

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов направления подготовки  
12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 620.179.17  
ББК 32.87  
П75

Рекомендовано к опубликованию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «3» мая 2023 г.,  
протокол № 9

Составители: канд. техн. наук, доц. С. С. Сергеев;  
ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

В методических рекомендациях кратко изложены основные теоретические и практические материалы для выполнения курсового проекта для студентов направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение» дневной формы обучения. Методические рекомендации разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Приборы и системы акустического контроля».

Учебное издание

## ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

1 Общие указания.....	4
1.1 Цель и задачи курсового проектирования .....	4
1.2 Тематика курсовых проектов.....	4
1.3 Исходные данные к проекту.....	4
1.4 Структура, объем и содержание курсового проекта.....	5
1.5 Общая схема работы над проектом.....	5
1.6 Порядок выполнения проекта .....	6
1.7 Использование компьютеров в курсовом проектировании .....	6
1.8 Оформление проекта.....	7
1.9 Защита проекта .....	7
2 Указания к разработке отдельных этапов проекта.....	8
2.1 Анализ характеристик объекта контроля.....	8
2.2 Анализ современного состояния вопроса проектирования .....	8
2.3 Выбор и обоснование метода контроля .....	9
2.4 Разработка методики контроля и технических средств .....	9
3 Расчет и проектирование электроакустических преобразователей.....	13
3.1 Оценка параметров акустического тракта .....	13
3.2 Выбор частоты ультразвуковых колебаний .....	15
3.3 Выбор структуры и расчет параметров преобразователей .....	18
3.4 Методика расчета и проектирования преобразователей на фазированных решетках.....	22
4 Выбор и расчет характеристик контроля .....	32
4.1 Выбор зоны и расчет шага сканирования .....	32
4.2 Оценка производительности контроля .....	33
5 Расчет параметров аппаратуры для теневого и эхометодов.....	34
5.1 Расчет параметров аппаратуры для контроля теневым методом.....	34
5.2 Расчет параметров аппаратуры для контроля сварных швов.....	36
Список литературы.....	39
Приложение А. Пример оформления титульного листа.....	40
Приложение Б.....	41
Приложение В.....	43
Приложение Г.....	44
Приложение Д.....	45

# **1 Общие указания**

## ***1.1 Цель и задачи курсового проектирования***

Целью курсового проектирования является привитие навыков самостоятельного применения в исследованиях и расчетах знаний по основам акустического контроля, полученных при изучении специального теоретического курса и при прохождении производственной практики.

Разработка курсового проекта ставит следующие основные задачи:

- систематизировать, расширить и закрепить теоретические знания, необходимые инженеру при создании новых эффективных методик неразрушающего контроля;
- выработать умение и навыки по комплексному решению технических задач при разработке методов и приборов контроля;
- развить навыки самостоятельной работы с научно-технической литературой.

## ***1.2 Тематика курсовых проектов***

Тематика курсовых проектов должна соответствовать современному состоянию и перспективам развития методов и средств неразрушающего контроля (НК). Темой для проекта является разработка методики акустического контроля (дефектоскопии, контроля физико-механических параметров, толщинометрии и т. п.) материалов и изделий, а также разработка технических средств (преобразователей, узлов дефектоскопов и других приборов, вспомогательных устройств, сканеров) контроля. Если в процессе проектирования возникает необходимость в разработке принципиально нового прибора или сложного устройства, допускается выбирать в качестве объекта проектирования конструкцию его части.

Курсовой проект может быть посвящен как разработке новой, так и модернизации существующей методики или прибора НК. Целью модернизации может быть повышение производительности контроля, чувствительности, надежности, уменьшение габаритов, массы и стоимости, расширение функциональных возможностей средств контроля.

В разработке курсового проекта необходимо использовать передовые достижения отечественной и зарубежной науки и техники.

## ***1.3 Исходные данные к проекту***

Исходными данными для выполнения курсового проекта являются следующие:

- конкретный объект контроля, характеризующийся определенными параметрами: форма и геометрические размеры, материал, технология изготовления, состояние поверхностей;
- условия нагружения и эксплуатации объекта контроля;
- характеристика возможных дефектов в изделии: тип дефекта, степень концентрации дефектов по объему объекта, ориентировочные место и глубина залегания;

– технические условия на выявляемость дефектов: минимальный размер дефектов, степень их опасности.

#### ***1.4 Структура, объем и содержание курсового проекта***

Курсовой проект должен состоять из графической части и пояснительной записки. Графическая часть включает комплект чертежей на разрабатываемую методику и аппаратуру контроля. Объем и конкретные чертежи определяются руководителем проекта. На чертежах приводятся: схемы прозвучивания и сканирования объекта, сборочные чертежи преобразователей и вспомогательных средств, функциональные схемы приборов и установок и т. п.

Пояснительная записка должна содержать конкретный материал по выбору и обоснованию применяемых решений. Примерное содержание пояснительной записки:

- введение;
- анализ исходных данных и характеристик объекта контроля;
- анализ современного состояния вопроса проектирования;
- выбор и обоснование метода контроля с анализом акустического тракта;
- разработка технических средств контроля;
- разработка методики контроля;
- выводы по результатам проектирования;
- список использованных источников и приложения.

#### ***1.5 Общая схема работы над проектом***

Анализ основных этапов создания новых методик и новой техники показывает, что общая схема обоснования любого технического (технологического, конструкторского) решения от выбора метода контроля до выбора подставки под изделие должна иметь следующий вид:

- формулировка технических требований к объекту проектирования;
- анализ и подбор (по литературным, патентным и другим источникам) пригодных для сравнения альтернативных вариантов решений;
- сравнительный анализ отобранных вариантов на соответствие техническим требованиям;
- выбор из числа альтернативных оптимального варианта (если таковой удастся выявить).

В случае отсутствия удовлетворительного варианта из числа известных вытекает задача разработки нового технического решения или усовершенствования наиболее приемлемого варианта.

Приведенной последовательности необходимо придерживаться при выполнении курсового проекта в целом, его отдельных разделов, решении частных задач проекта.

Сложность вопросов и объекта проектирования, его системный характер требуют комплексного решения всех частных задач проектирования. При этом необходимо проанализировать влияние синтезируемых частей друг на друга.

## ***1.6 Порядок выполнения проекта***

При выполнении курсового проекта рекомендуется следующий порядок или последовательность работы.

Производится анализ исходных данных на курсовой проект. Изучаются характеристики объекта контроля. Определяются акустические характеристики материала объекта: скорость распространения и коэффициент затухания волн, волновое сопротивление и др.

Производится анализ современного состояния методов и технических средств контроля, известных эффективных методик контроля аналогичных исходному объектов. Анализ производится по литературным, патентным и справочным источникам.

На основе анализа производится выбор и технико-экономическое обоснование метода контроля. Рассматриваются основные теоретические положения выбранного метода применительно к конкретному объекту контроля. Производится анализ акустического тракта.

Разрабатываются методика контроля и технические средства в соответствии с подразделом 2.4.

Разрабатываются чертежи сборочных единиц, схемы, графики, спецификации.

Приводятся общие выводы по работе в виде заключения и рекомендации.

## ***1.7 Использование компьютеров в курсовом проектировании***

Основными задачами, которые целесообразно решать в данном проекте на основе компьютеров, являются следующие:

- оценка, исследование и оптимизация параметров и характеристик преобразователей;
- расчет и моделирование акустических полей преобразователей и отражателей;
- составление градуировочных и поправочных таблиц и графиков для контроля изделий;
- расчет различных параметров контроля (частоты, чувствительности) и всевозможных коэффициентов (формы дефекта, преобразования, отражения и прохождения и др.).

Разработанная на кафедре ФМК учебная программа «SONIC» позволяет: определить оптимальную частоту УЗК, произвести полный расчет и оптимизацию параметров преобразователей с построением диаграммы направленности, провести анализ акустического тракта с расчетом чувствительности и построением графиков.

Для решения частных задач в отдельных проектах проектировщик должен сам составить алгоритм и программу его реализации.

## ***1.8 Оформление проекта***

Построение пояснительной записки, изложение ее текста, а также оформленные иллюстрации и приложений должны соответствовать ГОСТ 2.105. Пример оформления титульного листа представлен в приложении А.

Пояснительная записка выполняется рукописным или печатным способом чернилами или пастами темных цветов четким разборчивым почерком на листах белой бумаги формата А4 со стандартными рамками.

Изложение записки должно быть кратким и выполнено ясным техническим языком. В тексте записки не должно быть общих фраз, общих рекомендаций и т. п. Не допускается сокращение слов (кроме общепринятых), а терминология должна соответствовать принятой в учебниках и стандартах.

Расчетные формулы должны записываться в индексной форме с полной экспликацией и сквозной или пораздельной нумерацией. Все используемые в работе величины должны быть выражены в системе СИ согласно ГОСТ 8.417.

Список использованных источников должен содержать лишь те, которые использованы при выполнении проекта и на которые есть ссылки в тексте записки. Оформление списка должно соответствовать принятым правилам.

В приложение необходимо включать спецификации чертежей курсового проекта, распечатки программных продуктов, таблицы, графики, алгоритмы и т. п. по каким-либо причинам не включенные в основную часть записки.

Все графические материалы проекта должны соответствовать требованиям ЕСКД и данным указаниям.

## ***1.9 Защита проекта***

Выполненный и правильно оформленный курсовой проект сдается руководителю на проверку не позднее, чем за три дня до установленного срока защиты, и после проверки может быть представлен к защите. Проект должен быть подписан автором и руководителем.

Защита проекта производится перед комиссией в составе 2–3 преподавателей кафедры. Студент в течение 8...10 мин должен доложить о поставленной перед ним задаче, о принятых решениях, произвести анализ этих решений и защитить полученные результаты.

При оценке проекта учитываются качество его содержания и самостоятельность выполнения поставленной задачи, оформление графической части и пояснительной записки, четкость сообщения и ответы на вопросы.

## **2 Указания к разработке отдельных этапов проекта**

### ***2.1 Анализ характеристик объекта контроля***

Начальным этапом проектирования, включающего разработку методики контроля, является изучение характеристик контролируемого изделия, материала, из которого оно изготовлено, и дефектов, подлежащих обнаружению.

При этом к характеристикам изделия относятся: форма и размеры, технология изготовления, состояние поверхности, наличие припусков на обработку, условия нагружения при эксплуатации. К характеристикам материала: макроструктура, термообработка, плотность, степень анизотропии и акустические характеристики. К характеристикам дефектов: тип, размеры, место и глубина залегания, ориентация относительно поверхностей изделия, а также степень концентрации дефектов по объему изделия.

Часть характеристик объекта контроля может быть приведена в исходных данных на проект, а часть определяет или уточняет проектировщик по справочным и другим источникам.

Параметры, характеризующие объект контроля, удобно свести в общую таблицу.

### ***2.2 Анализ современного состояния вопроса проектирования***

Данный раздел проекта должен включать сравнительный анализ эффективности методов акустического контроля и технических средств применительно к исследуемому объекту контроля. Предметом анализа должны быть методики контроля, дефектоскопы, сканирующие устройства. Анализ производится на основе тщательного изучения литературных, методических, патентных и нормативных материалов по заранее составленной общей схеме, предполагающей направленность поиска и конечную цель исследований.

При выполнении этого раздела студенты должны изучить и обобщить опыт предыдущих исследований, результаты которых опубликованы в монографиях, материалах научно-технических конференций, журналах «Дефектоскопия», «В мире неразрушающего контроля», «Контроль и диагностика», авторских свидетельствах и патентах, нормативных документах, на сайтах Internet. При изложении результатов анализа по тексту должны быть приведены ссылки на источники.

Материал данного раздела необходимо излагать не в виде простого описания, а с точки зрения эффективности применения тех или иных методов и средств для контроля объекта по заданию. При этом основное внимание должно быть уделено достижению максимальной чувствительности, высокой производительности и достоверности контроля, простоты ввода УЗ-волн и расшифровки результатов контроля, возможности автоматизации и т. д. Излагаемый материал может сопровождаться схемами и рисунками. Анализ должен быть кратким, содержать только суть рассматриваемого вопроса и отражать основные тенденции развития акустического контроля.



## ***2.3 Выбор и обоснование метода контроля***

Этот раздел является наиболее важным этапом проектирования, т. к. эффективность НК в основном определяется методически правильным выбором оптимального способа выявления дефектов или определения характеристик объекта контроля. При этом выбор метода должен производиться по результатам анализа и оценки эффективности существующих способов контроля, полученных в предыдущем разделе.

