

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки (специальность) 12.03.01 «Приборостроение»
 Отделение школы (НОЦ) отделение контроля и диагностики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
«Разработка внутритрубного УЗ толщинометра стенки трубопровода с использованием вращающегося зеркала»

УДК 620.179.16:681.7.06:621.643

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б4А	Серебрянников Илья Рованович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Капранов Б. И.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Спицын В. В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Анищенко Ю. В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ОПП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Мойзес Б. Б.	К.Т.Н.		

Томск – 2018 г.

ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ БАКАЛАВРИАТА

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения, с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средства измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
	<i>Универсальные компетенции</i>
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и диагностики
 Направление подготовки (специальность) 12.03.01 «Приборостроение»
 Отделение школы (НОЦ) контроля и безопасности

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
1Б4А	Серебренникову Илье Романовичу

Тема работы:

«Разработка внутритрубного УЗ толщинометра стенки трубопровода с использованием вращающегося зеркала»
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<i>Материал объекта измерения <u>сталь</u> Диапазон измерения толщины <u>2-50 мм</u> Метод измерения <u>иммерсионный</u> Рабочая частота <u>от 1 до 10 МГц</u> Рабочая иммерсионная среда <u>однофазная жидкость</u></i>
--	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p><i>Выполнить анализ геометрии распространения УЗ пучка от излучателя до контролируемого объекта с учётом изменения направления распространения с помощью УЗ зеркала. Рассчитать основные параметры пьезоэлектрического излучателя, форму акустического пучка, ослабление пучка при отражении от зеркала, прохождение через акустически прозрачный корпус, отражение от стенки и возвращение на преобразователь. Провести эксперименты по измерению основных характеристик УЗ системы.</i></p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p>Анищенко Ю. В.</p>
<p>«Социальная ответственность»</p>	<p>Спицын В. В.</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>15.01.2017г</p>
--	--------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>профессор</p>	<p>Капранов Б.И.</p>	<p>д.т.н</p>		<p>15.01.2017</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>1Б4А</p>	<p>Серебренников Илья Романович</p>		<p>15.01.2017</p>

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки (специальность) 12.03.01 «Приборостроение»
 Уровень образования бакалавриат
 Отделение школы (НОЦ) контроля и диагностики
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: 13.06.2018 г

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.03.2017	<i>Объекты и методы исследования</i>	10
17.04.2017	<i>Методы определения технического состояния</i>	10
19.04.2018	<i>Разработка внутритрубного УЗ толщинометра стенки трубопровода с использованием вращающегося зеркала</i>	30
19.03.2018	<i>Социальная ответственность</i>	10
21.03.2018	<i>Финансовый менеджмент</i>	10
29.04.2018	<i>Заключение</i>	10
25.05.2018	<i>Презентация</i>	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Капранов Б. И.	Д.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПШ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Мойзес Б. Б.	К.Т.Н		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 102 с., 65 рис., 21 табл., 28 источников.

Ключевые слова: ультразвук, акустический импеданс, ультразвуковая волна, пьезопреобразователь, отражение.

Объектом исследований являются система ультразвукового контроля толщины стенки трубопроводов с использованием вращающегося зеркала.

Предмет исследований – расчёт основных элементов электроакустического тракта системы контроля.

Цель работы – разработать систему контроля толщины стенки трубопровода, на предмет потери металла, основанной на ультразвуковом методе, позволяющий получить информацию о состоянии толщины всей поверхности трубопровода:

- Выполнить анализ геометрии распространения УЗ пучка от излучателя до контролируемого объекта с учётом изменения направления распространения с помощью УЗ зеркала.
- Рассчитать основные параметры пьезоэлектрического излучателя.
- Рассчитать форму акустического пучка, рассчитать ослабление пучка при отражении от зеркала.
- Рассчитать прохождение через акустически прозрачный корпус. Рассчитать характеристики отражения от стенки и возвращения на преобразователь.
- Провести экспериментальные измерения основных характеристик УЗ системы.
- На основе полученных данных подобрать материалы, которые будут служить согласующим слоем между пьезопреобразователем и технической жидкостью, а также между технической жидкостью и нефтью.
- Выбрать материал с наибольшим коэффициентом отражения энергии импульса для УЗ зеркала.

- Рассмотреть альтернативный вариант контроля с использованием акустического волновода.

Содержание	
РЕФЕРАТ	6
Введение.....	11
Обзор литературы.....	13
1 Электроакустический тракт системы.....	20
1.1 Выбор рабочей частоты.....	21
1.2 Пьезопреобразователь	31
1.2.1 Режим излучения и приёма	33
1.2.2 Акустическое поле преобразователя.....	41
2 Расчёт основных элементов акустического тракта.....	53
2.1 Прохождение УЗ от пьезопластины преобразователя в иммерсионную среду, заполняющую измерительную головку	53
2.2. Прохождение УЗ через масло до зеркала	55
2.3. Отражение от зеркала на 45°	56
2.4. прохождение от зеркала до стенки зонда	59
2.5 Прохождение УЗ от стенки зонда через "однофазную" жидкость до внутренней стенки трубы	59
2.6 Прохождение УЗ от стенки зонда через «однофазную» жидкость до внутренней стенки трубы	61
2.7 Прохождение УЗ через внутреннюю поверхность трубы в металл.....	61
2.8 Отражение УЗ от наружной поверхности стенки трубы (граница металл - воздух)	63
2.9 Прохождение отражённого назад от внешней стенки трубы через внутреннюю стенку в масло (граница сталь- масло).....	63
2.10 Прохождение УЗ, отражённого от внутренней стенки трубы через жидкость до стенки зонда	64
2.11 Прохождение УЗ, отражённого внешней стенки трубы и прошедшего в обратном направлении через внутреннюю поверхность стенки трубы в жидкость, через жидкость до стенки зонда	64
2.12 Прохождение УЗ импульса, отражённого от внутренней поверхности, через стенку зонда назад к зеркалу	65
2.13 Прохождение УЗ импульса, отражённого от внешней поверхности трубы через стенку трубы назад к зеркалу	65

2.14 Прохождение УЗ импульсов, отражённых от внутренней и внешней поверхности стенок трубы от зеркала под углом 45°	65
2.15 Прохождение УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы, отражённых от зеркала через границу масло – пьезопластина	65
2.16 Преобразование УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы в электрические импульсы в пьезопластине	67
3 Альтернативный вариант с акустическим волноводом	68
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	76
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	76
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений	76
4.1.2 Технология QuaD	79
4.1.3 SWOT-анализ.....	80
4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	83
4.2.1 Разработка графика проведения научного исследования.	84
5. Социальная ответственность	87
5.1 Производственная безопасность	87
5.1.1 Анализ вредных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.....	87
5.1.2 Отклонение показателей микроклимата.....	88
5.1.3 Превышенный уровень ультразвука	89
5.1.4 Отсутствие естественного освещения	90
5.1.5 Умственное перенапряжение	91
5.1.6 Повышенный уровень электромагнитных излучений	91
5.1.6 Электрический ток	92
5.1.7 Токсические и раздражающие вещества.	93
5.2 Экологическая безопасность.....	94
5.2.1 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.	94
5.2.2 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.	94
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	94

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	96
Заключение	98
Список использованных источников	100

Введение

Ультразвук представляет собой волнообразно распространяющееся колебательное движение частиц среды. Ультразвук имеет некоторые особенности в сравнении со звуками слышимого диапазона. В ультразвуковом диапазоне довольно легко получить направленное излучение; в дальнейшем данное излучение можно сфокусировать, в результате чего повышается интенсивность ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковые колебания нашли широкое применение в неразрушающем контроле. В 1928 году Профессор С.Я. Соколов использовал свойство распространения ультразвука в ряде материалов, и предложил новый метод обнаружения дефектов, залегающих в толще металла. Ультразвуковой метод довольно скоро получил признание по всему миру. Объясняется это тем, что данный метод обладает довольно высокой чувствительностью и достоверностью обнаружения дефектов. Так же не стоит забывать про такие неоспоримые достоинства метода, как его оперативность, производительность и безопасность в работе.

В современном приборостроении широкое распространение получили ультразвуковые приборы на основе пьезоэлектрических преобразователей. Объемы выпуска таких приборов стабильно возрастают. Эксплуатационные характеристики приборов на основе пьезоэлектрических преобразователей улучшаются: уменьшаются шумы, снижается мертвая зона, возрастает разрешающая способность, увеличивается мощность излучения.

Назначение работы – Разработка системы контроля толщины стенки трубопроводов, основанной на методе ультразвуковой толщинометрии с использованием вращающегося зеркала и рассмотрение альтернативных решений ультразвукового сканирования стенки трубопровода.

Схема измерительной системы представлена на Рис.1

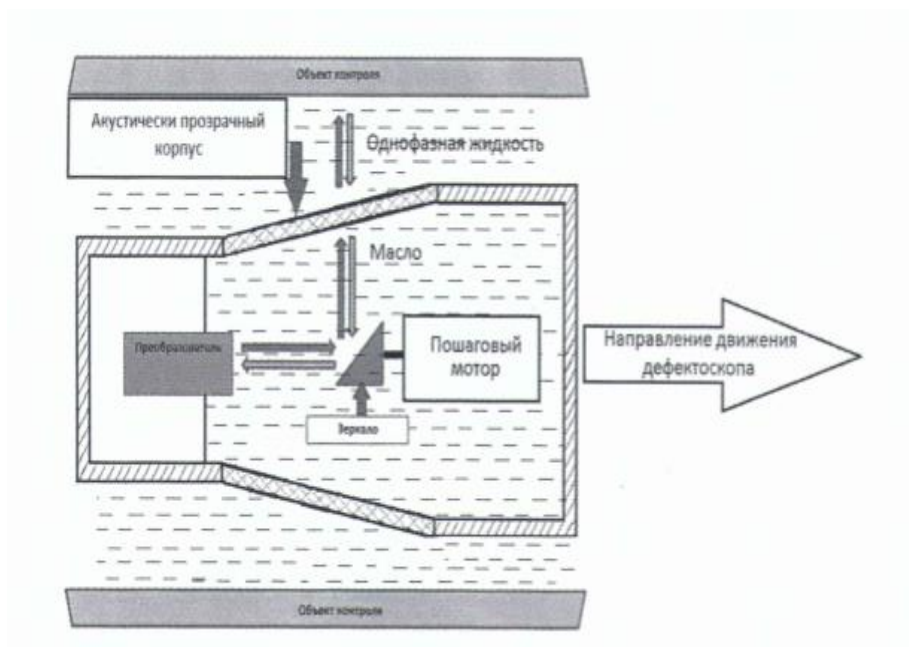


Рис.1 Схема измерительной системы УЗТ с зеркалом.

Задача работы: выполнить анализ геометрии распространения УЗ пучка от излучателя до контролируемого объекта с учётом изменения направления распространения с помощью УЗ зеркала. Рассчитать основные параметры пьезоэлектрического излучателя, форму акустического пучка, ослабление пучка при отражении от зеркала, прохождение через акустически прозрачный корпус, отражение от стенки и возвращение на преобразователь. Провести эксперименты по измерению основных характеристик УЗ системы.

Обзор литературы

Внутритрубный УЗ дефектоскоп для обнаружения трещин на начальной стадии.

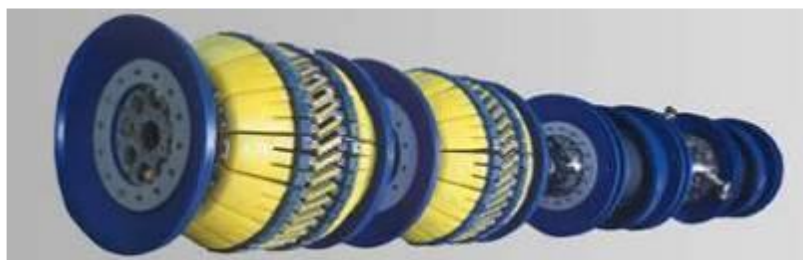


Рис.2 Ультразвуковой дефектоскоп

Для обследования магистральных трубопроводов наличие трещин используется ультразвуковой дефектоскоп. Данный прибор может обнаруживать продольные и поперечные трещины в том числе и сварных швах. [1]

В данном приборе используются совмещённые преобразователи с наклонным вводом УЗ волны в стенку трубы.

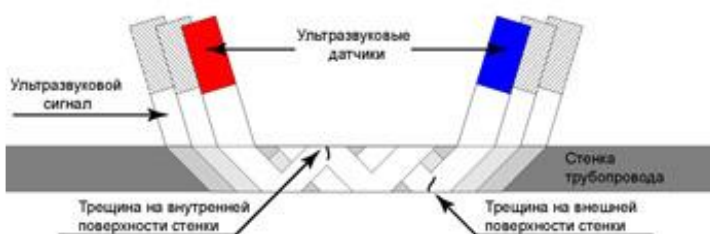


Рис.3 Принцип действия дефектоскопа

Принцип действия данного метода заключается в измерение амплитуды сигнала, отражённого от внутренней стенки трубопровода и отражённым импульсом от трещины, а также измерение времени между ними. На рисунке 3 представлено графическое изображение работы дефектоскопа.

Возбуждённая ультразвуковая волна входит в стенку трубопровода под углом 17° к поверхности, в толщине металла происходит преломление данной волны, угол распространения становится равным 45° относительно

перпендикуляра поверхности. При такой геометрии распространения обеспечивается наилучшее отражение сигнала от трещины. Приём сигнала от дефекта осуществляют этим же датчиком.

Для более точного обнаружения дефектов, стенку трубы облучают сразу с 2 сторон, таким образом сигнал от дефекта может быть принят несколькими датчиками с каждой из сторон.



Рис. 4 Система дефектоскопа

Для измерения пройденного пути и привязки дефектов трубопровода основывается на одометрической системе, в состав которой входит несколько одометрических колёс, за полный оборот которого происходит генерация определённого количества импульсов. Расстояние автоматически определяется дефектоскопом.

Для определения углового положения относительно продольной оси трубопровода дефектоскоп имеет маятниковую систему, которая позволяет учесть вращение прибора при движении.

Ультразвуковой внутритрубный дефектоскоп для прямого высокоточного измерения толщины стенки трубы.



Рис. 5 Ультразвуковой дефектоскоп WM

Для обследования магистральных трубопроводов на потерю металла используется ультразвуковой дефектоскоп. Данная система позволяет выявить дефекты трубы типа потери металла при механическом и коррозионном износе, а также расслоения и инородные включения.

В дефектоскопах используется принцип ультразвуковой толщинометрии, основанном на акустическом эхо-импульсном зондировании стенки трубопровода с использованием ультразвуковых иммерсионных преобразователей совмещенного типа.

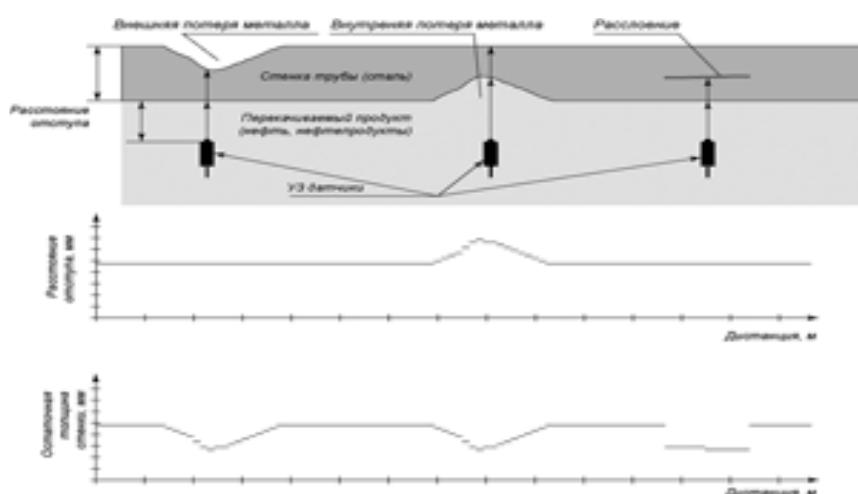


Рис. 6 принцип работы толщиномер

Принцип работы дефектоскопа в варианте ультразвукового толщиномера заключается в измерении временных интервалов, отраженными от внутренней и внешней поверхностей стенки трубопровода. Временной

интервал между первым и вторым отраженными импульсами соответствует толщине стенки. На рисунке 6 представлено графическое изображение работы дефектоскопа

Кроме обнаружения внутренней и внешней потерь металла, данный метод позволяет обнаружить и измерить другие типы дефектов, такие как вмятины, царапины, включения, расслоения, надрезы и задиры, а также их комбинации. [2]



Рис.7 Система дефектоскоп

Технологией IRIS (Internal Rotary Inspection System) занимаются разработчики ультразвуковой контрольной аппаратуры для обследования трубопроводов с целью обнаружения утонения стенок, обнаружения коррозии. [3]

Принцип действия системы заключается в измерении толщины с помощью ультразвукового иммерсионного метода (Рис.8).

