

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи

БУЙ ВАН ДОНГ

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
МАЛОРАКУРСНЫМ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Солдатов Алексей Иванович

Томск – 2015

Оглавление	
ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	12
1.1 Полимерные композиционные материалы	12
1.2 Дефекты полимерных композиционных материалов	18
1.3 Томография.....	29
1.4 Средства контроля ПКМ.....	30
1.5 Ультразвуковые методы дефектоскопии многослойных полимерных композиционных материалов	33
1.6 Ультразвуковые дефектоскопы для контроля многослойных полимерных композиционных материалов.....	37
ВЫВОДЫ.....	47
2.1 Расчет амплитуды сигнала на приемнике	49
2.2 Разрешающая способность акустического тракта, образованного антенными решётками.....	72
2.3 Исследование предельной чувствительности.....	78
ВЫВОДЫ.....	91
ГЛАВА 3. АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ	93
3.1 Экспериментальная установка	93
3.2 Экспериментальные исследования	99
3.2.1 Исследование точности определения местоположения дефектов... ..	99
3.2.2 Исследование коэффициента Кд	104
3.2.3 Исследование чувствительности	109
3.2.4 Исследование разрешающей способности	115
3.3 Интерфейс оператора	121
3.3 Структурная схема многоканального малоракурсного теневого дефектоскопа.....	125
ВЫВОДЫ.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ. Акты внедрения.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Теоретические исследования и практическое применение теневого метода в неразрушающем контроле с применением ультразвукового излучения известно давно [1, 2]. В основном, использование ограничивалось акустическим трактом, образованным одним излучателем и одним приёмником. Однако, начиная с семидесятых годов прошлого столетия, делались многочисленные попытки разработки и исследования аппаратуры, основанной на линейных антенных решётках. В работе С.А. Цехановского [3] исследовался теневой акустический тракт, предназначенный для контроля резинотехнических изделий. Излучающая и приемная антенные решетки при этом располагались взаимно перпендикулярно, образуя пиксел изображения при реконструкции результатов контроля на пересечении излучающего элемента с приемным. Дальнейшее развитие этого подхода было проведено в работах В.С. Макарова [4]. Он использовал этот подход для контроля колец железнодорожных подшипников с целью обнаружения областей пережогов при термообработке колец. Основным преимуществом предлагаемых решений являлась только высокая производительность контроля по сравнению с одиночным каналом. Ограничение вычислительных ресурсов электроники не позволяли определять глубину залегания дефектов.

Активное совершенствование теневого метода контроля началось с внедрением реконструктивной томографии, вычислительный аппарат которой основан на преобразовании И. Радона [5, 6]. Самые значительные достижения наблюдаются в медицинской диагностике, основанной на рентгеновской томографии [7]. В ультразвуковом неразрушающем контроле применение реконструктивной томографии, основанной на преобразовании И. Радона, используется не так широко, что обусловлено вполне объективными обстоятельствами. В первую очередь, это сложности получения необходимого набора проекций. Зачастую возможность получения необходимого набора проекций ограничена размерами и

конфигурацией контролируемого изделия и антенной решетки. Например, весьма эффективен теневой контроль для исследования многослойных композиционных материалов [8]. Однако их плоскостная конфигурация вообще исключает почти все проекции кроме проекций по нормали к поверхности за исключением малоракурсных.

Термин «малоракурсная» по отношению к томографии может иметь два значения. Во-первых, это может означать, что имеется небольшое число проекций. Анализ такой ситуации приведён в работе А.В. Филонова [6]. Во-вторых, это может отражать ситуацию, когда имеется набор проекций, причём диапазон углов, под которыми они получены, составляет значительно меньше 90° . Именно такая ситуация возникает при контроле многослойных композиционных материалов. Задача данной работы состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении.

Объектом исследования в представленной работе является акустический тракт трансмиссионного малоракурсного томографического дефектоскопа на основе антенных решеток

Цель диссертационной работы: исследовать возможности акустической малоракурсной томографии трансмиссионным методом на основе линейных антенных решеток для создания компактного аппаратно-программного комплекса неразрушающего контроля композитных материалов.

Достижение поставленных целей потребовало решения следующих **основных задач:**

1. Разработать методику акустической малоракурсной реконструкции томографического изображения зоны контроля с помощью эквидистантных линейных антенных решеток.
2. Провести теоретические исследования дефектометрических характеристик акустической малоракурсной томографии.
3. Разработать макетный образец прибора и провести его испытания.

Научная новизна работы. В работе были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана компьютерная модель акустической малоракурсной реконструкции томографического изображения, которая позволяет проводить адекватные исследования в широком диапазоне исходных параметров акустического тракта зоны контроля позволяющая учесть неравномерное распределение акустических лучевых «трубок» в зоне контроля.

2. Получены аналитические выражения, описывающие зависимость разрешающей способности акустического тракта малоракурсного теневого дефектоскопа на основе эквидистантных антенных решеток от его геометрических и акустических характеристик.

3. Получены аналитические выражения, описывающие зависимость предельной чувствительности малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа на основе эквидистантных антенных решеток от его геометрических и акустических характеристик.

4. Создан акустический малоракурсный томограф для контроля композитных материалов, имеющий лучшие технические характеристики по сравнению с аналогами.

Практическая значимость.

1. Полученные аналитические выражения для определения количества лучей в зоне контроля при теневом методе контроля могут быть использованы при реконструкции малоракурсного томографического изображения зоны контроля.

2. Предложенная модель акустической малоракурсной томографии позволяет определить параметры акустического тракта при проектировании многоканальных малоракурсных трансмиссионных дефектоскопов без проведения затратных экспериментальных исследований.

3. Создан макетный образец акустического малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа, нашедший практическое применение в HSTM Vietnam Construction Consulting Company Limited, Ханой, Вьетнам.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Компьютерная модель акустической малоракурсной томографии, описывающая амплитуду томографического сигнала в произвольной точке зоны контроля в зависимости от конфигурации акустического тракта и параметров модели дефектов, позволяющая с погрешностью не более 6% определять координаты дефектов.

2. Разрешающая способность теневого дефектоскопа на основе эквидистантных линейных антенных решеток и обработкой первичной информации по методике обратных проекций является аналитической функцией, зависящей от геометрических характеристик акустического тракта и позволяющая детектировать два дефекта, расположенных на расстоянии 18 мм друг от друга при использовании антенных решеток из 16 элементов и толщине образца 400 мм в центре зоны контроля.

3. Предельная чувствительность малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа на основе эквидистантных линейных антенных решеток и обработкой первичной информации по методике обратных проекций является аналитической функцией, зависящей от геометрических характеристик акустического тракта и позволяющая детектировать дефект, с размером 0,9 мм² при использовании антенных решеток из 16 элементов и толщине образца 400 мм в центре зоны контроля.

Личный вклад автора: участие в постановке задач, разработке модели акустической малоракурсной томографии. Автором лично предложен способ реконструкции томографического изображения при теневом методе контроля, учитывающий неравномерное распределение лучей в зоне контроля и его техническая реализация, а также проведено исследование разрешающей способности и чувствительности акустической малоракурсной томографии.

Апробация работы и публикации.

Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены и обсуждены на следующих конференциях:

- на XIX Международной научно-практической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» г. Томск, 2013
- на VI Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов», г. Томск, 2013
- на XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», г. Томск, 2014
- на XX Международной научно-практической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» г. Томск, 2014
- на VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов», г. Томск, 2014

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 4 статьях, материалах 5 докладов, список которых приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 145 страниц, 77 рисунков и 5 таблицы. Обзор литературных данных содержит 100 наименования.