При выборе того или иного метода необходимо учитывать следующие факторы: агрегатное и физическое состояние контролируемой среды, условия контроля, конструктивные особенности объекта контроля, вид решаемой задачи (дефектоскопия, толщинометрия, структурометрия и др.).

Следует отметить, что наибольшее распространение из акустических методов контроля получили методы отражения, а именно эхометод, так как он обладает наибольшей чувствительностью и высокой помехоустойчивостью. Когда применение эхометода затруднительно или невозможно, используют другие методы. Например, дельта- и эхозеркальный методы позволяют обнаруживать вертикальные дефекты сварных соединений. Зеркально-теневой метод используют для выявления в рельсах вертикальных дефектов, не дающих обратного отражения, но ослабляющих донный сигнал. Такие методы, как велосимметрический, импедансный, акустико-топографический, удобны при контроле слоистых конструкций с дефектами типа непроклеев, непропаев и т. п., где применение эхометода ограничивают наличие мертвой зоны и недостаточная разрешающая способность. Теневой метод применяют для контроля изделий простой формы (листов) и некоторых слоистых материалов. Для толстых листов эффективен эхосквозной метод. Крупнозернистые материалы типа строительных контролируют временным теневым методом. Контроль всевозможных сосудов в процессе эксплуатации, а также слежение за процессами сварки и разрушения металлов осуществляется посредством метода акустической эмиссии.

В данном разделе должно быть приведено теоретическое обоснование выбранного метода контроля с анализом физических основ взаимодействия УЗ-волн с контролируемой средой. Кроме того, должен быть проведен предварительный анализ акустического тракта для выбранных схем прозвучивания объекта контроля.

## ***2.4 Разработка методики контроля и технических средств***

***2.4.1 Выбор частоты УЗ-волн.*** Частота контроля определяется в основном коэффициентом затухания, уровнем структурной реверберации материала, минимальными размерами выявляемых дефектов и габаритами контролируемого изделия. Зная эти характеристики, можно оценить и выбрать оптимальную частоту, которая обеспечит наибольшую чувствительность контроля при минимальных потерях ультразвуковой энергии на рассеяние и поглощение.

Следует иметь в виду, что чем выше частота, тем меньше длина волны и тем

лучше условия отражения их от дефектов. Кроме того, повышение частоты увеличивает направленность излучения и приема, что ведет к возрастанию отношения отраженной от дефекта энергии к общей энергии, вводимой в изделие. Однако с повышением частоты повышается коэффициент затухания ультразвука, ухудшаются условия прохождения волн через поверхность ввода, увеличивается интенсивность отражений от границ зерен и неоднородностей материала, не являющихся дефектами.

Задача выбора оптимальной частоты решается численными методами на основе анализа акустического тракта.

*2.4.2 Выбор типа УЗ-волн и направления их распространения в изделии.* Выбор вида УЗ-волн определяется габаритами и формой контролируемого изделия, а также характером и местом расположения дефектов. При этом продольными и поперечными волнами контролируют изделия большой толщины, значительно превышающей длину волны. Волны в пластинах применяют для контроля листов, оболочек, труб с толщиной стенок, соизмеримой с длиной волны. Для контроля проволок и стержней, диаметр которых соизмерим с длиной волны, используют волны в стержнях. Поверхностные волны применяют для обнаружения дефектов, непосредственно выходящих на поверхность или залегающих на глубине, не более длины поверхностной волны. Для выявления подповерхностных дефектов применяют головные волны, которые не чувствительны к поверхностным дефектам.

После выбора типа волн необходимо наметить направления прозвучивания изделия. При этом направление волн должно быть таким, чтобы обеспечивалось надежное выявление наиболее опасных дефектов. Ответственные изделия контролируют несколько раз при различных направлениях волн.

Выявляемость дефектов в большой степени зависит от направления продольных и поперечных волн. Для достижения оптимальной чувствительности волны должны падать на плоскость дефекта перпендикулярно или отражаться от дефектов с максимальной амплитудой обратного эхосигнала. Ориентация дефектов существенно меньше влияет на выявляемость при контроле волнами в пластинах и стержнях, в которых одинаково хорошо выявляются поперечные и продольные дефекты.

Правильный выбор направления прозвучивания позволяет свести к минимуму наличие геометрических мертвых зон и прогнозировать возможное появление ложных сигналов (особенно для изделий сложной формы), которые существенно усложняют расшифровку результатов контроля и снижают его достоверность.

При выборе направления прозвучивания необходимо учитывать законы трансформации, преломления и отражения волн. В пояснительной записке должны быть приведены расчетные зависимости.

*2.4.3 Выбор способа контакта.* При выборе акустического контакта требуется учитывать необходимую производительность контроля, габариты и сложность формы изделия, состояние поверхности и ряд других факторов.

В условиях контакта через тонкий слой смазки стабильность обеспечить более трудно, чем при иммерсионном, так как для этого необходимо строго постоянное давление, прижимающее преобразователь к поверхности изделия.

При выборе контактной смазки или иммерсионной жидкости следует помнить, что вода обладает недостаточной вязкостью и смачиваемостью и может вызывать коррозию изделия. Высоковязкие минеральные масла применяют при контроле вертикально расположенных поверхностей, шероховатых поверхностей объектов, находящихся при положительной температуре окружающего воздуха. Маловязкие масла применяют чаще в зимних условиях при контроле вне помещений. Очень эффективным и перспективным является использование магнитных жидкостей. Однако при этом должны быть внесены изменения в конструкцию преобразователей.

Основная задача при выборе способа контакта – это обеспечение его стабильности.

*2.4.4 Выбор мест ввода УЗ-волн и схемы сканирования.* Правильный выбор мест ввода УЗ-волн должен обеспечить принятые ранее направления прозвучивания объекта контроля. При этом следует учитывать, что поверхность, через которую вводятся волны, должна быть относительно ровной, не иметь выступов и выемок, мешающих перемещению преобразователя.

Если используется контактный способ контроля, то недопустимо наличие на поверхности отслаивающейся окисной пленки, грубых неровностей или покрытий, препятствующих прохождению ультразвука. В связи с этим в ряде случаев следует предусмотреть предварительную обработку (механическую или химическую) мест ввода УЗК.

При контроле изделий по криволинейной поверхности необходимо согласовать форму контактной поверхности преобразователя с формой поверхности изделия. Если для этой цели использовать переходники, то следует соблюдать ограничивающие условия, обеспечивающие отсутствие помех от многократных отражений в теле переходника.

Для обеспечения контроля всего изделия необходимо преобразователь перемещать по поверхности объекта с определенным шагом. При этом схема сканирования определяется формой и размерами объекта контроля, типом используемых волн, требуемой производительностью, параметрами преобразователей и др. факторами. Так, например, при контроле изделий сложной формы целесообразно предусмотреть одновременное прозвучивание изделия в различных направлениях путем использования отдельных преобразователей, сканирующих изделие с разных сторон. При контроле крупногабаритных изделий с плоскими поверхностями целесообразно использовать многоканальные системы, позволяющие осуществить сканирование всего изделия за один проход, без реверсирования строчками.

Шаг сканирования выбирают так, чтобы было невозможно пропустить дефект заданного размера. Он зависит от диаметра преобразователя и не должен его превышать.

При выборе скорости перемещения преобразователя учитывается толщина изделия. Чем больше толщина изделия, тем меньше должна быть скорость перемещения.

*2.4.5 Выбор или разработка технических средств контроля.* При выполнении данного раздела проекта производится выбор (или при необходимости разработка) типа дефектоскопа или другого специализированного прибора, преобразователей и вспомогательных устройств, обеспечивающих высокопроизводительный контроль.

Выбор ультразвуковой аппаратуры определяется в основном функциональными возможностями и эксплуатационными характеристиками приборов. Поэтому, с учетом условий решаемой задачи и требований, приведенных в исходных данных, необходимо проанализировать (по справочникам, сайтам Internet, проспектам) параметрические и функциональные возможности типовых универсальных и специализированных приборов.

Обязательным элементом курсового проекта является расчет и проектирование преобразователей, обеспечивающих реализацию выбранных схем прозвучивания объекта контроля.

Кроме того, составной частью проекта является разработка вспомогательных устройств для механизированного или автоматизированного сканирования объекта по принятой схеме.

Функциональные, электрические и конструктивные схемы приборов и устройств должны быть отражены в пояснительной записке и вынесены на основные чертежи.

*2.4.6 Выбор способа регистрации и расшифровка результатов контроля.* В этом разделе на основе анализа акустического тракта приводятся предполагаемые осциллограммы, возникающие при прозвучивании изделия. Определяются зоны стробирования для каждой схемы прозвучивания и разрабатываются рекомендации по отстройке от помех.

При проведении механизированного или автоматизированного сканирования результаты должны документироваться. Для этой цели могут быть использованы всевозможные периферийные средства печати.

*2.4.7 Разработка метрологического обеспечения средств контроля.* Для исключения влияния субъективных факторов на результаты акустического контроля необходимо создать стандартные условия контроля. Одним из существенных моментов стандартизации контроля является настройка параметров приборов по эталонам и контрольным образцам.

В нашей стране для текущей проверки наиболее важных параметров и характеристик приборов служит комплект стандартных образцов по ГОСТ 14782, а для проверки и калибровки толщиномеров применяют наборы плоскопараллельных концевых мер длины по ГОСТ 9038.

При контроле реальных объектов для настройки чувствительности удобно использовать специальные контрольные образцы с искусственными дефектами.

Выбор того или иного образца определяется видом и материалом изделия, типом используемых волн, типом предполагаемых дефектов. При этом важно, чтобы разработанные образцы по своим свойствам были близки к реальному объекту контроля. В разделе должна быть описана методика настройки прибора или системы контроля.

#### *2.4.8 Описание мероприятий по технике безопасности и охране труда.*

В данном разделе проекта необходимо предусмотреть мероприятия по обеспечению электробезопасности операторов и вспомогательного персонала при проведении контроля на основе разработанных средств.

## **3 Расчет и проектирование электроакустических преобразователей**

### *3.1 Оценка параметров акустического тракта*

Начальным этапом проектирования является анализ характеристик контролируемого объекта, материала, из которого он изготовлен, и дефектов, подлежащих обнаружению. Характеристики объекта могут быть приведены в исходных данных на проект либо могут быть частично заданы, а частично определены проектировщиком.

Для заданного материала объекта упругие постоянные, скорости распространения упругих волн и удельное акустическое сопротивление можно определить по формулам, приведенным в [1, с. 29–31], или взять из таблицы Б.1.

В акустическом тракте на пути от излучателя до дефекта и от дефекта к приемнику происходит дифракционное ослабление ультразвуковых волн. Действие данного фактора  $\Phi$  учитывается при вычислении по формулам акустического тракта [3, с. 231] или более точным расчетам по номограммам для эхометода [3, с. 232–235] и теневого метода [3, с. 250, 251]. В случае, когда отражение происходит от точечного рефлектора, рассеивающего падающие волны по всем направлениям, акустический тракт характеризуется полем излучения-приема преобразователя [1, с. 81–86]. В случае, когда дефект имитируется плоскостным отверстием или тонким диском, наиболее точное определение дифракционного ослабления позволяют осуществить АРД-диаграммы [4, с. 128–134]. Для построения по безразмерным АРД-диаграммам размерных следует задаваться округленными значениями диаметров дефектов и расстояний, затем находить безразмерные параметры и определять соответствующие точки путем интерполяции по безразмерным АРД-диаграммам. При расчете требуемого коэффициента усиления прибора принимается наибольшее ослабление сигнала, т. е. минимальное значение параметра  $\Phi$ .

Если контроль осуществляется теневым методом, то ослабление ультразвука, связанное с расхождением волн на пути от излучателя к приемнику, определяется как сквозной сигнал  $P_c$ . Кроме этого, происходит ослабление сигнала

вследствие экранирования его дефектом. Величина  $P_c$  рассчитывается по формулам для донного сигнала [3, с. 231], но вместо расстояния до отражателя (донной поверхности) вводится величина, равная половине толщины изделия, контролируемого теневым методом.

Величина ослабления сигнала дефектом, т. е. регистрируемое прибором ослабление сквозного сигнала, задается при расчете теневого дефектоскопа и составляет:

$$K_D = 1 - \frac{P_{CD}}{P_C}, \quad (3.1)$$

где  $K_D$  – коэффициент ослабления сигнала;

$P_{CD}$ ,  $P_C$  – амплитуда акустического сквозного сигнала при наличии и отсутствии дефекта соответственно.

Отсюда ослабление сигнала дефектом равно  $(1 - K_D)$ . Для оценки размера дефекта по ослаблению сигнала прибор должен обеспечить регистрацию сигналов в 10 раз меньших. В результате наибольшее дифракционное ослабление сигнала для теневого метода определяется формулой

$$\Phi = 0,1 \cdot (1 - K_D) \cdot \frac{P_C}{P_0}, \quad (3.2)$$

где  $P_0$  – амплитуда акустического сигнала, излучаемого преобразователем.