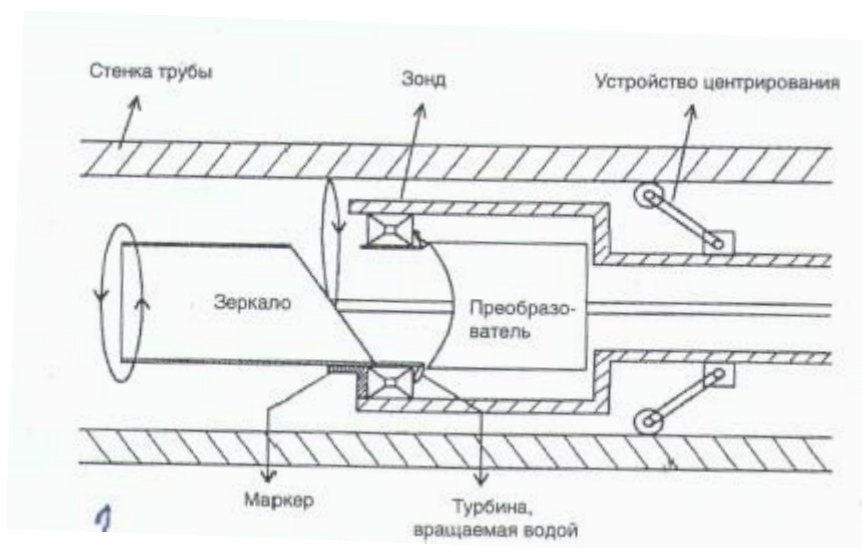


Рис.8 Вид обследующей головки IRIS в разрезе

Высокочастотный преобразователь (10-15 МГц) преобразует импульс электрической энергии в ультразвуковые колебания. Ультразвуковой импульс проходит через воду к стенке трубы, где большая часть энергии импульса отражается обратно в сторону преобразователя. Незначительная часть энергии (около одной десятой) проходит в стенку и отражается от её внешней поверхности обратно к внутренней. Маленькая часть энергии (около одной десятой) передаётся в воду и движется в направлении преобразователя. На преобразователь приходят два импульса, от внутренней и внешней поверхности трубы. Измерив время запаздывания между импульсами от внутренней стенки и внешней поверхности трубы, можно определить толщину стенки трубы. Если в стенке с внутренней или внешней поверхности, или с той и с другой есть утонение, временное положение импульсов будет меняться.

Система состоит из следующих компонентов:

преобразователь, вращающееся зеркало, устройство центрирования зонда, турбина для вращения зеркала. Турбина вращает зеркало со скоростью 1800 об/мин. Каждый оборот составляет ровно один цикл ультразвукового луча. Для синхронизации вращающегося зеркала служит проволочный маркер, дающий импульс за каждый оборот. Перед проведением контроля внутренняя поверхность трубы должна быть зачищена от рыхлых окалин,

обрезков, технологических жидкостей. [4-5] Чистая поверхность создаёт резкую границу вода-сталь, что даёт относительно большую амплитуду сигнала, отражённых от внутренней поверхности трубы. Для калибровки системы используется отрезок трубы, которая контролируется, с разными толщинами стенки. Результат контроля представляют в виде В-скана сечения стенки трубы за один оборот. (Рис. 12), занимающий 333 миллисекунды. Диаметры контролируемых труб не указаны. Не указано также количество отсчётов толщины на 1 оборот зеркала.

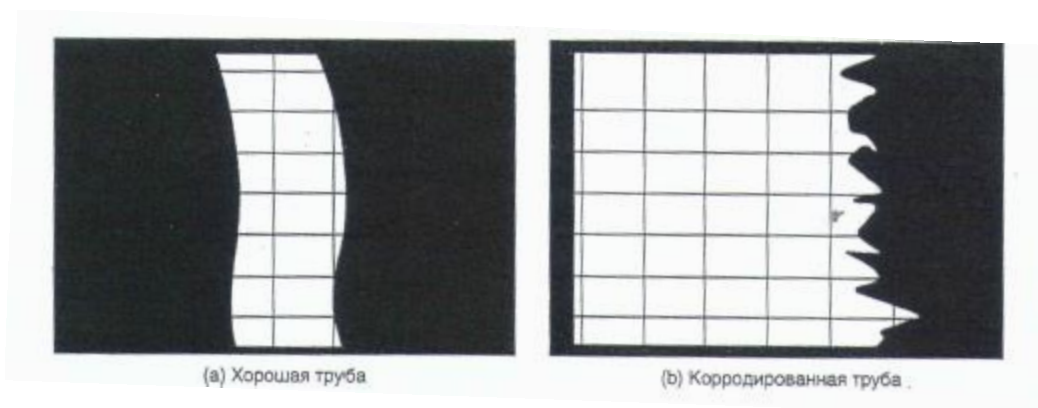


Рис.12 В-скан стенки трубы за один оборот зеркала.

На рис.12,b показана труба с корродированной внешней поверхностью. Точность измерения толщины стенки указывается в 0.05-0.075 мм и однозначно зависит от качества зачистки внутренней поверхности трубы.

Результаты сравнительных измерений толщины стенки трубы оптическим методом подтверждает заявленную погрешность. Более конкретные данные приводятся в описании системы ультразвукового внутритрубного контроля на базе IRIS «PRIS XT» (Рис.13)

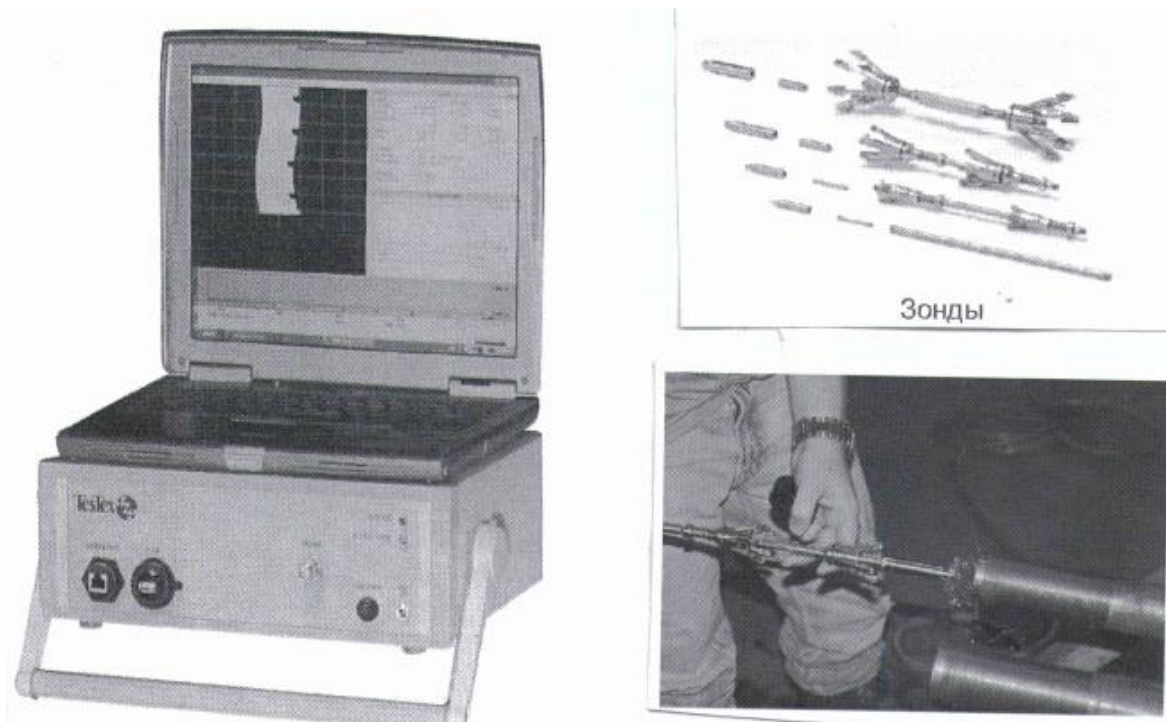


Рис.13 Система «PRIS XT».

Сплошной 100%-ый контроль трубы достигается при скорости до 3 метров в минуту. Внутренние диаметры контролируемых труб от 10 до 77.5 мм. Рабочая частота ультразвука до 20 МГц. Частота следования импульсов до 20 кГц. Количество измерений за 1 оборот зеркала – 719, точность измерения остаточной толщины – 0.01мм.

И та и другая система предназначена для работы в воде. И в том и в другом случае требуется тщательная зачистка внутренней поверхности трубы. [6]

1 Электроакустический тракт системы

В соответствии с Рис.1 полный электроакустический тракт системы содержит этапы:

- преобразование электрического импульса возбуждения в УЗ импульс. Процесс описывается коэффициентом преобразования при излучении (L);
- прохождение УЗ от пьезопластины преобразователя в масло. Граница пьезопластина–масло;
- прохождение УЗ через масло до зеркала;
- отражение от зеркала на угол 45° ;
- прохождение УЗ от зеркала до стенки зонда;
- прохождение УЗ через стенку зонда из масла в «однофазную» жидкость;
- прохождение УЗ от стенки зонда через «однофазную» жидкость до внутренней стенки трубы;
- прохождение УЗ через внутреннюю поверхность трубы в металл (граница жидкость – металл);
- отражение УЗ от наружной поверхности стенки трубы (граница металл – жидкость);
- прохождение УЗ, отражённого назад от внешней стенки трубы через внутреннюю стенку в масло (граница сталь – масло);
- прохождение УЗ, отражённого от внутренней стенки трубы через жидкость до стенки зонда, с учётом расхождения пучка;
- прохождение УЗ, отражённого внешней стенки трубы и прошедшего в обратном направлении через внутреннюю поверхность трубы в жидкость, через жидкость до стенки зонда, с учётом расхождения пучка;
- прохождение УЗ импульса, отражённого от внутренней поверхности трубы, через стенку зонда назад к зеркалу;
- прохождение УЗ импульса, отражённого назад от внешней поверхности трубы через переднюю стенку трубы к зеркалу;

- прохождение УЗ импульсов, отражённых от внутренней и внешней поверхности трубы через масло от внутренней стенки зонда до зеркала;
- отражение УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы от зеркала под углом 45°;
- прохождение отражённых в обратном направлении от зеркала импульсов от внешней и внутренней стенок трубы через масло к преобразователю, с учётом расхождения пучка;
- прохождение УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы, отражённых от зеркала через границу масло – пьезопластина;
- преобразование УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы в электрические импульсы в пьезопластине.

1.1 Выбор рабочей частоты

Участки преобразования при излучении и приёме определяется целиком размерами и характеристиками используемого пьезопреобразователя. В данной схеме на излучение и приём работает один и тот же преобразователь (совмещённая схема). В этом случае он описывается коэффициентом двойного преобразования $K=L*M$. Для хороших преобразователей можно принять $K \approx -30 \text{ дБ}$ (≈ 0.03 по напряжению). Амплитуда акустического импульса однозначно определяется амплитудой импульса возбуждения. Для преобразователей с частотой 5.0 МГц и ниже используют для возбуждения короткие импульсы амплитудой 300 В.

Длительность акустического импульса, формируемого преобразователем, определяет разрешающую способность системы. В соответствии с требованиями ТЗ минимально измеряемая толщина стенки трубы составляет 4 мм. Временная задержка между импульсами, отражёнными от внутренней и внешней стенок трубы составит в стали 1.35мкс. Чтобы измерить такую задержку длительность зондирующего импульса не должна превышать 1/3 от времени задержки, т.е. 0.4мкс. [7]

Если учесть, что зондирующий импульс содержит (3-5) периодов колебаний, т.е. период колебаний в зондирующем импульсе не должен превышать 0.08 мкс, что соответствует частоте заполнения 12.5 МГц. Для широкополосного преобразователя типа «VIDEOSCAN» импульс может содержать 3 периода колебаний, что позволяет уменьшить частоту колебаний до 7.5 МГц т.е. в соответствии с требованиями ТЗ рабочая частота ультразвука не может быть меньше 7.5 МГц при использовании хорошо демпфированного широкополосного преобразователя. [8-9]

Другое требование к рабочей частоте – полное затухание в жидкости для трубы максимального диаметра не должно превышать 60дБ. Это находится на границе чувствительности стандартных дефектоскопов. При этом условии, с учётом максимального пути $l=100\text{см}$, затухание в жидкости будет равно:

$$e^{-\alpha * l} = e^{-\alpha(\text{см}) * 100\text{см}} = 0.001; \quad (1)$$

Отсюда коэффициент затухания α не должен превышать 0.069 см^{-1}

Для измерения коэффициента затухания ультразвука в жидкостях был изготовлен преобразователь с отражающим элементом в виде диска Рис.14.

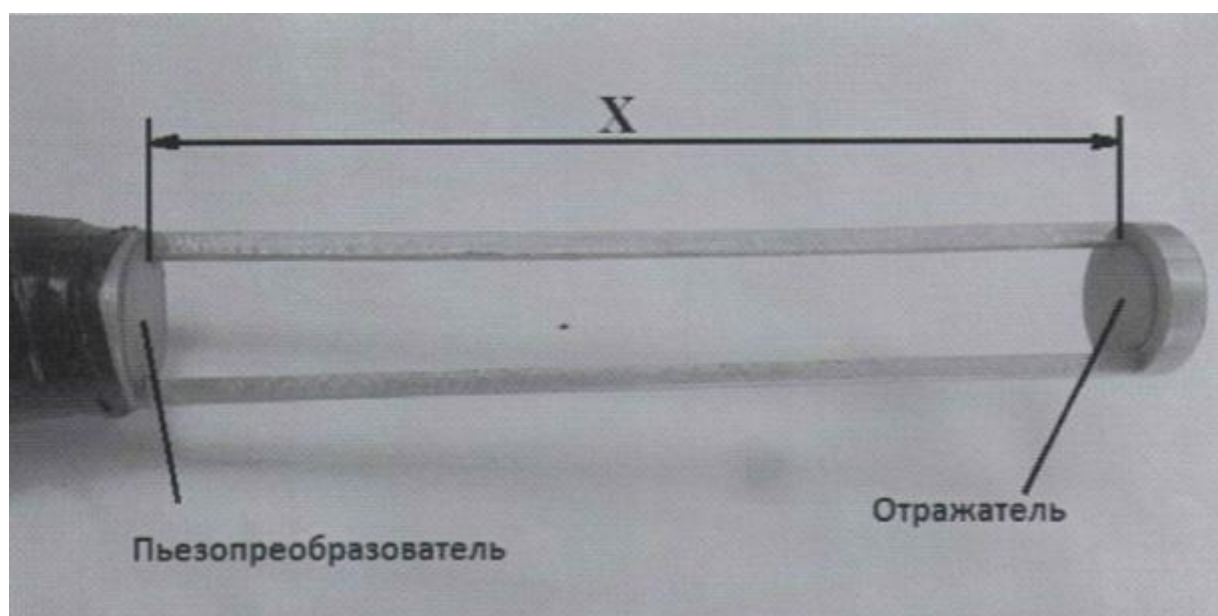


Рис.14 Преобразователь с отражающим элементом.

Для измерений был использован импульсный метод, основанный на измерении отношения амплитуды последовательности донных импульсов (Рис. 15).

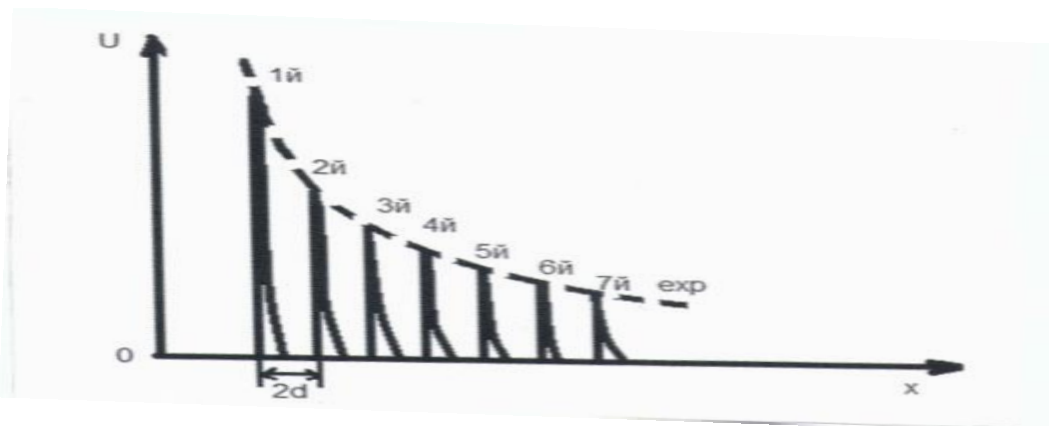


Рис.15 Импульсный метод измерения коэффициента затухания.

Затухание описывается экспонентой [10]:

$$U(d) = u_0 * e^{-\alpha*d} \quad (2)$$

где d –толщина образца.

Длина пройденного пути между двумя соседними импульсами составляет $2d$.

Измерив амплитуды двух соседних импульсов U_1 и U_2 , получим

$$\alpha = \frac{1}{2d} \ln \frac{U_1}{U_2} \text{ (см}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

По отмеченной методике были измерены коэффициенты затухания ультразвука в воде и масле на частотах 1.25 МГц; 2.5МГц; 5МГц; 10МГц.

Результаты измерений приведены в табл. 2. Если учесть, что нефть по затуханию ближе к маслу, т.е. коэффициент её затухания не меньше, чем в масле, можно сделать вывод, что для труб диаметром до 100 см рабочая частота не должна превысить 3 МГц. Соответственно, лучевая разрешающая способность будет составлять $\Delta t = 3.0 * T = 3.0 * 0.3 * 10^{-6} \text{ c} \approx 1.0 \text{ мкс}$.

Таблица 1 Коэффициент затухания.

Рабочая частота	1.25 МГц	2.5МГц	5МГц	10МГц
вода	0.0137 см ⁻¹	0.0195 см ⁻¹	0.13 см ⁻¹	0.245 см ⁻¹
масло	0.0341 см ⁻¹	0.050 см ⁻¹	0.194 см ⁻¹	0.315 см ⁻¹

Это минимальное разрешаемое временное расстояние между импульсами от внутренней и внешней стенкой трубы. По расстоянию это соответствует $6000 \text{ м/с} * 10^{-6} \text{ с} = 6 \text{ мм}$. Следовательно, минимальная измеряемая толщина стенки при внешнем диаметре 1220 мм составляет 6мм при рабочей частоте 3МГц. При выбранных условиях обеспечивается контроль труб с внешним диаметром более 720 мм. в соответствии с табл.2

Таблица 2. Номенклатура труб для магистральных трубопроводов.

