

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Потапов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

Гордиенко Валерий Евгеньевич

доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра наземных транспортно-технологических машин, профессор.

Чертов Дмитрий Николаевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «НДТ-МАРКЕТ», ведущий специалист.

Ведущая организация -

закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр».

Защита диссертации состоится 29 сентября 2017 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан «20» июля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 рассматриваемых объектов играет остаточная толщина их стенок. Недопустимое утонение в ряде случаев может приводить к авариям и катастрофам с большими экономическими потерями и человеческими жертвами. В связи с этим проведение контроля с целью выявления коррозионных повреждений стенок 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 рентгенофлуоресцентных 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 методе β -отражения 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 его 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 $\mu_{ок}$ материала объекта контроля, максимальная допустимая шероховатость R_{Zmax} 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 глубины дефекта h . 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 (Magnetic Flux Leakage) для контроля днищ цилиндрических резервуаров, является одной из главных задач магнитной дефектоскопии.

Степень научной разработанности темы: Значительный вклад в развитие магнитных методов внесли отечественные и зару-

бежные 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.

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.

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.

Задачи исследований:

- Провести анализ методов повышения чувствительности и отстройки от воздействия мешающих параметров на результаты измерений;
- Разработать модель магнитной системы, обеспечивающей возможность оптимизации чувствительности MFL – преобразователя дефектоскопа;
- Разработать способ выделения информативного параметра сигнала на фоне влияния мешающих параметров, позволяющий проводить измерения с погрешностью, не превышающей заданную;

– Разработать средства метрологического обеспечения выявления коррозионных повреждений;

– 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.

Методы исследования. 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 MFL – преобразователя.

Практическая ценность диссертации:

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

- разработана модель магнитной системы MFL – преобразователя, гарантированно обеспечивающего достоверность результатов выявления коррозионных повреждений;

- разработан MFL – дефектоскоп для контроля днищ цилиндрических резервуаров.

Обоснованность и достоверность научных положений, подтверждаются численными расчетами измерительных процессов

различными методами, сравнением с результатами, полученными в известных работах, а также проверкой результатов многочисленными экспериментами.

Личный вклад автора:

- проведен анализ конструкции MFL – дефектоскопов, эксплуатируемых при контроле днищ цилиндрических резервуаров;
- на основе анализа литературных источников и экспериментальных исследований обоснована неоптимальность параметров MFL – дефектоскопов;
- предложен способ оптимизации параметров магнитной системы MFL – преобразователя, обеспечивающих, при заданных габаритах, максимальную чувствительность в требуемых диапазонах толщин стенок и вариации мешающих параметров объектов контроля;
- разработана математическая модель системы намагничивания стального листа с искусственным дефектом, имитирующим язвенную коррозию;
- разработаны и изготовлены средства метрологического обеспечения измерений остаточной толщины стенки днищ стальных цилиндрических резервуаров;
- сформулированы научные положения, основные выводы и рекомендации.

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 университет 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 университет 2016

г.); XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва 28-2 марта 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 в изданиях, входящих в список рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 128 страницах, содержит 74 рисунка, 1 приложение, 8 таблиц, список литературы из 67 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы работы, проанализирована степень разработанности темы, научная новизна, а также идея работы.

В главе 1 рассмотрены классификации стальных вертикальных резервуаров для хранения нефтепродуктов, проведен анализ современного состояния методов и приборов неразрушающего контроля целостности стенки днищ РВС.

В главе 2 приведена расчетно-теоретическая модель взаимодействия магнитного поля системы намагничивания MFL – преобразователя и объекта контроля, а также обобщенная структурная схема MFL – преобразователя.

В главе 3 представлены основные методические принципы построения первичных MFL – преобразователей, на основе построенной математической модели, разработаны алгоритмы формирования магнитного поля и обработки первичной измерительной информации, обеспечивающих подавление влияния мешающих параметров.

В главе 4 проведен анализ современной стандартизации по неразрушающему контролю остаточной толщины стенки ферромагнитного материала, а также предложен проект схемы прослеживаемости для средств измерений остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров, реализующих технологию MFL.

В главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований MFL – дефектоскопа на образцах дефектов. Выполнен

сравнительный анализ сходимости расчетных результатов и испытаний на образцах реальных дефектов.

Заключение отображает основные выводы и рекомендации по результатам диссертационной работы.

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие положения:

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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.

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.

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 1 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 $B_z(h^*, x^* = 0) \approx 0$

Из рисунка 2 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 характери-

стики 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.

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. Объект контроля не находится в состоянии близком к насыщению.

На рисунке 2 представлены расчетные зависимости $B_{zm}(h^*, T)$ для рассматриваемой модели преобразователя над ферромагнитным листом из стали 1010 (аналог Ст.10) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила.