При наличии акустической задержки для расчетов акустического тракта вводится мнимая пьезопластина, методика построения которой приведена в [1, с. 90–93 или 5, с. 174–177]. При прохождении границы задержка-изделие происходит ослабление акустического сигнала, которое численно определяется коэффициентом прохождения по амплитуде  $D$ , а в случае прохождения границы в прямом и обратном направлениях – коэффициентом прохождения по энергии  $\tilde{D}$  [1, с. 42, 43]. Для небольших углов падения (для жидкостей  $\beta < 4^\circ$ , для пластмасс  $\beta < 7^\circ$ ) коэффициенты прохождения можно рассчитать по формулам для нормального падения.

Формулы для расчета коэффициентов отражения и прохождения в случае твердых тел или жидкости и твердого тела:

– при прямом падении продольной ультразвуковой волны

$$\tilde{R} = \left[ \frac{(Z - Z_1)}{(Z + Z_1)} \right]^2; \quad (3.3)$$

$$\tilde{D} = \frac{4ZZ_1}{(Z + Z_1)^2}, \quad (3.4)$$

где  $Z_1, Z$  – удельные волновые сопротивления верхней и нижней среды соответственно;

– при наклонном падении продольной ультразвуковой волны

$$\tilde{R} = \left( \frac{Z_l \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha - Z_1}{Z_l \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1} \right)^2; \quad (3.5)$$

$$\tilde{D}_l = \frac{4Z_l Z_1 \cos^2 2\alpha}{(Z_l \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1)^2}; \quad (3.6)$$

$$\tilde{D}_t = \frac{4Z_t Z_1 \cos^2 2\alpha}{(Z_l \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1)^2}, \quad (3.7)$$

где  $Z_l, Z_t$  – удельные волновые сопротивления нижней среды для прошедших продольной и сдвиговой волн соответственно;

$\alpha$  – угол преломления волны.

Часто для введения волн в зону контроля приходится прибегать к отражениям волн от свободных поверхностей объекта. При этом возможна трансформация используемых волн в волны другого типа. Ослабление амплитуды волн при отражении учитывается коэффициентом отражения  $R$  [3, с. 197, 198]. Затухание ультразвука в материале объекта и акустической задержки учитывается множителем  $\exp(-\delta x - \delta_1 r_1)$ , где  $x$  и  $r_1$  – пути в объекте и задержке вдоль центрального луча;  $\delta$  и  $\delta_1$  – коэффициенты затухания ультразвука в объекте и задержке [3, с. 192–196]. Коэффициенты затухания для некоторых материалов приведены в таблице В.1. При прохождении звука в прямом и обратном направлениях величины  $x$  и  $r_1$  умножаются на 2. Формулы акустического тракта представлены в таблицах Г.1 и Д.1.

Таким образом, суммарное ослабление ультразвука в акустическом тракте определяется по формуле [7]

$$\frac{P_1}{P_0} = \Phi \cdot \tilde{D} \cdot R \cdot \exp(-2\delta x - 2\delta_1 r_1), \quad (3.8)$$

где  $P_1$  – амплитуда акустического сигнала, поступающего на приемный преобразователь.

### 3.2 Выбор частоты ультразвуковых колебаний

Выбор рабочей частоты ультразвуковых колебаний определяется в основном коэффициентом затухания и уровнем структурной реверберации материала объекта, а также его габаритами. Увеличение частоты способствует повышению

разрешающей способности, уменьшению мертвой зоны, снижению величины минимально выявляемых дефектов, повышению точности измерения расстояния. С другой стороны, это приводит к возрастанию затухания ультразвука и уменьшению толщины пьезопластины. Кроме того, ухудшаются условия прохождения волн через поверхность ввода и увеличивается интенсивность отражений от границ зерен металла. Таким образом, можно оценить и выбрать оптимальную частоту, которая обеспечит наибольшую чувствительность контроля при минимальных потерях энергии ультразвука.

Рассмотрим некоторые подходы при выборе частоты ультразвука.

При проектировании импульсных приборов для достижения требуемой лучевой разрешающей способности или устранения интерференции от двух близко расположенных отражателей, например, границ слоя, необходимо, чтобы два следующих друг за другом импульса не налагались. Как правило, в каждом импульсе имеется около четырех периодов колебаний с большой амплитудой, а амплитуда других колебаний существенно меньше. Импульсы фиксируются отдельно, если расстояние между одинаковыми отражателями вдоль луча  $\Delta x \geq 2\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны. Если же отражатели разные и амплитуда одного импульса существенно больше другого, отдельная их фиксация будет достигаться, когда расстояние между отражателями составляет  $\Delta > 4\lambda$ .

При выборе частоты с позиции обеспечения высокой точности измерения импульсным эхометодом расстояния

$$h = \frac{ct}{2},$$

где  $c$  – скорость распространения волн;  
 $t$  – время пробега импульса в объекте,  
 пользуются формулой [2]

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta t_{np}}{t} + \frac{\Delta t_c}{t} + \frac{\chi T}{t}, \quad (3.9)$$

где  $\frac{\Delta t_{np}}{t}$  определяет погрешность измерительного прибора и составляет

$$\frac{\Delta t_{np}}{t} \approx \frac{\Delta c}{c} \approx 1 \%;$$

$\Delta t_{жс}$  – вариация времени пробега в слое контактной жидкости, связанная с изменением толщины  $\Delta h_{жс} \approx 0,1$  мм (при скорости  $c_{жс}$  звука в жидкости можно найти величину  $\frac{\Delta t}{t} = \frac{c_{жс} \Delta h}{ch}$ );

$\frac{\chi T}{t}$  характеризует погрешность, связанную с длительностью импульса. Коэффициент  $\chi$  определяет, на сколько периодов колебаний  $T$  (или долей периода)



можно ошибиться при измерении.

В импульсных толщиномерах  $\chi = 0,125$ . При переходе от  $t$  к  $h$  находим

$$\frac{\chi T}{h} = \frac{\chi \lambda}{2h} = \frac{\chi c}{2fh}. \quad (3.10)$$

С учетом заданной погрешности измерений и сделанных оценок определяют частоту  $f$ , обеспечивающую требуемую точность.

При контроле изделий большой толщины необходимо учитывать дифракционное расхождение ультразвуковых лучей и затухание ультразвука, поскольку эти факторы зависят от частоты.

При выборе частоты с точки зрения выявляемости минимальных дефектов следует учитывать, что, когда длина волны превосходит размер дефекта, амплитуда отраженного или экранированного сигнала уменьшается с уменьшением размера дефекта гораздо быстрее, чем для более коротких волн. Отсюда формируется условие  $\lambda = \frac{c}{f} < 2b$ , где  $2b$  – характеристический размер дефекта (в случае искусственного дефекта – это диаметр сферы, диска, цилиндра или ширина паза).

Оптимальное значение рабочей частоты можно определить, решая задачу достижения максимальной предельной чувствительности на основе анализа формул акустического тракта при заданном значении максимальной акустической чувствительности дефектоскопа  $\frac{P_{\min}}{P}$ , где  $P_{\min}$  – наименьший акустический сигнал, регистрируемый аппаратурой [6, с. 149]. Для преобразователя без задержки должно выполняться условие

$$\frac{S_a \cdot S_b}{\lambda^2 \cdot x^2} \exp(-2\delta x) \geq \frac{P_{\min}}{P}, \quad (3.11)$$

где  $S_a$  – площадь пьезопластины;

$S_b$  – минимальная площадь дефекта;

$x$  – максимальное расстояние до дефекта в объекте.

В выражении (3.11) частотнозависимыми являются величины  $\lambda$  и  $\delta$ . При этом в области  $\lambda > 10D$  коэффициент затухания определяется формулой [1, с. 32, 33]:

$$\delta = Af + Bf^4 \bar{D}^3, \quad (3.12)$$

где  $A, B$  – константы. Для стали  $A = 0,1$ ;  $B = 105$ ,

а в области  $4 \leq \frac{\lambda}{D} \leq 10$  формулой

$$\lambda = A_1 \bar{D} f^2, \quad (3.13)$$

где  $A_1$  – константа.

Решая задачу о максимуме чувствительности с учетом формул (3.11)–(3.13), можно записать уравнение для нахождения оптимальной частоты при контроле объектов с мелкозернистым материалом:

$$B\bar{D}^3 f_{opt}^4 + 0,5Af_{opt} - \frac{1}{x} = 0, \quad (3.14)$$

где  $\bar{D}$  – средний диаметр зерна материала.

После нахождения оптимального значения частоты находят рабочую частоту  $f_p$ , МГц, из чисел ряда, регламентированного ГОСТом: 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,8; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0; 10.

### ***3.3 Выбор структуры и расчет параметров преобразователей***

Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) состоит из пьезопластины, демпфера, призмы, протектора и корпуса. Основным элементом преобразователя является пьезопластина, имеющая, как правило, круглую форму. Выбор материала пьезопластины определяется требуемыми характеристиками преобразователя и условиями контроля [5, с. 23–29]. Толщина пластины  $h$  выбирается полуволновой для рабочей частоты  $f_p$ , на которой ведется контроль:

$$h_1 = \frac{c_1}{2f_p}. \quad (3.15)$$

Толщина протектора  $h_2$  выбирается четвертьволновой:

$$h_2 = \frac{c_2}{4f_p}, \quad (3.16)$$

где  $c_2$  – скорость звука в материале протектора.

Материал протектора при излучении в жидкость должен быть по характеристическому акустическому импедансу  $Z_2$  возможно ближе к значению

$$Z_2' = \sqrt{Z_1 Z_3}, \quad (3.17)$$

где  $Z_1, Z_3$  – характеристические импедансы пьезопластины и воды.

Для этого вычисляется значение  $Z_2'$  и подбирается материал [3, с. 193], характеристический импеданс которого  $Z_2$  возможно ближе к  $Z_2'$ . При излучении в изделие материал протектора выбирается с большим затуханием ( $> 100 \text{ м}^{-1}$ ). Для изготовления протекторов применяют кварц, сапфир, бериллий, сталь, минералокерамику, а также материалы на основе эпоксидных смол с наполнителями. В некоторых вариантах протектор может отсутствовать.

Материал демпфера выбирается из [5, с. 205–208]. Он должен обладать большим характеристическим импедансом, равным  $Z_4 > (3,5...6) \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , если контролируется объект малой толщины или если контроль ведется иммерсионным методом. Если контролируются объекты большой толщины или применяются наклонные призмы, то демпфер либо отсутствует, либо имеет импеданс  $Z_4 > (1...2) \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Толщина демпфера должна обеспечить уменьшение амплитуды ультразвуковых колебаний не менее, чем на 60 дБ, вследствие затухания. Если затухание меньше, то верхнюю грань демпфера, противоположную пьезопластине, следует выполнять ребристой, чтобы на ней происходило рассеяние ультразвука.

Если по условиям контроля требуется применение наклонного преобразователя, то необходимо выбрать материал призмы, угол ее наклона и геометрические параметры. Материал призмы должен удовлетворять целому ряду требований [5, с. 215–218]. В качестве материала призмы наиболее широко используют органическое стекло. Однако его целесообразно применять в диапазоне частот 1,5...5 МГц. На частотах выше 5 МГц его заменяют материалом с меньшим затуханием ультразвука, а на частотах ниже 1,5 МГц – материалом с большим затуханием. Изменение затухания ультразвука в пластмассах в диапазоне частот 1...10 МГц имеет линейный характер и составляет: для полистирола – 5...35  $\text{м}^{-1}$ , для органического стекла – 10...80  $\text{м}^{-1}$ , для арелакса – 20...100  $\text{м}^{-1}$ , для эпоксидной смолы – 50...320  $\text{м}^{-1}$ . Скорость звука и импеданс приведены в [3, с. 193].

Угол наклона призмы  $\beta$  рассчитывается по требуемому углу ввода луча  $\alpha$  из закона синусов:

$$\frac{\sin \beta}{c_1} = \frac{\sin \alpha}{c}, \quad (3.18)$$

где  $c_1, c$  – скорости волн в призме и изделии.

Формула (3.18) является приближенной, т. к. под влиянием изменения условий преломления лучей угол максимума излучения не всегда соответствует расчетному [5, с. 179].