Диаметр наружный условны, мм	Толщины стенок, мм
114	4,5,6,7 9,10, 12
219	4,5,6,7,9, 10,12, 14, 16, 18
273	4,5,6,7,8,9, 10,12, 14, 16,18, 20, 22, 25
325	4,5,6,7,8,9,10,12, 14, 16,18, 20, 22, 25
377	4,5,6,7,8,9,10,12, 14, 16,18, 20, 22, 25
426	4,5,6,7,8,9, 10,12, 14, 16,18, 20, 22, 25
530	4,5,6,7,8,9,10,12, 14, 16,18,20
620	4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,16, 18, 20, 22, 25
720	6,7,8,9,10,11,12,14,16,18, 20, 22, 25
820	7,8,9,10,11,12,14,16,18,20, 22, 25
920	8,9,10,11,12,14,16,18,20, 22, 25
1020	9,10,11,12,14,16,18,20,22, 25
1220	11,12,14,16,18,20,22,25

Более тонкие стенки соответствуют трубопроводам меньшего диаметра, что соответствует уменьшению затуханию ультразвука. Рассмотрим в качестве верхней границы \varnothing 620 мм. Суммарный путь ультразвука составит 620 мм, что соответствует затуханию $e^{-a*60\text{см}}$.

Принимая в качестве условия ослабление на 60дБ, получаем

$$e^{-a*60\text{см}} = 0.001. \quad (4)$$

Отсюда допустимое значение a будет составлять 0.115 см^{-1} . В соответствии с графиком это соответствует рабочей частоте 5МГц. При такой же длительности импульса в 3 периода колебаний $\Delta t = 3.0 * 0.2 * 10^6 \text{ с} = 0.6 \text{ мкс}$ или минимальное расстояние между стенками $6000 \text{ м/с} * 0.6 * 10^{-6} \text{ с} = 3.6 \text{ мм}$. При частоте 5 МГц обеспечивается возможность измерения толщины стенки при диаметрах от 114 до 620 мм.

Для стандартной частоты 2.5 МГц получаем $\Delta t = 3.0 * 0.4 \text{ мкс} = 1.2 \text{ мкс}$, что соответствует минимальной измеряемой толщины стенки $6000 \text{ м/с} * 1.2 * 10^{-6} \text{ с} = 7.2 \text{ мм}$. При такой частоте перекрывается диапазон диаметров труб 920 до 1220мм. При стандарте 2.25 МГц также обеспечивается контроль диаметров от 920 до 1220 мм. Для рабочей частоты 10 МГц коэффициент затухания составляет 0.315 см^{-1} . При условии ослабления на 60 дБ максимальный диаметр трубы составляет 220 мм, что соответствует трубам диаметров 114 и 219 мм.

Таким образом, зависимости коэффициента затухания ультразвука в масле показывает, что целесообразно весь диапазон труб разделить на 4 участка:

- диаметры 114 мм и 219 мм – рабочая частота 10 МГц;
- диаметры 273 мм до 620 мм – рабочая частота 5МГц;
- диаметры 720 мм – рабочая частота 3МГц;
- диаметры от 820 мм до 1220 мм – рабочая частота 2.5МГц.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена иммерсионная ванная Рис. 16 с расположенным в ней преобразователем, механизмом продольного перемещения и механизмом поперечного перемещения.

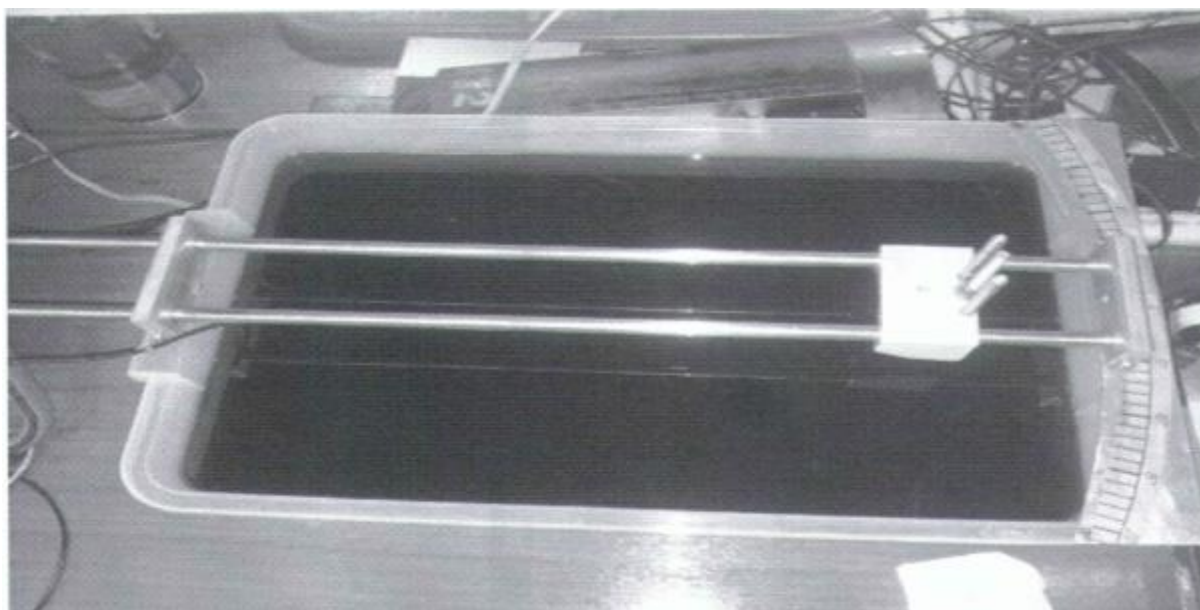


Рис.16 Экспериментальный стенд. Иммерсионная ванна.

В качестве отражателей использовались стальные имитаторы стенки трубы в виде цилиндров диаметром 10 мм. Рис. 17.

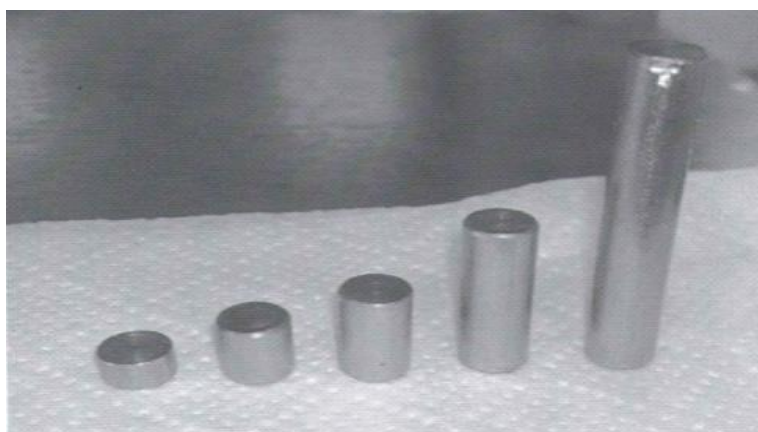


Рис.17 Имитаторы толщины стенки трубы \varnothing 10 мм.

Толщины, слева направо, 5, 10, 15, 25, 50 мм.

Диаметр 10 мм выбран исходя из требования обеспечения фронтальной разрешающей способности контролируемое пятно-диаметр 10 мм. Система крепления образца приведена на Рис.18. Она представляет собой гнездо с внутренним диаметром 10 мм, в которое вставляется образец. Гнездо имеет острую переднюю кромку для уменьшения сечения отражения, закреплённое на цилиндрическом стержне, также обладающим малым сечением отражения УЗ пучка в обратном направлении.

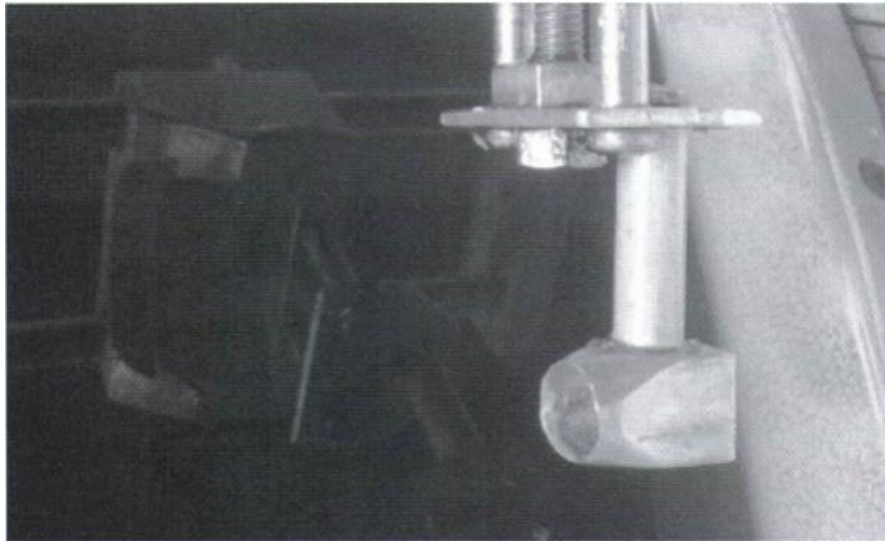


Рис.18 Устройство крепления образца. Образец отсутствует
 Отражающая способность устройства крепления образца проверялась
 на частотах 2.5 МГц и 5.0 МГц.



Рис.19 Отражение от устройства крепления образца. 2.5 МГц.

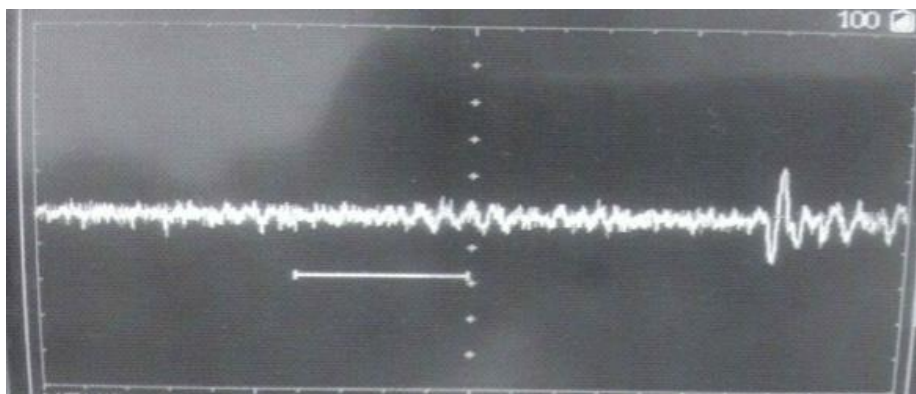


Рис.20 Отражение от устройства крепления образца 5.0 МГц.

Во всех экспериментах расстояние между преобразователем и образцом составляет 260 мм. Преобразователь возбуждался 3-мя периодами колебаний на рабочей частоте. Амплитуда импульса возбуждения 200 В. На рисунках 13,14, 15, 16, 17 приведены эхограммы образцов 5, 10, 15, 25, 50 мм на частоте 5 МГц.

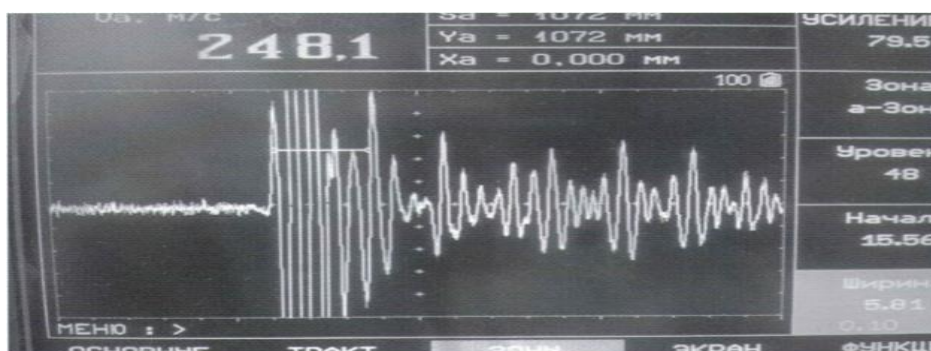


Рис.21 Эхограмма образца 5мм, 5МГц.

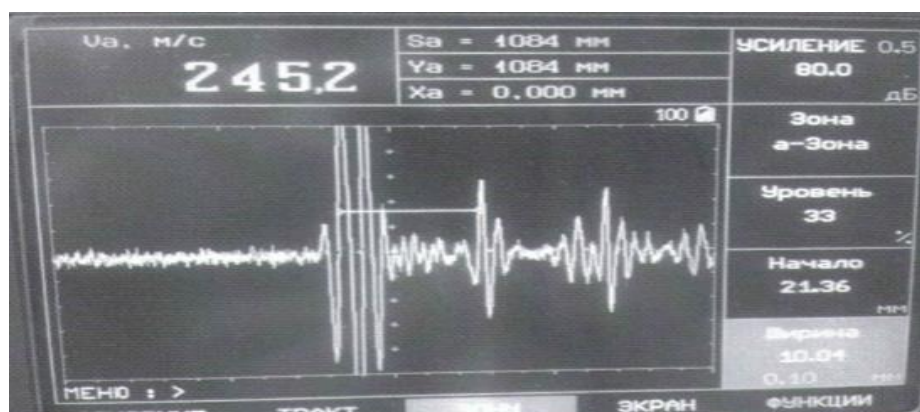


Рис.22 Эхо грамма образца 10 мм. 5 МГц.

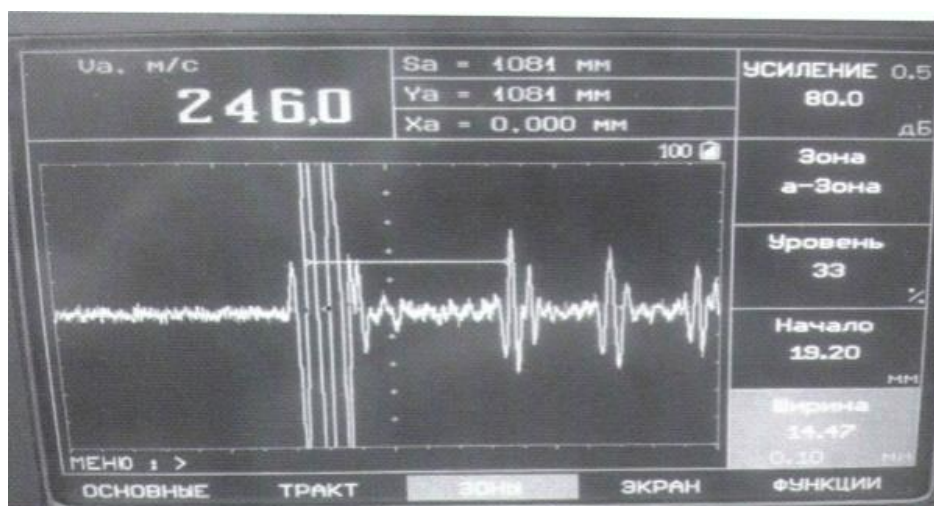


Рис.23 Эхограмма образца 15 мм. 5 МГц.

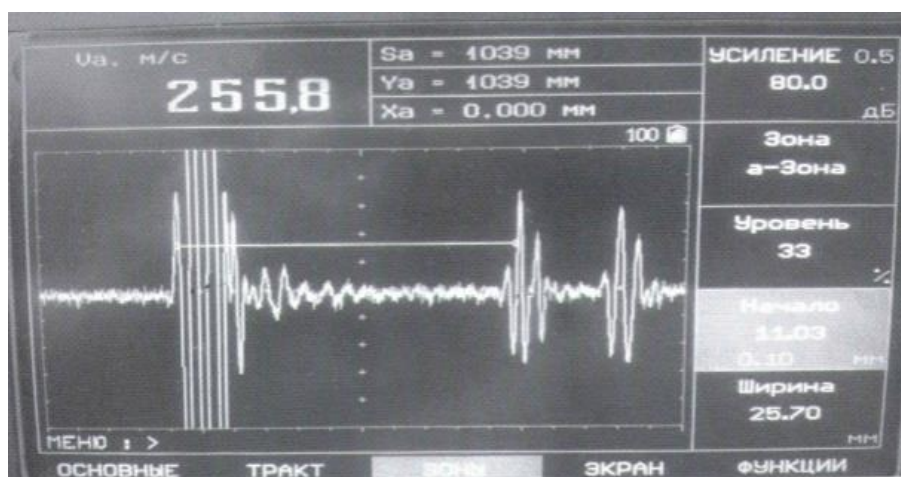


Рис.24 Эхограмма образца 25 мм. 5 МГц.

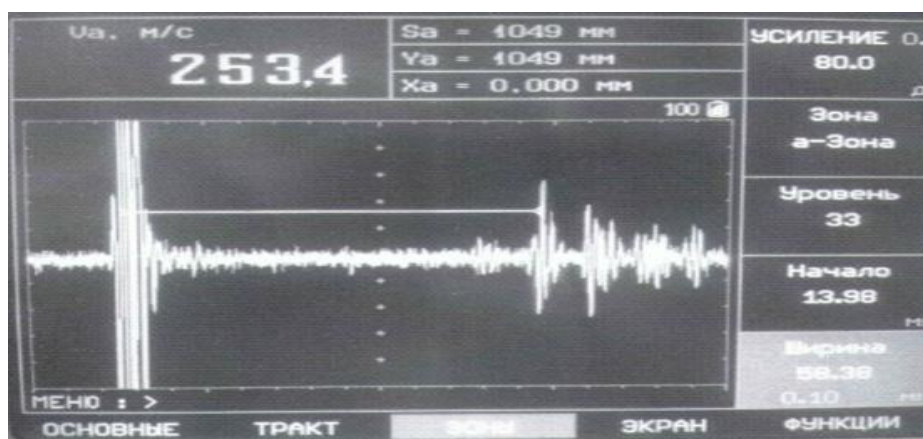


Рис.25 Эхограмма образца 50 мм. 5 МГц.