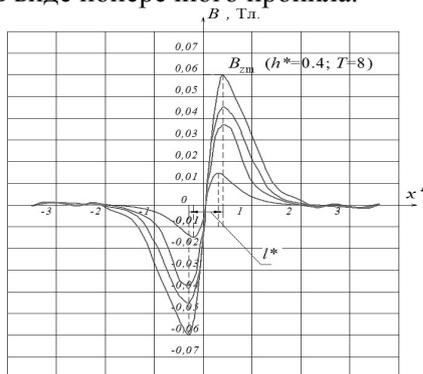


Рисунок 1 – Зависимость $B_z(h^*, x^*)$ над листом из стали 1010 толщиной $T = 8$ мм в районе поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм

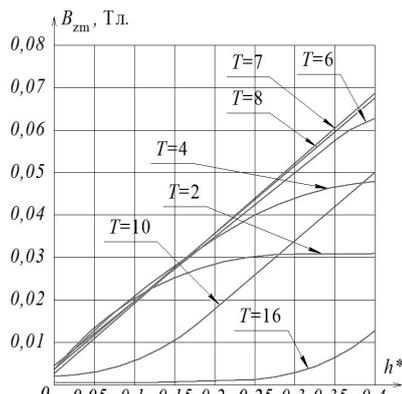


Рисунок 2 – Зависимость $B_{zm}(h^*, T)$ над листом из стали 1010 с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм

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 приведены расчетные значения магнитной индукции $B_M(a)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu(b)$ металла листа при его намагничивании преобразователем, в зависимости от T , для сталей марок 1010 и 1008 (близкой по характеристикам к Ст.10 и Ст.08) 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 $30 < \mu < 70$.

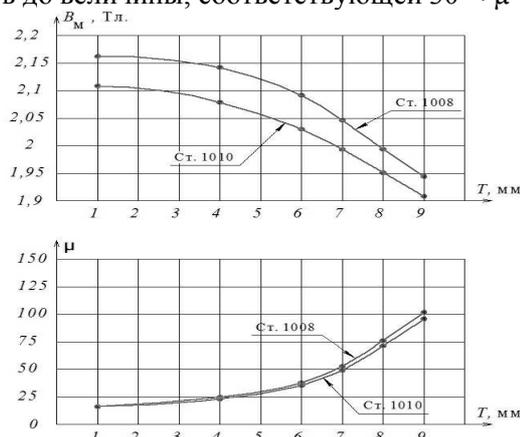


Рисунок 3 – Зависимость магнитной индукции $B_M(a)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu(b)$ в металле листа от его толщины T в зоне установки чувствительного элемента

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 1 приведены рассчитанные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны измерения, соответствующие сформулированным требованиям.

Таблица 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

Макетирование измерительных преобразователей показало сходимость результатов моделирования и расчетов с экспериментальными данными, в частности, уменьшение $\Delta h(h, T)$, при расширении диапазонов h^* и T . Настройка преобразователей с использованием контрольных образцов перед началом работы позволяет контролировать изделия с толщиной стенки T от 2,7 до 16 мм и измерять глубину питинговых коррозионных повреждений в диапазоне h^* от 0,15 до 0,4 с абсолютной допустимой погрешностью $\Delta h \leq 0,1h$, сопоставимой с погрешностью при ультразвуковой толщинометрии.

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.

Мешающие геометрические и физические параметры для данного метода должны контролироваться на этапах изготовления и поверки средств измерений в соответствии с представленной на рисунке 4 предлагаемой 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 – Проект схемы прослеживаемости для средств измерений остаточной толщины днищ цилиндрических резервуаров, реализующих технологию MFL

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

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 разработать стандарт. В дальнейшем на основа-

нии стандарта должны быть разработаны поверочные схемы и средства измерений для их реализации.

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).

Меры моделей дефектов (рисунок 5) 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.

