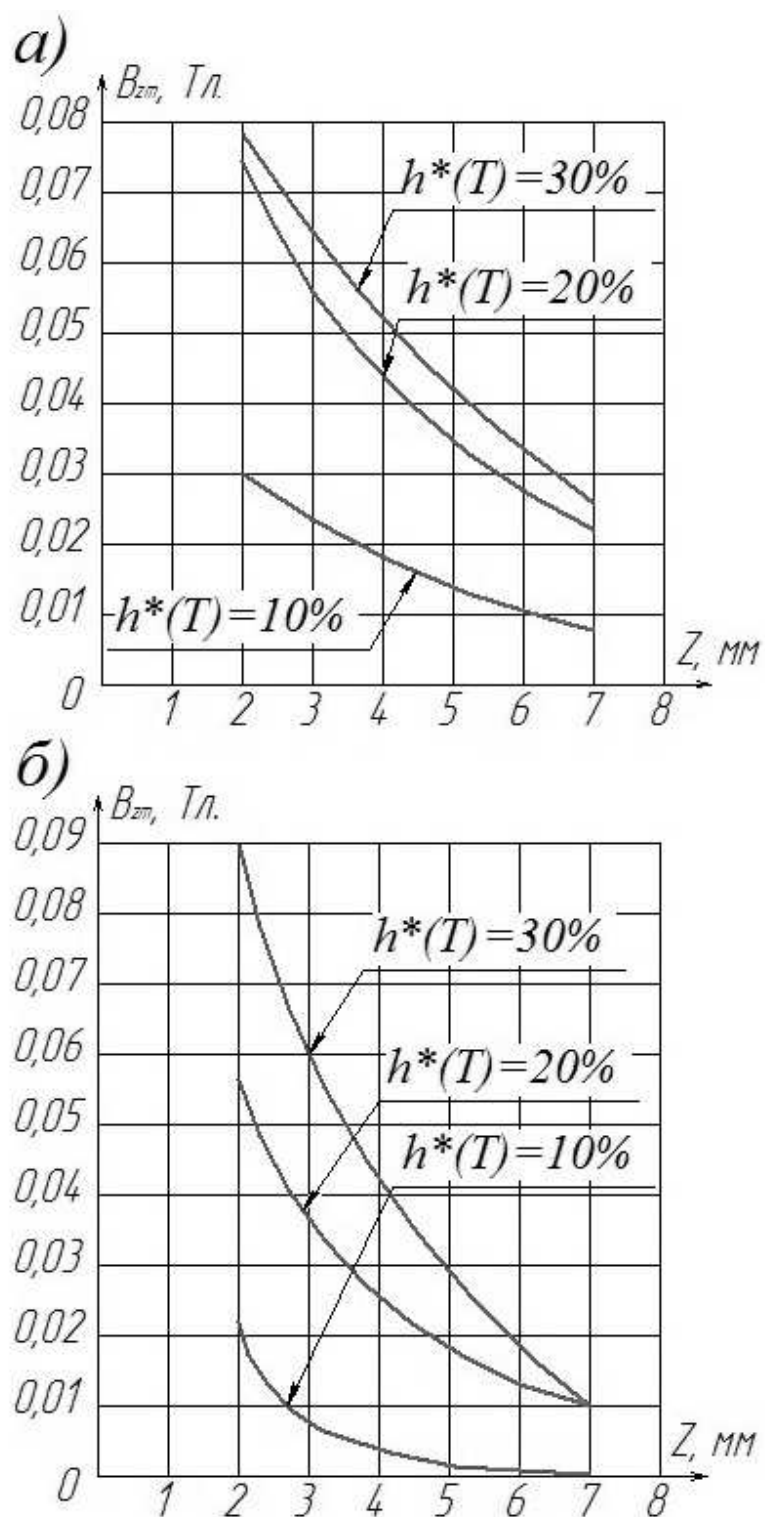


Рисунок 3.17 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от зазора Z при толщине листа $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б).

Анализ представленных на рисунке 3.17 зависимостей показывает, что устанавливаемый для рассматриваемых преобразователей технологический

зазор $Z=5$ мм является максимально допустимым, при наличии покрытий чувствительность может уменьшаться до критического уровня.

При анализе метрологических характеристик следует учесть также возможное влияние локальной девиации относительных магнитных проницаемостей μ_{mc} и $\mu_{ок}$ деталей магнитной системы и материала объекта контроля, соответственно, которые могут привести к снижению достоверности результатов измерений [53]. Для оценки были проведены расчеты $B_{zm}(h^*, T)$, для случая использования сталей Ст.10 и Ст.08 в качестве материала ярма и полюсов магнитной системы (рисунок 3.18), отличие магнитных свойств, которых сопоставимо с возможной локальной девиацией $\Delta\mu$ используемых для этого сталей [62].

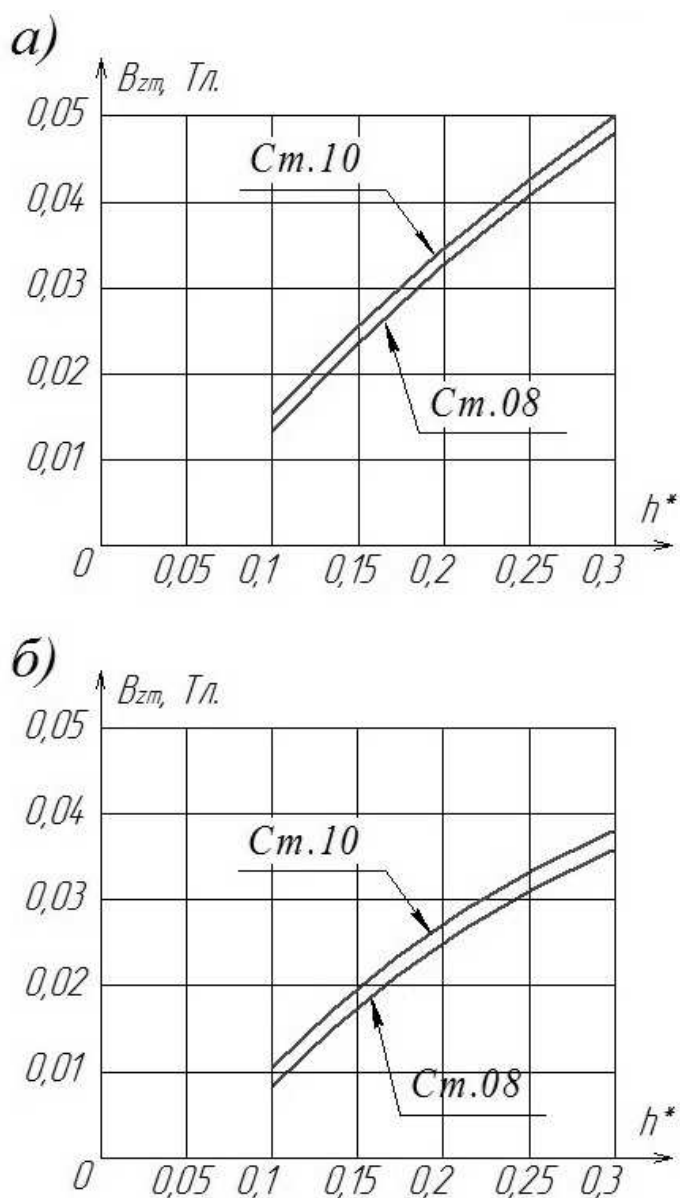


Рисунок 3.18 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины h^* дефекта в случае выполнения деталей магнитной системы из сталей марок Ст.10 и Ст.08 над ферромагнитными листами толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила.

Выполненные расчеты зависимостей $B_{zm}(h^*, T)$ показывают, что, например, в случае замены сталей Ст.10 на Ст.08 при изготовлении деталей магнитной системы при $h^* \approx 0,2$ для $T=6$ и $T=10$ мм дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta \mu_{мс}) = 2\Delta h_{д}$.

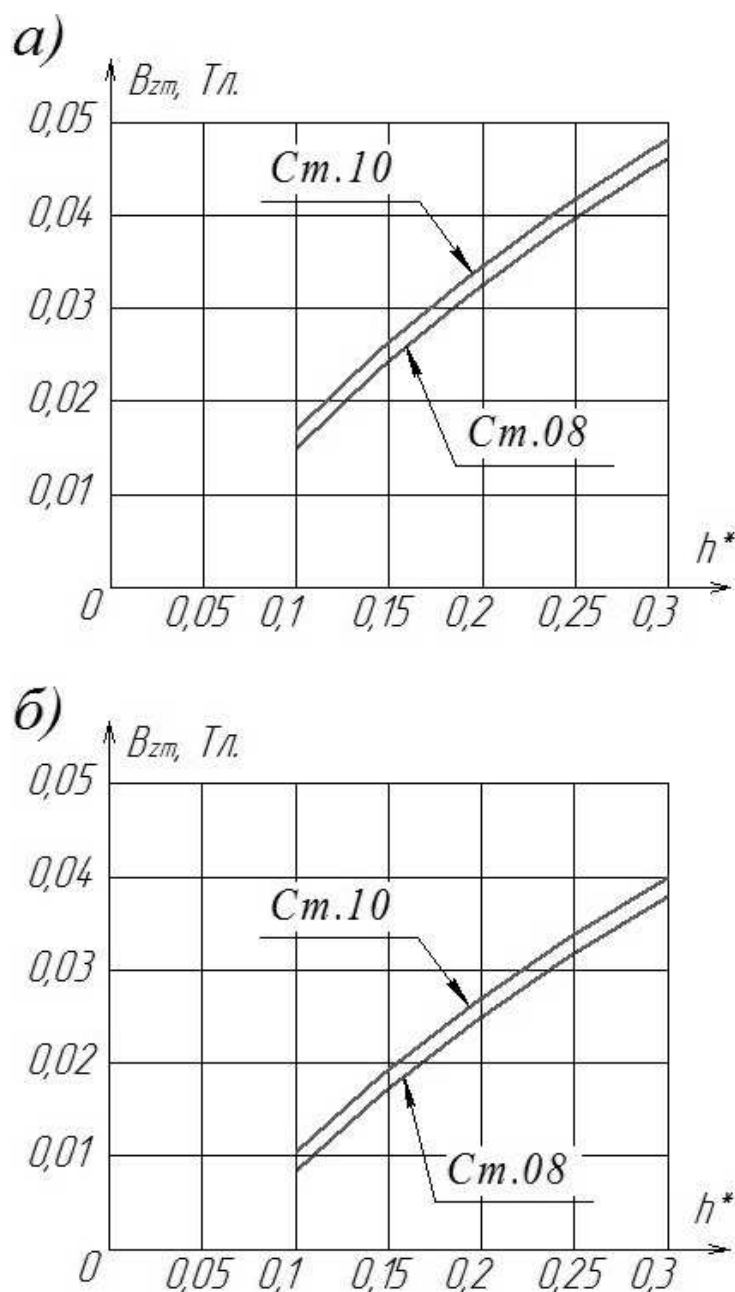


Рисунок 3.19 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины дефекта h^* над ферромагнитными листами из сталей марок Ст.10 и Ст.08 толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила.

В случае замены стали Ст.10 на Ст.08 при изготовлении стенки или днища объекта контроля, при $h^* \approx 0,2$ для $T=6$ и $T=10$ мм в процессе сканирования поверхности $\Delta B_{zm}(h^*, T) = |B_{zm}(h^*, T)_{ст10} - B_{zm}(h^*, T)_{ст08}| < 0,002$ Тл, а дополнительная погрешность $\Delta h(\Delta \mu_{ок}) = 2\Delta h_{д}$. Разность типовых значений относительной магнитной проницаемости рассматриваемых сталей соответствует величине девиации $\mu_{ок}$ в пределах партии листов.

Выпускаемые в настоящее время дефектоскопы с MFL-сканерами не могут обеспечить заявляемую в руководстве по эксплуатации погрешность измерения глубины коррозионных повреждений $\Delta h \leq \pm(0,1 - 0,15)h$ в условиях разброса геометрических и электрофизических характеристик стальных листов днищ резервуаров. Так, например, при сканировании днища толщиной $T = 10$ мм, в случае выявления дефекта глубиной $h^* \approx 0,2$ при девиации шероховатости поверхности в диапазоне $Rz = 0 - 100$ мкм, изменении величины зазора на величину $\Delta Z = 1$ мм и указанной вариации относительной магнитной проницаемости $\Delta \mu_{ок}$ материала объекта контроля погрешность измерения может достигать величины $\Delta h \leq \pm 0,3h$ [59].

Применяемые в настоящее время магнитные дефектоскопы с MFL-сканерами, исходя из их назначения и технических характеристик, следует рассматривать как средства измерения. В связи с этим они должны иметь поверочные схемы, эталоны и средства измерений, обеспечивающие прослеживаемость рабочих средств измерений (дефектоскопов) к первичному эталону и получение достоверных результатов измерений [22].

Как упоминалось ранее, в качестве чувствительных элементов в MFL – преобразователях используются интегральные датчики Холла. Интегральные датчики Холла производят такие фирмы, как Honeywell, Melexis, Allegro Microsystems, Siemens и др. Чувствительные элементы, выполненные в виде микросхем, состоят из очень точного линейного датчика Холла, интегрированного на кристалл микросхемы, и медного проводника, размещенного близко к кристаллу. Электрический ток, протекая через проводник, создает магнитное поле, которое фиксируется датчиком Холла и преобразуется в напряжение, пропорциональное значению входного тока (рисунок 3.20). Высокая точность, гальваническая изоляция измерительной схемы, термостабильность и малые габариты делают датчики хорошим решением для применения в преобразовательной технике.

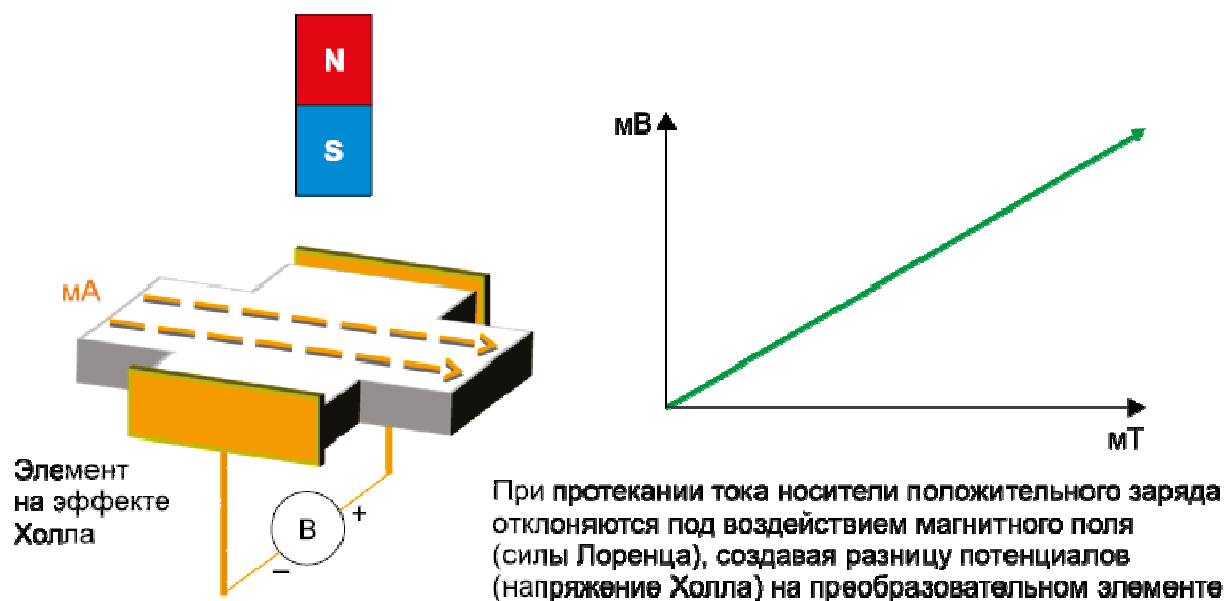


Рисунок 3.20 – Схема работы чувствительного элемента основанного на эффекте Холла.