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены методы и приборы контроля композиционных материалов. В разделе 1.1 приведены основные сведения о композитных материалах, которые очень широко применяются в современном производстве. Рассмотрены методы получения композитных материалов, их конструктивные особенности и свойства. В разделе 1.2

рассмотрены основные типы дефектов, их характерные размеры и причины образования. Приведена классификация дефектов и их влияние на свойства композитных материалов. В разделе 1.3 рассмотрены основные понятия о томографии и методы получения томографического изображения. Отдельно рассмотрены вопросы ультразвуковой томографии, сделан акцент на малоракурсной томографии, которая представляется перспективной для применения в ультразвуковом контроле. В разделе 1.4 приведены сведения о средствах контроля композиционных материалов. Показано, что для контроля применяют различные методы: термографию, рентгеновский метод и ультразвуковой. Наиболее перспективно применение термографии для контроля сотовых конструкций. Рентгеновские методы позволяют контролировать только нарушения упорядоченной структуры композитных материалов. В разделе 1.5 рассмотрены ультразвуковые методы дефектоскопии многослойных композиционных материалов. Представлена классификация ультразвуковых методов контроля композиционных материалов. Рассмотрены их области применения и типы выявляемых дефектов. В разделе 1.6 собраны сведения о современных ультразвуковых дефектоскопах как отечественных так и зарубежных производителей, позволяющих контролировать композиционные материалы.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований малоракурсной ультразвуковой томографии на основе созданной модели. Раздел 2.1 посвящен расчету амплитуды сигнала на приемнике при теновом контроле с использованием акустических решеток. Показаны особенности малоракурсного акустического тракта, заключающиеся в неравномерном распределении лучей по зоне контроля, исходящих от излучателей к приемникам. Для количественной оценки выявляемости дефектов при теновом методе контроля применен коэффициент k_D , который определяется отношением амплитуды сигнала на приемнике при наличии дефекта к амплитуде сигнала на приемнике при отсутствии дефекта при неизменном зондирующем сигнале. При моделировании этот коэффициент k_D является

основой для построения томографического изображения. С учетом различного положения дефекта в зоне контроля (относительно ближней зоны излучателя и приемника) рассмотрены четыре варианта определения коэффициента k_d . Приведены алгоритмы для моделирования одного и двух дефектов в зоне контроля, с реконструкцией томографического изображения акустического образа дефекта. Исследованы погрешности модели, характеризующие геометрические параметры положения дефекта в зоне контроля. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов, на основе которых сделано заключение о адекватности предложенной модели. В разделе 2.2 исследована разрешающая способность малоракурсной ультразвуковой томографии при трансмиссионном контроле. Показано, что разрешающая способность будет определяться акустическим аналогом функции рассеяния точки (PSF) для теневого метода. Поэтому фронтальная и продольная разрешающие способности будут равны соответствующим размерам PSF. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований разрешающей способности в различных областях зоны контроля. Показано, что наилучшая разрешающая способность будет в центре зоны контроля. В разделе 2.3 исследована предельная чувствительность системы акустического контроля малоракурсным теньевым методом с использованием теории дифракции Кирхгофа. Определены минимальные размеры обнаруживаемого дефекта для различных параметров акустического тракта: количества элементов в антенных решетках, расстоянии между антенными решетками, расстояния между элементами в антенной решетки, частоты излучения. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований предельной чувствительности в различных областях зоны контроля. Показано, что наилучшая чувствительность будет в ближней зоне антенных решеток.

Во третьей главе приведены результаты практического использования проведенных исследований. В разделе 3.1 представлены структурная схема, диаграммы работы и фотографии экспериментальной установки, на которой

проводились исследования. Приведено описание оригинального алгоритма реконструкции томографического изображения. В разделе 3.2 представлены результаты экспериментальных исследований фронтальной и продольной точности определения координат дефектов в зоне контроля, разрешающей способности и предельной чувствительности. Приведены томограммы объектов контроля с дефектами. В разделе 3.3 описан интерфейс оператора с отображением уровней принятых сигналов по каждому каналу при последовательном зондировании всеми элементами излучающей антенной решетки, что позволяет проводить калибровку многоканальной системы контроля. В разделе 3.3 приведена структурная схема, фотография и технические характеристики многоканального малоракурсного теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector», который прошел успешные испытания и внедрен на предприятии HSTM Vietnam construction consulting company.

Выводы по работе делаются в конце каждой главы.

В заключении приводятся основные результаты работы, полученные в процессе подготовки диссертации.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов с данными других авторов (там, где таковые имеются), совпадением экспериментальных и расчетных значений предельной чувствительности и разрешающей способности, величины погрешности в определении координат залегания дефектов, работоспособностью изготовленного прибора, результатами лабораторных испытаний. Протоколы испытаний и акты внедрения разработанных приборов приведены в Приложении.

Результаты, используемые в работе получены автором лично и совместно с коллегами – в равном участии, а также при непосредственном участии автора в постановке исследовательских задач и разработок действующего макета прибора.

Автором непосредственно выполнены:

- анализ текущего состояния теоретических исследований и практических разработок приборов для ультразвукового малоракурсного теневого контроля,
- исследования фронтальной и продольной разрешающей способности,
- исследования предельной чувствительности,
- исследования точности определения координат залегания дефектов в объекте контроля,
- предложены способ реконструкции томографического изображения для теневого метода с использованием антенных решеток
- разработаны алгоритм и программа его реализации,

При непосредственном участии автора в качестве руководителя разработан и изготовлен многоканальный малоракурсный теневой дефектоскоп «Multi-channel acoustic shadow flaw detector».

Большая часть проведенных исследований и разработок выполнена в творческом содружестве и при непосредственном участии сотрудников кафедры ПМЭ Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КОПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Современное развитие различных отраслей техники диктует необходимость создания новых конструкционных материалов, обладающих высокой прочностью, на металлической, керамической и полимерной основах. Высокие требования к современной технике порождает необходимость резкого увеличения прочностных характеристик изделий при уменьшении их массы. Перспективным направлением, получившим бурное развитие в последние годы, стало использование композиционных материалов на полимерной основе (композитов). Их прочностные характеристики значительно превосходят все другие типы конструкционных материалов. Учеными были достигнуты серьезные успехи в расширении номенклатуры и улучшении свойств таких материалов [10, 12, 13, 14].

1.1 Полимерные композиционные материалы

Композиционные материалы в настоящее время очень широко применяются в промышленности. Автомобилестроение, станкостроение, судостроение, военная техника и авиация — вот неполный перечень основных отраслей, где используют композиционные материалы.

Композиционный материал – искусственный, неоднородный, сплошной материал, изготовленный из нескольких компонентов с ярко выраженной границей раздела между ними. В большинстве случаев (за исключением слоистых) композиционный материал содержит матрицу и включенные в нее армирующие элементы (рис. 1.1) [11].



Рис. 1.1. Структура типового композитного материала

Совершенствование композитных материалов идет непрерывно. Основной целью является создание более технологичных в производстве, а значит – и более дешёвых материалов. Проводятся эксперименты с саморастущими кристаллическими структурами [10, 12], соединенными в монолит клеем на полимерной основе (цементы с добавками водорастворимых клеев), композиты из термопластического материала с короткими армирующими волокнами.

В настоящее время для разных задач техники создается огромное количество композитов, основное технологическое преимущество которых заключается в процессе одновременного получения и материала, и конструкции. Кроме того, такие композиты обладают высокой удельной прочностью (3500 МПа), жесткостью (модуль упругости в композиционных материалах колеблется от 130 до 240 ГПа), износостойкостью, легкостью и ю усталостной прочностью (рис. 1.2). Следует заметить, что разные композиты, как правило, имеют разные преимущества, т.к. довольно сложно добиться одновременного получения нескольких характеристик высокого уровня [11].