При конструировании призмы вначале необходимо выбрать некоторое оптимальное значение угла  $\alpha$ , а затем по нему определить  $\beta$ . При этом нужно иметь в виду, что существуют области углов  $\beta$ , наиболее употребительные в практике

ультразвукового контроля. Так, например, при контроле стальных изделий преобразователями с призмой из оргстекла для возбуждения продольных волн используются углы  $\beta < 10^\circ \dots 12^\circ$ . Для возбуждения поперечных волн применяются призмы с углами, лежащими в диапазоне между первым и вторым критическими.

Необходимо отметить, что лучи, выходящие из призмы, в дальней зоне распространяются в виде расходящегося пучка лучей [5, с. 175–177]. Крайними лучами расходящегося пучка следует считать те, амплитуды которых уменьшаются до 20 дБ по сравнению с центральным лучом. Учет расхождения пучка лучей дает дополнительные ограничения на выбор угла наклона  $\beta$ . При этом должны выполняться:

– условие отсутствия продольной волны

$$\beta - \beta_1 > \arcsin\left(\frac{c_l}{c_l}\right); \quad (3.19)$$

– условие отсутствия поверхностной волны

$$\beta + \beta_1 \leq \arcsin\left(\frac{c_l}{c_s}\right), \quad (3.20)$$

где  $c_l$ ,  $c_s$  – скорости продольной и поверхностной волн в объекте контроля;

$\beta_1$  – угол между акустической осью и крайним лучом.

Форма призмы и ее размеры выбираются такими, чтобы они обеспечивали отсутствие ложных импульсов. Для этого необходимо, чтобы отраженные от поверхности призма – изделие волны не попадали на пьезопластину. В ближней зоне пьезоэлемента излучаемую волну можно считать слабо расходящейся. Тогда требования таковы, что луч  $AA'$  (рисунок 3.1), выходящий из нижней части пьезопластины, после отражения от нижней поверхности призмы с учетом трансформации не должен попадать на верхнюю часть пьезопластины, а луч  $BB'$ , выходящий из верхней части пластины, не должен попадать на ребро двугранного угла. Эти условия можно записать в следующем виде:

$$AD > \frac{2a \cos \beta}{\operatorname{tg}(\beta + \gamma_t)}; \quad (3.21)$$

$$n = OC > OB' = \frac{a}{\cos \beta}. \quad (3.22)$$

Путь центрального луча в призме определяется из условия

$$r_1 = OO' > a(2\operatorname{ctg}(\beta + \gamma_t) + \operatorname{tg}\beta). \quad (3.23)$$

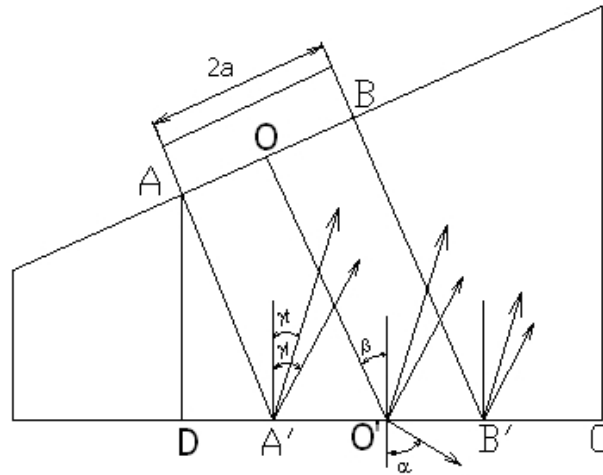


Рисунок 3.1 – Расчетная схема призмы преобразователя

Таким образом, все отраженные волны должны попадать в ловушку и, испытывая в ней многократные отражения до попадания на пьезоэлемент, ослабнуть не менее, чем на 60 дБ. Ослабление центрального луча в призме на пути от пластины до объекта должно быть не более 10 дБ.

Акустическое поле преобразователя с линией задержки можно приближенно оценить введением мнимого пьезоэлемента. Направление акустической оси мнимого излучателя определяется углом ввода центрального луча в изделие. Расстояние вдоль акустической оси от точки ввода до мнимого пьезоэлемента вычисляется по формуле

$$r_1' = r_1 \frac{c_1 \cos \alpha}{c \cos \beta}. \quad (3.24)$$

Мнимый излучатель строится перпендикулярно акустической оси, а его размеры принимают равными размеру преломленной лучевой трубки реального излучателя. Для дискового пьезоэлемента мнимый излучатель будет иметь форму эллипса с осью в плоскости падения, равной  $2a \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$ , где  $a$  – радиус пьезопластины и второй осью с размером  $2a$ .

Более подробно расчет характеристик преобразователей с акустической задержкой приведен в [1, с. 90–93; 5, с. 174–184].

Для полного расчета геометрических и физических параметров пьезоэлектрических преобразователей имеет смысл использовать компьютерные возможности. При этом алгоритм расчета должен включать все рассмотренные в данном подразделе вопросы.

### 3.4 Методика расчета и проектирования преобразователей на фазированных решетках

3.4.1 *Определение и выбор углов падения на границу раздела сред и углов ввода в объект контроля.* Предварительно приняв, что контроль в объекте проводится поперечными волнами, можно рассчитать и выбрать углы ввода и угла падения [12]. Для того чтобы узнать в каком диапазоне углов распространяются поперечные волны, надо определить первый и второй критические углы с учетом выбранного заранее материала призмы:

$$\beta_k^I = \arcsin\left(\frac{C_{II}}{C_{I2}}\right), \quad (3.25)$$

при условии, что  $C_{I2} > C_{II}$ ;

$$\beta_k^{II} = \arcsin\left(\frac{C_{II}}{C_{I2}}\right), \quad (3.26)$$

при условии, что  $C_{I2} > C_{II}$ .

Проверив, что условия выполняются, вычислить критические углы.

Так как использовать весь диапазон углов не целесообразно ввиду уменьшения чувствительности контроля, необходимо задаться диапазоном углов падения  $\beta$  (выбирается диапазон в  $10^\circ \dots 20^\circ$ ). Зная крайние значения углов падения, находят нужные максимальное и минимальное значения углов ввода:

$$\alpha_{\min} = \arcsin\left(\frac{C_{I2}}{C_{II}} \cdot \sin(\beta_{\min})\right); \quad (3.27)$$

$$\alpha_{\max} = \arcsin\left(\frac{C_{I2}}{C_{II}} \cdot \sin(\beta_{\max})\right). \quad (3.28)$$

3.4.2 *Определение геометрических параметров фазированной решетки.* Существует большое количество типов фазированных решеток. Тип решетки в основном определяется расположением пьезоэлементов в ней. Выбор типа решетки осуществляется по необходимой пространственной конфигурации акустического поля. В данном случае рассчитывается линейный тип фазированной решетки (рисунок 3.2). Линейные решетки наиболее часто применяются на практике. Их основными преимуществами являются: простая конструкция и изготовление; простой расчет и моделирование; возможность применения с призмами, в контактном и иммерсионном вариантах; сравнительно низкая стоимость; универсальность.

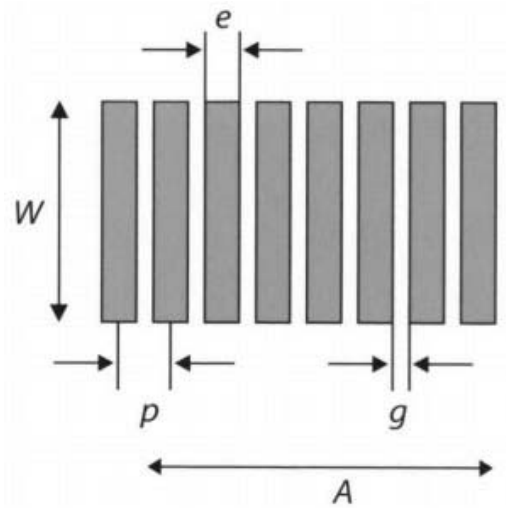


Рисунок 3.2 – Геометрические параметры фазированной решетки

Ширина элемента  $e$  – это ширина одного пьезоэлемента фазированной решетки. Данная величина определяется из условия

$$e < \frac{\lambda}{2}. \quad (3.29)$$

Максимальный размер элемента  $e_{\max}$  – это допустимая максимальная ширина отдельного элемента, которая определяется максимальным углом отклонения луча при электронном управлении.

$$e_{\max} = \frac{0,514 \cdot \lambda}{\sin(\alpha_{\max})}. \quad (3.30)$$

Шаг решетки  $p$  – это расстояние между центрами соседних элементов решетки. Главное правило состоит в том, чтобы соблюдалось условие

$$p < 0,67 \cdot \lambda. \quad (3.31)$$

Выполнение этого условия важно для избегания образования дополнительных лепестков диаграммы направленности.

С учетом этого условия принимается шаг решетки.

Новые разработанные приборы показывают, что шаг размещения элементов  $p$  может быть и больше длины волны, но при этом возможность управления лучом становится ограниченной.

Зазор между ближайшими элементами  $g$  находится как разность между шагом решетки и шириной одного элемента:

$$g = p - e. \quad (3.32)$$

Количество элементов  $n$  определяет размер и эффективность работы фазированной решетки. Количество элементов выбирается из ряда 16, 32, 64,

128 элементов.

Активная апертура  $A$ . Активной апертурой называется общая длина решетки. Апертура рассчитывается по следующей формуле:

$$A = n \cdot e + g \cdot (n - 1). \quad (3.33)$$

При расчете элементов фазированной решетки имеет место и определение толщины ее элементов. Толщина элементов  $h_{\text{пласт}}$  выбирается из условия

$$h_{\text{пласт}} = \frac{C_{\text{пласт}}}{2 \cdot f}, \quad (3.34)$$

где  $C_{\text{пласт}}$  – скорость продольной волны в материале пьезоэлемента.

Пьезоматериал и его характеристики выбираются по справочникам.

Диапазон углов «качания» луча  $\alpha_s$  – это разность максимального и минимального угла преломления луча в образце.

$$\alpha_s = \alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{min}}. \quad (3.35)$$

Эффективная активная апертура  $A_{\text{eff}}$  – проекция активной апертуры на плоскость, перпендикулярную преломленным лучам (рисунок 3.3).

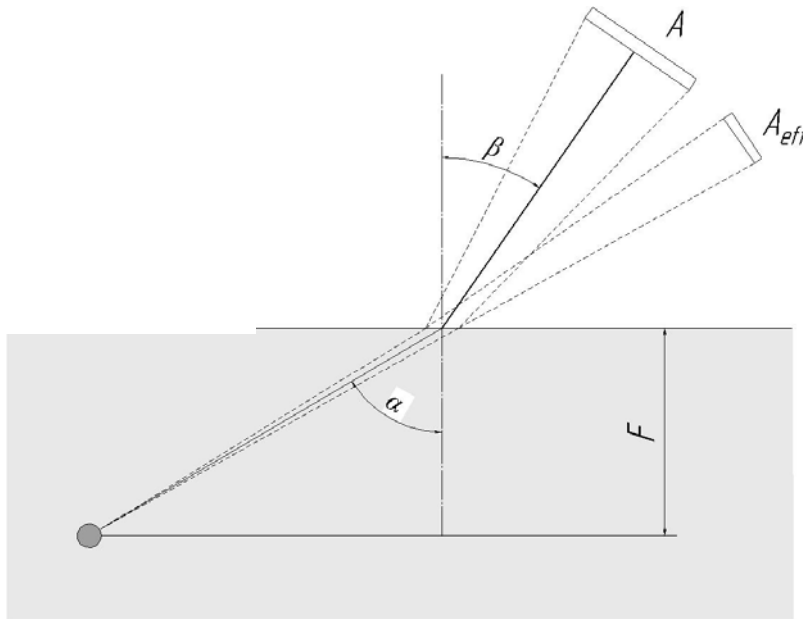


Рисунок 3.3 – Отклонение луча в призме

Рассчитывается по формуле

$$A_{\text{eff}} = \frac{A \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\beta)}. \quad (3.36)$$



Эффективная активная апертура зависит от углов падения луча на границу раздела призма – металл и от угла ввода в исследуемый объект. Необходимо рассчитать значения для максимальных и минимальных углов падения и соответствующих им углов ввода.

$$A_{eff \min} = \frac{A \cdot \cos(\alpha_{\min})}{\cos(\beta_{\min})};$$

$$A_{eff \max} = \frac{A \cdot \cos(\alpha_{\max})}{\cos(\beta_{\max})}.$$

Из полученных значений очевидно, что с увеличением углов величина эффективной активной апертуры уменьшается.