Рассмотрим схему расположения чувствительных элементов на модели взаимодействия системы намагничивания MFL – преобразователя и объекта контроля в виде стального листа (рисунок 3.21) толщиной 7 мм с дефектом в виде пропила выполненного цилиндрической фрезой диаметром 0,5 мм на глубину 3,5 мм.

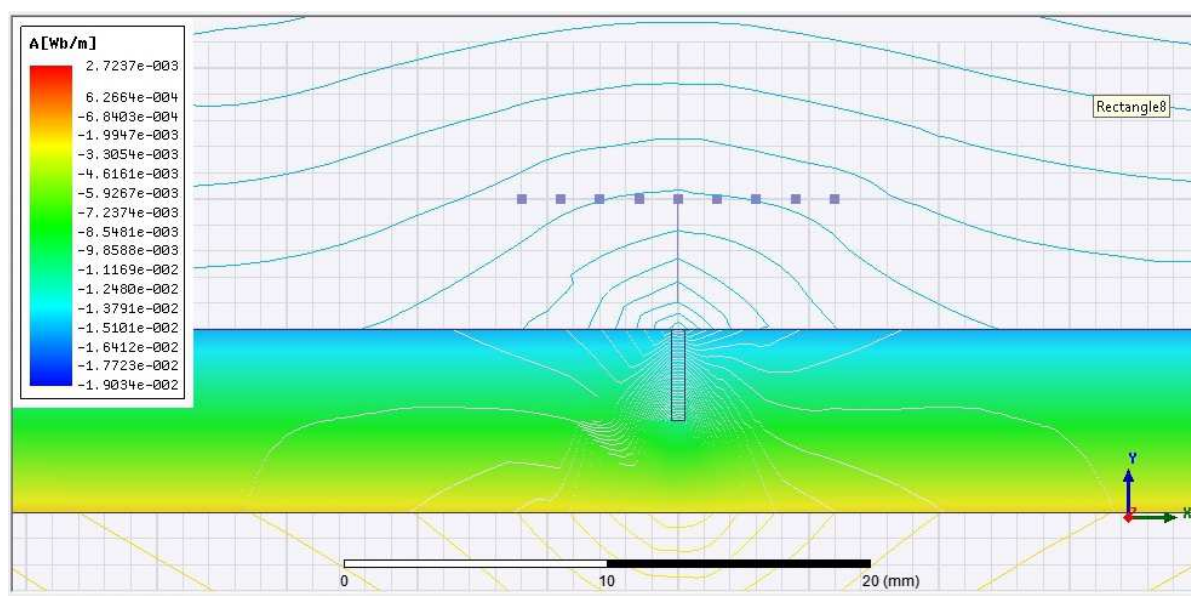


Рисунок 3.21 – Графическая схема расположения чувствительных элементов.

Чувствительные элементы расположены на расстоянии 3 мм относительно образца контроля и на расстоянии 3 мм относительно друг друга.

Полученные значения величины вектора магнитной индукции в точках наблюдения (point 1...point 9):

point 1 - 36.235265 mT (B_z - -0.018056 T);

point 2 - 37.496899 mT (B_z - -0.016807 T);

point 3 - 40.367794 mT (B_z - -0.011453 T);

point 4 - 44.878199 mT (B_z - -0.006098 T);

point 5 - 51.028113 mT (B_z - -0.018948 T);

point 6 - 48.717998 mT (B_z - -0.006305 T);

point 7 - 45.910974 mT (B_z - -0.009754 T);

point 8 - 42.607042 mT (B_z --0.013204 T);

point 9 - 38.806202 mT (B_z -- 0.016654 T),

где B_z – z составляющая вектора магнитной индукции.

Получена зависимость изменения вектора магнитной индукции от положения датчика над дефектом (рисунок 3.22).

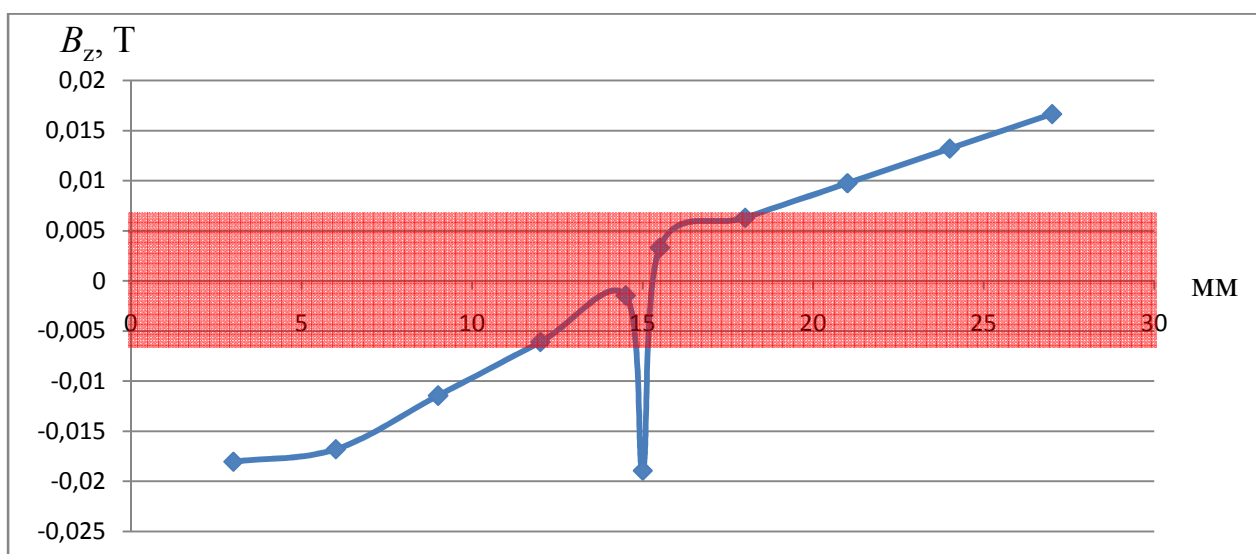


Рисунок 3.22 – Зависимость изменения вектора магнитной индукции B от положения датчика над дефектом.

Красная зона – зона порога чувствительности датчика Холла. На графике видно, что дефект обнаружил только один чувствительный элемент, но стоит заметить, что сигнал превышает порог чувствительности датчика Холла в 3 раза.

В ходе экспериментов было установлено, что самая выгодная конфигурация расположения датчиков – равнобедренный треугольник. Благодаря тому, что датчики могут быть расположены близко друг относительно друга, появляется возможность исследования микроструктуры поля, что невозможно при использовании, например, феррозондовых датчиков. В связи с этим, оптимальным является использование датчиков A1395SEHLT-T производителя Allegro Microsystems Inc, с током питания 3,2 мА и напряжением 2,5~3,5 В. Стоит отметить, что рабочий диапазон температур датчика от -20°C до 85°C. Чувствительность датчика 10 мВ/Гс. Изменяя основание треугольника, можно изменять зону покрытия, следовательно, разрешающую способность датчика. В сильном поле магнитный диполь дефекта ориентируется вдоль намагничивающего поля, поэтому можно положить, что $m_z = 0$, где m – магнитный момент диполя. Для простоты предположим, что дефект находится в начале координат $x = y = 0$; $r = z$ (рисунок 3.23), тогда можем оценить производные поля.

$$\begin{cases} \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{3m_x}{z^4}, \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{3m_y}{z^4}. \end{cases} \quad (15)$$

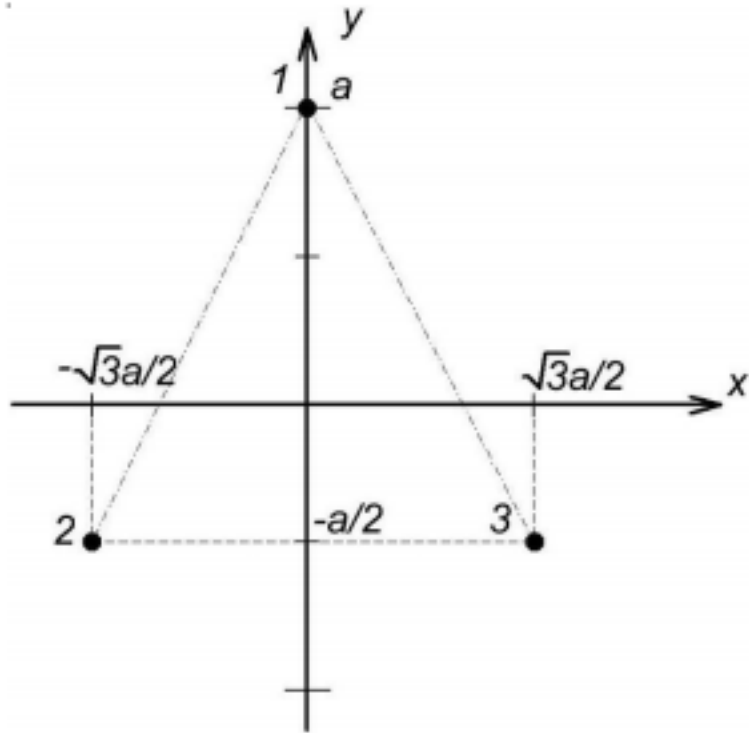


Рисунок 3.23 – Конфигурация расположения датчиков Холла.

Мерой дефекта может служить величина

$$\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2 = \frac{9m^2}{z^8} \quad (16)$$

Разложим поле в точках 1,2,3 в ряд Тейлора и ограничимся линейными слагаемыми:

$$\begin{cases} B_1 = B_0 + \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \\ B_2 = B_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial B_z}{\partial x} a - \frac{1}{2} \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \\ B_3 = B_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial B_z}{\partial x} a - \frac{1}{2} \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \end{cases} \quad (17)$$

где B_1, B_2, B_3 – поле в точках 1,2,3 соответственно;

B_0 – поле в начале координат (рисунок 3.23). Получим

$$B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 - B_1 B_2 - B_1 B_3 - B_2 B_3 = \frac{9}{4} \left(\left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (18)$$

Таким образом, измерив, поле в трех точках, можно судить о характере дефекта. [48]

3.4 Разработка методики настройки преобразователей и проведения измерений остаточной толщины стенки

Включение дефектоскопа осуществляется тумблером, расположенным на лицевой панели.

Перед началом работы необходимо выбрать, в каком диапазоне толщин находится объект контроля: 4-6; 7-8; 9-10; 11-12; 13-14; 15-16мм. Выбор осуществляется кнопками «вверх», «вниз» (рисунок 3.24). При этом выбор сопровождается свечением соответствующего светодиода (через некоторое время диод должен гаснуть).

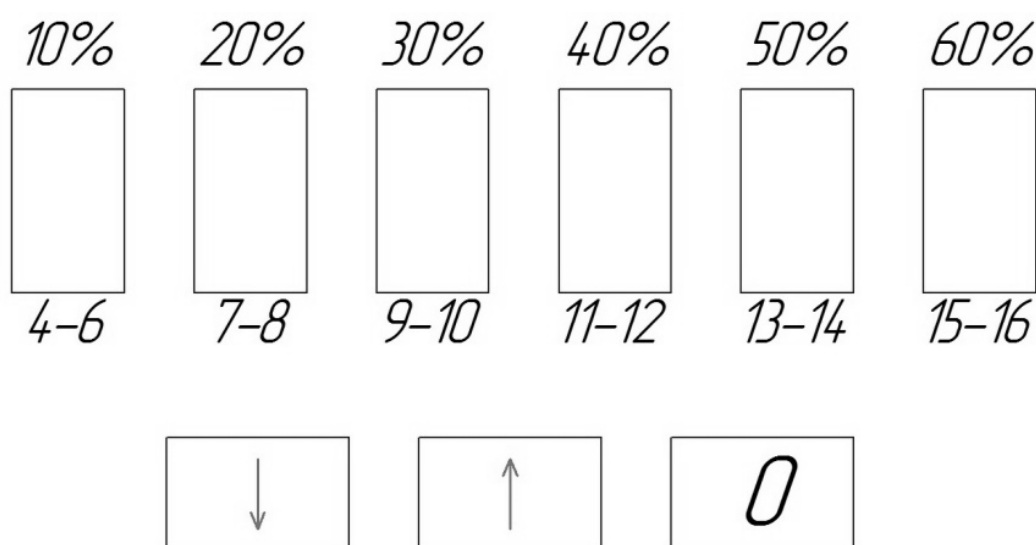


Рисунок 3.24 – Схема расположения светодиодов и кнопок управления.

Затем необходимо установить дефектоскоп на бездефектную калибровочную меру или бездефектный участок объекта контроля и нажать кнопку «0», после чего можно проводить контроль.

В случае обнаружения дефекта, на панели индикации загораются светодиоды с соответствующей маркировкой (рисунок 3.25)

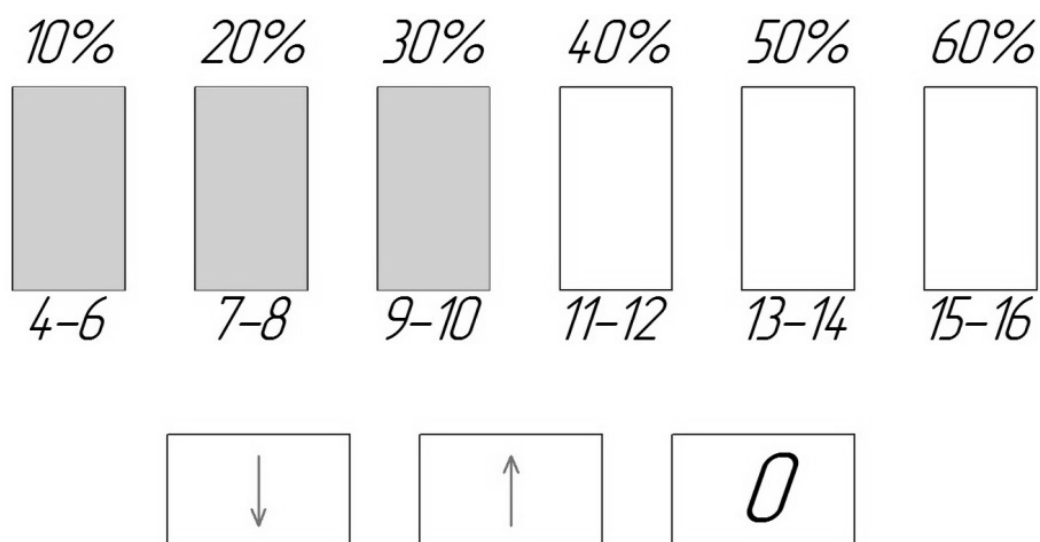


Рисунок 3.25 – Схема срабатывания панели индикации при обнаружении дефекта 30% утонения стенки объекта контроля.