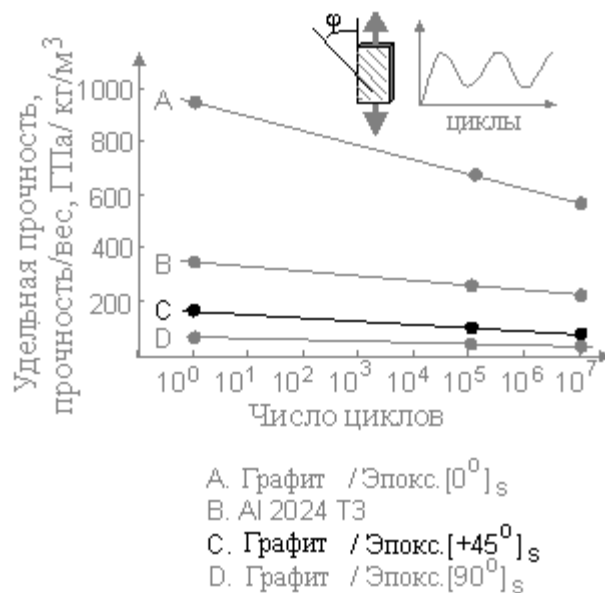


Рис. 1.2. Зависимость удельной прочности композитных материалов от циклической нагрузки

Все композиционные материалы имеют большое число положительных свойств, однако им свойственно примерно такое же число отрицательных свойств, которые ограничивают их распространение. Среди них можно отметить наличие дефектов при производстве и появление дефектов в процессе эксплуатации, плохую повторяемость свойств композиционных материалов от образца к образцу, низкую ударную вязкость, что приводит к высокой повреждаемости изделий из композиционных материалов при эксплуатации, большой удельный объем, гигроскопичность и токсичность при эксплуатации. Кроме того такие материалы имеют низкую эксплуатационную технологичность, низкую ремонтопригодность и высокую стоимость эксплуатации. Как правило, готовые изделия из композиционных материалов не подлежат модернизации и ремонту [12, 14].

Главной задачей, которую решают с помощью композиционных материалов в судостроении, является уменьшение номенклатуры применяемых материалов, при повышении надежности и качества конструкций. Успешное решение этой задачи во многом базируется на применении композиционных материалов [21].

При строительстве современных высокоскоростных судов используются новые полимерные композиционные материалы, которые позволяют создавать безнаборные корпусные конструкции из сэндвич-композиций с высокопрочными промежуточными слоями, выполненными из стеклопластика или стали, и средним слоем, выполненным из полимерных материалов с низкой плотностью.

Для обеспечения требований по пожаробезопасности и экологичности современных судов применяют многофункциональные теплозвукоизоляционные материалы для отделки судовых помещений. При этом их малая плотность при одновременном обеспечении пожаробезопасности позволяет с успехом применять такие материалы в отделке надводной части судов, что приводит к улучшению устойчивости судна, уменьшению его радиолокационной заметности и упрощению эксплуатации корпуса [22].

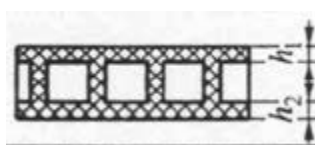
За счет уникальных характеристик композитных материалов создаются высокопрочные, легкие корпуса катеров и яхт. При этом наиболее широко применяются различные стеклопластики, которые имеют высокую химическую и биологическую стойкость. К преимуществам стеклопластиков можно отнести высокую прочность, и что немаловажно высокую технологичность производства, при этом улучшаются условия труда, сокращаются производственные расходы на обеспечение санитарно-гигиенических норм в производственных помещениях. Кроме стеклопластиков в судостроении применяются композиционные материалы из углепластиков для изготовления подводных крыльев судов. Интересно применение композиционных материалов для изготовления спасательных шлюпок. Кроме большой вместимости при сравнительно небольшом весе они обладают уникальным свойством. Они способны защитить экипаж судна в зоне утечки горячей нефти в случае аварии танкеров [22, 24].

Основная номенклатура изделий и конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ), используемых в различных отраслях народного хозяйства приведена ниже.

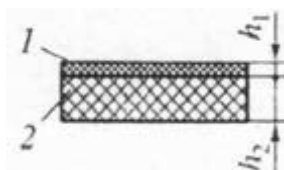
Деталь монолитная из ПКМ (стеклопластик, угле-, боро-, текстолит и т.п.), $h=0,1-100$ мм



- Интегральная монолитная конструкция из ПКМ; $h_1 \geq 0,5$ мм $h_2 \leq 1,0$ мм



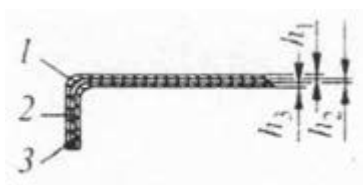
- Двух-слойное: 1 – Слой из неметалла (ПКМ, теплозащита); 2 – ПКМ, $h_1 \leq 25$ мм, $h_2 \geq h_1$



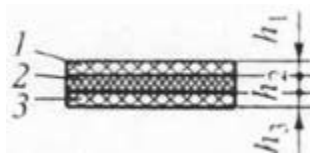
- Двух-слойное: 1 – ПКМ; 2 – металл или сплав; $h_1 \leq 10$ мм $h_2 \geq h_1$ или $h_2 \leq h_1$



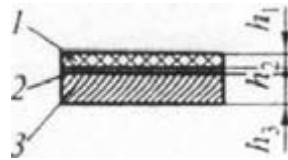
- АЛОР, СИАЛ: 1, 3 – алюминиевый сплав; 2 – ПКМ; $h_1=h_2=h_3=(0,3-0,5)$ мм



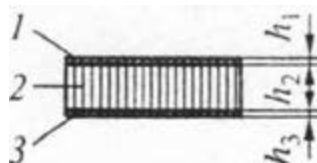
- Трех-слойные: 1, 2, 3 – пластик армированный или неармированный суммарной толщиной до 100 мм



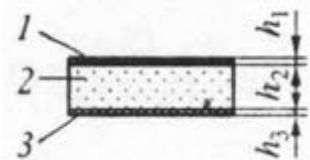
- Трех-слойные: 1 – ПКМ; 2 – слой из резины; 3 – металл; $h_2 < h_1$ $h_2 < h_3$ $h_2=1-3$ мм



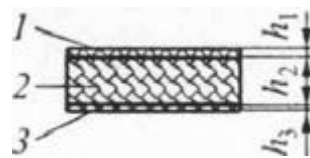
- Трех-слойные: 1, 3 – ПКМ; 2 – соты из стеклопластика или алюминиевого сплава; $h_1=(0,2...10)$ мм, $h_2=(4...100)$ мм, $h_3=(0,2...10)$ мм



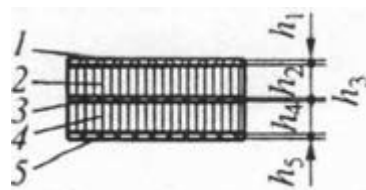
- Трех-слойные: 1 – ПКМ; 2 – пенопласт; 3 – металл; $h_1=(0,3...2)$ мм, $h_2=(5...100)$, мм $h_3=(0,2...3)$ мм



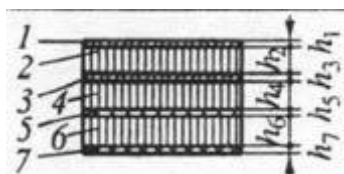
- Трех-слойные: 1, 3 – стеклопластик; 2 – органотрикотаж; $h_1=h_3=0,2$ мм, $h_2=1,2$ мм



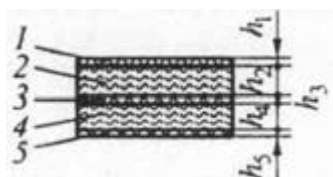
- Многослойные: 1, 3, 5 – ПКМ; 2, 4 – соты из алюминиевого сплава или армированного пластика; h_1 и $h_5=(0,5...3)$ мм, $h_3=(0,5...8)$ мм, h_2 и $h_4=(4...40)$ мм



- Многослойные: 1, 3, 5, 7 – ПКМ; 2, 4, 6 – соты из алюминиевого сплава или армированного пластика; h_1 и h_3 и h_5 и $h_7 \leq 0,5$ мм, h_2 и h_4 и $h_6 = (3 \dots 6)$ мм



- Многослойные: 1, 3, 5 – ПКМ; 2, 4 – стеклосетчатый наполнитель; $h_1, h_3, h_5 = (0,5 \dots 3)$ мм, h_2 и $h_4 = (5 \dots 30)$ мм



[21].