Анализ эхограмм показывает, что на частоте 5 МГц возможно измерение толщины стенки трубы начиная с 5 мм (Рис. 21). Однако преобразователь требует более глубокого демпфирования, т.к. зондирующий импульс содержит не 3 периода колебаний, а практически 4. Если длительность эхо-импульсов действительно составляет примерно 3 периода колебаний, то зондирующий импульс содержит реверберационную помеху, увеличивающую его длительность до 4-х периодов (Рис.22). Для уменьшения длительности зондирующего импульса необходимо решить вопрос более эффективного акустического демпфирования пьезопластины и согласования

акустических импедансов пьезопластины с маслом (однокомпонентной жидкостью). [11]

Аналогичные измерения на Рис. 26, 27, 28, 29, для образцов толщиной 10, 15, 25, 50 мм проведены на частоте 2,5 МГц.

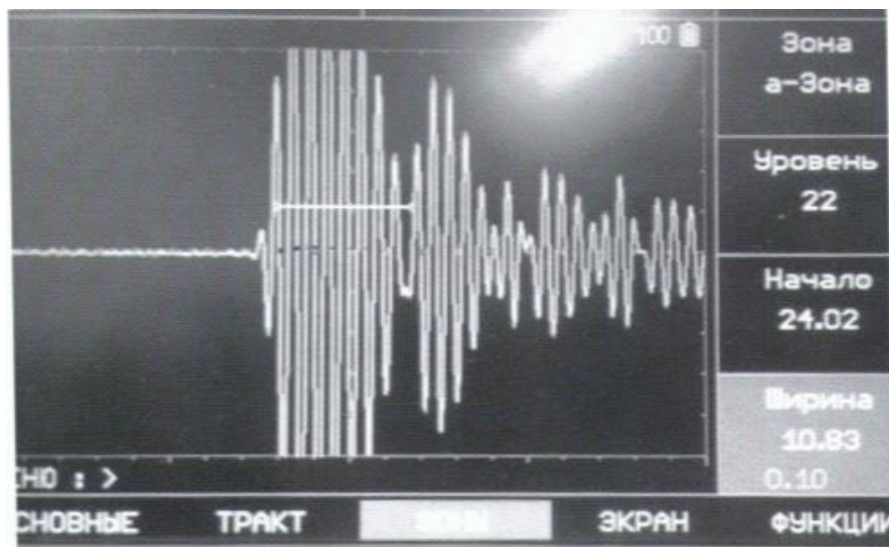


Рис. 26 Эхограмма образца 10мм. 2.5МГц.

На частоте 2.5 МГц отсутствует эхограмма образца 5 мм, т.к. проблемным становится и измерение образца 10 мм. Это связано с большой длительностью зондирующего импульса. Используемый при измерениях преобразователь, как видно из рисунков 26-29 содержит порядка 8-и периодов колебаний. На всех эхограммах толщина образца отображается в окне «ширина» строба. Развёртка калибровалась на сталь. Скорость 5900 м/с

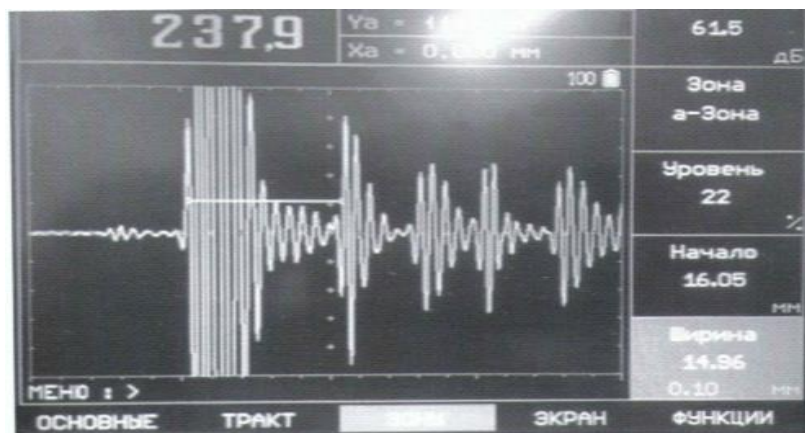


Рис. 27 Эхограмма образца 15мм. 2.5 МГц.



Рис. 28 Эхограмма образца 25 мм. 2.5 МГц.



Рис.29 Эхо грамма образца 50 мм. 2.5 МГц.

1.2 Пьезопреобразователь

В настоящее время промышленность выпускает пьезоэлектрические преобразователи трёх видов для решения конкретных задач контроля. Принцип работы пьезопреобразователя и пример конструктивного исполнения приведены на Рис. 30, а и б.

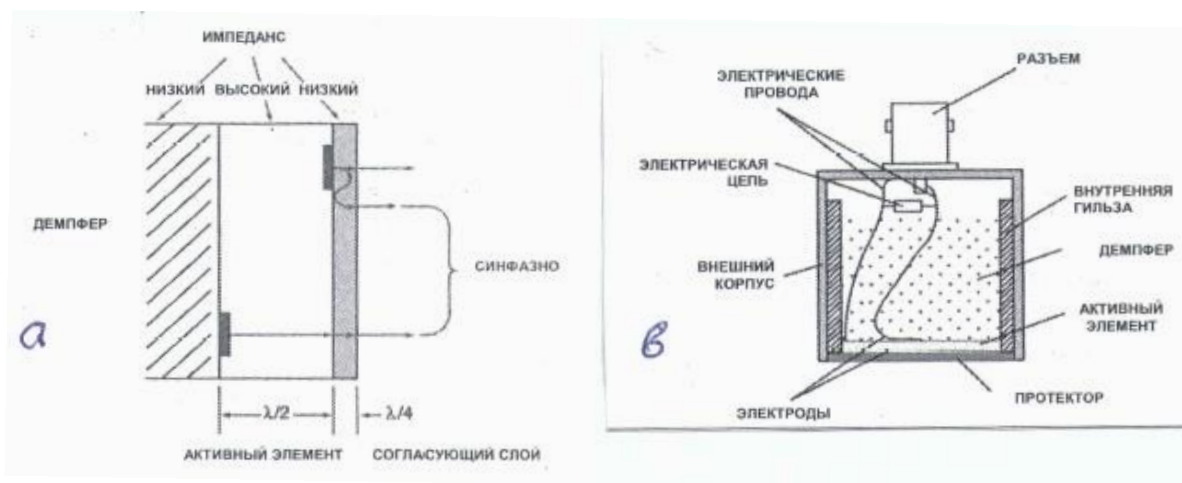


Рис. 30 Пьезоэлектрический преобразователь.

Основным элементом пьезоэлектрического преобразователя (активный элемент) является пьезопластина, преобразующая энергию электрического поля (электрическое напряжение E) в энергию механического (упругого) поля (упругое напряжение σ) при излучении и упругое напряжение σ в электрическое напряжение E при приёме. Связь между упругим напряжением и электрическим напряжением даётся выражением:

$$\sigma = e * E, \quad (5)$$

где e – пьезоконстанта, являющаяся основной характеристикой пьезоэлектрического материала. Она описывает эффективность преобразователя при излучении и приёме. Важным параметром пьезоматериала является также коэффициент электромеханической связи β , определяемый свойствами пьезоматериала:

$$\beta = \frac{1}{c_e} * \frac{e}{\sqrt{\rho * \epsilon * \epsilon_0}}, \quad (6)$$

где: c_e – скорость звука в пьезопластине;

e – пьезоконстанта;

ϵ_0 – $8.85 * 10^{-12}$ ф/м – пьезоэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость пьезоматериала;

ρ - плотность пьезоматериала.

Величина $\frac{e}{\sqrt{\rho * \epsilon * \epsilon_0}}$ имеет размерность (м/с). Квадрат коэффициента электрической связи

$$\beta^2 = \frac{e^2}{\rho * \epsilon * \epsilon_0 * C e^2} \quad (7)$$

определяет эффективность работы преобразователя при излучении и приёме.
[12]

1.2.1. Режим излучения и приёма

Для анализа работы пьезопреобразователя в совмещённом режиме (режим излучения - приёма) обычно используют следующую модель (Рис.31)

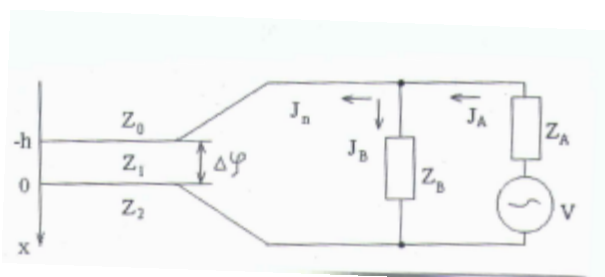


Рис.31 Модель для расчёта режимов излучения и приёма.

На этой модели:

$Z_1 = \rho_1 * C_1$ – акустический импеданс пластины;

$Z_0 = \rho_0 * C_0$ – акустический импеданс на который нагружена верхняя грань пластины;

$Z_2 = \rho_2 * C_2$ – полный акустический импеданс, на который нагружена нижняя грань пластины. Пластина имеет площадь S_{nl} и толщину h . Координата нижней грани $x=0$, координата верхней грани $x=-h$.

Как элемент электрической цепи пластина является конденсатором. Её ёмкость равна

$$C_{\text{пл}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \rho}{h}. \quad (8)$$

Пластина подключена к генератору V , создающему на обкладках пластины разность потенциалов $\Delta\varphi$. Z_A и Z_B —комплексные величины сопротивления цепи генератора и элементов, подключенных параллельно пластине, соответственно.

В режиме излучения генератор напряжения V создаёт в цепи Z_A ток I_A , который ответвляется частично в цепь Z_B создавая ток I_B , и частично уходит в пластину $I_{\text{пл}}$, создавая разность потенциалов $\Delta\varphi$. Для расчёта режима излучения рассматривают электрическую схему преобразователя, в которой он представляет пассивную нагрузку Z_N , и получают выражение для волны, излучаемой в среду под нижней гранью пластины (Рис.32).

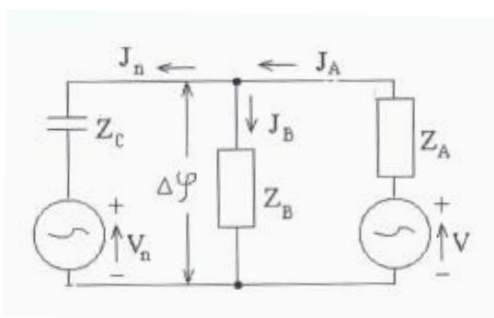


Рис.32 Эквивалентная электрическая схема преобразователя в режиме излучения.

Анализ основных закономерностей позволяет получить выражения для тока I_n и разности потенциалов $\Delta\varphi$ и, через них, упругое напряжение в среде (под нижней гранью пластины), или акустическое давление, вводимое в среду [13]

$$P_0 = -\frac{eB}{h} V_0 \frac{Z}{Z_1} F_1 GS, \quad (9)$$

где: Z – импеданс среды;

Z_1 – импеданс пластины;

e – пьезоконстанта;

V_0 – амплитуда генератора напряжения V ;

$B = \frac{Z_B * Z_C}{Z_A * Z_B + Z_B * Z_C + Z_A * Z_B}$ – коэффициент, описывающий электрическую схему;

F_1 – коэффициент описывающий соотношение давлений, распространяющихся через нижнюю грань и верхнюю грань пластины;

G – коэффициент суммарного ослабления акустической волны в слоях между нижней гранью пластины и средой;

S – площадь пластины.

Обычно давление в среде по модулю записывают в виде:

$$|P_0| = L * V_0 , \quad (10)$$

$$\text{где: } L = \frac{e * B * S * Z}{h * Z_1} * F_1 * G , \quad (11)$$

называется коэффициентом преобразования при излучении.

В режиме приёма генератор V отсутствует и эквивалентная электрическая схема принимает вид (Рис. 33)

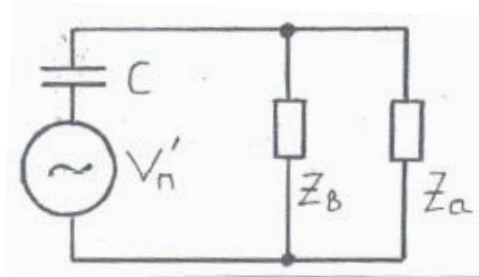


Рис.33 Эквивалентная электрическая схема преобразователя в режиме приёма

Пьезопластина, под действием механического напряжения σ^I , создаваемого акустической волной из среды под нижней гранью, генерирует электрическое напряжение V_n^I

$$V_n^I = \frac{2e * S}{h * Z_1} * Z_a * B * F_1 * G * \sigma^I . \quad (12)$$

Выражение (12) также записывают в виде:

$$V'_n = M * \sigma', \quad (13)$$

где $M = \frac{2e * S}{h * Z_1} * Z_a * B * F_1 * G$ называют коэффициентом преобразования при приёме.

Если на излучение и приём работает один и тот же преобразователь, то его описывают коэффициентом двойного преобразования K

$$K = L * M = \frac{4e^2 * \rho^2}{h^2 * Z_1^2} * Z_a^2 * B^2 * F_1^2 * G^2. \quad (14)$$

При разработке конструкции преобразователей и схемы его включения учитывают следующие требования:

1. Обеспечение максимальной чувствительности.

Для достижения максимальной чувствительности преобразователь возбуждают радиоимпульсом с частотой заполнения, равной собственной резонансной частоте пластины. С этой целью пластину включают в колебательный контур по схеме [11] (Рис. 34)

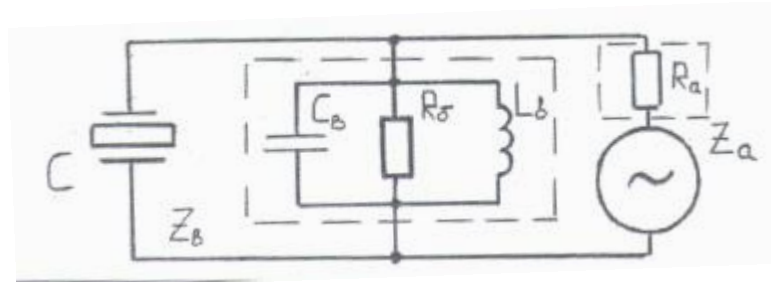


Рис.34 Схема включения пьезопластины в колебательный контур.

Для такой схемы $Z_a = R_a$. Z_b состоит из параллельно влечённых сопротивлений R_b , ёмкости соединительного кабеля C , индуктивности контура L_b .

Поэтому в общем случае для реактивного сопротивления цепи B справедливо

$$\frac{1}{Z_B} = \frac{1}{R_B} - \frac{1}{j * \omega * L_B} - j * \omega * C_B. \quad (15)$$

Под резонансной частотой пластины понимают частоту, при которой по толщине пластины указывается половина длины волны. На этой частоте реактивное сопротивление пьезопластины обращается в бесконечность. Т.е. выполняется условие

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L * C}} = \pi * Cl/h , \quad (16)$$

где Cl – скорость звука (продольная волна) в пластине.

Электрическая добротность такого контура:

$$Q_\partial = \omega_0 * R_0 * C , \quad (17)$$

где $R_0 = \frac{R_a * R_b}{R_a + R_b}$ – параллельно соединённые R_a и R_b .

Для преобразователя вводят также понятие акустической добротности Q_a . Она определяется отношением акустического импеданса пластины к суммарному акустическому импедансу демпфера и среды

$$Q_a = \frac{\pi * Z_1}{2(Z + Z_0)} . \quad (18)$$

Для обеспечения максимальной чувствительности должно выполняться соотношение:

$$Q_\sigma = \frac{\pi^2}{8 * \beta^2 * Q_a} . \quad (19)$$

В этом случае модуль двойного коэффициента преобразования будет равен

$$|K| = \frac{R_0 * Z}{2R_a(Z + Z_0)} = |K_{max}| . \quad (20)$$

Из этого выражения видно, что K_{max} уменьшается с увеличением акустического импеданса демпфера Z_0 .

Чувствительность можно повысить применением согласующего протектора, для которого $h_2 = \lambda_2/4$ в этом случае

$$Z_2 = \sqrt{Z * Z_1} . \quad (21)$$

2. Расширение полосы частот

Для анализа полосы пропускания излучателя-приёмника используют выражение для коэффициента двойного преобразования K (14). Примеры таких расчётов для преобразователей, работающих на иммерсионную жидкость приведены на (Рис.35).

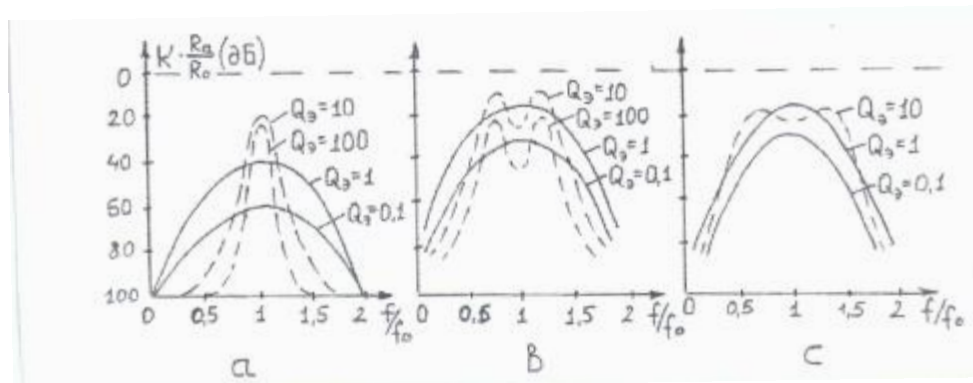


Рис. 35 Полоса пропускания и добротность пьезоэлектрического преобразователя. а) кварцевая пластина; в) пьезокерамика; с) преобразователь с протектором.