Минимальная активная апертура  $A_{\min}$  – это минимально необходимая активная апертура чтобы получить достаточную фокусировку под максимальным преломленным углом.

$$A_{\min} = 2 \cdot \left( \frac{F \cdot (C_{t2}^2 - C_{t1}^2 \cdot \sin^2(\alpha_{\max}))}{f \cdot C_{t2}^2 \cdot \cos^2(\alpha_{\max})} \right)^{0,5}, \quad (3.37)$$

где  $C_{t1}$  – скорость звука в первой среде (призма);

$C_{t2}$  – скорость звука в контролируемом образце;

$f$  – частота ультразвука;

$F$  – фокусная глубина для максимального угла преломления (принимается равной толщине контролируемого изделия);

$\alpha_{\max}$  – максимальный угол преломления в испытуемом образце.

**3.4.3 Определение геометрических параметров призмы.** Чаще всего линейные решетки используются с призмами (рисунок 3.4). Призмы позволяют изменить угол ввода или направление главной акустической оси. При этом можно эффективно использовать для контроля широкий диапазон углов ввода пучка в объект.

Задержка в призме  $D$  – это время прохождения импульса через призму под заданным углом (имеется в виду суммарное время прохождения туда и обратно).

Порядок расчета следующий (см. рисунок 3.4).

1 Найти по закону Снеллиуса необходимый угол падения  $\beta$  через требуемый угол ввода  $\alpha$ .

Принимается угол призмы  $\omega$  такой, чтобы было возможно исключить попадание отраженных лучей от границы раздела сред на фазированную решетку, что в свою очередь вызывает появление помех.

2 Найти высоту призмы  $Y_2$  в точке соответствующей середине фазированной решетки. Для этого необходимо сначала определить высоту расположения нижнего элемента фазированной решетки. При его определении должно выпол-

няться условие, которое исключает попадание луча, вышедшего из нижнего элемента и впоследствии отраженного от нижней поверхности призмы, в верхний элемент решетки (в миллиметрах):

$$Y_1 > \frac{A \cdot \cos(\beta_{\min})}{\operatorname{tg}\left(\beta_{\min} + \arcsin\left(\frac{C_{l1}}{C_{l1}} \cdot \sin(\beta_{\min})\right)\right)}. \quad (3.38)$$

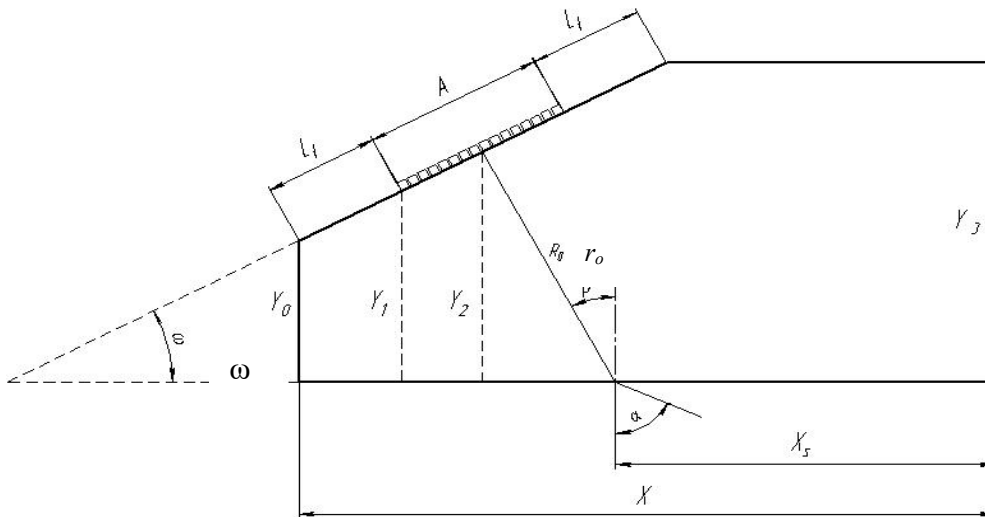


Рисунок 3.4 – Схема призмы преобразователя

Далее находят высоту мнимой точки излучения (в миллиметрах):

$$Y_2 = \left( \frac{Y_1}{\sin(\omega)} + \frac{p \cdot n}{2} - \frac{g}{2} \right) \cdot \sin(\omega). \quad (3.39)$$

3 Найти путь ультразвукового луча в призме (в миллиметрах):

$$r_{0\min} = \frac{Y_2}{\sin(90 - \beta_{\min})}; \quad (3.40)$$

$$r_{0\max} = \frac{Y_2}{\sin(90 - \beta_{\max})}. \quad (3.41)$$

Таким образом, видно, что с увеличением угла падения путь, пройденный лучом в призме, увеличивается.

4 Найти величину задержки в призме (в секундах):

$$D = \frac{2 \cdot r_0}{C_{l1}}. \quad (3.42)$$

Задержка находится для максимального и минимального углов ввода.

Стрела преобразователя  $X_s$  – это расстояние от передней кромки призмы до точки выхода ультразвукового луча. Для ее определения необходимо найти ряд других величин.

Полная высота призмы  $Y_3$  – определяет высоту передней грани призмы (в миллиметрах). Рассчитывается по формуле

$$Y_3 = \left( \frac{Y_2}{\sin(\omega)} - L_t \right) \cdot \sin(\omega), \quad (3.43)$$

где  $L_t$  – технологический отступ от края фазированной решетки (принимается 5 мм).

Длина призмы

$$X = A \cdot \cos(\omega) + L_t \cdot \cos(\omega) + \left( \frac{Y_1}{\sin(\omega)} + A \right) \cdot \frac{\sin(\omega)}{\operatorname{tg}(90 - \beta_{\max})}. \quad (3.44)$$

Для исключения попадания волн от верхнего элемента решетки на переднюю грань призмы следует чуть увеличить ее общую длину.

Стрела призмы рассчитывается по формулам:

$$X_{s\min} = X - \left( \frac{Y_2}{\operatorname{tg}(\omega)} - \left( \frac{Y_1}{\sin(\omega)} - L_t \right) \cdot \cos(\omega) \right) - \frac{Y_2}{\operatorname{tg}(90 - \beta_{\min})}; \quad (3.45)$$

$$X_{s\max} = X - \left( \frac{Y_2}{\operatorname{tg}(\omega)} - \left( \frac{Y_1}{\sin(\omega)} - L_t \right) \cdot \cos(\omega) \right) - \frac{Y_2}{\operatorname{tg}(90 - \beta_{\max})}. \quad (3.46)$$

Для изготовления призмы необходимо знать также  $Y_0$  высоту заднего среза призмы (в миллиметрах):

$$Y_0 = \sin(\omega) \cdot \left( \frac{Y_3}{\sin(\omega)} - A - 2 \cdot L_t \right). \quad (3.47)$$

Для определения смещения точки выхода  $X_s(\beta)$ , т. е. изменения положения точки выхода в зависимости от угла падающего луча в призме следует построить график.

Направление смещения точки выхода определяет тип отклонения луча в призме. Существуют следующие типы отклонений луча.

Азимутальное (секторное) отклонение, которое связано с «качанием» луча по длине призмы (рисунок 3.5). При изменении угла его распространения в вертикальной плоскости. При этом пассивная апертура решетки параллельна ширине призмы.

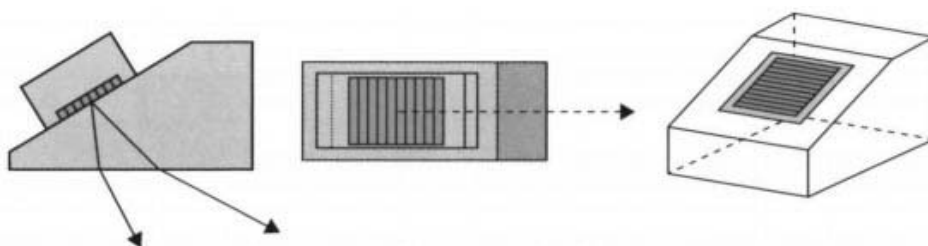


Рисунок 3.5 – Азимутальное отклонение луча в призме

Поперечное отклонение связано с «качанием» луча по ширине призмы в горизонтально-наклонной плоскости. Качание осуществляется из стороны в сторону при постоянном угле ввода, определяемом углом призмы (рисунок 3.6).

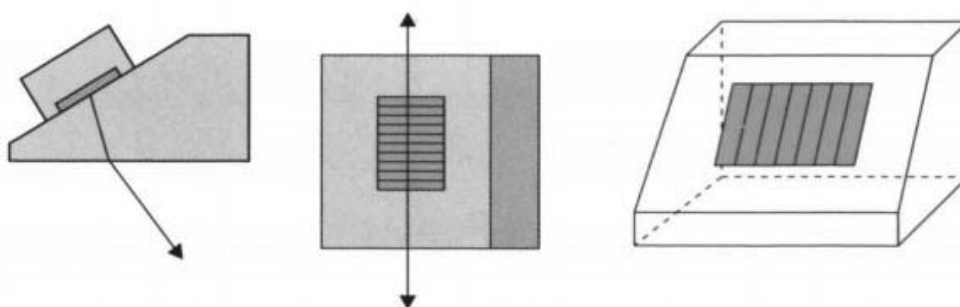


Рисунок 3.6 – Поперечное отклонение луча в призме

Наклонное отклонение луча по азимуту похоже по сути на «качание» луча по длине призмы, однако осуществляется не в вертикальной плоскости, а несколько отклонено от вертикального направления под углом, заданным наклоном грани призмы (рисунок 3.7).

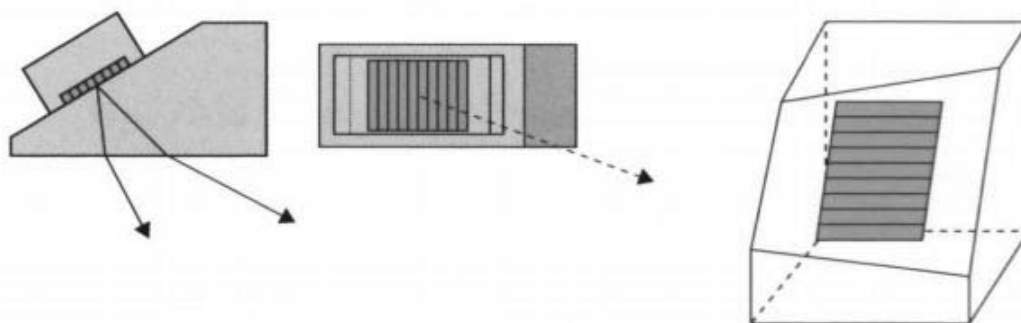


Рисунок 3.7 – Наклонное отклонение луча в призме по азимуту

Из приведенных вариантов выбирается требуемый тип отклонения луча в призме.

Пассивная апертура  $W$  – это длина одного элемента решетки или ширина всей решетки.

Пассивная апертура влияет на чувствительность и на точность определения размеров дефектов. Для линейной решетки максимальная эффективность достигается при  $W = A$ .

Также пассивная апертура влияет на ширину луча и распределение акустического давления. Чаще всего фазированные решетки изготавливают с соотношением  $W/p > 10$  и  $W = (0,7...1,0) \cdot A$ . По данным соотношениям рассчитывается пассивная апертура.

При контроле трубных изделий желательна притирка рабочей поверхности призмы к кривизне поверхности ввода ультразвука, при этом необходимо пересчитывать фокальный закон с учетом внесенной кривизны. Разрешается не производить притирку призмы к изделию, если выполняется следующее условие:

$$R \geq \frac{X^2}{4}, \quad (3.48)$$

где  $X$  – длина основания призмы;

$R$  – радиус объекта контроля.

Практически величина зазора между призмой и изделием не должна превышать 0,5 мм (рисунок 3.8). Для искривленных поверхностей контактная смазка может вытекать из-под призмы, поэтому зазор 0,5 мм является практическим минимальным значением, когда жидкость удерживается в нем.

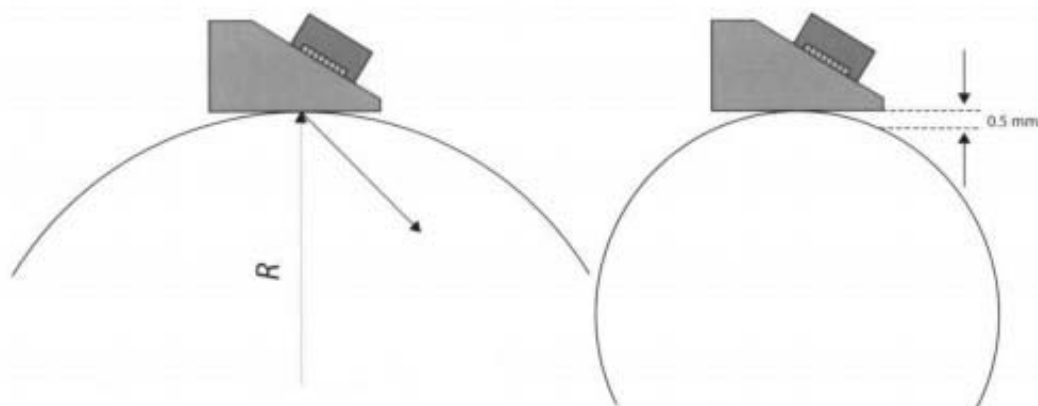


Рисунок 3.8 – Схема положения призмы и объекта контроля

**3.4.4 Определение расстояний, пройденных лучом в призме при контроле сварных соединений.** Учитывая специфику преобразователя, рассчитываются проходимые минимальное и максимальное расстояния лучом в материале изделия. При расчетах учитывается смещение точки выхода, которое зависит от угла падения в призме. Кроме того, необходимо учитывать в расчетах не только номинальную толщину изделия, но и высоту валика сварного шва и величину провисания шва, значения которых приведены в ГОСТ 8713–79.