1.2 Дефекты полимерных композиционных материалов

При производстве композитов наиболее распространенными являются дефекты типа нарушения сплошности, к которым относятся: расслоения, непроклеи, трещины, воздушные или газовые раковины, инородные включения, сломанные пучки (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Дефект типа «сломанные пучки»

Кроме того, при производстве возможно появление дефектов на уровне микроструктуры: поры, отклонения от типового соотношения объема матрицы и объема армирующего материала, неудовлетворительная степень отверждения связующего компонента, неправильная ориентации волокон,

складки, свили, поверхностные вмятины и царапины и т.п., вблизи которых прочность материала существенно снижается [13].

Дефекты полимерных композитных материалов (ПКМ) различаются:

- по стадии образования (при изготовлении, при хранении, при транспортировке или при эксплуатации);
- по глубине расположения (поверхностные или внутренние);
- по раскрытию;
- по размерам (макродефекты – размером свыше 60–100 мкм и микродефекты – размером до 60–100 мкм).

Дефекты, возникающие при изготовлении можно разделить на 7 групп.

К первой группе относят дефекты, возникающие в связи с низкой степенью отверждения полимерной матрицы, а также связанные с несоответствием требуемых показателей в составе композитного материала по всему объему. Дефекты, вызванные низкой степенью отверждения матрицы, приводят к снижению теплостойкости материала, резкому ухудшению водо- и влагостойкости, а также других эксплуатационных характеристик, снижению сопротивления материала к воздействию агрессивных сред, а также изменение характера разрушения материала при статической и усталостной динамической нагрузке. Отклонение в составе в значительном объеме материала приводит к серьезным изменениям прочностных характеристик, упругости и эксплуатационной надежности. На изменения характеристик и свойств материала в разной степени влияют виды деформации: растяжение, сжатие или сдвиг, характер напряженного состояния (одноосное, плоское, объемное), кроме того длительность и цикличность нагрузки [22].

Расслоения относят ко второй группе. Воздействие этой группы дефектов на свойства материала является зависимостью главным образом от типа напряженного состояния. Расслоения при растяжении на прочность и модуль упругости фактически не влияют, в то время как при сжатии такого объекта прочность может существенно уменьшаться в зависимости от местоположения и размеров дефекта.

К третьей группе дефектов относятся трещины. При таких дефектах вокруг трещины создается высокая концентрация напряжений. Трещины приводят к нарушению целостности композита. Через трещины материал и отдельные его компоненты подвергаются воздействию окружающей среды, что может привести к появлению дефектов типа расслоение.

Локальные зоны, содержащие повышенное количество волокна, пор и матрицы относят к четвертой группе. Коэффициент опасности дефектов этой группы определяется, в конечном счете, размером, формой и его расположением [25, 31].

Пятую группу составляют стыки и нахлесты, которые в основном влияют на механические характеристики за счет изменения структуры материала: в зоне нахлеста увеличивается степень армирования материала, а в зоне стыка уменьшается. Подобно стыкам и нахлестам на физико-механические свойства материала влияют подмятия, складки, свили и инородные включения, также входящие в пятую группу дефектов. Так как эти дефекты вызывают локальные искривления волокон, то это приводит к изменению структуры композита по сечению дефекта. Степень влияния этих дефектов на механическую прочность и упругость возрастает с увеличением величины армированности композита, так как при большом количестве волокон дефекты одинакового размера влияют на большее число слоев композита [31].

Сколы, отверстия и надрезы относят к шестой группе. Эти дефекты являются концентраторами напряжений, которые уменьшают несущую способность материала. Результаты исследований многочисленных авторов показывают, что влияние отверстий, являющихся концентраторами напряжений, на механическую прочность композита уменьшается с увеличением длительности статического нагружения, а также при увеличении скорости деформирования при одноразовом статическом и динамическом нагружении. При повышении температуры испытаний

эффективный коэффициент концентрации напряжений композитов со сложной схемой армирования также снижается.

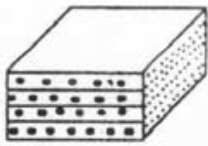
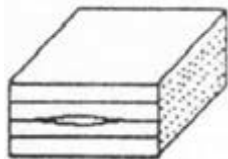
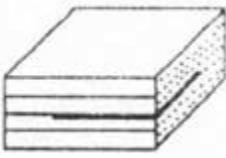
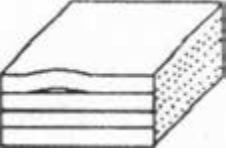
К седьмой группе относятся дефекты, вызванные искривлением волокон в плоскости слоев, с небольшим угловым отклонением волокон армирования от исходного значения. Чаще всего дефекты этого типа не носят масштабный характер и искривления, как правило, наблюдаются только в одном или нескольких слоях материала, при этом их размеры в разы меньше размеров элемента конструкции [10, 13].

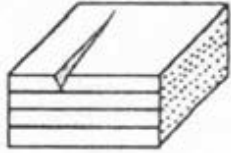
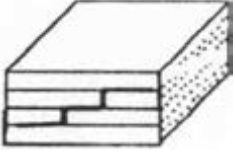
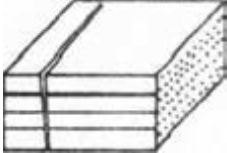
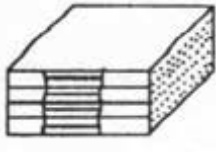
В таблице 1 представлены разные виды дефектов в изделиях и конструкциях из полимерных композиционных материалов, которые возникают в процессе производства и эксплуатации. Кроме того приведены некоторые показатели дефектов с указанием причин их возникновения.

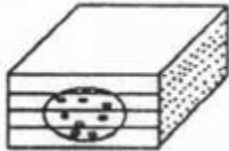
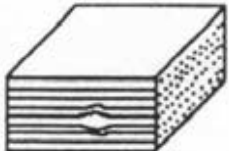
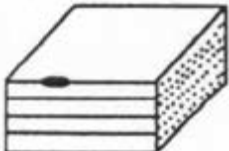
Таблица 1

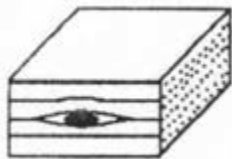
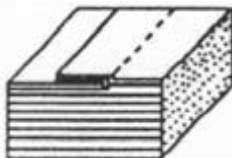
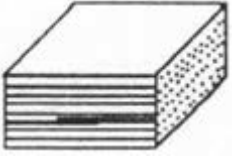
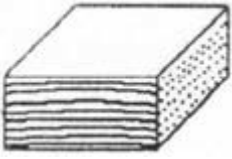
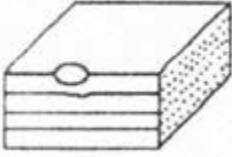
Виды дефектов в изделиях и конструкциях из ПКМ

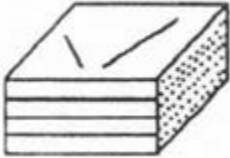
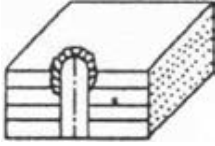
Группа по степени опасности	Вид дефекта	Изображение дефекта	Количественные и качественные показатели	Причины образования
1	Малая степень отверждения связующего компонента		Степень полимеризации меньше 95%	Несоответствие норме количества компонентов в связующем материале. Отклонение от нормы температурно-временного режима изготовления
	Отклонение		Заданные	Отклонение

	от нормы состава материала по объему детали или значительной его части		значения объемного содержания матрицы ($V_M, \%$), волокна ($V_B, \%$), пор ($V_P, \%$)	состава препарата от нормы, нарушение сроков или условий его хранения. Несоблюдение режима формования
2	Расслоение	<p><i>а)</i> замкнутое (изолированное от кромки детали)</p>  <p><i>б)</i> с выходом на кромку детали</p>  <p><i>в)</i> под-поверхностное</p> 	Форма и размеры в плане, глубина залегания	<p>Попадание различных смазок и пленок.</p> <p>Нарушение режимов изготовления: высокая температура, повышенная скорость охлаждения, случайное тепловое или механическое воздействие.</p> <p>Отсутствие антиадгезионного покрытия на части поверхности оснастки</p>