Электронная составляющая дефектоскопа разделена на модули:

- модуль чувствительных элементов, расположенный между магнитными полюсами;
- модуль индикации и управления, состоит из платы индикации и платы управления.

Модуль чувствительных элементов включает в себя плату с 42 датчиками Холла (рисунок 3.26) и электронные компоненты для обработки и передачи информации, также на плате необходимо разместить разъем, для подключения шлейфа связи с модулем индикации и питания.

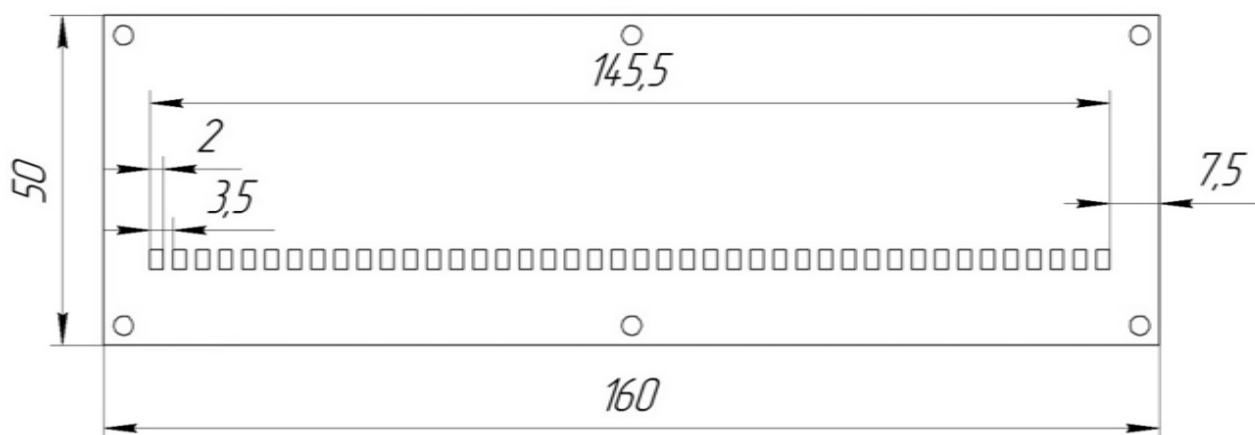


Рисунок 3.26 – Схема платы с датчиками Холла.

По шлейфу связи от модуля чувствительных элементов передаются сигналы на модуль индикации (рисунок 3.27), расположенной в лицевой панели дефектоскопа.

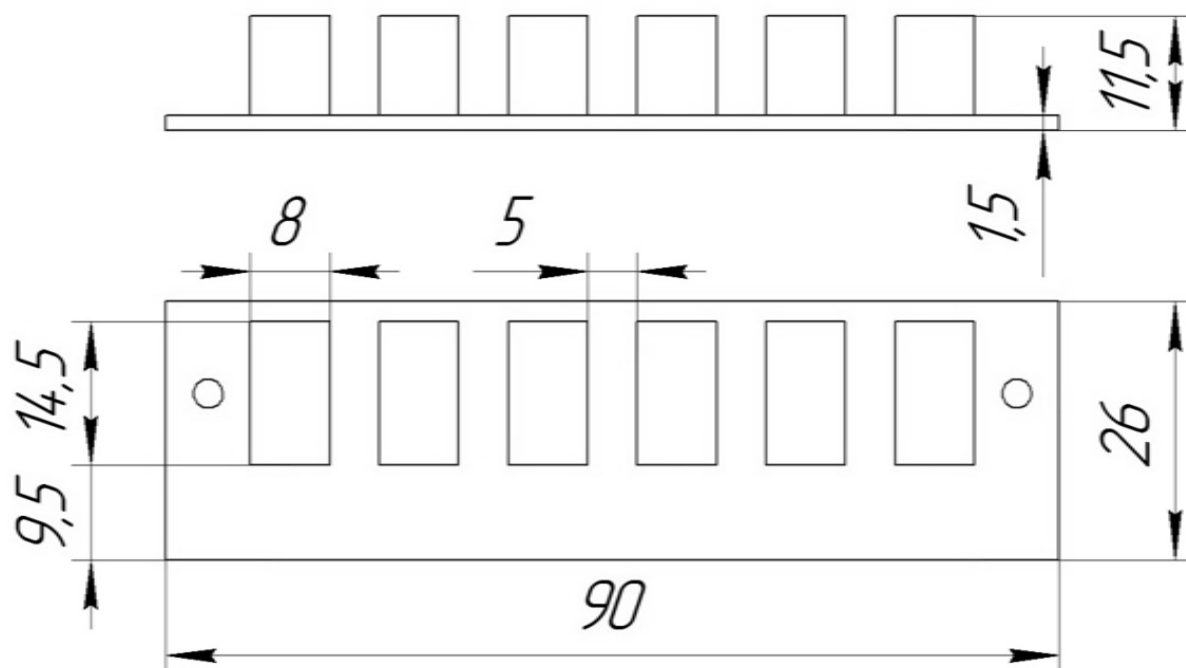


Рисунок 3.27 – Схема платы индикации.

Плата индикации соединена шлейфом с платой управления (рисунок 3.28), размещенная также на лицевой панели. На плате управления необходимо установить mini USB разъем.

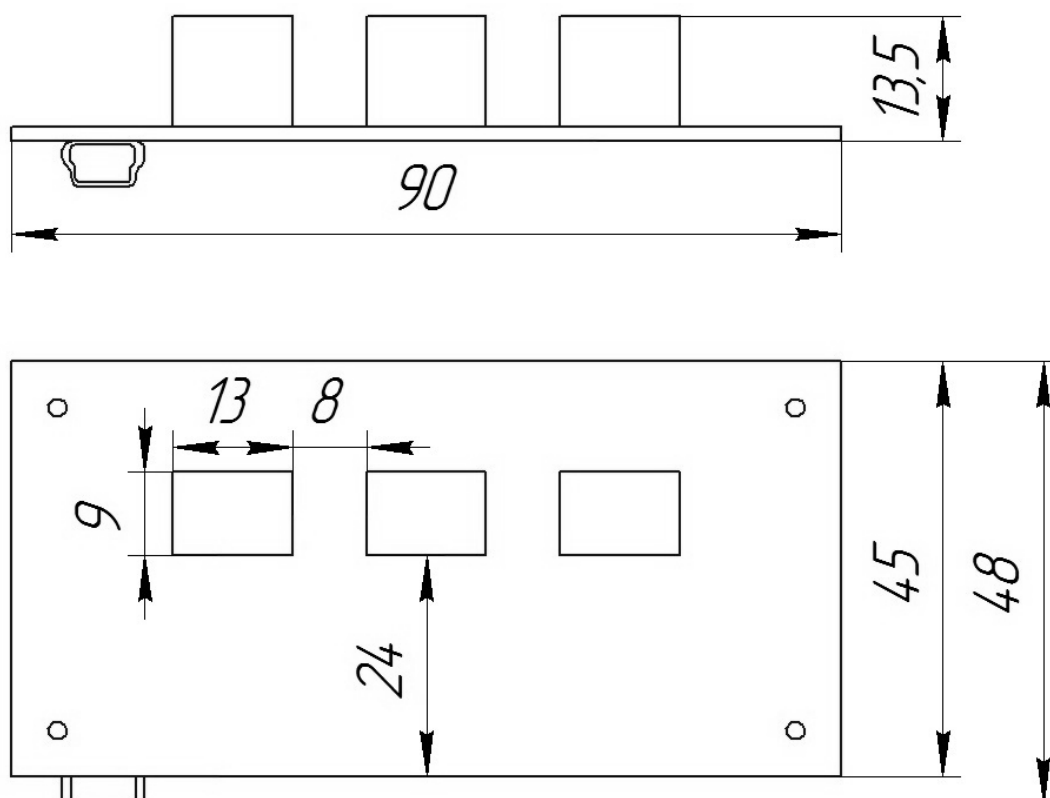


Рисунок 3.28 – Схема платы управления.

Питание всей электроники осуществляется Li-Ion аккумулятором ET 18650 2900mAh с напряжением 3,75 В, который расположен на лицевой панели дефектоскопа. Заряд аккумулятора осуществляется зарядным устройством вне дефектоскопа.

Алгоритм работы MFL – дефектоскопа:

1. Включение преобразователя:
 - тумблер ВКЛ/ВЫКЛ

При включении преобразователя загорается левый светодиод (рисунок 3.29).

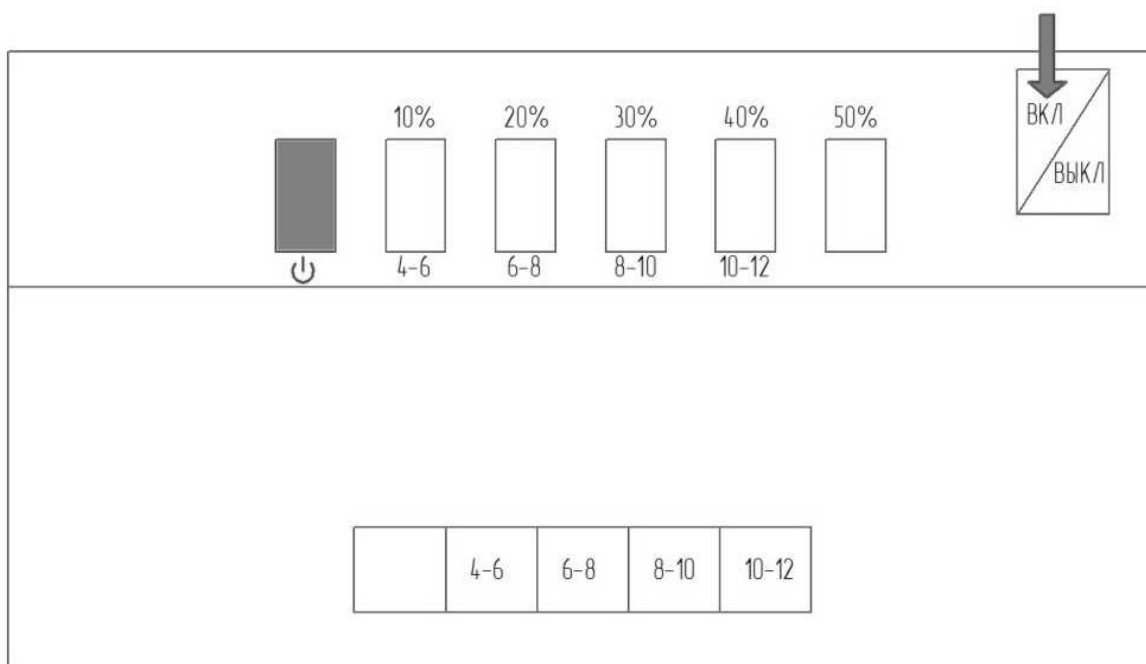


Рисунок 3.29 – Схема работы светодиодов при включении дефектоскопа.

При выключении преобразователя светодиод гаснет (рисунок 3.30).

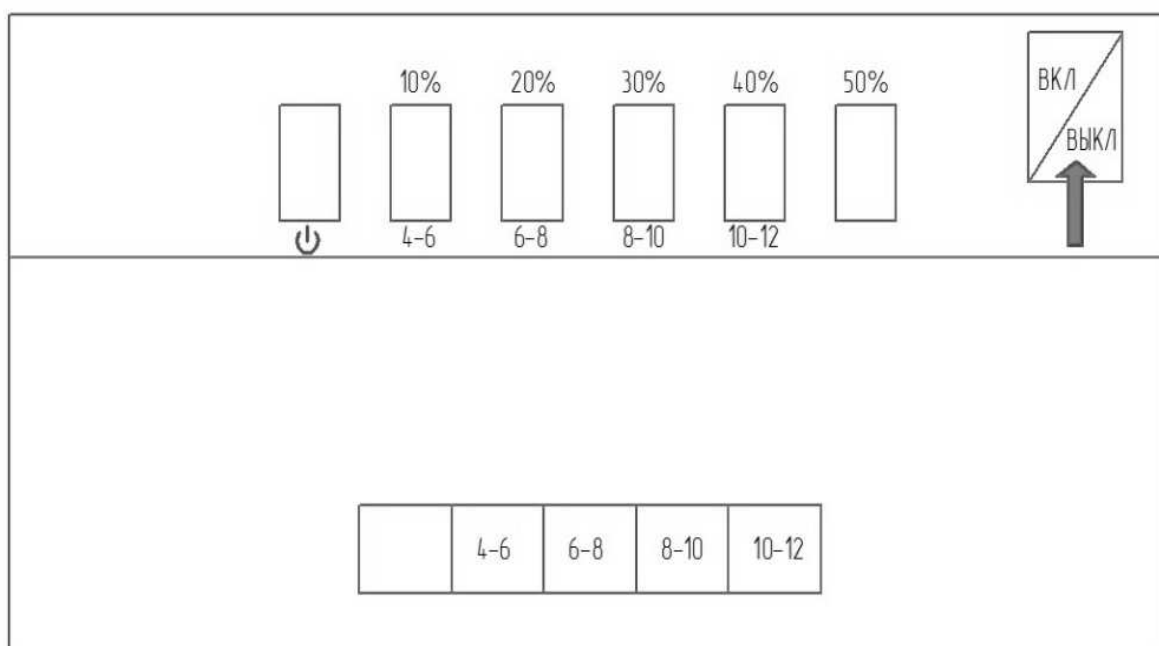


Рисунок 3.30 – Схема работы светодиодов при выключении дефектоскопа.

2. Начало работы. Кнопками, расположенными на лицевой панели преобразователя выбирается диапазон контролируемых толщин: (4-6; 6-8; 8-10; 10-12) и автоматически происходит выбор порогового значения для заданного диапазона толщины. При этом выбор сопровождается 3-х

секундным свечением светодиода, который соответствует выбранному диапазону контролируемой толщины объекта контроля (рисунок 3.31).