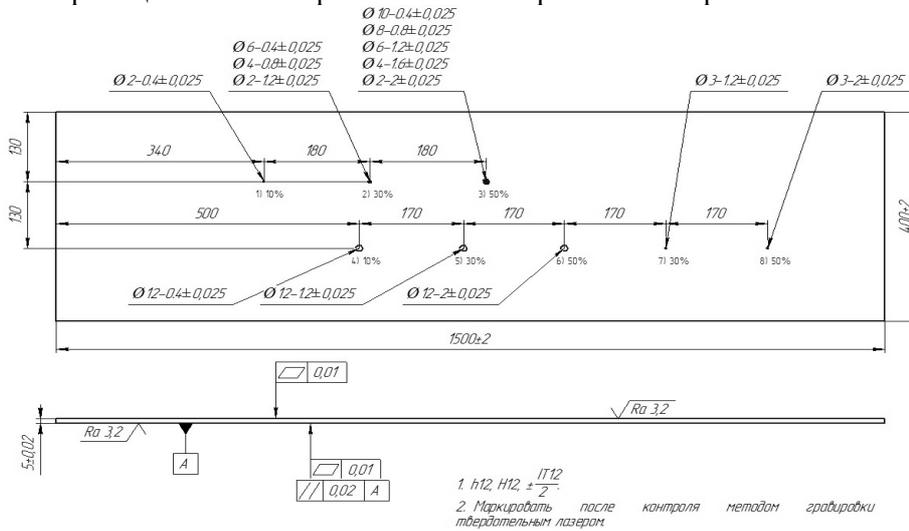


Рисунок 5 – Фрагмент рабочего чертежа на изготовление меры

На основании анализа задачи измерения остаточной толщины стенки дна резервуара можно составить структурную схему системы намагничивания MFL – преобразователя (рисунок 6). Контролируемым параметром является глубина дефекта h .

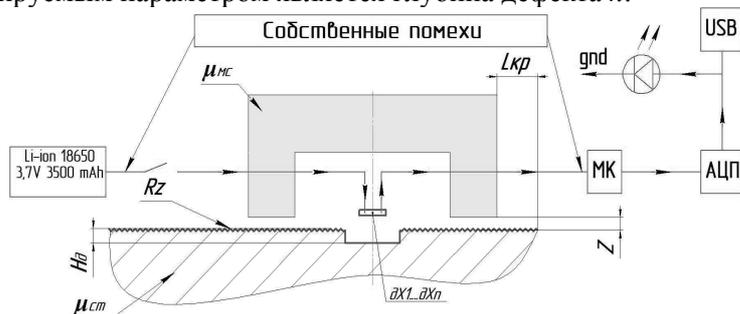


Рисунок 6 – Обобщенная структурная схема MFL – преобразователя. Контролируемый и мешающие параметры

Для MFL – преобразователя можно выделить следующие основные мешающие параметры:

- 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).

На рисунке 7, в соответствии с рассматриваемой моделью первичного преобразователя, приведены расчетные зависимости, иллюстрирующие влияние шероховатости внешней поверхности в диапазоне $R_z = 0 - 400$ мкм на величину магнитной индукции B_{zm} . Видно, что с увеличением R_z чувствительность преобразователя к дефектам снижается, а дополнительная погрешность измерения $\Delta h(R_z)$ увеличивается. В частности, для листа толщиной $T = 6$ мм с дефектом глубиной $h \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(R_z) =$

$100) = 3\Delta h_{\text{д}}$. Соответственно, для листа толщиной $T = 10$ мм с дефектом глубиной $h^* \approx 0,1$ дополнительная погрешность $\Delta h(R_z = 100) = 2\Delta h_{\text{д}}$ и для $h^* \approx 0,2$ дополнительная погрешность $\Delta h(R_z = 100) = 4\Delta h_{\text{д}}$.

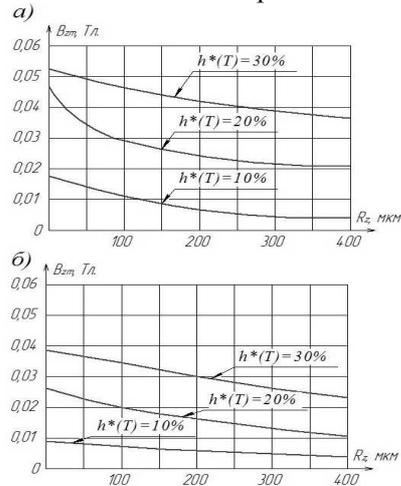


Рисунок 7 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости поверхности R_z для листа толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) мм с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность со стороны точки наблюдения)

Если шероховатой является поверхность с обратной стороны стенки объекта контроля, существенных изменений ее влияния не будет (рисунок 8).

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 $B_{\text{zm}} \sim 1/Z$ при прочих равных условиях. На рисунке 9 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 $\Delta h(\Delta Z=1) = 2\Delta h_{\text{д}}$, а для $T = 10$ мм $\Delta h(\Delta Z=1) = 3\Delta h_{\text{д}}$.