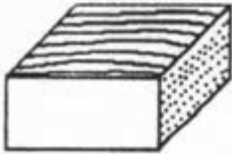
3	Трещина	 <p>a) поверхностная</p>  <p>б) внутренняя</p>  <p>в) сквозная</p>	<p>Геометрические размеры дефекта. Направление трещины. Глубина залегания</p>	<p>Нарушение режима изготовления: нарушена скорость охлаждения. Воздействие высоких механических нагрузок при изготовлении, транспортировке, хранении и эксплуатации</p>
4	Локальные несоответствия норме состава материала	 <p>a) локальная зона с повышенным или пониженным содержанием матрицы или волокна</p>	<p>$V_M, \%$ $V_B, \%$ $V_{II}, \%$</p>	<p>Колебания давления при формовании. Несоблюдение режима изготовления: Изменение времени и величины приложенного давления, скорости нагрева. Отклонение в</p>

		 <p>б) локальная зона с повышенным или пониженным содержанием пор</p>		количественном и качественном составе препарата
5	Раковина		<p>Геометрический размер дефекта. Глубина его залегания</p>	<p>Повышенное содержание летучих элементов в материале. Нарушение скорости нагрева, времени и величины приложенного давления</p>
6	Инородное включение	<p>а) поверхностное</p> 	<p>Геометрические размеры дефекта. Глубина залегания.</p>	<p>Попадание инородного материала при изготовлении, раскрое и выкладке</p>

		б) внутреннее 		
Складка	а) поверхностная  б) внутренняя 	Геометрический размер складки и глубина залегания. Положение дефектной зоны в изделии	Образование складок при сборке и прикатке. Плохое уплотнение. Колебания приложенного давления	
Свиль		Величина изгиба волокон. Геометрические размеры свили. Ориентация и количество слоев, затронутых свилем	Образование свилей при изготовлении. Плохое уплотнение пакета при пропитке, таблетировании и формовании	
Подмятие		Геометрические размеры подмятия. Ориентация на изделии	Дефекты оснастки. Дефекты впитывающих и разделительных слоев. Посторонние включения на	

				поверхности оснастки. Механическое воздействие при эксплуатации
	Царапина		Геометрические размеры дефекта. Ориентация дефекта на изделии	Воздействие при снятии детали с оснастки, транспортировке, хранении, обработке и эксплуатации
	Выкрашивание по кромкам отверстий и гнезд		Геометрические размеры дефекта. Глубина залегания дефекта	Несоблюдение режима обработки. Плохая заточка инструмента.
7	Отрыв поверхностных слоев		Геометрические размеры дефекта. Глубина залегания дефекта	Нарушение условий прижима подкладываемого материала. Неправильная заточка инструмента. Несоблюдение режима обработки – высокая скорость подачи

				инструмента
	Сколы		Геометрические размеры дефекта. Глубина залегания дефекта. Расположение на детали	Несоблюдение режима снятия детали с оснастки, транспортировки, хранения, механообработки.
	Отверстие	<p><i>а) глухое</i></p>  <p><i>б) сквозное</i></p> 	Диаметр и глубина отверстия. Расположение на детали.	Несоблюдение режима механообработки и небрежность при сборке
	Отклонение угла армирования		Угол отклонения от заданного направления. Номера и количество слоев	Ошибка при раскрое и выкладке пакета
7	Отклонение угла армирования		Угол отклонения от заданного направления. Номера и количество	Ошибка при раскрое и выкладке пакета

			слоев	
	Искривление волокон в плоскости слоев		Величина изгиба волны. Ориентация слоев. Геометрические размеры дефекта.	Искривление волокон. Деформирование армирующего материалы при подготовке или изготовлении

Современные композитные материалы имеют уникальные механические свойства по сравнению со сталью или алюминиевыми сплавами: усталостная прочность, специфическая прочность (отношение прочности и веса), специфическая жесткость (отношение модуля упругости и веса), повышенная прочность и высокое сопротивление повреждениям от внешних нагрузок. В противоположность металлам, трещиностойкость современных композитных материалов возрастает с увеличением прочности. Трещиностойкость композитных материалов зависит от предела прочности на разрыв волокна, предела прочности матрицы и прочности соединения на сдвиг. Прочность связи между матрицей и волокном помогает материалу остановить микротрещины. Уникальные свойства композита могут быть получены правильным выбором волокна, концентрацией волокна, ориентацией слоев, и т.д. Использование композитных материалов уменьшает вес пассажирских самолетов на 20 - 40% (рис. 1.4). Использование композитных материалов снижает цену многих инженерных конструкций [14, 21, 24].

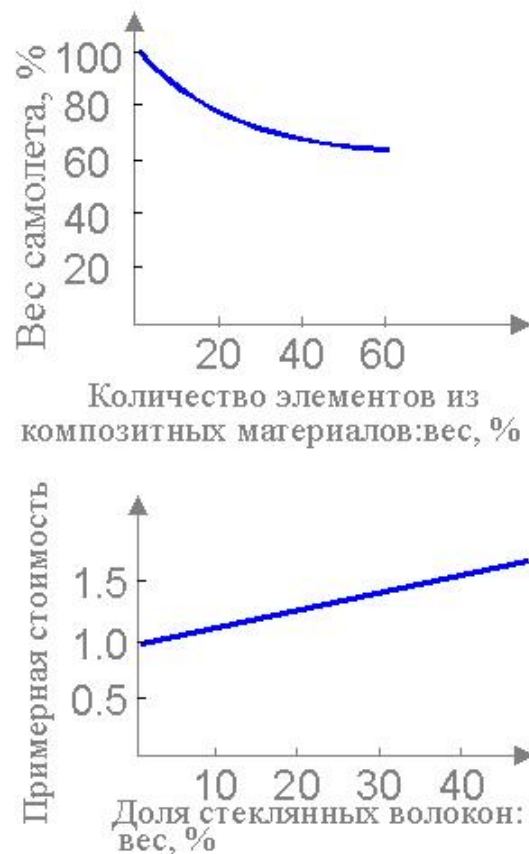


Рис. 1.4. Изменение веса (а) и стоимости (б) самолета при использовании композитных материалов

Увеличение процентного содержания волокон не приводит к резкому увеличению цены материала. Одной из важных стадий производства композиционной конструкции является неразрушающий контроль

1.3 Томография

Томография (в переводе с древнегреческого — сечение) — получение послойного изображения внутренней структуры объекта. В классической интерпретации под томографией подразумевается метод рентгенологического исследования, при котором получается изображение выбранного слоя, лежащего определенной глубине исследуемого объекта. Метод впервые предложил французский врач Андрэ Бокаж спустя несколько лет после открытия рентгеновских лучей. Метод заключался в использовании трёх компонентов рентгенографии: рентгеновской трубки, рентгеновской

плёнки и объекта исследования, два из которых перемещались относительно третьего компонента, в качестве которого традиционно выступал объект контроля. В основе метода лежит интегральное преобразование предложенное в 1917 году австрийским математиком Иоганном Радоном, используя которое появилась возможность определять исходную функцию, если известно ее преобразование. Наибольшее распространение получил прием, использующий согласованное перемещение рентгеновской трубки и кассеты с плёнкой в противоположных направлениях, а исследуемый объект при этом оставался неподвижным. При синхронном перемещении рентгеновской трубки и пленки на ней четким получается только выбранный слой, потому что относительно плёнки только он остаётся неподвижным, всё остальное размывается, практически не влияя на полученное изображение. В настоящее время этот метод именуется классической томографией или линейной томографией. В последнее время стали появляться работы направленные на улучшение качества получаемого изображения [15, 16].

Ультразвуковая томография развита менее рентгеновской томографии. Работы по ультразвуковой томографии основаны на получении изображения за счет отражения упругих волн от неоднородностей, что эквивалентно получению С-скана. Работ по ультразвуковой томографии в теневом варианте практически нет. Это связано с особенностями получения первичных данных с разных ракурсов, что является сложной задачей с учетом обеспечения хорошего акустического контакта. Однако в последнее время стали появляться работы по малоракурсной рентгеновской томографии, когда угловое отличие ракурсов не превышает 90 градусов. Применение этого подхода возможно и в акустике с использованием акустических многоэлементных решеток, одна из которых работает в режиме излучения, а другая в режиме приема [17, 27].