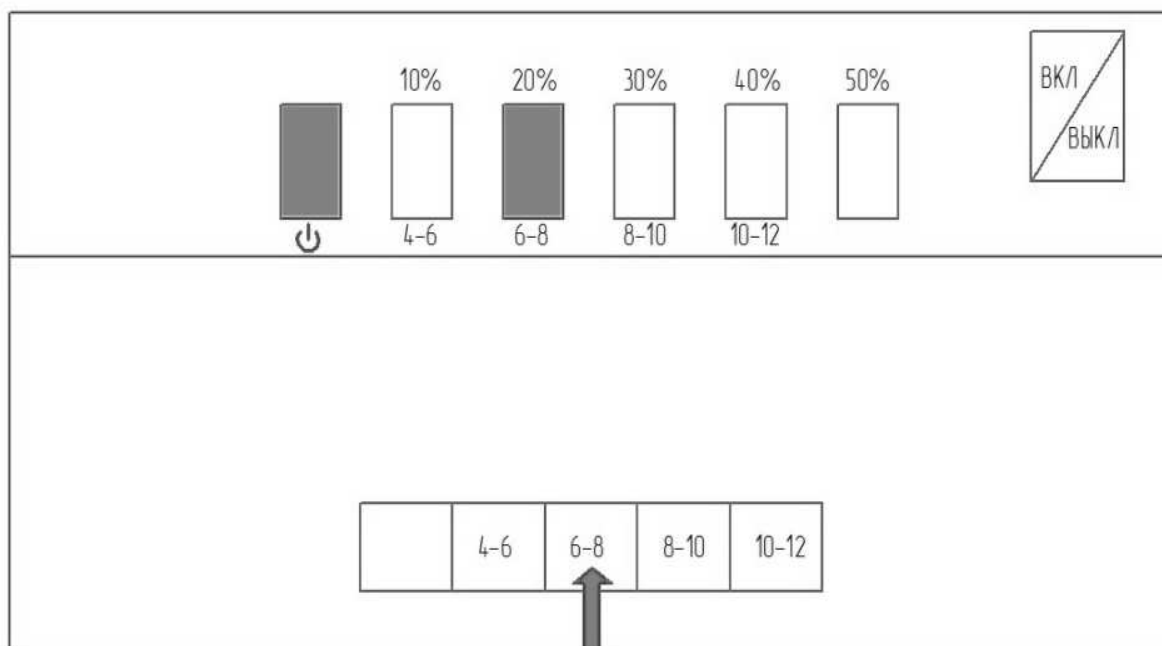


Рисунок 3.31 – Схема работы светодиодов при выключении выборе диапазона контролируемых толщин.

3. При включении преобразователя по умолчанию выбирается диапазон с минимальными толщинами (4-6)

4. При необходимости перехода на другой диапазон контролируемой толщины, необходимо нажать на соответствующую кнопку на лицевой панели.

5. При проезде по бездефектному участку должен гореть только левый светодиод.

6. При проезде по участку с дефектом загорается то кол-во светодиодов, которому соответствует глубина дефекта контролируемой стенки изделия (например, при проезде через дефект 30% должны загораться диоды «10%», «20%», «30%») (рисунок 3.32). В случае одновременного обнаружения нескольких дефектов разной глубины, загорается количество светодиодов, которому соответствует наибольшая глубина дефекта.

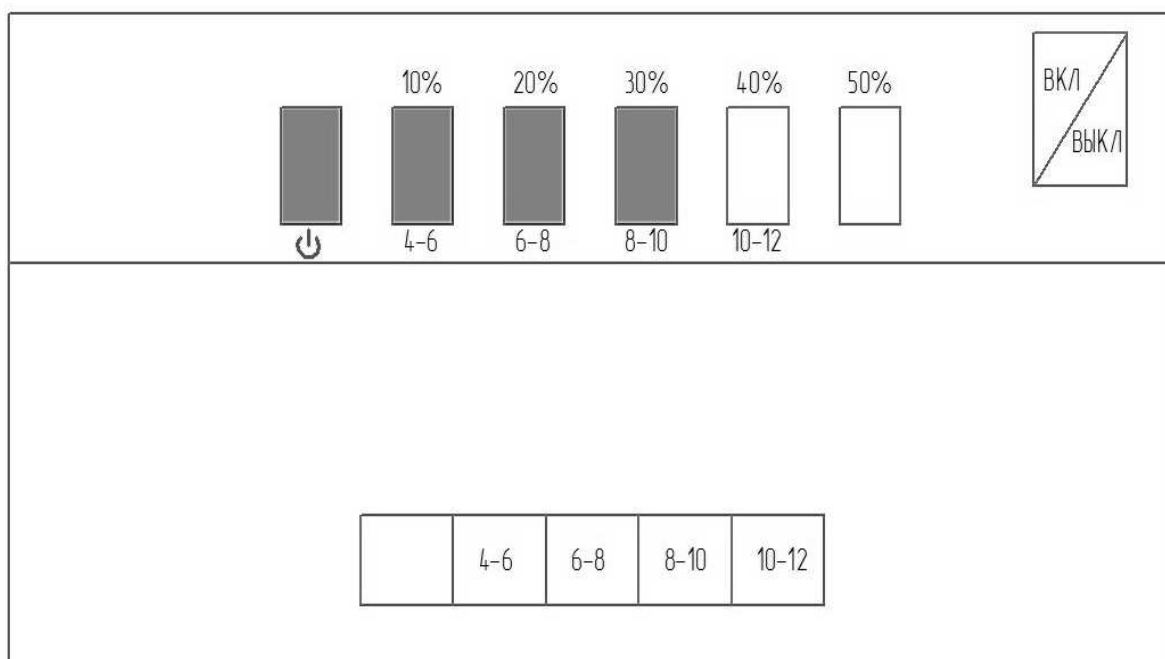


Рисунок 3.32 – Схема работы светодиодов при проезде через дефект 30%.

7. Световая индикация должна осуществляться в режиме реального времени (время залипания, вопрос индикации) .
8. Проводить сканирование необходимо без ускорения, с постоянной скоростью не более 0,5 м/с.
9. При просадке аккумулятора на 70% левый светодиод должен начать мигать.
10. При просадке аккумулятора на 90% преобразователь должен отключаться.
11. Заряд батареи осуществляется внешним зарядным устройством (MH12210, NCR18650B для литий ионных элементов питания 18650)
12. В случае некорректной работы преобразователя все светодиоды должны мигать одновременно.

Основные требования к компьютерной программе ввода, вывода и обработки информации MFL – дефектоскопа:

- запись в память дефектоскопа максимального порога срабатывания (минимальная толщина/максимальная глубина дефекта). А также таблицы диапазонов толщины листа и соответствующих им дефектов. С возможностью внесения корректировок разработчиком;

- возможность сохранения последних 7-10 секунд результата сканирования в памяти дефектоскопа перед нажатием самой правой кнопки, для дальнейшей передачи кода на ПК и его анализа. После перезагрузки дефектоскопа (выключения/включения) результаты предыдущих 7-10 секунд сканирования должны удаляться/перезаписываться;
- передача данных по USB (с выводом на один график. С возможностью определения датчика);
- получение информации о состоянии заряда батареи.

3.5 Выводы к главе 3

1. Сформулированы основные методические принципы построения MFL – дефектоскопа, обеспечивающие оптимальной чувствительностью, для контроля всего диапазона толщин днищ цилиндрических резервуаров.
2. Разработана расчетно-графическая модель взаимодействия MFL – преобразователя и объекта контроля, с учетом мешающих параметров.
3. Установлена оптимальная величина намагничивания материала объекта контроля, соответствующая определенному значению магнитной проницаемости.
4. Разработаны принципы построения и конструкция геометрически подобных MFL – преобразователей для измерения остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров в требуемых диапазонах толщин.
5. Разработаны алгоритмы формирования магнитного поля и обработки первичной измерительной информации, обеспечивающих подавление влияния мешающих параметров.
6. Для модели взаимодействия системы намагничивания MFL – преобразователя и объекта контроля представлена схема расположения чувствительных элементов, обеспечивающая полное перекрытие области сканирования.

7. Разработаны методики настройки MFL – преобразователей и проведения измерений остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров.

ГЛАВА 4 МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ДНИЩА РВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ MFL

4.1 Состояние метрологического обеспечения и стандартизации в области магнитного контроля с использованием технологии MFL

В нашей стране отношения при производстве и потреблении регулирует Закон «О техническом регулировании». При этом инструментами регулирования являются технические регламенты, стандарты, подтверждение соответствия требованиям и сертификация, надзор за соблюдением требований [47].

Наряду с национальными стандартами и нормативными документами существует большое число стандартов в нормативных документов организаций, которые развивают и конкретизируют основные положения национальных стандартов с учетом условий применения средств неразрушающего контроля на соответствующем уровне и решают практические производственные вопросы контроля качества продукции.

Обеспечение основных положений государственных стандартов достигается с использованием нормативных документов по метрологическому обеспечению измерений остаточной толщины, утверждаемых сертифицированными метрологическими организациями Госстандарта. Им присваивается соответствующий номер, и они включаются в издаваемый ФГУП «ВНИИМС» «Указатель. Нормативные документы в области метрологии». Этот указатель ежегодно обновляется и переиздается [64].

К дефектоскопам, измеряющим остаточную толщину понятие «качество» можно трактовать как гарантированное обеспечение заявленных характеристик в процессе эксплуатации. Заявленные характеристики определяются конструктивными решениями.

Первым этапом после изготовления дефектоскопа является его настройка на соответствующих мерах моделей дефектов. В память дефектоскопа заносятся пороговые значения в табличном или аналитическом виде.

Перед передачей прибора на производство производится первичная поверка в соответствии с утвержденной методикой. Целью поверки является установление соответствия метрологических характеристик требованиям технической документации.

Однако, на сегодняшний день в нашей стране не существует нормативных документов которые регулируют изготовление мер моделей дефектов для средств измерений, использующих технологию MFL. В связи с этим, представляется необходимым предложение по разработке новых стандартов на меры моделей дефектов, а также разработка проекта схемы прослеживаемости для средств измерений использующих технологию MFL.

Анализ современной стандартизации по неразрушающему контролю остаточной толщины стенки ферромагнитного материала показал, что на сегодняшний день существуют нормативные документы на виды и методы неразрушающего контроля, которые устанавливают требования к терминам и определениям, но не указаны требования к мерам моделей дефектов и средствам измерений. Для устранения этого недостатка необходимо разработать нормативные документы на измерение остаточной толщины ферромагнитного материала с использованием технологии MFL, которые будут устанавливать требования к MFL – дефектоскопам, мерам моделей дефектов, а также требования к их поверке и калибровке.

4.2 Разработка проекта схемы прослеживаемости для дефектоскопов реализующих технологию MFL

На рисунке 4.1 представлен проект схемы прослеживаемости для средств измерений остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров, реализующих технологию MFL.

Мешающие геометрические, физические параметры для данного метода должны контролироваться на этапах изготовления и поверки средств измерений в соответствии с представленной на рисунке 4.1 схемой передачи размера единицы измеряемой величины h от мер моделей к MFL – дефектоскопам с учетом контроля мешающих параметров. В таком случае будет обеспечиваться метрологическая прослеживаемость.

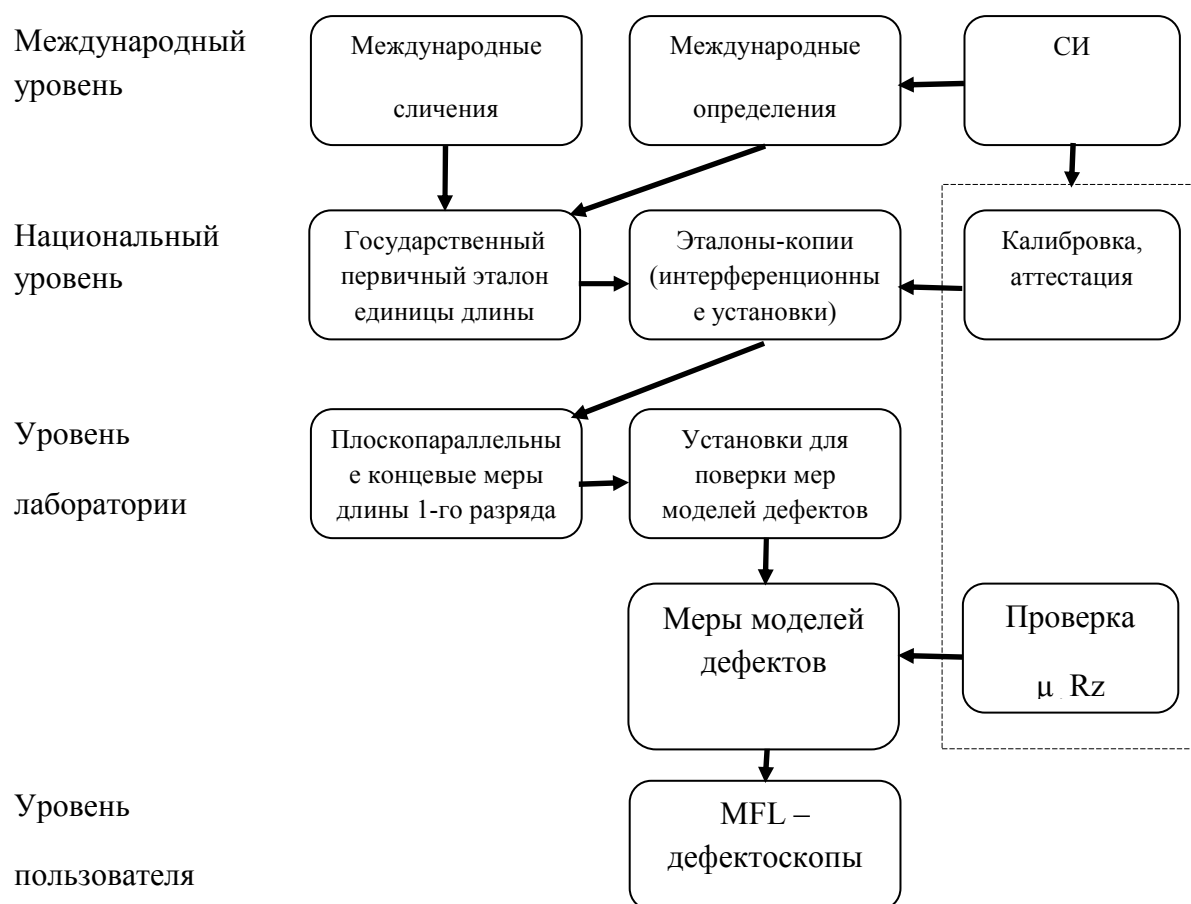


Рисунок.4.1 – Проект схемы прослеживаемости для средств измерений остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров, реализующих технологию MFL

Структура поверочной схемы включает четыре уровня метрологической цепи для определения и распространения единицы остаточной толщины стенки ферромагнитного материала и предполагает проверку μ и Rz.

В перспективе, одним из вариантов решения рассматриваемой проблемы обеспечения единства измерений в области MFL – дефектоскопии, а также координации работ метрологических служб, производителей и потребителей MFL – дефектоскопов представляется необходимым

разработка стандарта. В дальнейшем на основании стандарта должны быть разработаны поверочные схемы и средства измерений для их реализации.

4.3. Разработка мер моделей дефектов для калибровки и поверки дефектоскопов, реализующих технологию MFL

Как упоминалось ранее, высокая точность измерений остаточной толщины обеспечивается в том случае, когда физико-механические свойства материала мер моделей дефектов, по которым градуированы дефектоскопы и объекта контроля будут совпадать, или незначительно отличаться в соответствии с критерием ничтожных погрешностей (либо учитываться при их существенном отличии путем внесения поправок в результаты измерений) [15].