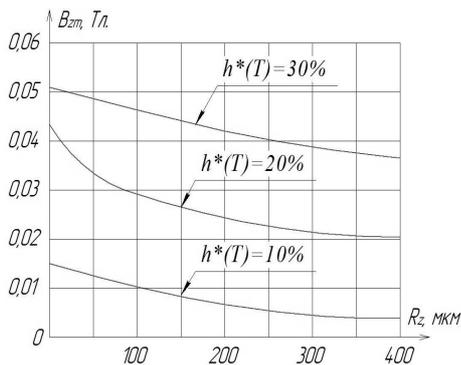


Рисунок 8 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от шероховатости R_z для листа толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) мм с искусственным дефектом в виде поперечного пропила (шероховатая поверхность с противоположной стороны от точки наблюдения)

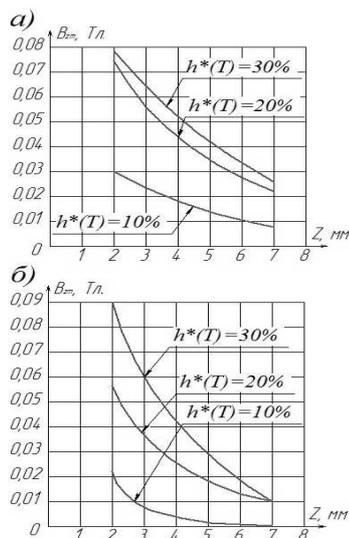


Рисунок 9 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от зазора Z при толщине листа $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б)

Анализ представленных на рисунке 9 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 $\mu_{мс}$ и $\mu_{ок}$ деталей магнитной системы и материала объекта контроля, соответственно, которые могут привести к снижению достоверности результатов измерений. 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 10), отличие магнитных свойств, которых сопостави-

мо с возможной локальной девиацией $\Delta\mu$ используемых для этого сталей.

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 $\Delta h(\Delta\mu_{mc}) = 2\Delta h_d$ (рисунок 11).

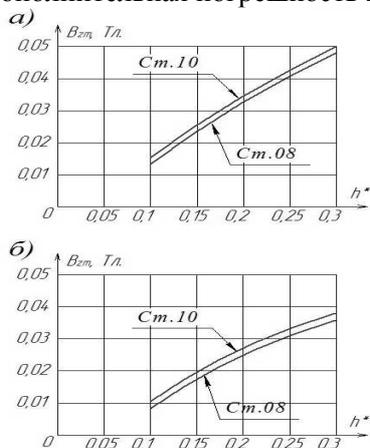


Рисунок 10 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины h^* дефекта в случае выполнения деталей магнитной системы из сталей марок Ст.10 и Ст.08 над ферромагнитными листами толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила

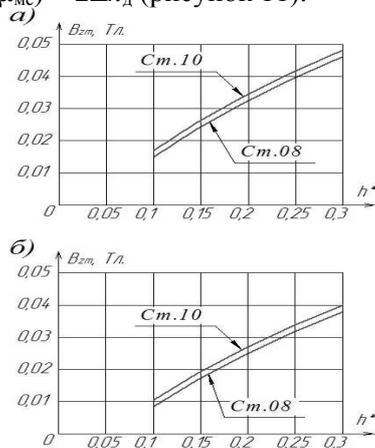


Рисунок 11 – Зависимость величины магнитной индукции B_{zm} от глубины дефекта h^* над ферромагнитными листами из сталей марок Ст.10 и Ст.08 толщиной $T=6$ мм (а) и $T=10$ мм (б) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила

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 $\Delta h(\Delta\mu_{ок}) = 2\Delta h_d$. Разность типовых значений относительной магнитной прони-

цаемости рассматриваемых сталей соответствует величине девиации $\mu_{ок}$ в пределах партии листов.

На основании выполненных исследований разработан дефектоскоп, охватывающий весь диапазон толщин днищ стальных цилиндрических резервуаров. 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.

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 задача, 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 публикаций, в которых изложены основные результаты диссертационной работы

Статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 64-71.
2. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Оптимизация параметров первичных измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL // Российский журнал неразрушающего контроля. 2015. Том 51. № 9. С. 596.

3. 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. // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 10–15.

4. 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.

Публикации в других изданиях:

5. Пудовкин О.П. Конечно-элементное моделирование MFL-преобразователя. // Сборник трудов III международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля». 2015. С. 85.

6. Пудовкин О.П. Оптимизация параметров магнитной системы MFL преобразователей. // Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля». 2016. Том IV. С. 127-130.

7. Сясько В.А., Пудовкин О.П. Моделирование и оптимизация параметров MFL преобразователей. // Сборник трудов 54-ой ежегодной конференции Британского института неразрушающего контроля. 2015. С. 27.

8. Потапов А.И., Сясько В.А., Пудовкин О.П. Моделирование и оптимизация преобразователей, реализующих технологию рассеяния магнитного потока (MFL). // Сборник тезисов. 19-ая Всемирная конференция неразрушающего контроля. Мюнхен. 2016. С.116.

9. Сясько В.А., Пудовкин О.П. Моделирование и оптимизация параметров магнитной системы MFL – преобразователей. // Сборник трудов XXI всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва. 2017. С. 269-272.