1.4 Средства контроля ПКМ

Тепловой контроль композиционных материалов.

Метод основан на регистрации тепловых изменений в материале вызванных локальными дефектами. Для неразрушающего контроля тепловым методом обычно применяется нестационарный метод [1] для контроля теплофизических характеристик изделий с большой теплопроводностью, изменения нагрев - охлаждение объекта, контроля дефектов типа нарушения сплошности в композитных материалах и сотовых конструкциях, полимерах, контроля тепловых деформаций. Контролируемые параметры: теплопроводность, тепловая постоянная времени, размер дефектов, температурная деформация. Данный метод не может применяться при недопустимой температуре нагрева объекта, временной и пространственной нестабильности излучения объекта.

Известен метод ультразвукового инфракрасного контроля полимерных композиционных материалов [20]. Метод основан на стимуляции дефектного образца импульсным ультразвуковым излучением частотой 22 кГц и мощностью 1 кВт. В процессе контроля в исследуемом образце под воздействием механической внешней нагрузки возникает температурное поле, вследствие рассеяния энергии колебания на дефектах и превращения её в энергию тепловую из-за внутреннего трения и механического гистерезиса. В области нарушения структурной однородности (дефекты) происходят зоны локальных перегревов объекта. Пример термограммы объекта контроля с дефектами, полученными с помощью ультразвуковой нагрузки, приведен на рис. 1.5.

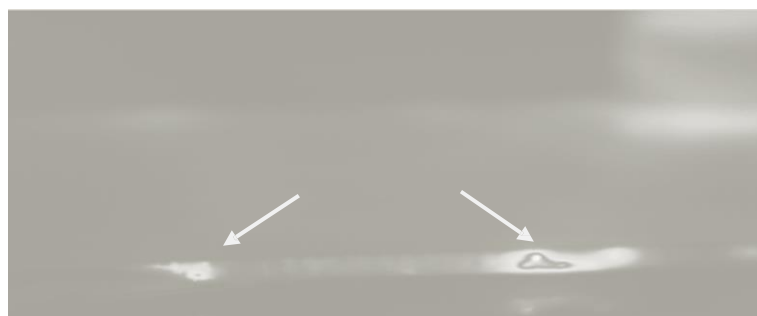


Рис. 1.5. Термограмма сотовой панели с дефектами в процессе механической стимуляции, стрелками показаны дефекты

Над дефектом происходит повышение температуры. При длительной механической стимуляции на объекте контроля наблюдается незначительное повышение температуры по всему образцу, что объясняется теплопроводностью за счет диффузии, а не поглощением ультразвуковой энергии.

Тепловым методом возможно обнаружение дефектов в композиционных материалах не большой толщины на глубине не более 1мм и только дефектов типа трещин или расслоений, т.е. дефектов имеющих протяженность хотя бы в одном направлении. Угол ввода ультразвуковой стимуляции относительно дефектов также влияет на ΔT . Максимальное изменение температуры наблюдается при угле ввода 90° , что соответствует перпендикулярному расположению дефекта, и ΔT уменьшается при изменении угла.

Таким образом возможно обнаружить дефект если дефект будет иметь большие размеры $>1\text{мм}$ и располагаться перпендикулярно углу ввода ультразвуковой стимуляции.

Радиационный контроль.

В промышленности используется томограф ВТ-600. Применяется для количественного неразрушающего контроля и рентгеновской дефектоскопии внутренней структуры большого класса промышленных изделий из композитных материалов аэрокосмического назначения [22]. В задачи томографа входит получение количественных оценок параметров изделий с точной привязкой каждого элемента томограммы в пространстве.

Вычислительный томограф ВТ-600, принцип работы основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры небольших слоев исследуемых изделий посредством совместной вычислительной обработки набора теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании образца в различных направлениях.

Технические характеристики томографа ВТ-600:

1. Максимальный размер объекта, 600 мм

2. Вес объекта, до 300 кг
3. Рабочее поле, $\text{Ø}20\text{--}600$ мм
4. Толщина исследуемого слоя, 0,5–2 мм
5. Чувствительность, 0,05 мм
6. Напряжение рентгеновской трубки, 450 кВ
7. Максимальная энергия ускоренных электронов, 5 МэВ
8. Время сканирования и реконструкция томограммы 600 мм, 3 мин
9. Число элементов в томограмме, $(1024 \times 1024) - (2048 \times 2048)$

При оптимальных технических характеристиках томографа он обладает явным недостатком, толщина контролируемого слоя не более 2мм.

1.5 Ультразвуковые методы дефектоскопии многослойных полимерных композиционных материалов

Классификация методов контроля. Объекты из различных материалов, отдельные элементы которых соединяются между собой клеями, пайкой или иным способом являются многослойными. Из-за конструктивных особенностей этих объектов (малая толщина, существенные отличия в физико-механических свойствах материалов, многие из которых не допускают контакта с жидкостями, большой коэффициент затухания упругих колебаний и др.) ограничивается использование широко распространенных методов неразрушающего контроля. Поэтому для их контроля используют:

А) специальные низкочастотные методы без промежуточной иммерсионной среды, для обеспечения акустического контакта;

Б) обычные акустические методы, применяемые для контроля изделий других типов;

В) модификации методов группы Б.

Отличительной особенностью методов группы А является сухой «точечный» контакт преобразователя с контролируемым изделием. Площадь

контакта не превышает, как правило 0,5 мм. Из методов группы А наиболее широко применяются: импедансный, велосиметрический, и свободных колебаний.

Из методов группы Б наиболее широко используется теневой и эхо-метод, реже зеркально-теневой и резонансный. Средства выявления дефектов в металлических элементах многослойных конструкций здесь не рассматриваются. Предполагается, что эти элементы проконтролированы соответствующими методами и не содержат дефектов [18, 19].

Из методов группы В наиболее широко используются: реверберационный, резонансный и способ оценки прочности склеивания по изменению коэффициента отражения от клеевого шва. Первый и третий методы являются вариантами эхо-метода [20].

Таблица 2

Ультразвуковые методы дефектоскопии многослойных полимерных композиционных материалов

Метод	Выявляемые дефекты	S, мм ²	H max	H min	Недостатки	Дополнительные сведения
Импедансный	дефекты соединений между слоями многослойных конструкциях из ПКМ, металлов, расслоения в пластиках	0.7	2	0.2	Относительно малое значение H_{max}	
Велосиметрический	дефекты соединений неметаллических	2	25	0.3	Интерференционные помехи и неоднозначность	Контроль с односторонним и

	ских покрытий и слоистых пластиков. Контроль соединений неметаллических и металлических слоев				оценки размеров дефектов при использовании непрерывных колебаний	двусторонним доступом
Свободных колебаний (локальный)	дефекты соединений неметаллических покрытий и слоистых пластиков. Контроль соединений неметаллических и металлических слоев	1	30	0.5	Шум при контроле	Возможен контроль материалов с маленькими значениями модуля Юнга и высоким коэффициентом затухания
Акустико-графический	Зоны нарушений соединения элементов конструкции. Дефекты соединения слоев биметаллов	0.05	5	0	Малое значение H_{max} . Уменьшение зоны контроля при одном положении преобразователя с увеличением коэффициента	Отсутствие неконтролируемой зоны. Не нужно сканирование изделия

					затухания	
Эхо-метод	Внутренние дефекты в композитах	0.5	200	5	Невозможен контроль изделий с криволинейным и поверхностями	Возможен контроль со смачиванием и без смачивания поверхности
Теневой	Расслоения, непрочлей в конструкциях из неметаллов и металлов	0.1	-	0	Необходимость двустороннего доступа. Возможен контроль иммерсионным и контактным (через тонкий слой жидкости) способами, а также катящимися преобразователями и преобразователями с воздушной связью	
Реверберационный	Дефекты соединений между металлическим слоем,	0,5	-	$\lambda/2$	Необходимость смачивания изделий или погружения их в жидкость	Контроль осуществляется со стороны металла. При

	соединенным с неметаллом, металлом или легким заполнителем					относительн о небольшом коэффициен те затухании в пластике допускается контроль изделия со стороны пластика
--	--	--	--	--	--	--

Теневой метод дефектоскопии наиболее предпочтительнее т.к. может обнаруживать более мелкие дефекты при больших толщинах заготовки. Основанный на ослаблении дефектами интенсивности упругих колебаний ультразвуковой частоты один из методов ультразвуковой дефектоскопии [23, 25].