Меры моделей дефектов представляют собой физическое тело, воспроизводящее размер глубины дефекта. Кроме того, мера передавая размер физической величины (мм) MFL – дефектоскопу, должна одновременно нести информацию о физических характеристиках материала. В связи с этим мера также предназначена, для хранения, воспроизведения и передачи параметров магнитной проницаемости и шероховатости поверхности материала.

Технологический процесс изготовления мер состоит из следующих основных операций:

1. изготовление заготовок мер;
2. прецизионная доводка поверхностей мер;
3. контроль основных геометрических параметров (отклонение от плоскостности и параллельности поверхностей мер, контроль шероховатости)
4. измерение остаточной толщины мер, комплектование набора и передача в первичную поверку.

Изготовление заготовок мер осуществляется из одной партии листового материала методами механической обработки: фрезерование,

сверление. Заключительной операцией механообработки является финишное шлифование [20].

Для обеспечения требуемых параметров по плоскостности и качеству подготовки поверхностей, меры подвергают операции доводки. Доводка осуществляется на доводочных станках или вручную с использованием алмазного абразива различной зернистости [41].

Контроль отклонения от плоскостности осуществляется интерференционным методом. Контроль шероховатости производится профилометром со встроенной прямолинейной базой. [38]

Фрагмент рабочего чертежа, по которому осуществляется изготовление мер, изображен на рисунке 4.2.

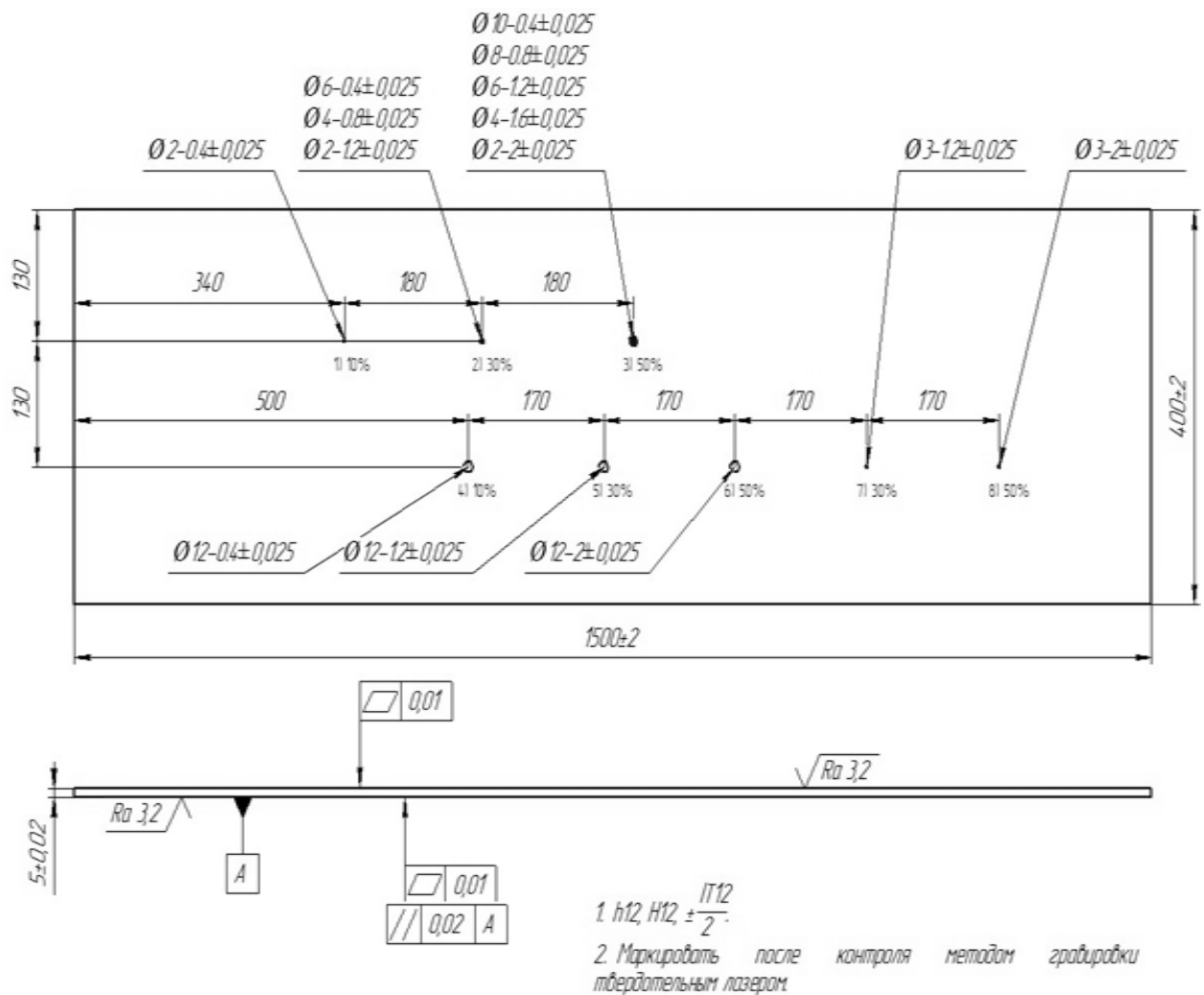


Рисунок 4.2 – Фрагмент рабочего чертежа на изготовление меры.

После притирки меры производится измерение действительной остаточной толщины и контроль шероховатости.

Для контроля шероховатости поверхности снимают профилограммы на десяти равномерно расположенных участках в пределах зоны с наличием сверлений. С помощью прилагаемого к профилографу программного обеспечения определяется значение шероховатости. Значение шероховатости R_z не должно превышать 2,0 – 3,2 мкм (в зависимости от общей толщины меры). Если шероховатость поверхности покрытия превышает указанные значения, или на поверхности имеются локальные неровности, то поверхность подвергают дополнительной обработке методом шлифовки, после чего шероховатость поверхности измеряется заново [35].

Стоит отметить, в силу ряда причин, не представляется возможным изготовление мер моделей дефектов по описанной технологии, так как их характеристики не будут соответствовать характеристикам реальных объектов контроля. В этой ситуации мерой может служить образец с произвольными габаритами, при этом стоит учитывать краевой эффект.

4.4 Выводы по главе 4

1. На данный момент в стране отсутствует нормативно – техническая база, обеспечивающая единство измерений в области измерения остаточной толщины стенки ферромагнитного материала с использованием технологии MFL.
2. Разработан проект схемы прослеживаемости для дефектоскопов, реализующих технологию MFL.
3. Разработана технология изготовления мер моделей дефектов, обеспечивающих требуемые погрешности при градуировке, поверке и калибровке MFL – дефектоскопов.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ MFL – ДЕФЕКТОСКОПОВ

5.1 Средства измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующие технологию MFL

Одной из проблем использования дефектоскопов для контроля стальных листовых изделий до настоящего времени являлось то, что в большинстве случаев каждый из них пытался охватить как можно больший диапазон измерений остаточной толщины, соответственно, погрешность измерений была довольно высокая [33]. В связи с этим, у потребителя как правило, имеется MFL – дефектоскоп с неоптимальными геометрическими параметрами системы намагничивания, что приводит к ошибкам при его использовании на различных объектах контроля, а также снижению достоверности полученных результатов.

Решение рассмотренных в предыдущих главах задач построения геометрически и функционально подобных измерительных преобразователей позволило разработать серию дефектоскопов магнитного контроля с использованием технологии MFL [23]. Дефектоскопы имеют свой диапазон контролируемых толщин, согласно параметрам системы намагничивания, что позволяет обеспечить измерение толщины практически всех типов стальных листовых изделиях, а также измерение толщины защитных покрытий из неферромагнитных материалов [24].

В третьей главе были рассмотрены вопросы оптимальности системы намагничивания при изменении толщины объекта контроля. При построении преобразователя учитывалась возможность замены системы намагничивания, для перехода на другой диапазон толщин стальных листовых изделий. При этом, существенно не подвергалась изменению конструкция сканера (рисунок 5.1).

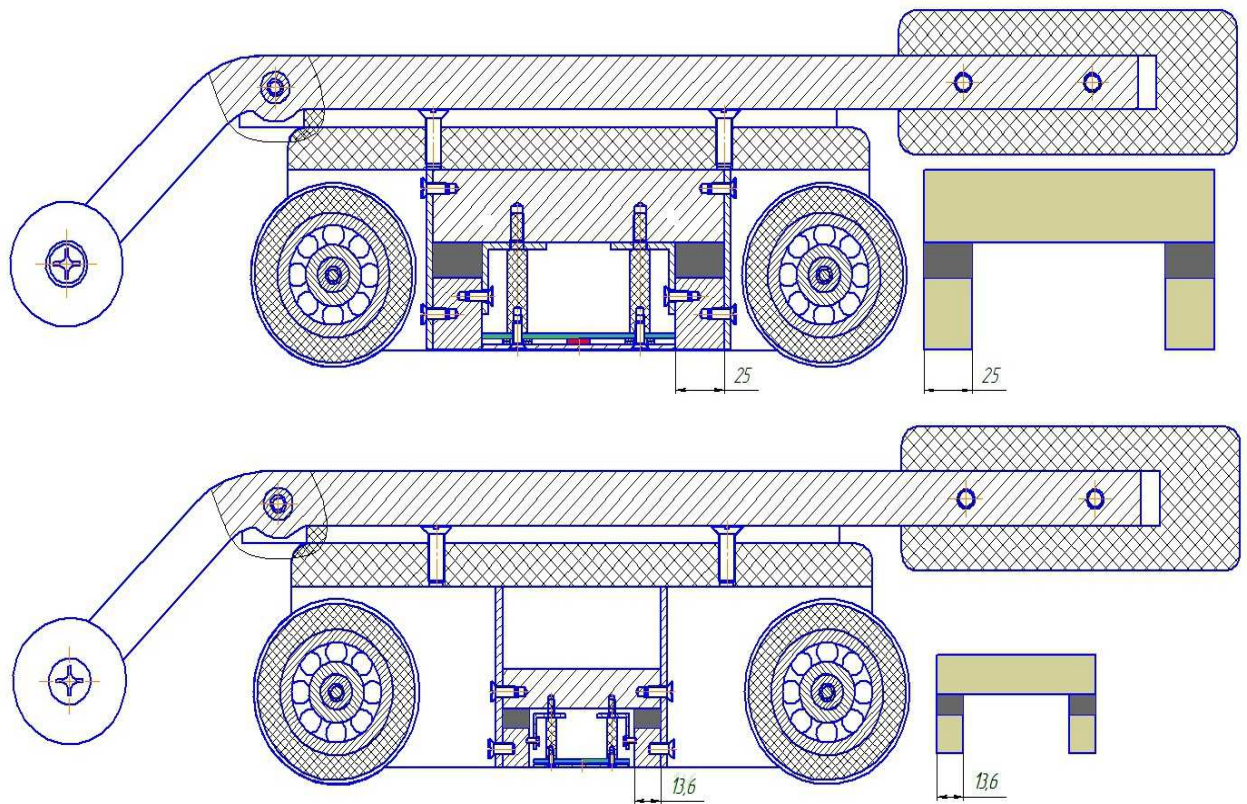
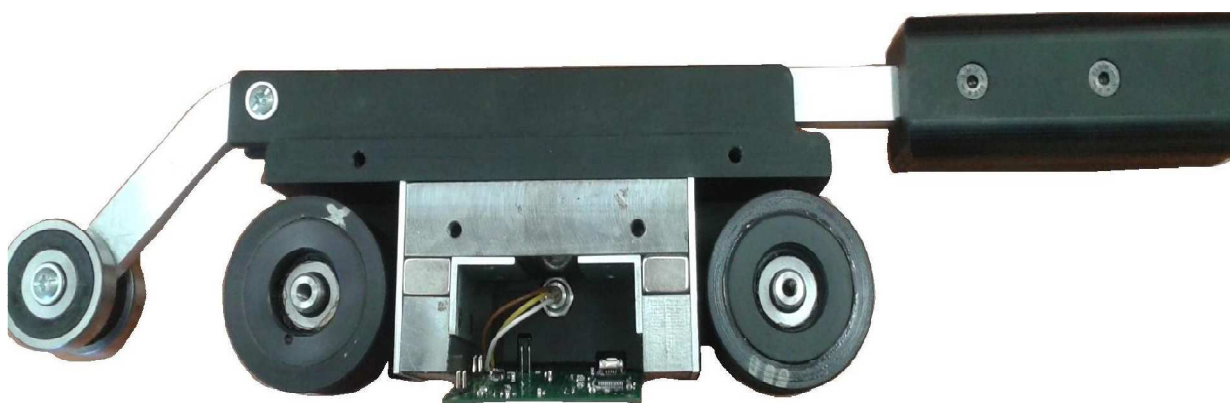


Рисунок 5.1 – Схема размещения сменной системы намагничивания на базе малого сканера для контроля стальных листовых изделий.

Представленная схема обеспечивает оптимальность контроля на разных диапазонах толщины, возможность реализации различных алгоритмов обработки и представления измерительной информации. Оптимальное намагничивание обеспечивает помехозащищенность при преобразованиях первичной измерительной информации. Обеспечивается измерение толщины практически всего диапазона толщин стальных листовых изделий, в частности днищ и стенок резервуаров, а также толщины защитного неферромагнитного покрытия.

С использованием представленной схемы реализован малый MFL – сканер в паре с многофункциональным прибором измерения геометрических параметров *Константа К5*, для контроля стальных листовых изделий. Внешний вид представлен на рисунке 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.2 – а) малый MFL – сканер (со снятой боковой панелью) для контроля стальных листовых изделий; б) multifunctional прибор измерения геометрических параметров *Константа K5*.

Малый MFL – сканер реализован в конструктиве 400x90x60 мм. Дефектоскоп, обеспечивает основную допустимую погрешность измерения на уровне $\pm (10...13) \%$ от величины измеряемого параметра, в зависимости от магнитной системы. В процессе измерений можно сохранять результаты в памяти и передавать их в компьютер по каналу связи USB. Также возможно

использование сканера с персональным компьютером, ноутбуком или планшетным компьютером. Применение тестовых методов обработки измерительной информации практически исключило временной и температурный дрейф показаний в диапазоне от минус 20⁰ С до плюс 50⁰ С. Время непрерывной работы составляет от 9-12 часов.

Дефектоскоп *Константа MFL* (рисунок 5.3). По основным схемотехническим и конструкционным решениям близок к малому сканеру для контроля стальных листовых изделий. Отличается наличием светодиодного дисплей, расположенного непосредственно на сканере, большей шириной сканирования, клавиатурой, облегчающими эксплуатацию дефектоскопа и возможностью работать без подключения к компьютеру, ноутбуку, планшету и прибору *Константа K5*. Дефектоскоп реализует отображение информации с использованием светодиодной подсветки и отображение в виде гистограмм на компьютере или планшете. Вид представления информации в сочетании с клавиатурой практически исключает неверные действия при эксплуатации, позволяет повысить производительность и достоверность. Габаритные размеры дефектоскопа 275x194x110 мм. Диапазон измерений для толщины $h= 4-12$ мм. Пределы допускаемой основной погрешности $\pm(0,1h-0,1)$. Источником питания дефектоскопа служит литий-ионный аккумулятор ET 18650 2900 mAh с напряжением 3,75 В. Дефектоскоп работает в диапазоне температуры окружающего воздуха от -10 до +50 °С.