Для кварцевого преобразователя K достигает максимума при $f=f_0$. Увеличение электрической добротности увеличивает K , однако при этом уменьшается полоса частот, оптимальные условия работы с точки зрения расширения полосы пропускания на уровне $0,1 \cdot K_{max}$ (-20дБ) получаются при $Q=2-4$. При этом полоса частот составляет около 30% от f_0 . Увеличивая акустическое сопротивление демпфера, полосу частот можно расширить.

Для керамических пьезоматериалов кривая $K\left(\frac{f}{f_0}\right)$ имеет 1 максимум только при $Q_3 \leq 1$. При $Q_3 > 10$ кривая имеет минимум в точке $f=f_0$ (Рис.35,в) и два максимума на частотах примерно $0,8 \cdot f_0$ и $1,2 \cdot f_0$. Появление двух максимумов связано с тем, что пластина и контур представляет собой два связанных колебательных контура с сильной связью, приводящий к появлению максимума при резонансе. При малой добротности проявляется только резонансные свойства пластины и на кривой имеется 1 максимум. Если для преобразователя на ЦТС ввести демпфер и просветляющий протектор, удаётся расширить полосу пропускания с сохранением чувствительности (Рис.35, с). Просветляющий четвертьволновый протектор оказывает благоприятное влияние ещё и в том смысле, что он уменьшает

акустическую добротность, но при этом увеличивает отток акустической энергии в среду под пластиной, т.е. повышает чувствительность.

При выборе конструкции преобразователя [14-15] преимущество в сторону чувствительности или широкополосности определяется решаемыми задачами. Для измерения толщины наиболее важным требованием является уменьшение длительности зондирующего импульса. Т.е. предпочтение следует отдавать широкополосности преобразователя. Оптимальным следует считать значение добротности $Q_{\text{э}} \approx 3$. При этом зондирующий импульс будет содержать 3 периода колебаний, а длительность зондирующего импульса для разных частот принимать значения, приведённых в табл.3

Таблица 3 Длительность зондирующего импульса и минимальная измеряемая толщина стенки по стали.

<i>f</i> рабоч. (МГц)	1.25	2.25	2.5	3.0	5.0	10
T (мкс)	0.8	0.44	0.4	0.33	0.2	0.1
t _и (мкс)	2.4	1.32	1.20	1	0.6	0.3
d _{min} (мм)	14.2	7.8	7.1	5.9	3.5	1.75

Значения в табл.3 минимально измеряемых толщин стенки полностью соответствуют приведённым выше результатам экспериментальных исследований.

Для решения различных задач ультразвукового неразрушающего контроля промышленность выпускает различные типы преобразователей. Для задачи контроля, когда главным является высокая чувствительность, а лучевая разрешающая способность не играет роли, используют преобразователь ACCUCAN «S» (Рис.36)



Рис.36 Преобразователь типа ACCUSCAN«S» 5МГц.

Такой преобразователь формирует импульс длительностью 0.65 мкс.

Промежуточным типом являются преобразователи типа ACCUSCAN«R» (Рис.37).

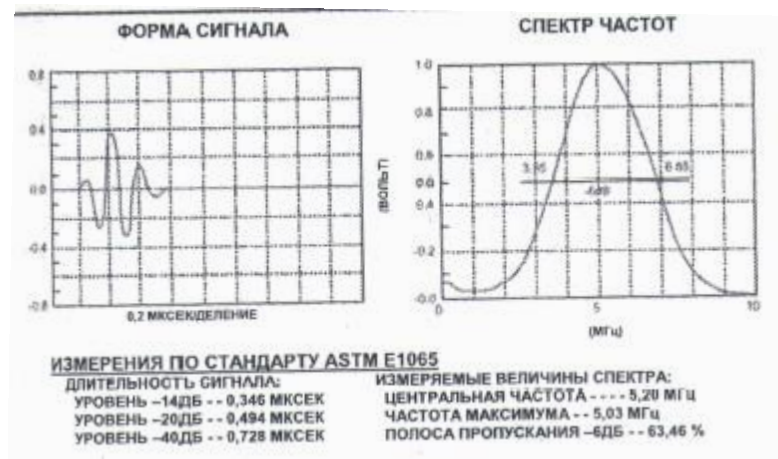


Рис.37 Преобразователь типа ACCUSCAN «R». 5 МГц.

Они обеспечивают меньшую длительность зондирующего импульса при сохранении достаточной чувствительности на рабочей частоте.

Наибольшей лучевой разрешающей способностью обладают широкополосные преобразователи типа VIDEOSCAN (Рис.38).



Рис.38 Преобразователь типа VIDEOSCAN 5МГц.

Они обеспечивают широкую полосу пропускания и высокий уровень демпфирования. Длительность зондирующего импульса составляет 0.262 мкс., что практически составляет ≈ 1.5 периода колебаний. Если учесть, что для системы измерения остаточной толщины стенки трубы главное значение имеет лучевая разрешающая способность, то предпочтение для дальнейших исследований стоит отдать преобразователям типа VIDEOSCAN.

Необходимо также отметить, что приводимые в документации характеристики преобразователя измеряется в «хороших» условиях, когда параметры среды (вода), условия возбуждения и приёма заданы и известны. В условиях реальной эксплуатации, как правило, такие условия не соблюдаются. Так например, на рисунке 21, 22, 23, 24, 25 реальная длительность зондирующего импульса на частоте 5МГц составляет не менее 4 – х периодов, т.е. $t_{\text{ц}} \approx 0.8$ мкс., что соответствует $d_{\text{min}} = 4,7$ мм. Поэтому реально следует делать допуск на параметры, даваемые изготовителем.

1.2.2 Акустическое поле преобразователя

Вторым важным параметром системы измерения остаточной толщины стенки трубы является локальность зоны контроля т.е. фронтальная разрешающая способность. Она полностью определяется формой

акустического поля, создаваемого преобразователем. В соответствии с общей теорией акустическое поле, создаваемое пьезопреобразователем описывают тремя понятиями:

- поле излучения – давление, которое действует на точечный приёмник, расположенный в точке с координатами x, y, z , в пространстве под преобразователем;

- поле приёма – сигнал приёмного преобразователя при действии элементарного излучателя, расположенного в точке с координатами x, y, z , в пространстве под преобразователем;

- поле излучения - приёма – сигнал приёмного преобразователя, возникающего от элементарного отражателя, расположенного в точке с коэффициентами x, y, z , в пространстве под преобразователем.

Обычно поле приёма повторяет поле излучения, поэтому поле излучения – приёма равно квадрату поля излучения. Рассмотрим геометрию волнового поля дискового излучателя, расположенного на плоской поверхности полупространства с неограниченными размерами по осям x, y, z . Считаем, что излучатель создаёт напряжение σ , нормальное к поверхности. Если пренебречь влиянием промежуточных слоёв между излучателем и средой [10], то волновое поле будет иметь вид, представленный на Рис.39

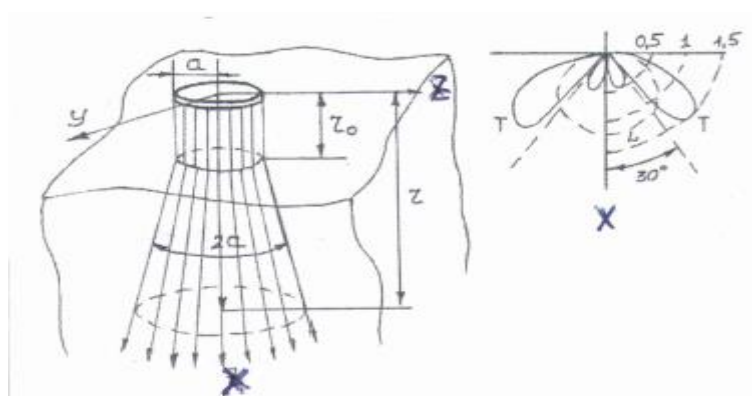


Рис. 39 Волновое поле дискового излучателя.

Оно имеет зоны:

1. Ближняя зона (зона Френеля) протяжённость $Z_0 = Z_0 = \frac{a^2}{\lambda}$, в пределах которой отсутствует расхождение и пучок лучей в сечении

повторяет сечение пластины. При этом акустическое давление на оси X испытывает колебания

$$P(X) = P_0 * 2\sin[\pi/\lambda (\sqrt{a^2 + X^2} - X)] \quad (22)$$

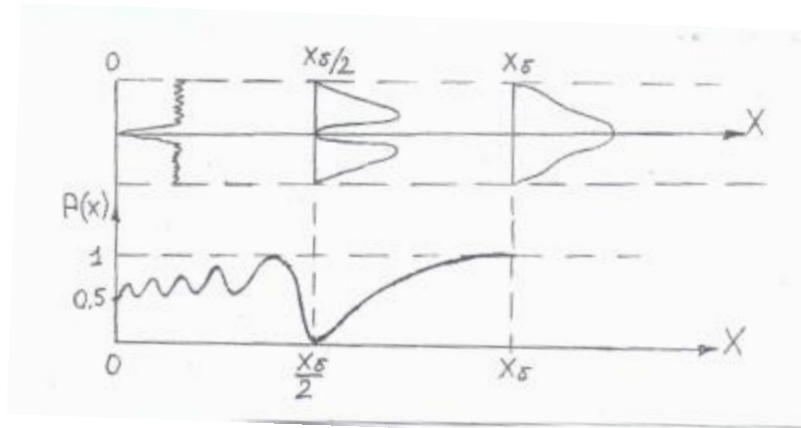


Рис.40 Распределение давления в ближней зоне.

Максимум наблюдается при X_δ .

2. Дальняя зона (Зона Фраунгофера) – эта зона при $X > R_0$, в пределах которой наблюдается расхождение лучей. Она характеризуется тем, что давление акустической волны при удалении от преобразователя уменьшается обратно пропорционально расстоянию X . Угол расхождения θ , за пределами которого давление уменьшается до 0.1 (-20дБ) равен

$$\theta = \arcsin 0.54 \frac{\lambda}{a} \quad (23)$$

По уровню $\frac{1}{2}$ (-6дБ)

$$\theta = \arcsin 0.514 \frac{\lambda}{a} \quad (24)$$

Для дальней зоны диаграмма направленности имеет вид, показанный на Рис.41

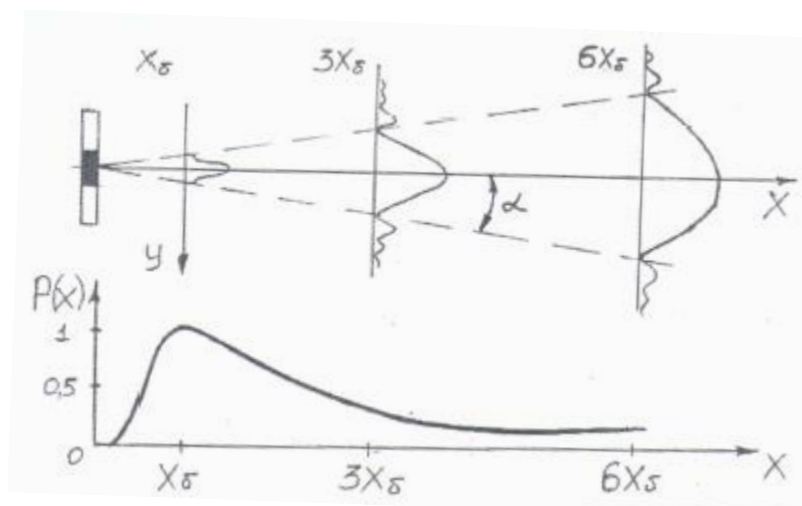


Рис. 41 Распределение давления в дальней зоне.

Давление максимально на оси пучка при $y=0$, $z=0$ и изменяется с расстоянием x по закону

$$P_m(x) = P_0 * \frac{S_a}{\lambda * x} . \quad (25)$$

где: S_a – площадь пластины;

P_0 – давление, вводимое пластиной в среду при $x=0$.

Угловое расхождение пучка описывается соотношением

$$P(x, y) = P_m(x) * \varphi(\alpha) \quad (26)$$

где: $\varphi(\alpha) = \frac{J(aK * \sin \alpha)}{aK * \sin \alpha}$;

$J(aK * \sin \alpha)$ – функция Бесселя первого рода.

Угол расхождения θ определяет максимальную разрешающую способность системы. Для повышения разрешающей способности системы угол θ следует уменьшать, Из (23) следует, что для уменьшения расхождения пучка можно, при заданной рабочей частоте, увеличивать радиус пластины. На Рис. 42 показан пример уменьшения угла расхождения для разных соотношений a/λ .

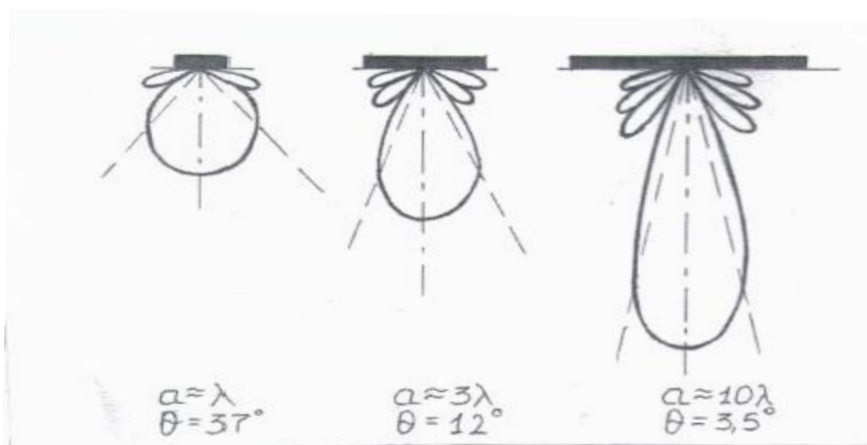


Рис. 42 Изменение формы пучка при увеличении диаметра пластины

Исходя из требований ТЗ, система должна измерять толщину стенки на пятне диаметром 10 мм. Если измерять угол расхождения по уровню - 20Дб, (формула 23), то для обеспечения ширины пятна пучка в 10мм для разных диаметров труб потребуются углы расхождения Q_0 , приведённые в Табл. 4 и необходимое для этого отношение a/λ или диаметр пластины $2a$ для рабочих частот [16-18], рекомендованных в разделе 1.1 для соответствующих диаметров труб. В Таб.4 приведены также значения $X_{0л}$ для эти же частот.

Таблица 4 Угол расхождения пучка.

ϕ (мм)	114	219	273	325	377	426	530	620	720	820	920	1020	1220
θ_0 (град.)	5.05	2.6	2.1	1.8	1.5	1.3	1.1	0.92	0.82	0.70	0.65	0.56	0.48
$\frac{a}{\lambda}$	6.14	12.0	14.6	17.4	20.1	23.5	28.4	33.8	38.6	45.0	49.1	55.1	65.9
Раб. Частота (МГц)	10 МГц $\lambda=0.15\text{мм}$	5 МГц $\lambda=0.3\text{ мм}$						3МГц $\lambda=0.5$ мм	2.5 МГц $\lambda=0.6\text{мм}$				
$2a$	1.8	3.6	8.7	10.4	12.0	14.0	17.0	20.2	40.0	54.0	60.0	66.0	80.0
$X_{0л}$ мм)	5.4	22	63	90	120	163	241	347	800	1215	1500	1815	2666

Анализ данных табл. 4 показывает, что для диаметров труб более 620 мм практически реализовать пятно контроля диаметром 10 мм не представляется возможным. Экспериментальные измерения ширины пучков для разных преобразователей проводились на иммерсионной ванне (рис.16) со шкалой поворота, проградуированной в градусах. Исследовались преобразователи на 5 МГц диаметром 10 мм и на 2.5 МГц диаметром 30 мм. Результаты измерений приведены в таблицах 5 и 6 и на рис. 43, 44. Для преобразователя 2.5 МГц диаметром 30 мм расчётное значение $\theta_p=1.47^\circ$, в то время как экспериментальное $\theta_p=3^\circ$. Отклонения связаны с тем, что максимальное расстояние до преобразователя составляет 300 мм при ближней зоне в 404 мм. Т.е. измерение проводилось при $X < X_{bl}$. А в ближней зоне измерения не однозначны.

Таблица 5 Преобразователь 5 МГц, Ø10 мм.

Угол (°)		-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
расстояние	X_{bl} 89.9 мм	2.25	5.5	6.0	9.5	10.0	14.0	29.0	43.0	50	46	45	23.5	13.0	6.0	3.0	1.55	-
	300 мм	-	1.0	2.0	4.0	8.5	14.0	25.5	37.0	50	48.5	37.5	24.0	15.5	9.5	5.0	2.5	2.25

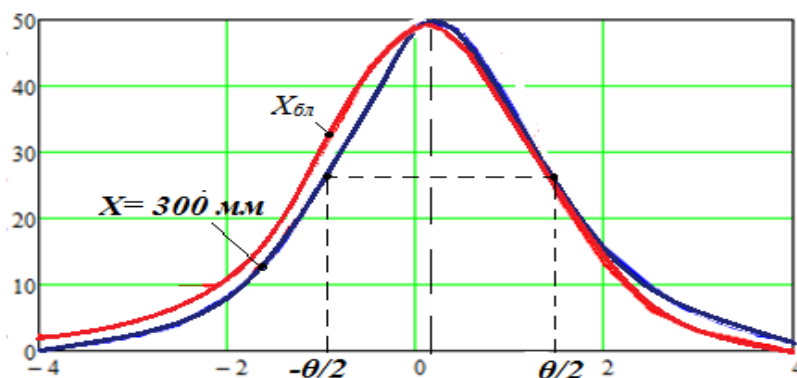


Рис.43 Диаграмма направленности преобразователь 5МГц., Ø10 мм.

Таблица 6 Преобразователь 2.5 МГц, Ø30 мм.