Для осуществления контроля в исследуемое изделие с одной стороны вводят ультразвуковые колебания используя различные излучатели. С другой стороны изделия с помощью датчика, установленного напротив излучателя, регистрируют интенсивность этих колебаний, прошедших через толщину материала. Если на пути колебаний окажется дефект, то часть их отразится, и интенсивность колебаний, поступающих на датчик, уменьшится. Теневой метод применяют для обнаружения расслоений, инородных включений, раковин и пр. дефектов [25].

1.6 Ультразвуковые дефектоскопы для контроля многослойных полимерных композиционных материалов

Ведущие мировые производители ультразвуковой техники в номенклатуре своих изделий имеют аппараты для контроля композиционных

материалов. Компания Sonatest выпускает ультразвуковой дефектоскоп RapidScan2, позволяющий контролировать композиционные материалы. Ультразвуковой дефектоскоп представляет собой многофункциональный прибор, обеспечивающий получение А, В и С-сканов, имеет небольшие размеры и отличается высокими эксплуатационными характеристиками. С дефектоскопом используются матричные преобразователи с резиновым протектором оригинальной конструкции, обеспечивающие быстрое получение данных А-скана с качеством иммерсионного контроля. Мощные средства построения стробов и анализа данных позволяют выполнять максимально полный анализ и интерпретацию ультразвуковых сигналов.



Рис. 1.6. Ультразвуковой дефектоскоп RapidScan2

Ультразвуковой дефектоскоп RapidScan2 реализует эхо-импульсный метод, подходящий для контроля средних и больших поверхностей. С-сканы высокого разрешения отражают данные о времени прохождения сигнала и амплитуде при одновременном отображении сканов А и В в реальном времени. Система включает 128-канальный модуль излучения и приёма с уплотнением каналов; новейшее электронное оборудование сбора данных и стандартный переносной компьютер. Управление дефектоскопом осуществляется с помощью интерфейса построенного на основе ОС Windows. Типовые области применения ультразвукового дефектоскопа включают контроль металлических и композитных материалов на основе

стекло и углеродных волокон, выявление расслоений, трещин, дефектов поверхности, очаговой коррозии, газовых пор, включений инородных материалов и контроль целостности клеевых соединений. Программное обеспечение обладает средствами для выполнения полного анализа данных, их оценки и создания протокола контроля. Дефекты помечаются на сканах окружностями, прямоугольниками, эллипсами и даже многоугольниками произвольной формы. По всем отмеченным дефектам сохраняются данные об их размере, координате, глубине и форме. Имеется возможность сохранения, экспорта и печати сканов в виде масштабированных изображений или изображений в натуральную величину с раскладкой на несколько страниц для последующего наложения на деталь и точного определения местоположения дефектов [31, 32, 36].

Компания GE Sensing & Inspection Technologies выпускает ультразвуковой дефектоскоп USN 60 (рис. 1.7).



Рис.1.7. Ультразвуковой дефектоскоп USN 60

Универсальный процессорный дефектоскоп USN 60 с цветным ЖК-экраном имеет понятное меню с описанием отдельных функций и «помощью», измеряет координаты дефектов (глубина залегания и расстояние до проекции дефекта на поверхность при работе с наклонными преобразователями). Дефектоскоп USN 60 оснащен системой построения кривой амплитуда-расстояние по эталонным отражателям и временной регулировкой чувствительности, с функцией встроенных электронных АРД-шкал (по дополнительному заказу) для стандартных преобразователей и заданием характеристик преобразователя любого типа, кроме отдельно-

совмещенных, диапазон калибровки по лучу до 28.000 мм (сталь, продольные волны).

Отличительные особенности дефектоскопа USN 60:

- Цветной ЖК-дисплей с высокой контрастностью и большим углом обзора;
- Понятное меню с описанием отдельных функций и «помощью»;
- Измерение координат дефектов, система построений АРК по эталонным отражателям и ВРЧ, с функцией встроенных электронных АРД-шкал (по дополнительному заказу) для стандартных преобразователей и заданием характеристик преобразователя любого типа, кроме отдельно-совмещенных;
- Режимы остроконечной и прямоугольной формы зондирующего импульса;
- Выходы ТТЛ для управления внешними устройствами;
- Возможность запуска развертки и стробирующих устройств АСД от поверхностного отражения при иммерсионном контроле;
- Подавление донного эхо-сигнала для контроля качества акустического контакта, внешняя синхронизация;
- Возможность работы с прямоугольным зондирующим импульсом для повышения разрешающей способности при контроле изделий авиапромышленности [36].

Таблица 3

Технические данные дефектоскопа USN 60

Технические данные дефектоскопа	
Частотный диапазон	0,25 - 25 МГц; узкополосные: 1,2,5,10,15 МГц; широкополосные: 0,25 - 2, 10 - 25МГц
Диапазон калибровки по глубине	мин. 0 - 1 мм (по стали), макс. 0 - 28 м
Скорость звука	250 - 16000 м/с
Смещение изображения	от - 20 до 3500 мкс (от - 60 мм до 10,5 м по стали)
Компенсация задержки в призме	0 - 999,9 мкс
Регулировка	0 - 110 дБ, ступенями: 0,1; 0,5; 1; 2; 6; 12 дБ

усиления	
Частота следования импульсов	15 - 6000 Гц
Форма представления сигналов	двух- или однополупериодное детектирование по положительной или отрицательной полуволне, ВЧ-представление, 4-х ступенчатое демпфирование
Отсечка	до 80%
Измерение амплитуды	в % от высоты экрана, в дБ по отношению к опорному уровню
Измерение расстояния	по фронту или по пику сигнала
ВРЧ	до 16 опорных точек, динамический диапазон 40 дБ, крутизна 6 дБ/мкс
Внутренняя память	100 блоков настройки с изображениями сигналов, запоминание результатов измерения толщины в файлах различного формата
Интерфейс	RS 232 C, ввод и вывод данных, параллельный порт
Питание	блок литий-ионных аккумуляторов, металл-гидридные или никель-кадмиевые аккумуляторы, 6 шт. (9 А/ч) или сухие батареи
Время работы от батарей	до 8 часов от блока литий-ионных аккумуляторов
Размеры	282 мм x 171 мм x 159 мм (Ш x В x Г)

Проведенный анализ показывает, что существующие зарубежные ультразвуковые томографы используют эхоимпульсный режим, который не позволяет проводить контроль композитных материалов толщиной более 10 мм.

Отечественная промышленность выпускает ряд ультразвуковых дефектоскопов серии УД. Основное назначение ультразвукового дефектоскопа УДЗ-71 (рис. 1.8) это выявление дефектов типа нарушения сплошности и однородности материалов, в готовых изделиях, полуфабрикатах и сварных (паяных) соединениях.



Рис. 1.8. Ультразвуковой дефектоскоп УДЗ-71

Таблица 4

Основные технические характеристики ультразвукового дефектоскопа
УДЗ-71.