Рисунок 5.3 – Дефектоскоп для контроля днищ резервуаров *Константа MFL*.

Константа MFL представляет собой подвижный сканер, который включает в себя модули индикации, управления и измерительный модуль.

Модули индикации и управления расположены в верхней части сканера, под лицевой панелью, на которой расположена клавиатура и индикаторы, а на торцевой поверхности – разъем USB. Измерительный модуль расположен в нижней части сканера между магнитными полюсами. Питание осуществляется от аккумуляторной батареи или элемента питания, устанавливаемого в расположенный в верхней части лицевой панели батарейный отсек.

5.2 Испытания средств измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующих технологию MFL на мерах моделей дефектов

Экспериментальные исследования средств измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующих технологию MFL проводились на мерах моделей дефектов, изготовленных и аттестованных по методике, изложенной в четвертой главе, рисунок 5.4.

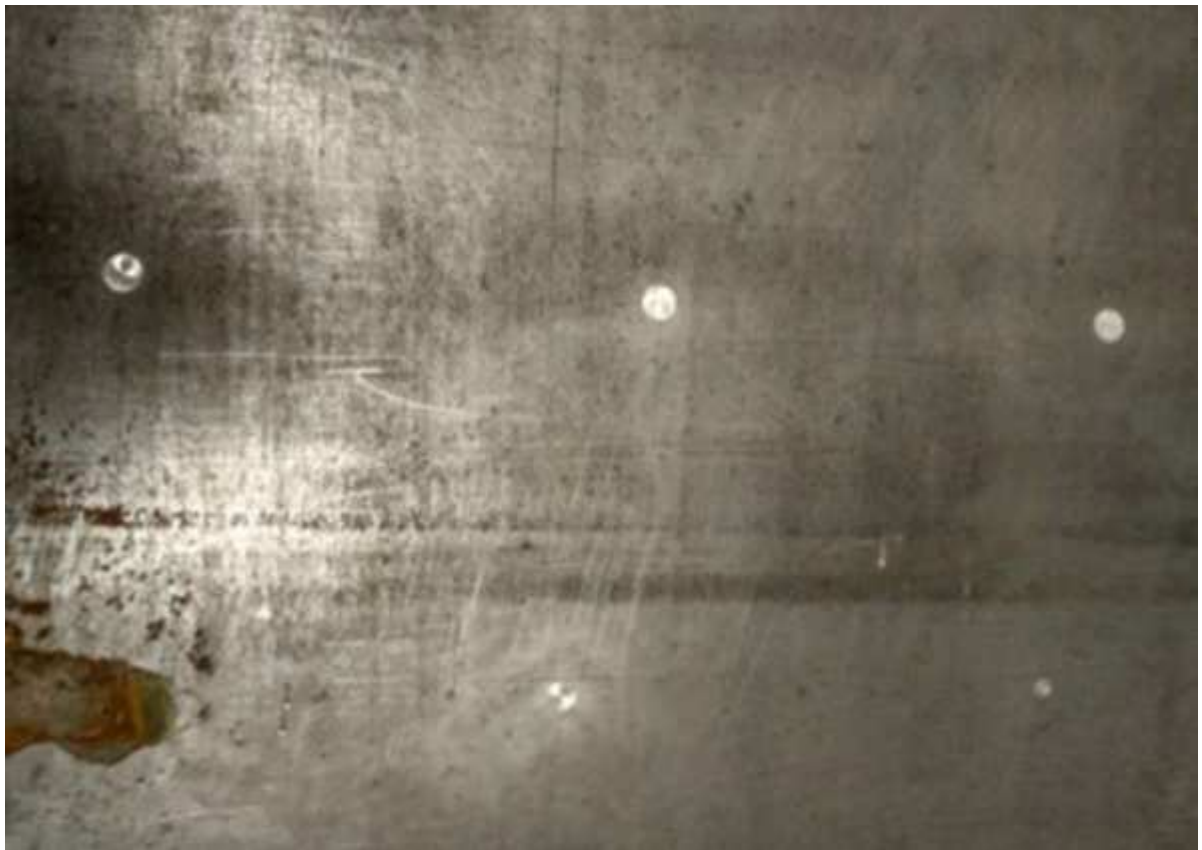


Рисунок 5.4 – Мера модели дефекта (остаточной толщины).

На каждой мере проводилась серия измерений. Рассчитывалось среднее значение серии измерений и отклонение результата измерений от действительного значения остаточной толщины.

Ввиду, получения большого массива кода, для примера, в таблице 5.1 приведены результаты обработки сигналов с тех датчиков, которые при сканировании находились вблизи дефекта. Шаг сканирования 2 мм.

Таблица 5.1 – Результат обработки сигналов в виде кода.

Расстояние, мм	Порядковый номер датчика Холла (dH)				
	№19	№20	№21	№22	№24
2	2042	2038	2035	2042	2038
4	2038	2026	2024	2030	2035
6	2036	2024	2025	2030	2034
8	2024	2018	2020	2024	2029
10	2020	2016	2011	2018	2024
12	2025	2024	2026	2022	2025
14	2033	2045	2040	2043	2037
16	2035	2054	2062	2058	2033
18	2038	2047	2055	2050	2036
20	2040	2038	2041	2039	2041

Картина зависимости полученных (рисунок 5.5) сигналов соответствует результатам моделирования, описанным в третьей главе.

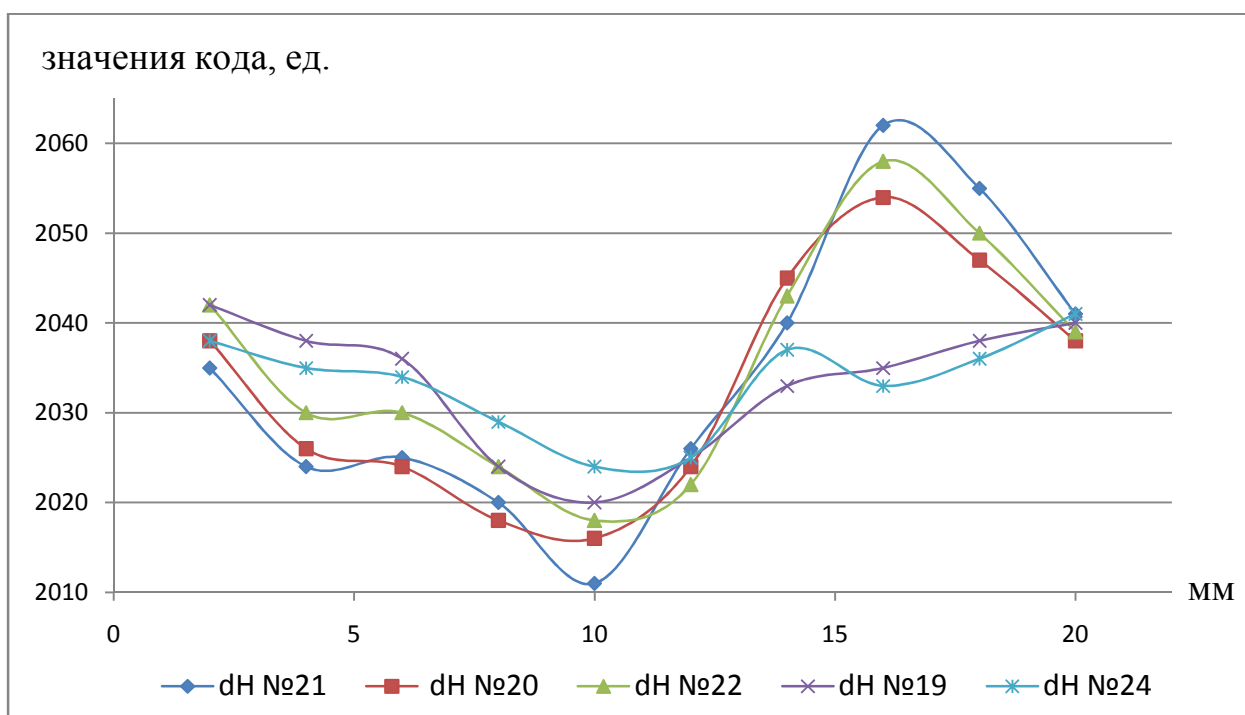


Рисунок 5.5 – Зависимость значений кода эквивалентного выходному напряжению при сканировании меры.

Полученная зависимость на рисунке 5.5 подтверждается показаниями полученной осциллограммы на рисунке 5.6.

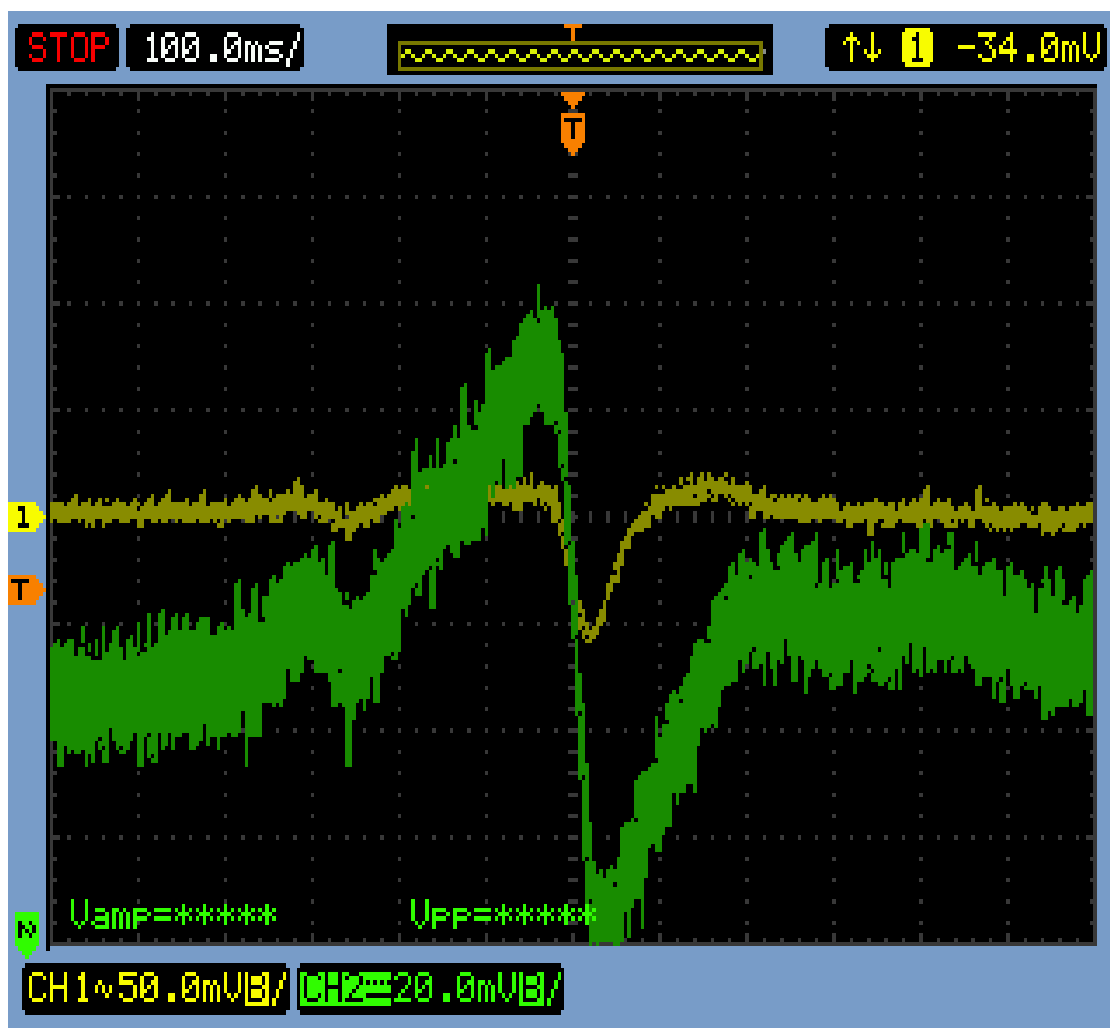


Рисунок 5.6 – Осциллограмма сканировании меры.

Результаты измерения остаточной толщины приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты измерений на мере остаточной толщины.

Стальной лист 1500x400 мм, толщиной $T=5$ мм, с мерами остаточной толщины				
h_d , мм	0,51	1,07	1,58	2,12
№ изм.	Результат измерения h , мм			
1	0,5	1,0	1,5	2,1
2	0,4	0,9	1,6	2,1
3	0,5	1,0	1,5	2,1
4	0,4	1,0	1,5	2,1
5	0,5	1,0	1,6	2,1
h_{cp} , мм	0,46	0,98	1,54	2,1
Δh , мм	-0,05	-0,09	-0,04	-0,02
$\Delta h_{max}=\pm(0,1h_d-0,1)$, мм	$\pm 0,0949$	$\pm 0,0893$	$\pm 0,0842$	$\pm 0,0788$
$\Delta_0 h$, %	-9,8	-8,4	-2,5	-0,9

Абсолютная погрешность измерения Δh_d определяется выражением:

$$\Delta h = \Delta h_{cp} - h_d, \quad (19)$$

где h_d – действительная остаточная толщина, измеренная в процессе аттестации меры.

Относительная погрешность измерения $\Delta_0 h$ определяется выражением:

$$\Delta_0 h = \Delta h / h_d \quad (20)$$

Максимальная допустимая абсолютная погрешность измерения рассчитывается исходя из условия $\Delta h_{max} \leq \pm(0,1h_d-0,1)$ мм.

На рисунке 5.7 представлена зависимость абсолютной погрешности измерения остаточной толщины. С увеличением измеряемой величины погрешность монотонно увеличивается, что объясняется общим ростом чувствительности магнитного преобразователя к измеряемой величине. В диапазоне остаточной толщины от 10 до 40 % утонения абсолютная погрешность измерения не превысила 10 %.