Угол (°)	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
X _{бл} 404 мм	-	1.0	2.0	3.0	6.0	11.0	27.0	43.0	50.0	47.0	39.0	35.0	22.0	9.0	2.5	2.0	-

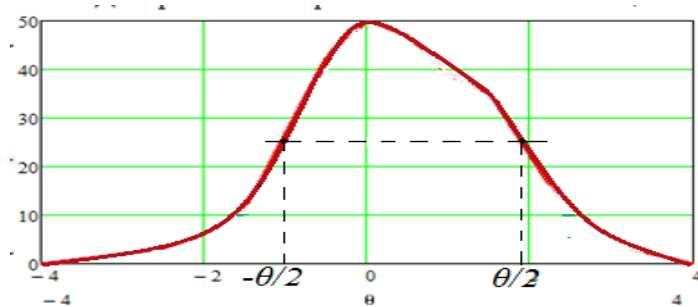


Рис.44 Диаграмма направленности преобразователя 2.5 МГц , Ø30 мм.

Одним из возможных путей уменьшения ширины пучка является фокусировка. Для фокусировки используют несколько типов преобразователей.

Активный концентратор

Активные концентраторы – изогнутые пьезоэлементы, представляющие собой часть сферы или цилиндра. Фокусное расстояние таких концентраторов F равно их радиусу кривизны R ; радиус пластины a , связан с фокусным расстоянием через угол раскрытия фронта θ_m формулой:

$$a = F * \sin \theta_m \quad (27)$$

а радиус фокального пятна $\rho = 0.61 * F * \frac{\lambda}{a}$ (28)

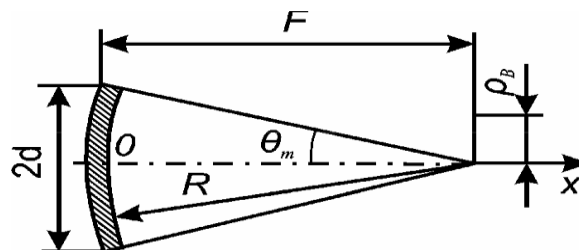


Рис. 45 Активный концентратор

Рефрактор

Рефракторы – линзы, преобразующие плоскую волну в сходящуюся. Линзы могут быть вогнутыми (ускоряющими) или выпуклыми (замедляющими) в зависимости от соотношения скоростей ультразвука в среде C_c и в материале линзы $C_{л}$. Их отношение называют показателем преломления:

$$n = C_c / C_{л} \quad (29)$$

Если среда - иммерсионная жидкость, а линза сделана из органического стекла, то $n < 1$. Фокусное расстояние такой плоско-вогнутой линзы связано с её радиусом кривизны соотношением:

$$F = R / (1 - n) \quad (30)$$

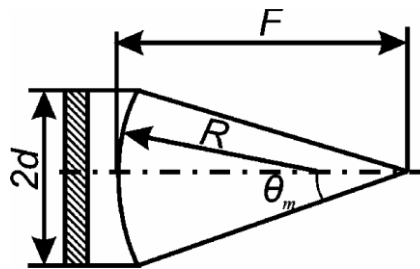


Рис.46 Рефрактор.

Дефлектор

Дефлекторы – зональные пластинки, состоящие из чередующихся акустически прозрачных и непрозрачных колец [19-20]. Внутренний a_v и наружный a_n радиусы колец определяются соотношениями:

$$a_v = \sqrt{2m * F\lambda} \quad (31)$$

$$a_n = \sqrt{(2m + 1) * F\lambda}$$

где $m=0, 1, 2, \dots$

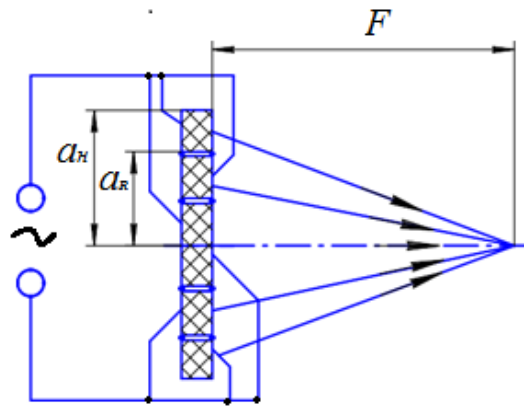


Рис.47 Преобразователь с зональной пьезопластиной

Существенного выигрыша в амплитуде сигнала при фазовой фокусировке можно добиться, если разделить пластину на кольца, соответствующие зонам Френеля (например, глубокими бороздками), и подать на электроды чётных и не чётных колец электрические напряжения в противофазе [21].

Для оценки возможности фокусировки рассмотрим активный концентратор. Другие фокусирующие преобразователи могут быть сведены к преобразователю с искривлённым пьезоэлементом, если рассматривать сходящийся волновой фронт вблизи фокусирующей поверхности как поверхность излучателя. Учитывая, что положение зрочка на оси преобразователя находится на расстоянии, равном фокусному расстоянию F , фокусное расстояние F должно быть равно радиусу трубы. Т.е. в (27) мы считаем F заданным. Принимая радиус зрочка равным S мм можно определить угол схождения фронта θ_m и радиус пластины для рабочих частот рекомендованных в табл. 4. Результаты расчётов приведены в табл.7

Таблица 7. Выбор диаметра пластины $2a$.

$\Phi_{\text{нар.}}$ (мм)	114	219	273	325	377	426	530	620	720	820	920	1020	1220
$f_{\text{раб.}}$ (МГц)	10.0 $\lambda=0.15$	10.0 $\lambda=0.15$	5.0 $\lambda=0.3$	5.0 $\lambda=0.3$	5.0 $\lambda=0.3$	5.0 $\lambda=0.3$	5.0 $\lambda=0.3$	5.0 $\lambda=0.3$	3.0 $\lambda=0.5$	2.5 $\lambda=0.6$	2.5 $\lambda=0.6$	2.5 $\lambda=0.6$	2.5 $\lambda=0.6$
$\Phi_{\text{вн.}}$ (мм)	102	201	249	301	353	402	510	596	696	796	896	996	1196
F (мм)	51	100.5	124.5	150.5	176.5	201	255	298	348	398	448	498	598
θ_m ($^\circ$)	5.6	2.9	2.3	1.9	1.6	1.4	1.1	0.95	0.8	0.7	0.65	0.57	0.50
a (мм)	0.98	1.83	4.45	5.42	6.35	7.24	9.2	10.73	20.9	28.6	32.2	35.8	43.0
m	32	63	78	95	111	126	160	187	218	250	281	313	375

Результаты расчётов, показывают, что при больших диаметрах труб диаметр пластины $2a$ становится практически нереализуемым. Возможность изменения a определяется выражением

$$a = \frac{0.61 \cdot F \cdot \lambda}{\rho} \quad (32)$$

вытекающим из (28).

В этом выражении уменьшение λ невозможно, т.к. рабочие частоты для всех диаметров труб регламентированы разрешающей способностью (Табл.4). F всегда равно радиусу внутренней стенки трубы. Единственное решение состоит в увеличении допустимого диаметра пятна контроля при увеличении диаметра трубы. В связи с этим можно установить в качестве степени локализации пятна контроля количество отсчётов по длине окружности по внутренней поверхности трубы. В Табл. 7 приведены значения количества точек отсчёта “ m ” по внутреннему диаметру трубы для пятна $\Phi 10$ мм. В качестве реального параметра можно принять 128 отсчётов, практически реализуемых для трубы $\Phi 426$ мм.

В системе PRIS XT, отмеченной в обзоре, даётся цифра 719 отсчётов на 1 оборот зеркала. Максимальный внутренний диаметр трубы 77,5 мм, рабочая частота до 20 МГц. Если учесть эти характеристики, получается, зона измерения в каждом положении зеркала составляет 0,34 мм. Теоретически и практически сформировать пучок такой ширины невозможно. Количество отсчётов также ограничивается временем одного цикла измерения. Для трубы 1220 мм время одного цикла измерения составляет примерно 0,7 мсек. Исходя из требований скорости продольного перемещения 1м/с и пятне 10 мм, на 1 м должно быть совершено сто оборотов зеркала. При длительности одного цикла измерения 0,7 мсек, на один оборот зеркала будет укладываться 14,2 измерительных цикла (точек отсчёта). С уменьшением диаметра трубы время одного цикла будет соответственно уменьшаться. На Рис. 48 приведена зависимость времени одного цикла измерения “t” от диаметра трубы для скорости звука в масле 1500 м/с.

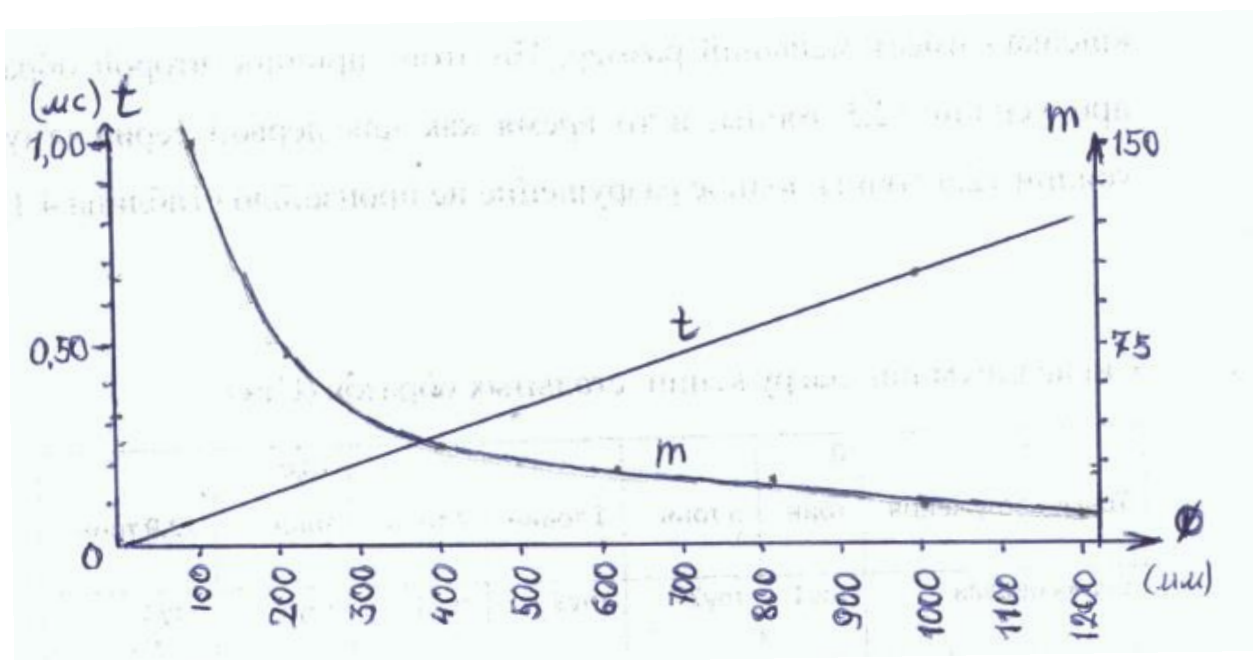


Рис. 48 Зависимость времени одного цикла и количество циклов измерения от диаметра трубы

Расчёт производился по внешнему диаметру трубы, чтобы обеспечить некоторый запас. На рисунке также приведена зависимость количества циклов измерений на 1 оборот зеркала при условии производительности 1 м/с. Исходя из реальных возможностей в соответствии с Табл. 7 может быть обеспечена скорость продольного перемещения 38 мм/с или 2,28 м/мин.

2 Расчёт основных элементов акустического тракта

2.1 Прохождение УЗ от пьезопластины преобразователя в иммерсионную среду, заполняющую измерительную головку

Геометрия задачи представлена на рис. 49.

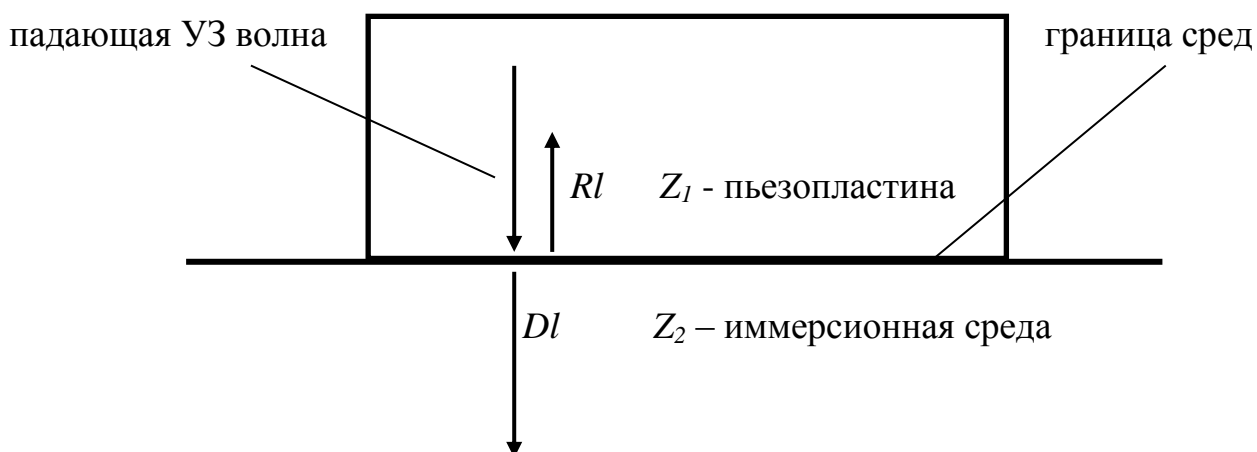


Рис. 49 Отражение и прохождение акустической волны на границе пьезопластины – иммерсионная среда.

В качестве иммерсионной среды рассмотрены вода, спирт, масло трансформаторное. Акустические характеристики сред представлены в таблице 8.

Таблица 8 Акустические характеристики сред.

среда	C_l (м/с)	ρ (кг/м ³)	C_l (кг/м ² *с)
ЦТС-19	3000	7.4	$22.2 \cdot 10^6$
вода	1500	10	$1.5 \cdot 10^6$
спирт	1180	0.789	$0.939 \cdot 10^6$
масло	1490	0.89	$1.54 \cdot 10^6$
глицерин	1923	1.261	$2.42 \cdot 10^6$

Коэффициент отражения по давлению определяется из соотношения

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad (33)$$

По энергии

$$\tilde{R} = R^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2.$$

Исходя из этих соотношений вычислены коэффициенты прозрачности по энергии, границы пьезопластина – среда для перечисленных сред.

$$\tilde{D} = 1 - \tilde{R}$$

Результаты расчётов приведены в таблице 9.

Таблица 9 Коэффициенты отражения и прозрачности сред.

среда	\tilde{R}	\tilde{D}
вода	0.762	0.238
спирт	0.844	0.156
масло	0.805	0.195
глицерин	0.668	0.332

Максимальная эффективность передачи энергии из пьезопластины соответствует глицерину. Для создания жидкой среды на основе глицерина он смешивается с водой в любых пропорциях.

Для максимального прохождения энергии из ЦТС-19 в масло необходимо ввести промежуточный слой (согласующий)[22]

Импеданс такого слоя определяется соотношением

$$Z_c = \sqrt{Z_1 * Z_2}. \quad (34)$$

$$Z_c = \sqrt{22.2 * 10^3 * 1.54 * 10^3} = 5.8 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Для границы ЦТС-19 и масло в качестве согласующего слоя хорошо подходит *эпоксидная смола*: $\rho = 1.15 * 10^3 \text{ кг} * \text{м}^3$; $C = 2.5 * 10^3 \text{ м/с}$; $z = 3 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$

Для расчёта коэффициента отражения по давлению воспользуемся формулой

$$R = \frac{Z_c^2 - Z_1 Z_2}{Z_c^2 + Z_1 Z_2}. \quad (35)$$

$$R = \frac{9 - 34.1}{9 + 34.1} = 0.58$$

Коэффициент отражения по энергии $\tilde{R}=R^2=0,33$.

Так как коэффициенты отражения \tilde{R} и прозрачности \tilde{D} по энергии связаны соотношением $\tilde{R}+\tilde{D}=1$, следует, что в данной системе прозрачность по энергии $\tilde{D}=0,67$.

Толщина согласующего слоя h_c должна быть кратной нечётному числу $1/4$ длины волны в слое. [23-25]

$$h = (2n + 1) \frac{\lambda_c}{4}. \quad (36)$$

При $n=1$ получаем:

Таблица.10 Зависимость толщины согласующего слоя (протектора) от рабочей частоты преобразователя.

f (МГц)	1.8	2.5	5	10
h_c (мм)	1.05	0.78	0.39	0.195

2.2. Прохождение УЗ через масло до зеркала

В данной установке, пьезопреобразователь расположен на расстоянии меньше 50 мм от зеркала, что соответствует ближней зоне преобразователя.

В данной зоне вся энергия распространяется вдоль оси преобразователя, по всей площади пьезопластины.

На рисунке 50 представлена схема распространения УЗ волны от преобразователя до зеркала.

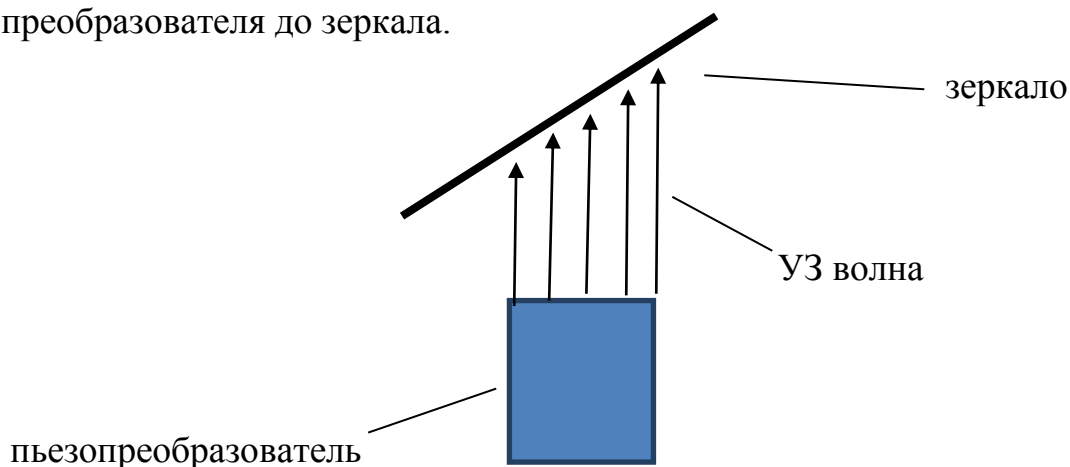


Рис. 50 Распространение УЗ волны от преобразования до зеркала.