Для обеспечения полного контроля сварного шва необходимо выбрать расстояние от края валика шва до точки выхода луча  $L$  (рисунок 3.9). Также надо определить максимальный угол ввода, при котором шов будет озвучиваться до корня.

Это расстояние должно соответствовать такому положению преобразователя, при котором луч при минимальном угле ввода будет проходить путь от

точки ввода в изделие до донной поверхности, и, отразившись от нее, до переднего края валика шва. Зная данное расстояние, можно определить то расстояние, на котором будет находиться преобразователь в процессе контроля.

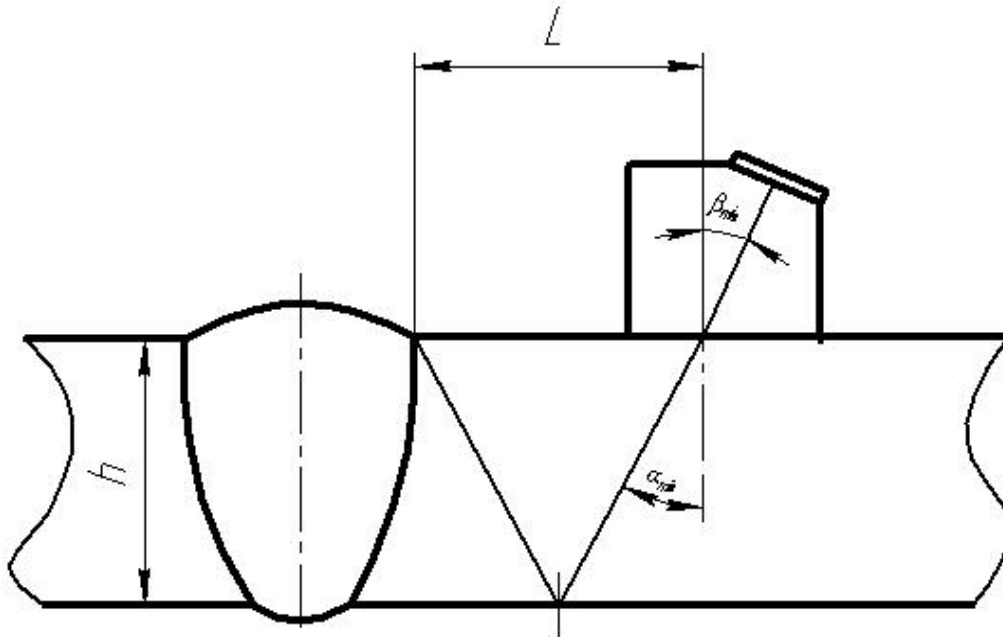


Рисунок 3.9 – Распространение ультразвукового луча при минимальном угле ввода

Учитывая вышеприведенные условия

$$L = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{\min}). \quad (3.49)$$

Зная значение стрелы при минимальном угле ввода, определяется расстояние  $L_k$ , на котором находится преобразователь в процессе контроля (расстояние от края шва до передней стенки призмы):

$$L_k = L - X_{s \min}. \quad (3.50)$$

Рассчитав необходимые расстояния, находится значение максимального пройденного пути. Максимальным пройденным путем будет являться путь, который прошел луч от точки ввода в объект до донной поверхности изделия, и, отразившись от нее, до дальнего края валика усиления сварного шва (рисунок 3.10).

Из предыдущих расчетов выводится зависимость изменения величины стрелы от угла ввода. Для нахождения максимального пути ультразвукового луча необходимо составить его математическую модель, далее подставить все известные величины. После путем перебора при использовании компьютера выбрать подходящий под условия угол ввода.

Принцип подбора следующий:

– составляются уравнения для величин, участвующих при расчетах пройденного пути:

$$L_1 = L - (X_{s \min} - X_s); \quad (3.51)$$

$$X_s = X - \frac{Y_2}{\operatorname{tg} \left( 90 - \arcsin \left( \frac{C_{i1}}{C_{i2}} \cdot \sin(\alpha) \right) \right)}; \quad (3.52)$$

$$\alpha = \frac{e + L_1}{2 \cdot (h + g)}, \quad (3.53)$$

где  $L_1$  – расстояние от края шва до точки выхода;

– перебираются и подставляются различные значения угла ввода во второе уравнение, до того момента пока во втором уравнении не получится такого же значения угла ввода. Подобрал угол, по нему ведется расчет.

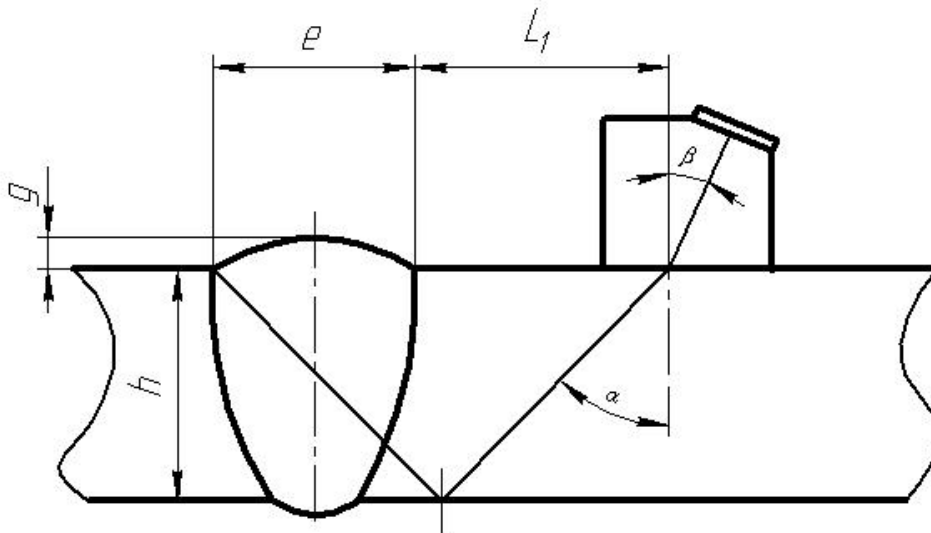


Рисунок 3.10 – Максимальное расстояние, проходимое ультразвуковым лучом

Проведя все вычисления, получают угол ввода  $\alpha$  и соответствующий ему угол падения  $\beta$  при «плавающей стреле».

Уравнение для максимального пути имеет вид:

$$r_{\max} = \frac{(e + L - (X_{s \min} - X_s))}{2 \cdot \sin(\alpha)} + \frac{(h + g)}{\cos \left( \arctg \left( \frac{L - (X_{s \min} - X_s)}{2 \cdot (h + g)} \right) \right)}. \quad (3.54)$$

Для полноты прозвучивания сварного шва, необходимо установить конечный (или максимальный) угол ввода (рисунок 3.11).

$$L_2 = L - (X_{s \min} - X_{s \max}); \quad (3.55)$$

$$\alpha_{\max} = \arctg\left(\frac{h}{e + L_2}\right), \quad (3.56)$$

где  $L_2$  – расстояние от края шва до точки выхода при прозвучивании на максимальном угле.

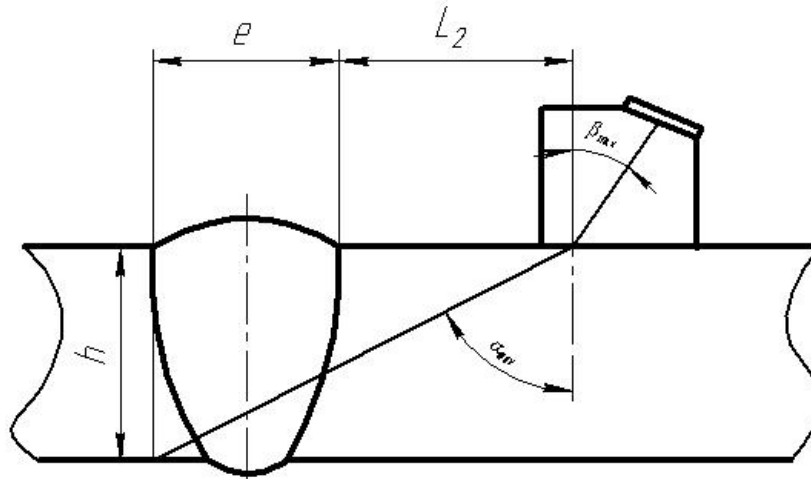


Рисунок 3.11 – Схема для прозвучивания корня шва

## 4 Выбор и расчет характеристик контроля

### 4.1 Выбор зоны и расчет шага сканирования

Для обеспечения контроля требуемой зоны изделия необходимо перемещать преобразователь по поверхности изделия с определенным шагом. При этом схема сканирования определяется формой и размерами объекта контроля, типом используемых волн, параметрами преобразователей и другими факторами. Так, например, при контроле листов зоной сканирования является вся поверхность листа, при контроле сварных швов преобразователь перемещается по основному металлу вблизи шва, при контроле изделий сложной формы целесообразно предусмотреть одновременное прозвучивание объекта в различных направлениях путем использования преобразователей, сканирующих изделие с разных сторон, при этом повышается надежность выявления различно ориентированных дефектов. Надежность выявления дефектов повышается в случае совокупного использования прямых и наклонных преобразователей.

Зоны сканирования прямыми и отраженными лучами определяются геометрией распространения ультразвуковых лучей, которые должны охватить весь объем материала в зоне контроля. С учетом этого следует рассчитать положение границ, между которыми перемещается преобразователь по поверхности объекта. Например, при контроле сварных соединений прозвучивание наплавленного металла осуществляют в два этапа в различных режимах: поисковом и оценочном. При этом на этапе поисков дефектов наиболее эффективным является



продольно-поперечный способ сканирования, а в оценочном режиме – поперечно-продольный [3, с. 238, 240].

Шаг сканирования  $\Delta_c$  определяется как расстояние между ближайшими траекториями перемещения преобразователя по поверхности изделия. Чем больше это расстояние, тем сильнее ослабляется чувствительность к дефектам, расположенным между траекториями перемещения преобразователя. Допустимое ослабление чувствительности задается величиной  $m < 1$ . Тогда шаг сканирования  $\Delta_c$  определяется как удвоенное расстояние от центра преобразователя по поверхности объекта до точечного дефекта, на котором амплитуда сигнала изменяется в  $m$  раз. Данный расчет выполняется по наиболее узкому участку акустического поля в пределах контролируемого объекта [3, с. 216, 217]. Рассмотрим два примера определения шага сканирования [2].

При контроле листа теневым методом толщина  $h$  изделия составляет 1,5 ближней зоны преобразователя  $x_0$ . Необходимо найти шаг сканирования  $\Delta_c$  при  $m = 0,5$ . Дефект считается залегающим в середине листа. Ослабление сигнала при контроле теневым методом определяется по формуле, аналогичной выражению для акустического тракта эхометода, но расстояния для эхометода принимаются равными  $\frac{h}{2}$ . Так как соотношение  $\frac{h}{2x_0} = 0,75$ , найдем на гра-

фике [3, с. 217] значение  $\frac{x}{x_0} = 0,75$ . Считая, что длительность импульса равна среднему значению, строим интерполяционную кривую в заштрихованной зоне графика. На уровне 0,5 от максимума ширина ее равна  $\frac{\rho}{a} = 0,5$ . Отсюда находим  $\Delta_c = 2\rho = a$ , т. е. шаг сканирования равен радиусу пьезопластины.

При контроле сварного шва, расположенного в дальней зоне преобразователя с диаметром пьезопластины  $2a$ , требуется рассчитать шаг для поперечного сканирования [3, с. 260]. Известны длина волны  $\lambda$  и минимальное расстояние между точками наплавленного металла и преобразователя  $X$ . По диаграмме [3, с. 216] находим значение  $ak \sin \theta$ , соответствующее заданному  $m$ , далее с учетом того, что  $ak \sin \theta = \frac{2\pi a \Delta_c}{kx}$ , находим  $\Delta_c$ .