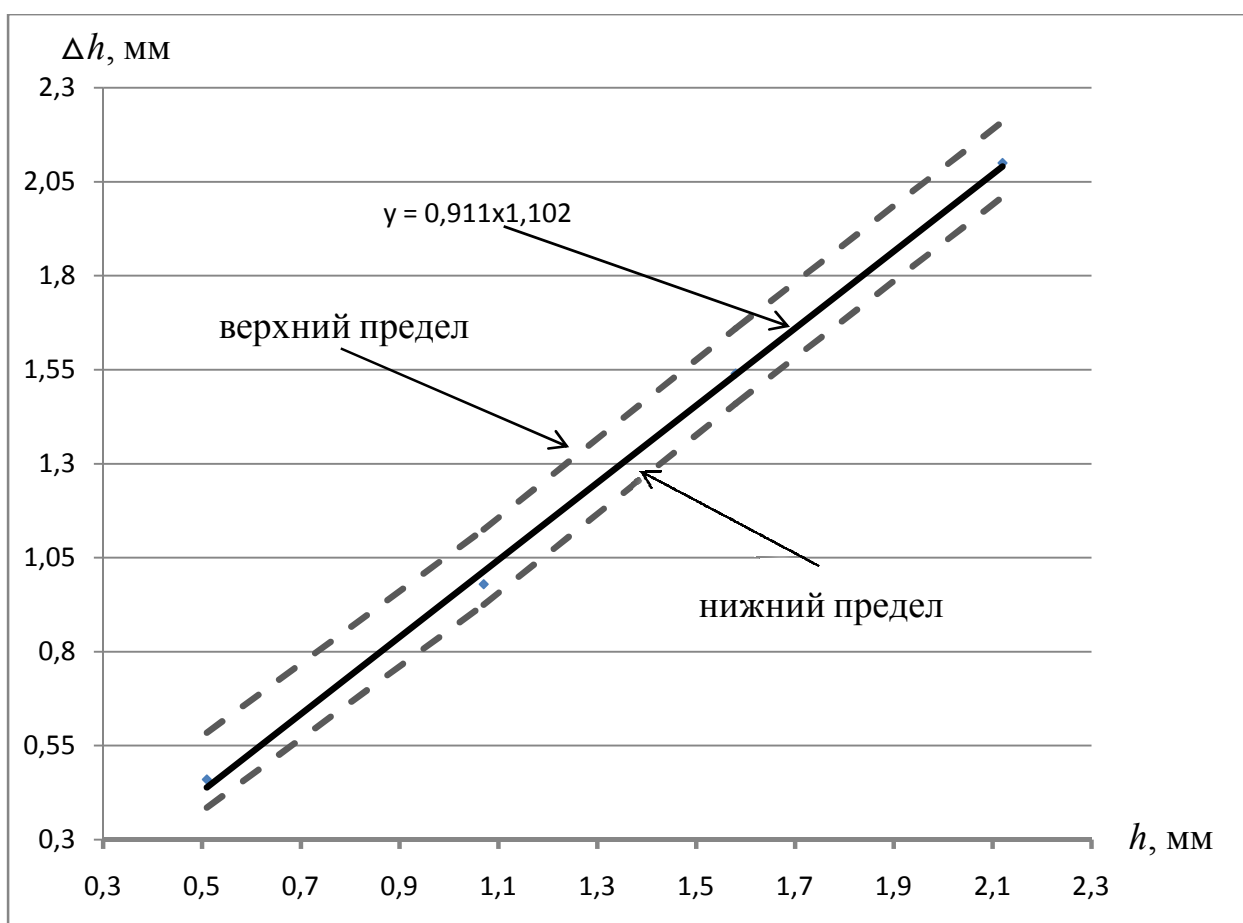


Рисунок 5.7 – Зависимость абсолютной погрешности измерения остаточной толщины.

Абсолютная погрешность измерения на образце толщиной 5 мм, наиболее часто встречающейся на практике, не превысила 0,1 мм, что удовлетворяет требованиям нормативных документов и большинства пользователей.

Результаты измерений на образце толщиной 5 мм и защитным неферромагнитным покрытием толщиной 5 мм представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты измерений на мере остаточной толщины с защитным покрытием

Стальной лист 1500x400 мм, толщиной $T=5$ мм, с мерами остаточной толщины, с защитным покрытием 5 мм				
h_d , мм	0,51	1,07	1,58	2,12
№ изм.	Результат измерения h , мм			
1	0,5	1,0	1,5	1,9
2	0,4	1,0	1,4	2,1
3	0,5	0,9	1,5	2

продолжение таблицы 5.3

4	0,4	0,9	1,6	2,1
5	0,4	1,0	1,5	2
$h_{\text{ср.}}, \text{ мм}$	0,44	0,96	1,5	2,02
$\Delta h, \text{ мм}$	-0,07	-0,11	-0,08	-0,1
$\Delta h_{\text{max}} = \pm(0,1h_{\text{д}} - 0,1), \text{ мм}$	$\pm 0,0949$	$\pm 0,0893$	$\pm 0,0842$	$\pm 0,0788$
$\Delta_0 h, \%$	-13,7	-10,2	-5,1	-4,7

На рисунке 5.8 представлена зависимость абсолютной погрешности измерения остаточной толщины при наличии защитного покрытия. На мере остаточной толщины от 10 % утонения абсолютная погрешность измерения составила 13,7 %.

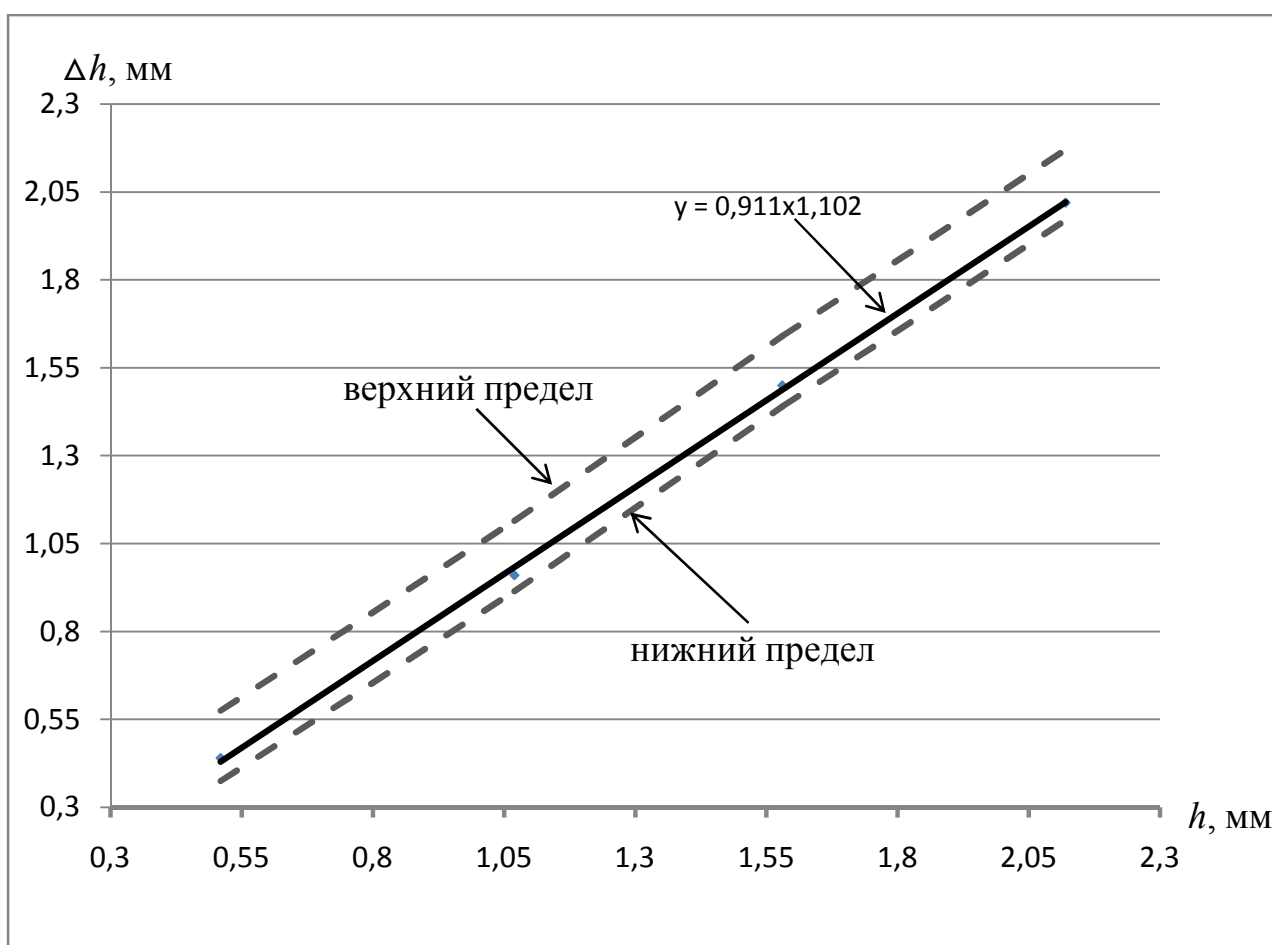


Рисунок 5.8 – Зависимость абсолютной погрешности измерения остаточной толщины эталонных мер при наличии защитного покрытия.

Абсолютная погрешность измерения на образце с защитным покрытием, также удовлетворяет требованиям нормативных документов и большинства пользователей. Однако, чувствительность заметно уменьшилась на всем диапазоне измерений остаточной толщины, что обусловлено увеличением воздушного зазора между магнитными полюсами сканера и областью намагничивания.

5.3 Испытания средств измерений параметров коррозионных повреждений днищ, использующих технологию MFL на реальных объектах

Кроме серии испытаний, проведенных на эталонных образцах, также были проведены эксперименты работы сканера на промышленном образце днища цилиндрического резервуара, изображенного на рисунке 5.9. Технические характеристики дефектов приведены в таблице 5.4.



Рисунок 5.9 –Контролируемый участок дна цилиндрического резервуара

Таблица 5.4 – Характеристики дефектов

№	Ширина, длина дефекта, мм.	Утонение, %	Краткое описание
1	7x7	30	Язвенная коррозия круглой формы, края острые.
2	6x2	20	Подповерхностная коррозия
3	2x2	30	Точечная коррозия
4	13x15	20	Коррозия пятнами овальной формы
5	7x8	30	Язвенная коррозия овальной формы, края не острые, с перепадом глубины до 40% утонения

Испытания на представленном образце вполне достоверно учитывают мешающие параметры магнитного контроля, которые могут возникнуть при

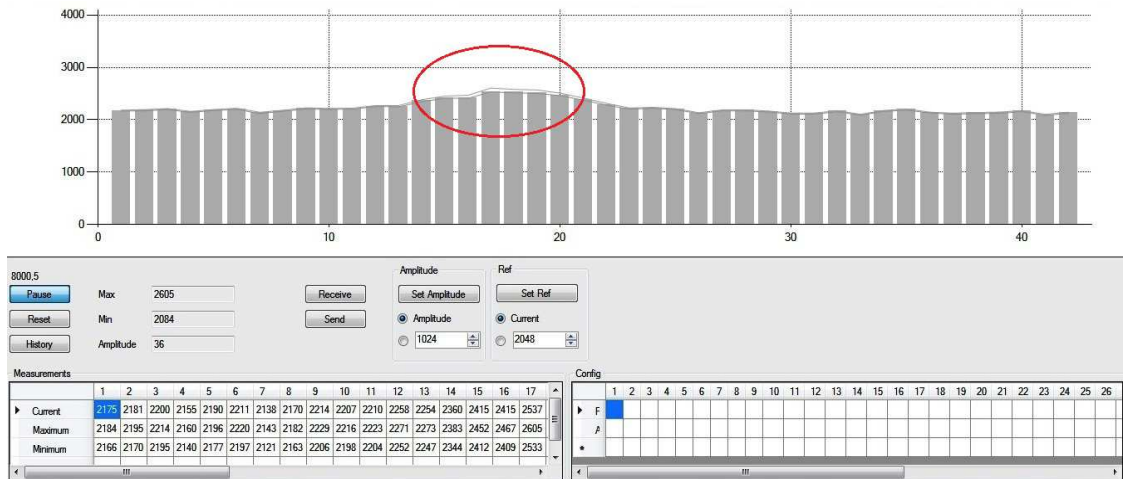
измерении остаточной толщины в промышленных условиях. Шероховатость поверхности не более Rz 200 мкм, что оказывает влияние на повторяемость результатов и может вызывать появление дополнительной погрешности. Результаты измерений приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты измерений остаточной толщины на образце днища резервуара

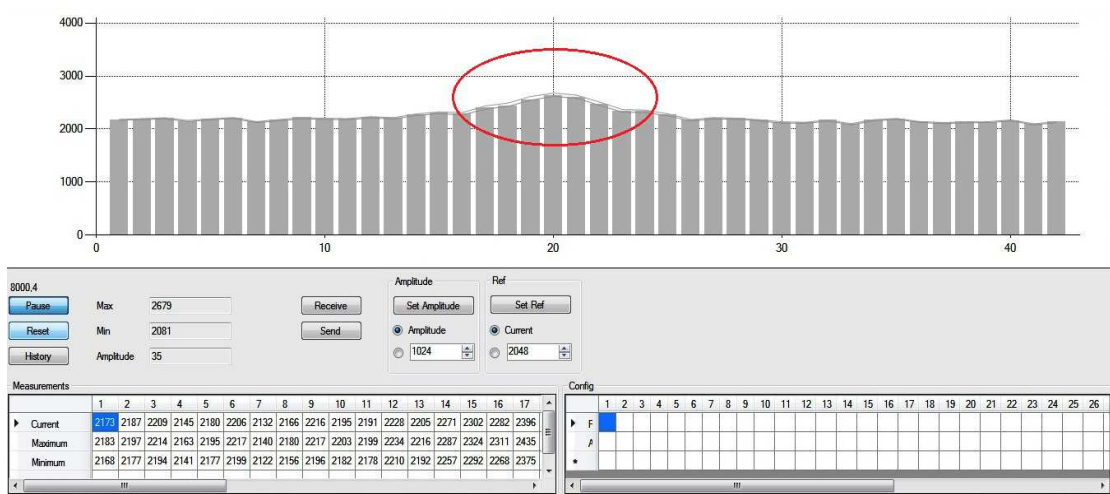
Стальной лист, толщиной $T=5$ мм, с дефектами					
№ дефекта	1	2	3	4	5
h_d , мм	1,6	0,9	1,5	0,9	1,5
№ изм.	Результат измерения h , мм				
1	1,4	0,7	1,6	1	1,3
2	1,5	0,8	1,7	0,6	1,6
3	1,3	0,9	1,6	0,9	1,5
4	1,5	0,8	1,4	0,9	1,4
5	1,6	0,6	1,8	0,6	1,3
$h_{ср.}$, мм	1,46	0,76	1,62	0,8	1,42
Δh , мм	-0,14	-0,14	0,12	-0,1	-0,08
$\Delta_0 h$, %	-8,8	-15,6	8	-11,11	-5,33

Абсолютная погрешность измерения глубины всех дефектов, кроме №4 и №5 превышает 0,1 мм. Сильный разброс результатов и большая абсолютная погрешность связана с существенным влиянием на результаты измерений шероховатости и магнитной проницаемости образца. Для повышения точности измерений остаточной толщины рекомендуется учитывать магнитную проницаемость контролируемого объекта и в соответствии с этим производить калибровку сканера. Шероховатость, в свою очередь, приводит к увеличению разброса результатов показаний, однако отстройка от изменения эквивалентного зазора позволяет уменьшить влияние шероховатости на дополнительную погрешность измерения остаточной толщины [20].