Рассчитаем границы ближней зоны для пьезопреобразователей на частоте $f= 2.5\text{МГц}; 5\text{МГц}; 10\text{МГц}$.

Граница ближней зоны рассчитывается по формуле:

$$X_6 = \frac{a^2}{\lambda} \quad (37)$$

Преобразователь $f= 2.5\text{МГц}$

Радиус $R=8\text{ мм}$

Длина волны $\lambda=\frac{c}{f}$

Скорость звука в масле $C=1390\text{ мм/с}$

$\lambda=0.556\text{ мм}$

Ближняя зона $X_6=\frac{a^2}{\lambda}$

$X_6 = 115\text{ мм}$

Преобразователь $f= 5\text{ МГц}$

Радиус $R=8\text{ мм}$

Длина волны $\lambda=\frac{c}{f}$

Скорость звука в масле $C=1390\text{ мм/с}$

$\lambda=0.278\text{ мм}$

Ближняя зона $X_6=\frac{a^2}{\lambda}\text{ мм}$

$X_6 = 230\text{ мм}$

Т.е. падающий и отражённый от зеркала пучок будут находиться в ближней зоне .

2.3. Отражение от зеркала на 45°

Для распространения волны в перпендикулярном направлении используется зеркало, которое характеризуется коэффициентом отражения (по амплитуде). Коэффициент отражение зависит от разности акустического сопротивления первой и второй среды. На рисунке 51 приведена графическая схема отражения УЗ волны от зеркала.

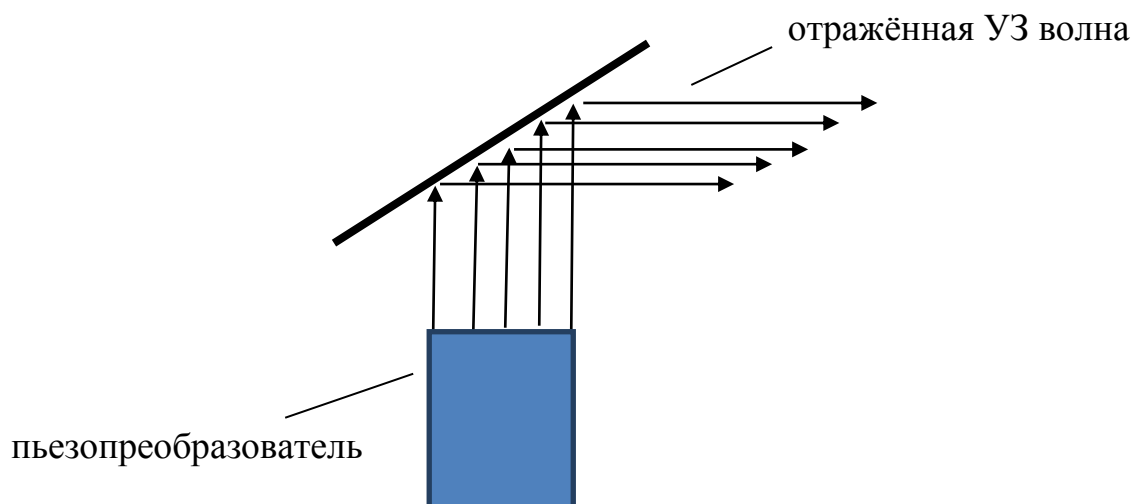


Рис. 51 Схема отражателя от зеркала.

Численные значения коэффициентов отражения (по амплитуде) для некоторых материалов представлены в таблице 11.

Таблица 11 Коэффициент отражения (по амплитуде).

Материал зеркала		Сталь	Дюралюминий	Медь	Латунь
среда	масло	0.94	0.84	0.93	0.92
	вода	0.94	0.85	0.93	0.93

Анализ показывает, что существенной разницы по эффективности отражения от разных материалов нет. Поэтому материал зеркала следует выбирать из конструктивных требований.

При проведении экспериментальных исследований в данной работе зеркало изготавливалось из дюралюминия.

Для рассмотрения процесса отражения падающей волны от ПЭП на зеркало рассмотрим общую схему отражения и преломления на границе масло – зеркало.

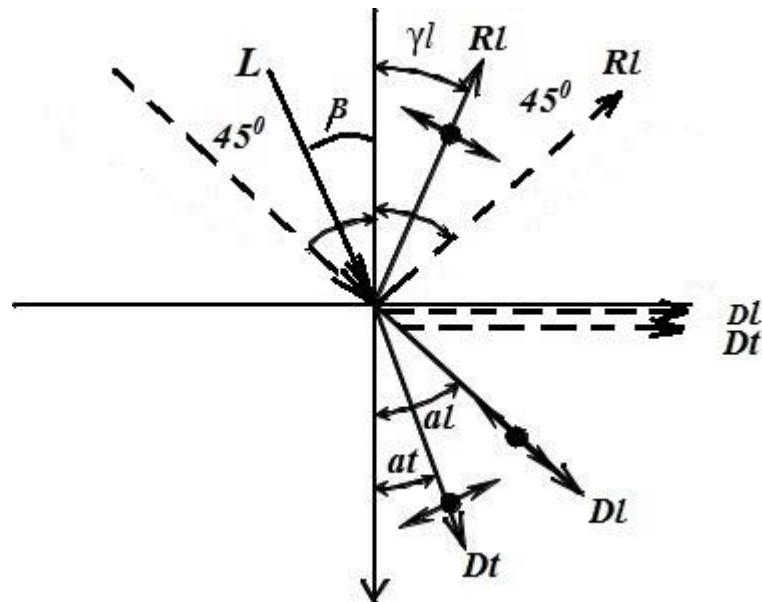


Рис.52 Отражение и преломление на границе масло – зеркало.

Отражаться от поверхности зеркала будет продольная волна RL , причём угол её отражения γ_l всегда равен углу падения β .

В материале зеркала возникают продольная и поперечные волны Dl и Dt . Наличие этих волн и их углы преломления al и at определяются значениями первого и второго критических углов для границы двух сред масло – сталь. По закону синусов:

$$\beta_{кр1} = \arcsin \frac{Cl_M}{Cl_{ст}} = \arcsin \frac{1490}{5900} = 14.5^\circ$$

$$\beta_{кр2} = \arcsin \frac{Cl_M}{Ct_{ст}} = \arcsin \frac{1490}{3300} = 26.7^\circ$$

В нашей геометрии угол падения $\beta=45^\circ$, что больше и $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$. Следовательно продольная и поперечная преломлённые волны уходят к поверхности т.е. в материале зеркала возникает поверхностная волна, скорость которой $C_s = 0.93 * Ct_{ст} \approx 3070$ м/с. Энергия волны сосредоточена в слое толщиной $\lambda_n = C_s/f = 1.3$ мм для $f = 2.5$ МГц. Следовательно толщина зеркала не должна быть меньше 1.3 мм. Для частот 5.0 МГц и 10 МГц минимальная толщина будет составлять 0.65 мм и 0.325 мм соответственно.

На рисунке 44 пунктиром отмечены отражённые и преломлённые волны на границе масло – зеркало.

2.4. прохождение от зеркала до стенки зонда

Расстояние от преобразователя до зеркала не более 50 мм, что соответствует ближней зоне преобразователя. Выходное окно так же находится на расстоянии не более 50 мм от зеркала. Из этого следует, что УЗ пучок в пределах зонда не меняет своей формы.

2.5 Прохождение УЗ от стенки зонда через "однофазную" жидкость до внутренней стенки трубы

В данной установке корпус зонда выполнен из полимера. Корпус необходим для защиты датчика и вращающегося зеркала от агрессивной среды и твёрдых частиц в нефти. А также данное устройство должно быть герметичным чтобы не происходило вымывание и перемешивание имерсионной жидкости.

При использовании в устройстве защитного элемента, возникает некоторые сложности решения поставленной задачи, которые можно решить несколькими способами. На рисунке 53 представлена графическая схема прохождения УЗ волны через стенку зонда.

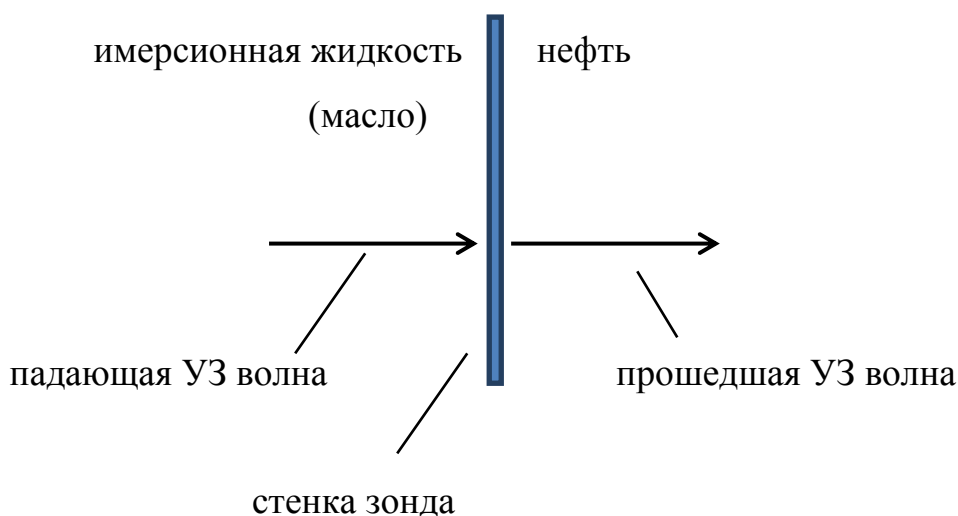


Рис.53 Прохождение УЗ волны через стенку зонда.

Способ №1

Для расчёта прохождения УЗ волны, из зонда в однофазную жидкость снова возникает вопрос согласования сред и подбору материалов.

Допустим что иммерсионная жидкость (масло) и нефть имеют одинаковые параметры: $\rho=0.89*10^3 \text{ кг*м}^3$; $C=1.490*10^3 \text{ м/с}$ $Z_c=1.54*10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$

В качестве согласующего слоя по техническим параметрам подходит вулканизированная резина: $Z_c=1.3-3.7*10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$ которая может обеспечить полное прохождение УЗ волны.

Способ №2

Рассмотрим систему, где две среды разделены промежуточным слоем толщиной h . В данном слое образуется две волны, распространяющиеся в прямом и в обратном направлении. Из волнового уравнения, с учётом граничных условий задачи (равенство давлений и смещений на обеих границах слоя), можно вычислить амплитуды всех волн. Из них получают следующее выражение для входного импеданса для падающей волны.

$$Z_{\text{вх}} = \rho_c * C_c \frac{Z_2 - j\rho_c * C_c * \text{tg}(k_c * h_c)}{\rho_c * C_c - jZ_2 * \text{tg}(k_c * h_c)} \quad (38)$$

где ρ_c – плотность слоя;

C_c – скорость продольной волны в слое;

$k_c = \frac{\omega}{C_c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

Z_c – импеданс нижней среды;

Импеданс выисляется по формуле (33). Зная $Z_{\text{вх}}$, мы можем вычислить коэффициент отражения и прозрачности.

$$R = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_2}{Z_{\text{вх}} + Z_2} \quad (39)$$

Так как $Z_{\text{вх}}$ зависит от h , то и коэффициенты R и D также будут зависеть от h_c .

Пусть $h_c = n \frac{\lambda}{2}$ – т.е. толщина слоя кратна числу полуволен в слое.

В этом случае $k_c h_c = n\pi$ и $\text{tg}n\pi = 0$. Получается, что

$$Z_{ex}=Z_2=\rho_2 C_2 \quad (40)$$

То есть импеданс такой системы равен входному импедансу второй среды. Эффект такой, что слой h_c как бы отсутствует, т.е. он не влияет на прохождение монохроматической волны.

Исходя из этого в качестве материала для стенки зонда можно использовать любой материал с толщиной $n \frac{\lambda}{2}$. Основные требования к материалу стенки зонда – механическая прочность. Может быть использовано оргстекло или конструкционный пластик [26].

2.6 Прохождение УЗ от стенки зонда через «однофазную» жидкость до внутренней стенки трубы

На данном промежутке пути, УЗ волна расходится т.к. имеет место дальняя зона, которая характеризуется раскрытием основного лепестка.

$$\theta = \arcsin 0,61 * \frac{\lambda}{a} \quad (41)$$

Таблица 12 Расчёт для расхождения проводился для преобразователей 2.5; 5; 10 МГц. Диаметр 18, 16, 16 мм соответственно.

f (МГц)	2.5	5	10
θ°	1.47	2.21	2.6

2.7 Прохождение УЗ через внутреннюю поверхность трубы в металл

Прохождение УЗ через жидкость (нефть) в стенку трубы, происходит под прямым углом относительно поверхности. В стенке возникают 2 волны: отражённая и прошедшая в глубь металла. На рисунке 54 представлено графическое изображение прохождения и отражения УЗ волны на границе нефть- сталь. [27]

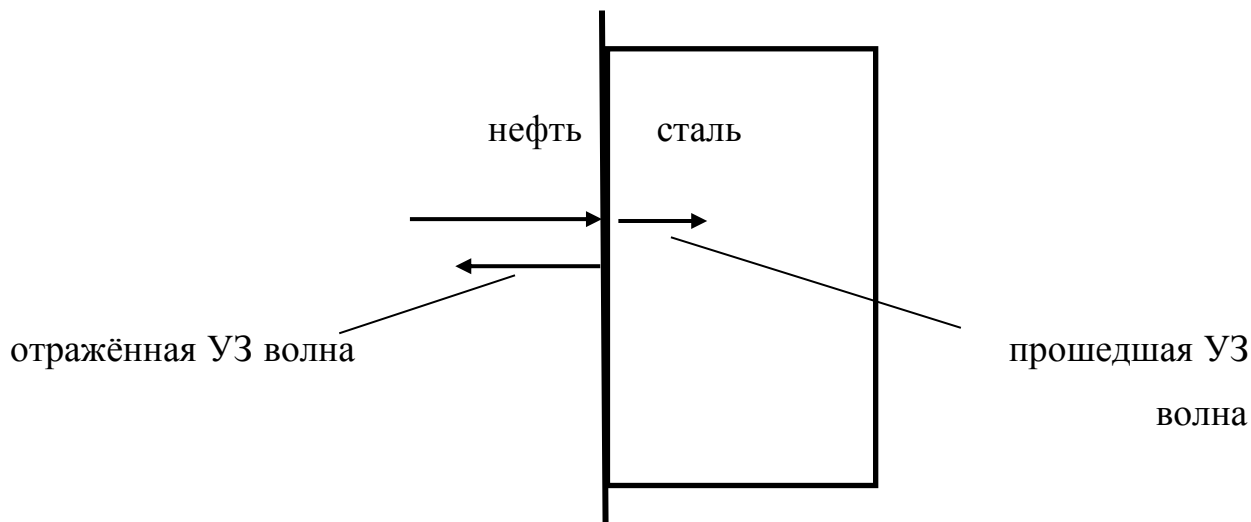


Рис. 54 Прохождение и отражение УЗ волны на границе масло- сталь.

Для расчёта коэффициентов отражения и прозрачности, необходимо рассчитать импедансы: нефти $\rho=0.89 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$; $C=1.74 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ и углеродистой стали $\rho=7.8 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$; $C=5.9 \cdot 10^3 \text{ м/с}$. Для расчётов воспользуемся формулой (33).

Акустический импеданс нефти равен:

$$Z_1 = 0.89 \cdot 10^3 \cdot 1.74 \cdot 10^3 = 1.54 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Акустический импеданс стали равен:

$$Z_2 = 7.8 \cdot 10^3 \cdot 5.9 \cdot 10^3 = 46 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Из полученных параметров рассчитаем коэффициент отражения на границе нефть-сталь.

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (42)$$

$$R = \frac{46 - 1.54}{46 + 1.54} = 0.935 \text{ – по давлению}$$

$$\tilde{R} = 0.86 \text{ – по энергии}$$

Коэффициент прозрачности границы нефть-сталь равен.

$$\tilde{D} = 0.14$$

То есть в стенку трубы проходит 14% энергии падающей волны.