#### 4.2 Оценка производительности контроля

Производительность контроля определяется шагом и скоростью перемещения преобразователя. Время контроля находят путем деления длины траектории перемещения центра преобразователя в соответствии со схемой сканирования на скорость перемещения преобразователя  $V$ , которая при ручном контроле ограничивается физическими возможностями контролера и составляет 0,1...0,2 м/с. При автоматическом контроле она ограничивается частотой посылок импуль-

сов  $N_u$  и инерционностью регистратора дефектов, определяемой числом импульсов  $N_p$ , от которого срабатывает регистратор. Тогда для круглого или квадратного преобразователя  $V = \frac{\Delta_c N_u}{N_p}$ . Производительность контроля может быть

увеличена за счет использования блока преобразователей. Следует отметить, что при оценке времени, необходимого на контроль, учитывается также время на настройку аппаратуры, вспомогательные операции, на исследование обнаруженных дефектов.

## 5 Расчет параметров аппаратуры для теневого и эхометодов

### 5.1 Расчет параметров аппаратуры для контроля теньевым методом

Теньевым методом контроля обычно проверяют качество листов металла после прокатки. Контроль осуществляется в иммерсионном варианте. Задаются минимальная  $h_{\min}$  и максимальная  $h_{\max}$  толщины контролируемого листа, диаметр  $2b_{\min}$  дефекта в виде полого диска, который необходимо выявить в листе при произвольном его положении по толщине, минимальное ослабление сквозного сигнала дефектом  $K_d = 1 - \frac{P_T}{P_C}$ , которое считается достаточным для его регистрации на фоне случайных помех. Требуется рассчитать диаметры  $2a$  или площади  $S_a$  преобразователей, рабочую частоту  $f_p$ , толщину слоя иммерсионной жидкости  $h_{жс}$ , расстояние  $H$  между преобразователями.

Предварительный выбор частоты выполняется из соображений предотвращения интерференции в наиболее тонком слое. Минимальная толщина слоя жидкости должна быть такой, чтобы в ней также не возникало интерференции ультразвуковых волн.

Расстояние между излучателем и приемником  $H$  должно обеспечивать возможность контроля листов во всем диапазоне толщин. Во всех расчетах следует предусмотреть изменение толщины листов в пределах допуска (10 %) и случайные перемещения листа из среднего положения в процессе перемещения между преобразователями (10 %). Например, величина  $H$  определяется из неравенства

$$H \geq (1,2h_{\max} + 2h_{жс}). \quad (5.1)$$

Выбор размеров преобразователей и уточнение значения рабочей частоты выполняется из условия достижения требуемой чувствительности. В случае, когда лист тонкий, расстояние между излучателем и приемником заполнено преимущественно иммерсионной жидкостью (рисунок 5.1, а). При этом достижение требуемой чувствительности оценивается исходя из выявляемости дефекта в ближней зоне  $x_\delta$  преобразователя:

$$\frac{P_{CD}}{P_C} = 1 - (1 \dots 4) \frac{S_a}{S_b}, \quad (5.2)$$

где  $S_b$  – площадь дефекта;

$S_a$  – площадь преобразователя.

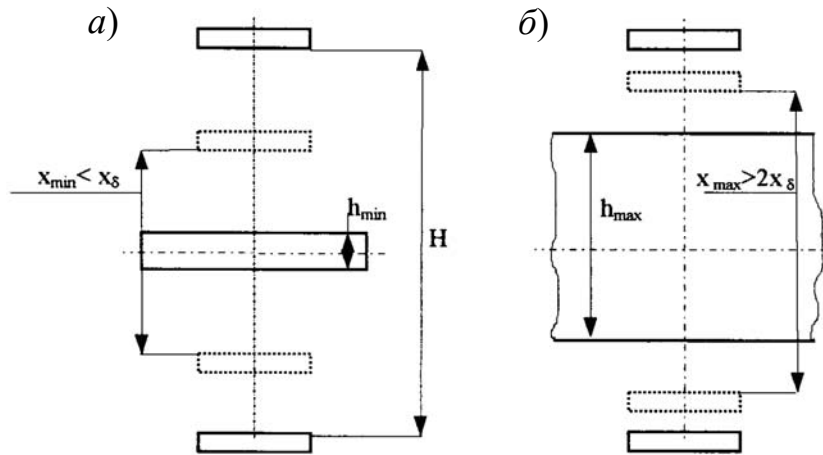


Рисунок 5.1 – Схема для расчета акустического тракта при теновом контроле

Для надежного выявления дефекта коэффициент (1–4) принимается равным 1. После этого необходимо рассчитать ближнюю зону и проверить, что приведенное расстояние между преобразователями меньше удвоенной ближней зоны.

Уточнение значения частоты (в сторону повышения) производится на основе выявляемости дефекта при любой толщине листа и при любом положении дефекта в листе. Для этого следует обеспечить выявляемость дефекта в дальней зоне (рисунок 5.1, б)

$$\left( 1 - 4 \frac{S_b}{\lambda x_{\max}} \right) \leq \frac{P_{CD}}{P_C}, \quad (5.3)$$

где  $x_{\max}$  – приведенное расстояние между преобразователями, соответствующее максимальной толщине изделия,

$$x_{\max} = 1,1h_{\max} + \left( \frac{C_{жс}}{C} \right) \cdot (H - 1,1 \cdot h_{\max}). \quad (5.4)$$

Кроме того, следует проверить, что выбор частоты обеспечивает условие, при котором длина волны ультразвука меньше размера дефекта, который требуется выявить. Окончательное значение частоты выбирается из стандартного размерного ряда. При расчетах по формулам (5.2) и (5.3) следует принимать значения  $\frac{P_{CD}}{P_C}$  на 10 %...20 % меньше указанных в задании, чтобы гарантировать надежное выявление дефекта при разных вариантах его расположения относительно

преобразователей.

После этого, по диаграммам [3, с. 250–251] необходимо проверить, обеспечивается ли выявляемость дефекта при любых его положениях по толщине листа и любых толщинах изделия. Для проверки этого следует по безразмерной АРД-диаграмме построить кривую размерной АРД-диаграммы, соответствующую заданным размерам дефекта, толщинам объекта с учетом жидкостной задержки, а также выбранным размерам преобразователя и частоте. Необходимо изобразить границы изменения ослабления сквозного сигнала в зависимости от возможного изменения положения изделия между преобразователями. Для надежного выявления дефекта вся найденная область ослабления сквозного сигнала должна лежать ниже значения  $\frac{P_{сд}}{P_c}$ , указанного в задании. Если это требование не выполняется, необходимо скорректировать выбор частоты и диаметра преобразователя.

## 5.2 Расчет параметров аппаратуры для контроля сварных швов

Основная сложность при контроле сварных швов толщиной не более 10...12 мм состоит в выборе таких параметров преобразователя, которые обеспечивают надежную проверку сварного шва при минимальном уровне помех, связанных с отражениями от неровностей шва. Как правило, задаются материал и толщина сварного соединения  $h$  и минимальный размер дефекта  $2b$  в виде плоскодонного отверстия, который необходимо выявить. Требуется рассчитать рабочую частоту  $f_p$ , угол наклона призмы и диаметр пьезоэлемента  $2a$ .

Контроль шва обычно проводится прямым и однократно отраженным лучом (рисунок 5.2). При контроле корневой части шва в качестве ложного сигнала может регистрироваться отражение от провиса. Сигналы от дефекта отличаются от них по времени прихода. Для этого прибор должен обладать лучевой разрешающей способностью не хуже  $h/6$ . Из этого условия определяется нижний предел частоты. Значение частоты определяется также из условия: размеры дефектов должны быть больше длины ультразвука. Выбирается большее из двух найденных значений частоты. Окончательно рабочая частота выбирается, как ближайшее большее значение из стандартного ряда.

Определение угла наклона призмы преобразователя  $\beta$  и размера пьезоэлемента  $2a$  выполняется из следующих условий: слой толщиной не менее  $h/3$  вблизи корня шва должен контролироваться прямым лучом. Это условие записывается в виде неравенства

$$n + \frac{h}{2} + \Delta g \leq \frac{2}{3} h \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.5)$$

Добавка  $\Delta g \approx 1$  мм в левой части неравенства введена в качестве резервной. Стрела преобразователя  $n$  выбирается из условий на призму преобразователя. При этом необходимо предусмотреть резервное расстояние не менее 0,5 мм.

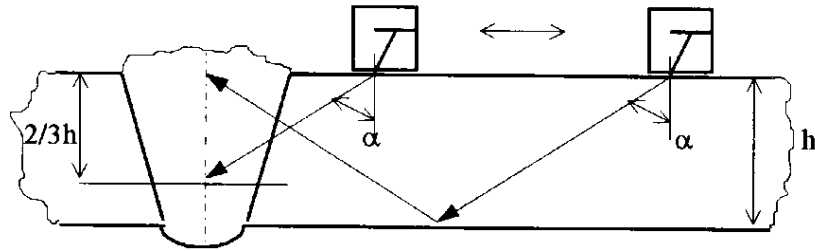


Рисунок 5.2 – Схема контроля сварного шва малой толщины

В контролируемом изделии не должны возбуждаться поверхностные волны. Поскольку  $\beta$  и  $\alpha$  связаны законом синусов, а величины  $n$  и  $\beta$  зависят от размеров пьезоэлемента  $2a$ , для выбора  $\beta$  и  $2a$  необходимо решить приведенные ранее формулы. При этом  $\beta$  следует определить с точностью до градуса, а  $a$  – с точностью до 0,5 мм (обычно  $a = 2...3$  мм). После вычислений необходимо уточнить угол призмы  $\beta$  с учетом экспериментальной зависимости  $\alpha$  от  $\beta$  [5, с. 179].

При контроле сварных швов малой толщины в качестве искусственного дефекта часто используется угловой отражатель в виде зарубки. С учетом выбранного угла призмы и руководствуясь [3, с. 232–235] необходимо определить размеры зарубки, дающей такую же амплитуду сигнала, как и заданное плоскодонное отверстие диаметром  $2b$ .

Контроль сварных швов толщиной более 100 мм сопровождается существенным ослаблением чувствительности. Обычно задаются средний размер  $\bar{D}$  зерна металла, толщина  $h$  контролируемого шва, диаметр плоскодонного отверстия, которое необходимо выявлять, и минимальная фронтальная разрешающая способность  $\Delta l$ . Требуется выбрать угол наклона  $\beta$  преобразователя, рассчитать рабочую частоту  $f_p$  и диаметр преобразователя  $2a$ , определить чувствительность для различных видов дефектов.

Если толщина шва меньше 150...200 мм, то угол наклона призмы  $\beta$  выбирается равным  $40^\circ$ , для более толстых швов –  $35^\circ...30^\circ$ . Далее по закону синусов рассчитывается угол преломления  $\alpha$ .

Расчет рабочей частоты выполняется из условия достижения максимальной амплитуды сигнала  $P_1$  от дефекта. Ослабление зондирующего импульса в акустическом тракте прибора определяется формулой

$$\frac{P_1}{P_1} = D \frac{S_a' S_b f^2 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}}{(r_1' + x)^2} \exp(-2\delta x - 2\delta_1 r_1'), \quad (5.6)$$

где  $D$  – коэффициент прохождения через границу оргстекло – изделие;

$x$  – максимальный путь ультразвука в изделии;

$S_a'$  – площадь мнимой пьезопластины;

$S_b$  – площадь плоскодонного отражателя.

Путь ультразвука в призме определяется аналитически или графически, исходя из конструкции призмы с учетом рассмотренных ранее условий. Размер пьезопластины выбирается для этого расчета с учетом рекомендаций [3, с. 260]; в дальнейшем размеры пьезопластины уточняются. Расчет оптимального значения частоты производится в соответствии с подразделом 3.2.

Уточненный диаметр пьезопластины выбирается наибольшим исходя из двух условий: отношение сигнал – средний уровень структурных шумов больше 2 и достижение минимального (или заданного) значения фронтальной разрешающей способности как при малых, так и при больших расстояниях до дефекта.

Фронтальная разрешающая способность  $\Delta L$  для ближней зоны определяется формулой

$$\Delta L = (0,5...1) \cdot 2a, \quad (5.7)$$

а для дальней зоны

$$\Delta L = \frac{x\lambda}{2a}. \quad (5.8)$$

Коэффициент 0,5 принимается для границы ближней зоны, а 1 – вблизи преобразователя. Совместное вычисление по этим двум формулам позволяет определить величину  $2a$ , обеспечивающую фронтальную разрешающую способность. Если минимальное значение  $\Delta L$  задано, то следует проверить выполнение этого требования во всех зонах сварного шва и в случае необходимости скорректировать значение диаметра пьезопластины и частоты. Диаметр пластины выбирается исходя из второго условия, и затем проверяется выполнение первого.