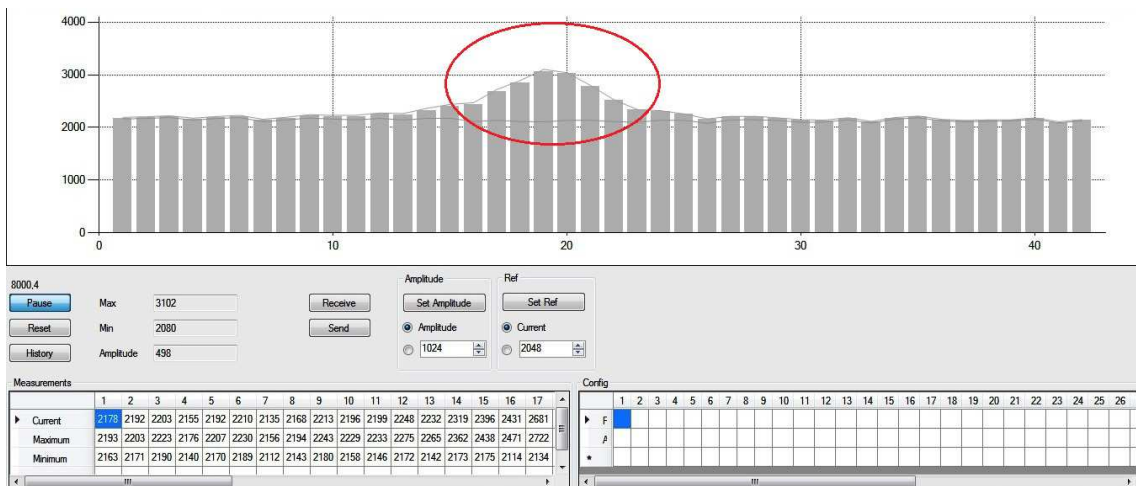
В полевых условиях, как говорилось ранее, пользователь может получать результаты, используя планшетный компьютер или ноутбук. Для наглядности был выполнен ряд экспериментов с использованием объекта контроля в виде стального листа $T = 6$ мм с искусственными дефектами 10, 20, 30 % утонения, имитирующими реальную язвенную коррозию. Результатом экспериментов являются гистограммы уровней сигналов (рисунок 5.10) в виде единиц кода, эквивалентных выходному напряжению преобразователей. На полученных гистограммах представлен результат обработки сигнала с выхода датчика Холла, при пересечении им области искусственного дефекта.



a)



б)



в)

Рисунок 5.10 – Результаты вывода сигналов на ноутбук при пересечении дефектов: а) искусственный дефект 10% утонения; б) дефект 20% утонения; в) дефект 30% утонения.

5.4 Выводы к главе 5

1. На основании выполненных исследований разработан дефектоскоп с комплектами геометрически подобных преобразователей для контроля остаточной толщины ферромагнитных листовых изделий для использования в лабораторных, цеховых и полевых условиях.
2. На основании выполненных исследований разработан дефектоскоп, охватывающий весь диапазон толщин днищ стальных цилиндрических резервуаров.
3. Разработанные и изготовленные эталоны остаточной толщины обеспечивают получение заданных метрологических характеристик дефектоскопов при градуировке и калибровке. Повторяемость характеристик эталонов остаточной толщины обеспечивает сходимость результатов при их использовании.
4. Разработанные дефектоскопы, а также методики их применения позволяют производить сбор, и передачу результатов измерений в компьютеры для обработки, представления, а также хранения результатов. Это позволяет производить мониторинг состояния объектов и изделий на всех этапах жизненного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе обоснован подход, разработаны теоретические и практические положения для расчета оптимальных характеристик и параметров MFL – преобразователей, а также алгоритмы их функционирования и методики проведения измерений остаточной толщины днищ стальных цилиндрических резервуаров, обеспечивающие оптимальную чувствительность при подавлении мешающих параметров.

В результате выполненных теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ решена крупная научно – техническая проблема, имеющая важное хозяйственное значение в области диагностики состояния объектов хранения и транспортировки нефтехимической

продукции, а также листовых ферромагнитных материалов применяемых в различных областях производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Ansys** [Электронный ресурс] URL: www.ansys.com (дата обращения: 12.07.2015)
2. **ASTM E 570-97**. Standard Practice for Flux Leakage Examination of Ferromagnetic Steel Tubular Products. 1997. – 5 p.
3. **Drury J. C.** I. Eng. M. Inst. NDT, A Comparison of the Magnetic Flux Leakage and Ultrasonic Methods in the detection and measurement of corrosion pitting in ferrous plate and pipe. Silverwing (UK) Limited A. Marino, Procontrols. r. l. – Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn701/idn701.html>.
4. **Femm** [Электронный ресурс] URL: www.femm.info (дата обращения: 12.07.2015)
5. **Infolytica** [Электронный ресурс] URL: www.infolytica.com (дата обращения: 02.09.2016)
6. **Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P.** Modeling and optimization of transducers implementing technology Magnetic Flux Leakage (MFL). / Book of abstracts. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich. 2016. – 116 p.
7. **Potapov A.I., Syasko V.A., Pudovkin O.P.** Optimization of the parameters of primary measuring transducers that use the MFL technology / Russian journal of nondestructive testing. 2015.Part 51. № 9. – 596 p.
8. **Stanley R. Chapter 5**, “Magnetic Leakage Field Measurements”, third edition: Vol. 8, Magnetic Testing, Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 2008. – p. 139 – 156.
9. **Stanley, R.** Basic Principles of Magnetic Leakage Inspection Systems for the Evaluation of Oil Country Tubular Goods. Electromagnetic Methods of Nondestructive Testing. - NY: Gordon and Breach, 1985. - p. 97 – 150.
10. **Syasko V.A., Pudovkin O.P.** The modeling and optimization of parameters MFL transducers. / Book of abstract. 54th Annual British conference of non-destructive testing, 2015. – 27 p.

11. **TesTex** [Электронный ресурс] URL: <http://testex-ndt.ru/static/falcon> (дата обращения: 07.08.2016)
12. **Андреева Е.Г., Шамец С.П., Колмогоров Д.В.** Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета Ansys. Нефтегазовое дело. - Омск : Омский государственный технический университет, 2002. – 90 с.
13. **Аркадьев В.К.** Электромагнитные процессы в металлах [Книга]. - [б.м.] : М.: Гос-энергоиздат, 1936. - Т. 2. – 312 с.
14. **Арнольд Р.Р.** Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами, М., «Энергия», 1969. – 184 с.
15. **Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л.,** Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. - М : Издательство стандартов, 2004. - 264 с.
16. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники [Книга]. - [б.м.] : М.: Высшая школа, 1996. - 9-е изд. 423-446 с.
17. **Бинс К., Лауренсон П.** Анализ и расчет электрических и магнитных полей. [Книга]. - [б.м.] : М.: Энергия, 1970. - Пер. с англ. 24-38 с.
18. **Бурков П.В., Буркова С.П., Тимофеев В.Ю.** Исследование состояния днища резервуаров вертикального стального резервуара, анализ методик диагностики его состояния и выявления причин его деформации [Статья] / Вестник Кузбасского государственного технического университета №4 (98). 2013. 79-81 с.
19. **Бучельников В.Д.** Физика магнитных доменов [Статья] / Соросский образовательный журнал. №12. 1997. 92-99 с.
20. **Веркович Г.А. и др** Справочник конструктора точного приборостроения. / ред. Явленского К.Н.. - Л : Машиностроение, 1989. - 792 с.
21. **Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М.** Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS [Книга]. - [б.м.] : МЭИ (ТУ) Кафедра электрофизики, 2003. 28-73 с.

22. **Герасимов В.Г, Ключев В.В, Шатерников В.Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. [Книга]. - [б.м.] : М.: Энергоатомиздат, 1985г., 190-198 с.
23. **Герасимов В.Г, Остапнин Ю.М, Покровский А.Д.** Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами. [Книга]. - [б.м.] : М.: Энергия, 1978. 187-200 с.
24. **Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В.** Неразрушающий контроль [Книга] / Электромагнитный контроль. - [б.м.] : М.: Высшая школа, 1992. - Т. 3 : - 212 с.
25. **Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В.** Электромагнитные поля и волны. [Книга]. - [б.м.] : М.: Советское радио, 1971. - изд. 2-е. 278-332 с.
26. **ГОСТ 19903-74.** Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. 1974. – 17 с.
27. **ГОСТ 20911-89.** Государственный стандарт союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения. 1989. – 10 с.
28. **ГОСТ 24450-80.** Государственный стандарт союза ССР. «Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения». 1980. – 12 с.
29. **ГОСТ 5272-68.** Коррозия металлов. Термины. 1968. – 12 с.
30. **ГОСТ Р 52910-2008.** Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. 2008. – 56 с.
31. **Гуртов В.А., Осауленко Р.Н.** Физика твердого тела для инженеров. Учебное пособие. Москва. 2007. 320-470 с.
32. **Гусев А.П., Поярков П.Н.** Магнитное поле поверхностного дефекта при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов [Статья] / Дефектоскопия 1992. № 11. 71-75 с.
33. **Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г.** Электромагнитная дефектоскопия. - М : Машиностроение, 1980. – 132-188 с.
34. **Дружинин В.В.** Магнитные свойства электротехнической стали. Изд. 2-е, перераб. М., «Энергия», 1974. 5-25 с.

35. **Жуков В.К.** Электромагнитные методы многопараметрового неразрушающего контроля. – Электромагнитные методы измерения и контроля [Книга]. - Томск : [б.н.], 1985. - Вып. 3. 67-80 с.
36. **Зисман Г.А., Тодес О.М.** Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1972. – 326 с.
37. **Ивкин А.Е.** Вихретоковые методы измерения толщины неферромагнитных электропроводящих покрытий на неферромагнитных электропроводящих основаниях: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Ивкин Антон Евгеньевич. – Спб., 2013. – 160 с.
38. **Измерение, контроль, качество.** Неразрушающий контроль: [Книга]. - М.: ИПК., Издательство стандартов, 2002. - Справочник. 5-15 с.
39. **Казаков В.Г.** Процессы перемагничивания. Методы записи на магнитных пленках [Статья] / Соровский образовательный журнал. №1. 1997. 99-106 с.
40. **Кондрашова О.Г., Назарова О.М.** Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / Нефтегазовое дело, 2004, № 2. 21-29 с.
41. **Кунце Х.И.** Методы физических измерений. - М : Мир, 1989. – 216 с.
42. **Лансберг Г.С.** Элементарный учебник физики: [Книга]. – ФИЗМАТЛИТ. Том 1. 2010. – 491 с.
43. **Марченко В.И.** К теории магнитных доменов. [Статья] / Журнал экспериментальной и теоретической физики. Выпуск 6. 1976. 268-322 с.
44. **Михеев М.Н., Горкунов Э.С.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. - М : Наука, 1993. – 222 с.
45. **Неразрушающий контроль металлов и изделий:** Справочник [Книга] / ред. Самойловича Г.С.. - М : Машиностроение, 1976. - Т. 2. - 356 с.
46. **Неразрушающий контроль.** Справочник в 7 томах под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6., кн. 1. Магнитные методы контроля. – М.: Машиностроение, 2004.- 275 с.

47. **Об обеспечении единства измерений:** Закон Российской Федерации [Книга]. – М.: Государственные стандарты, 9 июня 1993. - 56-70 с.
48. **Перченко С.В., Станкевич Д.А.** Холловский дефектоскоп. [Статья] / Вестник ВолГУ. Серия 1. Выпуск 13. 2010. 118-126 с.
49. **ПКТИ** [Электронный ресурс] URL: http://www.zaopkti.spb.ru/services07_46.html (дата обращения: 22.01.2015)
50. **Потапов А.И., Сясько В.А.** Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / Научное, методическое и справочное пособие.- Спб, 2009. -904 с
51. **Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П.** Неразрушающий контроль днищ резервуаров для хранения нефтепродуктов с использованием технологии MFL [Электронный ресурс]. Научный интернет-журнал. Технологии техносферной безопасности, 2016, Выпуск 5(69) - Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-5/2016-5.html> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.
52. **Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П.** Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL [Статья] /Дефектоскопия 2015. № 8. 64-71 с.
53. **Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П., Шаранова Д.А.** Анализ погрешности измерений остаточной толщины днищ цилиндрических вертикальных резервуаров по технологии MFL с использованием метода конечных элементов [Статья] / Контроль. Диагностика, 2016. № 11. 10–15 с.
54. **Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий:** Справочник.Книга 1, В 2-х книгах. / ред. Ключева В. В.. - М : Машиностроение, 1976. – 396 с.
55. **Пудовкин О.П.** Конечно-элементное моделирование MFL-преобразователя [Статья] / Сборник трудов III международной научно-практической конференция «Инновации на транспорте и в

- машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля», 2015, - 85 с.
56. **Пудовкин О.П.** Оптимизация параметров магнитной системы MFL преобразователей [Статья] / Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля», 2016, Том IV. 127-130 с.
 57. **РД 03-131-97** Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. 1997. – 22 с.
 58. **СА-03-008-08.** Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности. 2009. 82 - 99 с.
 59. **Слесарев Д.А., Абакумов А.А.** Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля [Статья] / Дефектоскопия, № 9, 2013 г, 3-9 с.
 60. **СНиП 2.03.11-85.** Защита строительных конструкций от коррозии. 1985. – 66 с.
 61. **СНиП II-23-81.** Нормы проектирования. Стальные конструкции. 2011. 6-14 с.
 62. **Сясько В.А.** Геометрически подобные магнитоиндукционные преобразователи толщиномеров защитных покрытий [Статья] / Приборостроение. - 2011. - № 9. – 64 – 70 с.
 63. **Сясько В.А.** Подавление влияния мешающих параметров при проектировании магнитоиндукционных толщиномеров защитных покрытий [Статья] / Контроль диагностика. - 2010. - № 9. - 16 – 22 с.
 64. **Сясько В.А., Ивкин А.Е.** Методы и средства измерения толщины металлических покрытий [Статья] / Мир гальваники. - 2011. - №4(16) - 54-57 с.

65. **Федотов А.В.** Расчет и проектирование индуктивных измерительных устройств. - М : Машиностроение, 1979. – 176 с .
66. **Шульц Е.Ф.** Индуктивные приборы контроля размеров в машиностроении. - М : Машиностроение, 1974. – 144 с.
67. **Щербинин В.Е., Горкунов Э.С.** Магнитный контроль качества металлов. - Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 264 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Утверждаю
главный инженер
ООО "КОНСТАНТА"
Булатов А.С.



Справка
о внедрении результатов диссертационного исследования
Олега Петровича Пудовкина

Результаты диссертационного исследования О.П. Пудовкина на тему: «Разработка прибора неразрушающего контроля стенки днищ стальных цилиндрических резервуаров, реализующего технологию MFL», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практике деятельности ООО «КОНСТАНТА» в виде:

- использования методики расчета оптимальных параметров магнитной системы MFL – преобразователей.
- использования предлагаемых схмотехнических и конструкторских решений, положенных в основу при разработке MFL – дефектоскопа.
- реализации алгоритмов обработки первичной измерительной информации, обеспечивающих выделение информативного параметра и подавление влияния мешающих параметров.
- применения технологии изготовления контрольных образцов и методик их применения для градуировки и калибровки MFL – дефектоскопов.

На основании указанных результатов совместно разработан прибор (сканер-дефектоскоп) для измерения остаточной толщины ферромагнитных листовых изделий «КОНСТАНТА – MFL».

Прибор успешно прошел производственные испытания в соответствии с разработанной программой.

Подготовлен комплект РКД, а также комплект документов для проведения испытаний в целях утверждения типа и освоено его производство.



Заместитель директора по
производству Малков О.Л.