2.8 Отражение УЗ от наружной поверхности стенки трубы (граница металл - воздух)

При прохождении через всю толщину металла УЗ волна встречает на своём пути границу сред металл- воздух, так как разность между акустическими импедансами данных сред очень велик, то вся энергия УЗ волны отражается обратно в металл. [28] Графическое изображение отражения УЗ волны от внешней стенки представлено на рисунке 55

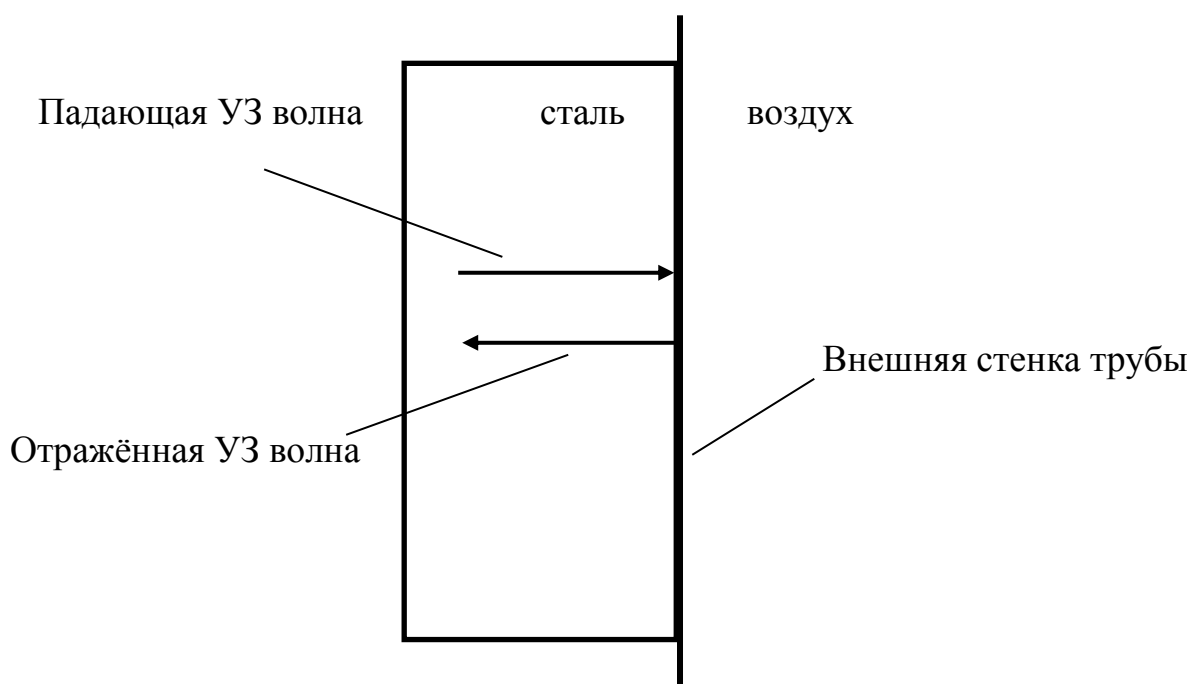


Рис. 55 Отражение УЗ волны от внешней стенки трубы.

2.9 Прохождение отражённого назад от внешней стенки трубы через внутреннюю стенку в масло (граница сталь- масло)

Прохождение УЗ через сталь обратно в жидкость, происходит по такой же траектории, как и в прямом направлении.

Из выше представленных расчётом известно, что коэффициент отражения на данной границе составляет:

$$R = \frac{46-1.54}{46+1.54} = 0.935 \text{ – по давлению.}$$

$$\tilde{R} = 0.86 \text{ – по энергии.}$$

Коэффициент прозрачности системы равен.

$$\tilde{D}=0.14$$

2.10 Прохождение УЗ, отражённого от внутренней стенки трубы через жидкость до стенки зонда

При падении УЗ волны под прямым углом, большая часть энергии УЗ волны, отражается в обратном направлении. Коэффициент отражения можно рассчитать по формуле (38)

$$R = \frac{46-1.54}{46+1.54} = 0.935 \text{ –по давлению}$$

Коэффициент отражения по энергии равен :

$$\tilde{R}=0.86$$

2.11 Прохождение УЗ, отражённого внешней стенки трубы и прошедшего в обратном направлении через внутреннюю поверхность стенки трубы в жидкость, через жидкость до стенки зонда

Отражённая от внешней стенки трубы УЗ волна, встречает на своём пути границу сталь-нефть. Коэффициент отражения и прозрачности на данном участке пути, будет зависеть от разности импедансов данных сред.

Импедансы нефти и стали соответственно равны:

$$\text{Нефть} - 1.54 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

$$\text{Сталь} - 46 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Используя формулу (38), рассчитаем чему равен коэффициент отражения данной границы.

$$R = \frac{46-1.54}{46+1.54} = 0.935 \text{ –по давлению;}$$

Коэффициент отражения по энергии равен:

$$\tilde{R}=0.86$$

Прозрачность данной границы равна:

$$\tilde{D}=1-\tilde{R}=0.14$$

2.12 Прохождение УЗ импульса, отражённого от внутренней поверхности, через стенку зонда назад к зеркалу

При распространении волны, отражённой от внутренней стенки трубы, на её пути встречается стенка зонда. Так как с обеих границ зонда имеется жидкость с одинаковым акустическим импедансом

$Z_I = 1.54 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, то данный элемент конструкции имеет смысл сделать равным $\frac{\lambda}{2}$. При такой толщине достигается максимальное просветление границы.

2.13 Прохождение УЗ импульса, отражённого от внешней поверхности трубы через стенку трубы назад к зеркалу

При распространении волны, отражённой от внешней стенки трубы, на её пути также возникает препятствие в виде зонда. Так как с обеих границ зонда имеется жидкость с одинаковым акустическим импедансом $Z_I = 1.54 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, то данный элемент конструкции имеет смысл сделать равным $\frac{\lambda}{2}$. При такой толщине достигается максимальное просветление границы.

2.14 Прохождение УЗ импульсов, отражённых от внутренней и внешней поверхности стенок трубы от зеркала под углом 45°

При падении УЗ волны на поверхность зеркал под углом 45°, происходит её отражение на тот же угол.

Коэффициент отражения от зеркала зависит от выбранного материала. Значения коэффициентов отражения обратной волны также определяется таблицей 11.

2.15 Прохождение УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы, отражённых от зеркала через границу масло – пьезопластина

Чтобы обеспечить прохождение отражённых УЗ волн от внешней и внутренней поверхности трубы, из масла в пьезопластину, необходимо согласование сред: масло с пьезокерамикой ЦТС-19.

$$\text{масло} : \rho=0.89*10^3 \text{ кг*м}^3; C=1.490*10^3 \text{ м/с}$$

$$\text{пьезокерамика ЦТС-19: } \rho =7.4*10^3 \text{ кг*м}^3; C=3*10^3 \text{ м/с}$$

Акустический импеданс среды рассчитывают по формуле (33)

Акустический импеданс пьезопластины равен:

$$Z_1 = 7.4 * 10^3 * 3 * 10^3 = 22.2 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Акустический импеданс среды (масло) равен:

$$Z_2 = 0.89 * 10^3 * 1.74 * 10^3 = 1.54 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Для максимального прохождения энергии из масла в ЦТС-19 необходимо ввести промежуточный слой (согласующий). Воспользуемся формулой (34).

$$Z_c = \sqrt{22.2 * 10^3 * 1.54 * 10^3} = 5.8 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$$

Для границы пьезопластины ЦТС-19 и масла в качестве согласующего слоя хорошо подходит *эпоксидная смола*: $\rho=1.15*10^3 \text{ кг*м}^3; C=2.5*10^3 \text{ м/с}; z=3 * 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 * \text{с}}$

Для расчёта коэффициента отражения по давлению воспользуемся формулой (34).

$$R = \frac{9-34.1}{9+34.1} = 0.58$$

Для удобства заменим коэффициентом отражения интенсивности, который связан с R отношением $\tilde{R}=R^2$.

$$\tilde{R}=0.33$$

Так как коэффициент отражения R и прозрачности D связан соотношением $\tilde{R} + \tilde{D} = 1$, то равенство $\tilde{R} = 0$ соответствует равенству $\tilde{D} = 1$.

Из этого следует, что в данной системе прозрачность $\tilde{D} = 0.67$.

2.16 Преобразование УЗ импульсов от внутренней и внешней стенок трубы в электрические импульсы в пьезопластине

При воздействии на пластину акустических импульсов, в ней возникает электрический сигнал. Возникающее напряжение сигнала описывается по формуле:

$$U = M * P_1 \quad (43)$$

где M – коэффициент преобразования при приёме;

P_1 – давление УЗ падающее на пьезопластину.

Давление P_1 , которое действует на пьезопреобразователь, зависит от начального давления P_0 и его ослабления на всём пройденном пути.

Учитывая вычислительные характеристики ослабления на заданном из участков, получаем полное ослабление в акустическом тракте:

$$N = 4.29 * 10^{-4} \text{ или } -74\text{дБ.}$$

Исходя из этого, электрический тракт приёмной части электронной схемы (усилитель) должен обеспечивать чувствительность на уровне -80дБ. На дефектограммах рис.13 – 21 диапазоны значения чувствительности приёмного тракта дефектоскопа при измерении толщин имитаторов стенки трубы толщиной от 5 до 50 мм. Во всех случаях она составляет порядка 80 дБ.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Б4А	Серебренникову Илье Романовичу

Тема: Разработка внутритрубного УЗ толщинометра стенки трубопровода с использованием вращающегося зеркала

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление / специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Проведение предпроектного анализ: оценка потенциальных потребителей, проведение SWOT-анализа</i>
<i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Определение целей и результатов</i>
<i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Планирование этапов работы, определение календарного графика</i>
<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Оценка сравнительной эффективности проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<i>Матрица SWOT</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын Владислав Владимирович	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б4А	Серебренников Илья Романович		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Данная работа посвящена разработке системы контроля толщины стенки трубопроводов, основанной на методе ультразвуковой толщинометрии с использованием вращающегося зеркала и рассмотрению альтернативных решений ультразвукового сканирования стенки трубопровода.

Основной задачей было выполнить анализ геометрии распространения УЗ пучка от излучателя до контролируемого объекта с учётом изменения направления распространения с помощью УЗ зеркала. Рассчитать основные параметры пьезоэлектрического излучателя, форму акустического пучка, ослабление пучка при отражении от зеркала, прохождение через акустически прозрачный корпус, отражение от стенки и возвращение на преобразователь. Провести эксперименты по измерению основных характеристик УЗ системы.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Основным конкурентом разрабатываемой технологии контроля является система «PRIS XT», производства TesTex Inc. Российских аналогов приборов с данной технологией не существует.

Система ультразвукового внутритрубного контроля PRIS XT предназначена для обследования ферромагнитных и неферромагнитных труб теплообменного оборудования. Система позволяет обнаруживать внутреннюю и внешнюю сплошную и точечную коррозию, с высокой точностью измерять толщину стенки и сохранять результаты для последующей обработки и анализа.

В системе PRIS XT используется технология IRIS (Internal Rotary Inspection System) - ультразвуковой иммерсионный эхо-метод с вращающимся зеркалом. Ультразвуковой преобразователь содержится в зонде, который проходит в трубе теплообменника. Ультразвуковой импульс испускается параллельно оси трубы. Вращающееся под углом 45 градусов зеркало обеспечивает сканирование по окружности. Зеркало отражает импульс перпендикулярно на стенку трубы. Отраженные от внешней и внутренней поверхности трубы импульсы следуют тем же путем назад к преобразователю.

Для обследования трубопроводов большого диаметра, в настоящий момент, используются внутритрубные ультразвуковые дефектоскопы. В данных приборах установлены иммерсионные УЗ датчики, которые располагаются по всей площади системы. Датчики вводят УЗ волну под углом 17 градусов к перпендикуляру поверхности, в толщине металла угол изменяется на 45 градусов, что позволяет достичь максимальной энергии до внешней стенки трубопровода. Приём осуществляется тем же датчиком.

Таблица 4.1

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _{к2}	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _{к1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Внутренние диаметры контролируемых труб	0.3	5	5	1.5	1.5
Точность измерения остаточной толщины	0.2	5	2	1	0.4
Количество измерений за 1 оборот преобразователя	0.1	4	3	0.4	0.3
Скорость сканирования	0.1	4	3	0.4	0.3
Электропитание	0.1	4	4	0.4	0.4
Экономический критерий					

Цена	0.1	3	4	0.3	0.4
Срок выхода на рынок	0.1	5	2	0.5	0.2
Итого	1	25	21	4.5	3.5

$B_{к2}$ – баллы конкурентной системы;

$B_{к1}$ – баллы разрабатываемой системы.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i * B_i$$

(1)

Система «PRIS ХТ», предназначена для узкоспециализированных задач (дефектоскопия труб теплообменного оборудования). Данная система производит измерение труб диаметром от 10 – 77,5 мм. Перемещение данного устройства осуществляется на расстояние 15.2–21 м, так как имеет соединительный кабель, обеспечивающий питание и приём сигнала. Основным преимуществом данной системы является точность измерения остаточной толщины, которая соответствует 0.01мм.

Технология, которая зарабатывалась в данной НИР направлена на создание системы для исследования трубопроводов с поперечным сечением от 114 мм до 1220 мм. Данный вид трубопроводов используется на всех предприятиях занимающиеся транспортировкой нефти, газа, воды.

При экспериментальных данных было выявлено, что данная система перекрывает весь заданный диапазон трубопроводов, при использовании нескольких сменных датчиков. При этом погрешность измерения зависла как от выбора преобразователя, так и толщины образца, имитирующего стенку трубы, и составляет от 1 – 8 мм, что является хорошим показателем для контроля труб большого диаметра.

Разрабатываемая технология будет пользоваться спросом так как, подобного оборудования, для контроля труб большого диаметра не было выявлено.

4.1.2 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект

Таблица 4.2

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный бал	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Надежность	0.2	90	100	0.9	0.18
Унифицированность	0.1	30	100	0.3	0.03
Уровень шума	0.2	70	100	0.7	0.14
Простота эксплуатации	0.1	80	100	0.8	0.08
Ремонтопригодность	0.2	90	100	0.9	0.18
Экономический критерий					
Конкурентоспособность продукта	0.1	60	100	0.6	0.06
Цена	0.1	50	100	0.5	0.05
Итого	1	470	700	0.6	60

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i * B_i$$

где P_{cp} - средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя P_{cp} получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая.

По выполненным расчётам, приведённых в таблице 2, можно сделать вывод, что разрабатываемая система контроля, имеет перспективы на дальнейшее проведение исследований. Уже сейчас существует несколько принципов улучшения и модернизации технологии контроля, которые могут повысить качественные характеристики системы. Так как уже есть идеи по улучшению технологии, то привлечение инвестиций в данный проект не составит труда.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 4.3 Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Заявленная точность сканирования системы.	Сл1. Использование низко точной установки для исследования.
	С2. Экологичность	Сл2. Отсутствие у

	<p>технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Наличие как бюджетного так и частного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p>Сл3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ</p> <p>Сл4. Использование простых и известных материалов по сравнению с аналогами.</p> <p>Сл5. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Улучшение и развитие технологии</p>	<p>В2С1С3 Заявленная точность оборудования и более низкая стоимость производства могут привлечь дополнительный спрос на новый продукт.</p>	<p>В1Сл1Сл4</p> <p>Использование инфраструктуры ТПУ позволит изготовить более надёжную и точную установку для исследований и подбору более подходящих материалов</p>

<p>контроля</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. Ограничения на экспорт технологии</p> <p>У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p> <p>У5. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>	<p>У5С4 Так как данный проект финансирует частная организация, то отсутствие бюджетного финансирования не сильно повлияет на разработку.</p> <p>У4С5 При введении дополнительных сертификаций имеющийся персонал проведёт дополнительные испытания и исправит несоответствия если такие выявятся.</p>	<p>У1Сл1 Отсутствие спроса на данную технологию не позволит проводить дальнейшие исследования и строить новые установки для их изучения.</p> <p>У2Сл4 При использовании ограниченного числа «простых» материалов и высокой конкуренции данная разработка быстро потеряет актуальность.</p>

4.2 Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Морфологический подход основан на систематическом исследовании всех теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования. Синтез охватывает как известные, так и новые, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть упущены. Путем комбинирования вариантов получают большое количество различных решений, ряд которых представляет практический интерес.

Реализация метода предусматривает следующие этапы.

1. Точная формулировка проблемы исследования.
2. Раскрытие всех важных морфологических характеристик объекта исследования.

Таблица 4.4 Морфологическая матрица для УЗ толщиномера

	1	2	3
А. Приведение в рабочее состояние	ручное	постоянно находится в рабочем состоянии	Автоматическое включение
Б. Форма корпуса зонда	цилиндр	конус	Без корпуса
В. Среда внутри зонда	вода	масло	спирт
Г. Перемещение при сканировании ОК	вращение преобразователя	вращение УЗ зеркала	Вращение ОК
Д. Материал согласующего слоя для пьезопреобразователя	оргстекло	Эпоксидная смола	резина
Е. Материал УЗ зеркала	сталь	дуралюмин	медь

Для данной таблицы наиболее подходящими являются варианты:

А3Б2В2ЗГ12Д1Е1

4.2.1 Разработка графика проведения научного исследования.

Таблица 4.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор темы ВКР	1	Постановка задачи	Научный руководитель
Разработка технического задания	2	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель, инженер
	3	Календарное планирование работ по теме	Научный руководитель
Подбор и изучение материалов по тематике	4	Изучение методов исследования	Инженер
	5	Обзор литературы для проведения исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение расчетов и обоснований	Инженер
	7	Проведение опытов на установке	Инженер
Проведение ОКР			
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер, научный руководитель
	11	Оформление методики калибровки	Инженер, научный руководитель
	12	Доклад и презентация	Инженер, научный руководитель

Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме.

Этап	T_{ki}		Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март			Апрель		
	НР	И	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4	0	■	■	■																					
2	2	2			■																					
3	4	0			■																					
4	0	23				■	■	■	■	■	■															
5	0	9							■	■	■															
6	0	9													■	■	■									
7	0	5															■									
10	1	6																		■	■	■	■			
11	2	12																					■	■	■	■
12	1	1																					■	■	■	■

■ - научный руководитель, ■ - инженер

Вывод:

В рамках финансового менеджмента был проведён анализ конкурентоспособности разрабатываемой технологии с имеющимися системами на рынке. Также данная разработка была исследована путём SWOT анализа, в результате составления таблицы, были выявлены сильные и слабые стороны разработки. В целом система диагностирования получила средней результат, что позволяет ей конкурировать с имеющимися приборами на рынке. На конечной стадии работы был составлен график проведения научной работы.