Чувствительность к выявлению дефектов различного вида (плоскодонных отверстий и сферических) определяется на основе расчета амплитуд эхосигналов по формулам, приведенным в [3, с. 231]. При этом задается массив значений размера отражателя (дефекта) от  $b_{\min}$  до  $b_{\max}$ , расположенных на расстоянии от преобразователя в диапазоне от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$ . Расчет производится на ПК и строятся графики чувствительности, аналогичные АРД-диаграммам.

## Список литературы

- 1 **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под общ. ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
- 2 Ультразвуковой дефектоскоп: методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Акустический контроль» / Сост. А. Ф. Зацепин. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. – 16 с.
- 3 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / Под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 2.– 352 с.
- 4 **Алешин, Н. П.** Ультразвуковая дефектоскопия: справочник / Н. П. Алешин, В. Г. Лупачев. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 271 с.: ил.
- 5 Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.: ил.
- 6 **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.: ил.
- 7 **Алешин, Н. П.** Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вопилкин; под общ. ред. Н. П. Алешина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 456 с.: ил.
- 8 **Кретов, Е. Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: СВЕН, 2007. – 296 с.: ил.
- 9 **Щербинский, В. Г.** Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. Г. Щербинский, Н. П. Алешин. – Москва: Стройиздат, 2001. – 284 с.: ил.
- 10 **Щербинский, В. Г.** Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. – Москва: Тиссо, 2003. – 326 с.: ил.
- 11 **Зацепин, А. Ф.** Акустические измерения: учебное пособие / А. Ф. Зацепин; под ред. В. Е. Щербинина. – Москва: Юрайт; Екатеринбург: Урал. ун-т, 2022. – 209 с.
- 12 **Данилов, В. Н.** Просто о преобразователях с фазированными решетками в ультразвуковом контроле / В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова. – Москва: Спектр, 2019. – 136 с.

## **Приложение А (обязательное)**

### **Пример оформления титульного листа**

Министерство образования Республики Беларусь  
Министерство образования и науки Российской Федерации  
БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра «Физические методы контроля»

## **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к курсовому проекту по курсу  
«ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ»

Тема проекта \_\_\_\_\_

Проект выполнил студент \_\_\_\_\_

Группа \_\_\_\_\_

Руководитель проекта \_\_\_\_\_



## Приложение Б (справочное)

Таблица Б.1 – Акустические свойства различных сред

Вещество	Плотность $\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Скорость распространения волн $c$ , $10^3$ м/с			Характеристический импеданс для продольных волн, МПа · с/м
		продольных	поперечных	поверхностных	
1	2	3	4	5	6
<i>Металлы и сплавы</i>					
Алюминий	2,7	6,36	3,13	2,9	17,2
Бериллий	1,82	12,8	8,71	7,87	23,3
Бронза	8,5...8,9	3,5...3,8	2,3...2,5	2,1...2,3	30...34
Висмут	9,8	2,18	1,1	1,03	21,4
Вольфрам	19,25	5,32	2,7	2,65	102,7
Дюралюминий	2,7...2,8	6,25...6,35	3,0...3,2	2,8...3,0	17,2...20,0
Железо	7,8	5,91	3,23	3,0	46,3
Золото	19,3	3,24	1,2	1,12	62,5
Кадмий	8,6	2,78	1,5	1,4	27,0
Латунь	8,5	4,43	2,12	1,95	37,7
Литий	0,53	3,00	–	–	1,6
Магний	1,74	5,77	3,05	2,875	10,1
Медь	8,9	4,72	2,44	2,26	42,0
Молибден	10,09	6,29	3,35	3,11	63,5
Никель	8,8	5,63	2,96	2,64	49,5
Ниобий	3,9	4,10	1,7	1,58	35,3
Олово	7,3	3,32	1,67	1,56	24,2
Платина	21,4	3,96	1,67	1,57	84,6
Ртуть	13,6	1,45	–	–	19,8
Свинец	11,4	2,16	0,85	0,79	24,6
Серебро	10,5	3,60	1,59	1,48	38,0
<i>Сталь:</i>					
коррозионно-стойкая	8,03	5,66...6,14	3,12...3,25	3,1	45,5...49,3
углеродистая	7,8	5,90...5,94	3,22...3,25	3,0	46,2...46,4
Титан	4,5	6,10	3,13	2,91	27,5
Уран	18,7	3,30	–	–	62,0
Цинк	7,1	4,17	2,41	2,22	29,6
Цирконий	6,5	4,90	2,9	2,66	31,9
Чугун	7,2	3,5...5,6	2,2...3,2	–	25...40

Окончание таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6
<i>Неметаллы</i>					
Бетон	1,8...2,8	2,1...5,2	–	–	6,95
Аральдит	1,18	2,5	1,1	–	3,0
Капрон	1,1	2,64	–	–	2,9
Кварц плавленный	2,2	5,93	3,75	3,39	13,0
Нейлон, перлон	1,1...1,2	1,8...2,2	–	–	1,8...2,7
Стекло органическое	1,18	2,65...2,75	1,12...1,13	1,05	3,0...3,2
Окись алюминия	3,7...3,9	10	–	–	37...39
Полистирол	1,1	2,37	1,12	1,04	3,0
<i>Резина:</i>					
сырая	1,3...2,1	1,48	–	–	1,9...3,1
вулканизованная	0,9...1,6	1,5...2,3	–	–	1,3...3,7
Смола акриловая	1,18	2,67	1,12	–	3,2
Стекло оконное	2,6	5,7	3,4	3,1	14,5
Текстолит	1,2...1,3	2,63	–	–	3,1...3,9
Фторопласт	2,2	1,35	–	–	3
Фарфор	2,4	5,3...5,35	3,5...3,7	–	1,3...1,4
Эбонит	1,2	2,4	–	–	2,9
Эпоксидная смола твердая	1,15...1,3	2,5...2,8	1,1	–	2,8...3,7
<i>Жидкости (20 °С)</i>					
Ацетон	0,792	1,192	–	–	0,94
Вода	0,998	1,490	–	–	1,49
Глицерин	1,265	1,923	–	–	2,42
Керосин	0,825	1,295	–	–	1,45
<i>Масло:</i>					
дизельное	0,88...1,02	1,25	–	–	1,1...1,3
машинное (автол)	0,89...0,96	1,74	–	–	1,5...1,7
трансформаторное	0,9...0,92	1,38...1,40	–	–	1,25...1,27
<i>Спирт:</i>					
метиловый	0,792	1,123	–	–	0,89
этиловый	0,789	1,180	–	–	0,93
<i>Газы (0 °С)</i>					
Воздух	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,331	–	–	$4,3 \cdot 10^{-4}$

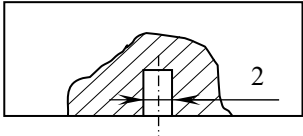
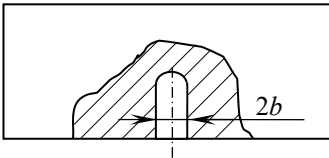
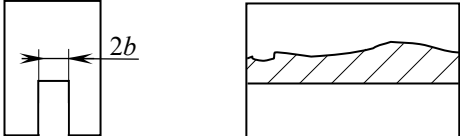

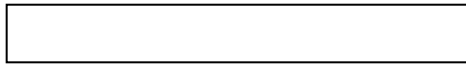
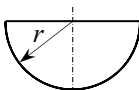
## Приложение В (справочное)

Таблица В.1 – Коэффициент затухания ультразвука частотой 2,5 МГц для некоторых металлов

Металл	Коэффициент затухания, дБ/ мм	
	Продольные волны	Поперечные волны
<i>Сталь перлитная</i>		
Отливки	0...0,018	–
Литые заготовки	0...0,013	–
Прокат, поковки	0...0,009	–
Сварные соединения	0...0,009	0,009...0,018
<i>Сталь аустенитная</i>		
Литье	0,018...0,9	–
Мелкие поковки и прокат	0...0,018	–
Крупные поковки	0...0,09	–
Сварные соединения	0,13...0,18	0,13...0,26
<i>Титан</i>		
Слитки	0,009...0,054	–
Поковки	0,009...0,045	–
Сварные соединения	0,018...0,045	0,045...0,063
<i>Алюминий</i>		
Литье	0,009...0,072	–
Поковки	0...0,009	–
Сварные соединения	0...0,009	0,009
<i>Бронза</i>		
Литье	0,045...0,9	–
Поковки	0,018...0,045	–

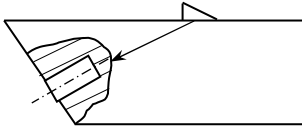
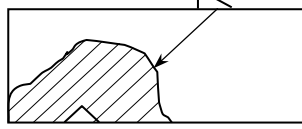
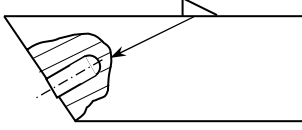
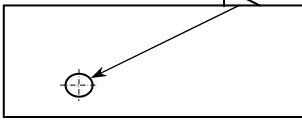
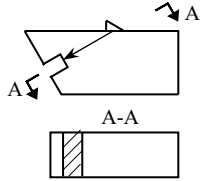
## Приложение Г (справочное)

Таблица Г.1 – Формулы акустического тракта прямого круглого совмещенного преобразователя

Модель дефекта	Тип искусственного отражателя	Уравнение акустического тракта при $r \geq 3r_0$
Диск площадью $S$	Глухое отверстие с плоским дном 	$\frac{A}{A_0} = \frac{S_a S}{\lambda^2 r^2} e^{-2\delta r}$
Сфера диаметром $2b$	Глухое отверстие со сферическим дном 	$\frac{A}{A_0} = \frac{S_a b}{2\lambda r^2} e^{-2\delta r}$
Бесконечная полоса шириной $2b$	Пропил 	$\frac{A}{A_0} = \frac{\sqrt{2} S_a b}{(\lambda r)^{3/2}} e^{-2\delta r}$
Бесконечный цилиндр диаметром $2b$	Сквозное отверстие 	$\frac{A}{A_0} = \frac{S_a}{2\lambda} \sqrt{\frac{b}{r^3}} e^{-2\delta r}$
Бесконечная плоскость	Донная плоская поверхность 	$\frac{A}{A_0} = \frac{S_a}{2\lambda r} e^{-2\delta r}$
Цилиндрическая вогнутая поверхность	Донная цилиндрическая поверхность 	$\frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{S_a}{2\lambda r}} e^{-2\delta r}$

## Приложение Д (справочное)

Таблица Д.1 – Формулы акустического тракта наклонного круглого совмещенного преобразователя

Модель дефекта	Тип искусственного отражателя	Уравнение акустического тракта при $r \geq 3r_0$
Диск площадью $S$	Глухое отверстие с плоским дном 	$\frac{A}{A_0} = \frac{D_{lt} S_a S \cos \alpha}{\lambda_l^2 (r + r_\Delta)^2 \cos \beta} E$
Сегментный отражатель площадью $S$	Наклонная выемка, выполненная фрезеровкой 	$\frac{A}{A_0} = \frac{D_{lt} S_a S \cos \alpha}{\lambda_l^2 (r + r_\Delta)^2 \cos \beta} E$
Сфера диаметром $2b$	Наклонное глухое отверстие со сферическим дном 	$\frac{A}{A_0} = \frac{D_{lt} S_a b \cos \alpha}{2\lambda_l (r + r_\Delta)^2 \cos \beta} E$
Бесконечный цилиндр диаметром $2b$	Сквозное отверстие 	$\frac{A}{A_0} = \frac{D_{lt} S_a \cos \alpha}{2\lambda_l \cos \beta} \sqrt{\frac{b}{(r + r_\Delta)^3}} E$
Бесконечная полоса шириной $2b$	Пропил 	$\frac{A}{A_0} = \sqrt{2} \frac{D_{lt} S_a b \cos \alpha}{[\lambda_l (r + r_\Delta)]^{3/2} \cos \beta} E$
<p>Примечание – <math>D_{lt}</math> – коэффициент прохождения через границу раздела; <math>\delta_{np}</math> – коэффициент затухания в материале призмы; <math>E = e^{-2(\delta r + \delta_{np} r_1)}</math>; <math>r_\Delta</math> – приведенный путь ультразвука в призме преобразователя <math>r_\Delta = r_1 \frac{C_{лп}}{C_t} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}</math></p>		