Рабочие частоты	от 0,4 до 15 МГц
Диапазон контролируемых толщин (по стали)	0...6000 мм
Динамический диапазон усиления приемного тракта	100 дБ
Абсолютная погрешность измерения - глубины залегания дефекта, - отношения амплитуд сигналов	$\pm(0,1+0,005 N x)$ мм $\pm(0,2+0,03 N x)$ дБ
Время непрерывной работы от аккумуляторной батареи, не менее	8 час
Масса прибора, не более	0,8 кг
Габаритные размеры	105 × 190 × 80 мм

Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70 предназначен для обнаружения дефектов в металле. Он может выпускаться в железнодорожной версии, которая предназначена для обнаружения дефектов в деталях и узлах локомотивов, МВПС, в элементах колесных пар вагонов. Прибор имеет малые габариты и прочный алюминиевый корпус, что как нельзя лучше подходит для тяжелых условий эксплуатации. Высокая контрастность и разрешающая способность большого цветного дисплея прибора делают

работу с ним удобной и приятной. Настраивая прибор в лаборатории легко можно вызвать готовую настройку на объекте.

Основные технические характеристики

Диапазон контролируемых толщин (по стали) от 2 до 5000 мм.

Параметры зондирующего импульса:

- амплитуда на нагрузке 50 Ом не менее 180 В.
- длительность не более 80 нс.
- частота повторения 30; 60; 120; 250; 500; 1000 Гц
- несущие частоты 0,4; 1.25; 1.8; 2.5; 5.0; 10.0 МГц

Параметры усилительного тракта:

- диапазон регулировки усиления 0...100 дБ.
- шаг регулировки усиления 0,5 или 1,0 дБ.
- дискретность изменения усиления скачком "+дБ" 3 ... 30 дБ.

Диапазон задержки развертки -2 ... +5000 мм.

Параметры измерительного тракта:

- диапазон залегания дефектов (по стали) 2 ... 5000 мм.
- дискретность измерения глубины 0,1 мм.
- погрешность измерения глубины $\pm (0,5 + 0,02 H)$ мм.
- диапазон установки угла ввода ПЭП 0...90°.
- дискретность установки 1°.
- количество стробов АСД 2.
- диапазон установки скорости УЗК 1000...15000 мс.
- диапазона регулировки ВРЧ 80 дБ.

Отсечка - линейная 0...100% высоты экрана.

Размер рабочей части экрана не менее 320 x 240 точек.

Все дефектоскопы имеют высокие технические характеристики и способны работать в отдельном режиме, при котором возможен контроль теневым методом. Однако все эти дефектоскопы одноканальные и не позволяют строить томограмму зоны контроля.

ООО «Акустические контрольные системы», г. Москва выпускает ряд ультразвуковых томографов различного назначения:

- Низкочастотный ультразвуковой томограф A1040 MIRA
- Низкочастотный ультразвуковой сканер-топограф A1050 PlaneScan
- Высокочастотный ультразвуковой томограф A1550 IntroVisor

Ультразвуковой томограф A1040 MIRA предназначен для определения целостности материала в конструкциях из бетона, железобетона и камня при одностороннем доступе к ним, выявления инородных включений, обнаружения полостей непроливов, расслоений и трещин, а также может работать в режиме толщиномера. Возможен контроль объектов с толщиной до 2,5 метров.

Томограф A1040 MIRA представляет собой измерительный прибор с автономным питанием, которым проводят многоканальный последовательный сбор данных и последующую томографическую обработку полученных данных. Прибор содержит многоэлементную антенную решетку из 48 (12 блоков по 4 элемента в каждом) преобразователей поперечных волн, использующих сухой точечный контакт и керамические износостойкие наконечники. Это обеспечивает их длительное использование по шероховатым поверхностям, без применения имерсионной жидкости. Каждый преобразователь имеет независимый пружинный подвес, что позволяет проводить контроль по неровным поверхностям. Номинальная рабочая частота решетки 50 кГц. В интерфейс прибора введена возможность использования лазерных лучей, которые проецируются на поверхность объекта контроля, позволяя оператору корректно соблюдать шаг перестановки антенного устройства в процессе полной технической диагностики исследуемого объекта [36].

Преимущества

- Визуализация внутренней структуры объекта контроля при одностороннем доступе

- Высокая производительность - реконструкция одной томограммы занимает 3 секунды
- Простота в использовании
- Высокая точность измерений и чувствительность прибора к различным отражателям
- Не требуется подготовка поверхности к контролю
- Износостойкие наконечники преобразователей

Особенности

- Автономная работа с данными без внешнего компьютера
- Сухой акустический контакт
- Адаптация антенного устройства к неровностям поверхности конструкции
- Автоматическое измерение скорости распространения ультразвуковой волны в объекте контроля
- Трехмерная реконструкция объекта контроля, отображение томограмм любого сечения зоны контроля

A1550 IntroVisor - ультразвуковой дефектоскоп с цифровой фокусировкой антенной решетки и томографической реконструкцией зоны контроля. Предназначен для контроля металлов и пластмасс. Обеспечивает поиск дефектов в виде изображения сечения в режиме реального времени.

Преимущества томографии

Быстрота и эффективность

- Оперативный и высокопроизводительный поиск дефектов в сварных швах, в изделиях из металлов, пластмасс и композитов с подробным документированием полученных результатов.
- Реконструкция томограммы зоны контроля в режиме реального времени с частотой смены изображения 25 кадров в секунду.
- Большая апертуры антенных решеток и за счет этого возможен контроль вдоль линии сварного шва без поперечного сканирования.
- Высокая частота кадра, при этом обеспечивается высокая скорость

сканирования вдоль сварного соединения до 50 мм/с [46, 47].

Технические характеристики ультразвукового томографа **A1550 IntroVisor:**

Параметр	Значение
Диапазон устанавливаемых скоростей ультразвука	1 000 – 10 000 м/с
Рабочие частоты преобразователей	1 – 10 МГц
Отклонение рабочих частот от номинальных	± 10%
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения толщины D с прямым преобразователем	±(0,01D+0,2) мм
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения глубины дефекта H с прямым преобразователем	±(0,01H+0,2) мм
Диапазоны измерения координат дефекта (по стали) наклонным преобразователем 65°:	
- глубины H	3 - 40 мм
- дальности по поверхности L	5 - 75 мм
Средний срок службы, не менее	8 лет
Условия эксплуатации:	
- температура воздуха	от -10 до +55 °С
- относительная влажность воздуха при температуре плюс 35 °С, не выше	95 %
Размер томограммы	256 x 256
Шаг реконструкции томограммы	0,1 - 2,0 мм
Номинальные рабочие частоты ультразвука	1,0; 1,8; 2,5; 4,0; 5,0; 7,5; 10,0 МГц
Диапазон перестройки скорости ультразвука	1 000 – 10 000 м/с
Динамический диапазон усиления	0 - 80 дБ
Шаг изменения коэффициента усиления	1, 6, 10 дБ
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения глубины дефекта H с антенной	±(0,03H+1)мм

решеткой продольных волн

Пределы допускаемой основной абсолютной

погрешности измерения координат дефекта с антенной

решеткой поперечных волн

глубины H

$\pm(0,03H+1)$ мм

дальности по поверхности L

$\pm(0,03L+1)$ мм

Все акустические томографы фирмы «АКС» работают только в эхо-импульсном режиме и поэтому реконструируют томограмму только по отраженным сигналам. Контроль композитных материалов толщиной более 10 мм возможен только низкочастотным дефектоскопом. Однако при этом разрешающая способность и чувствительность оказываются существенно ниже требований, предъявляемых к современным диагностическим системам для контроля композитных материалов.

ВЫВОДЫ

В настоящее время существуют акустические приборы, позволяющие контролировать композиционные материалы. Однако они имеют существенные ограничения. Во первых, приборы позволяющие определять глубину залегания дефекта работают в эхо-импульсном режиме и поэтому не позволяют контролировать изделия толщиной более 20 мм. Во вторых, приборы, которые позволяют контролировать изделия толщиной более 20 мм, работают в теневом варианте, поэтому они не позволяют определять глубину залегания дефектов, так как используют одноканальный вариант. Для совершенствования технологического процесса производства композитных материалов требуется знать на каких толщинах появляются дефекты, поэтому возникла необходимость исследовать возможности малоракурсной ультразвуковой томографии для контроля композиционных материалов и определить предельные характеристики [55, 59, 66].

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОРАКУСНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Практическое применение теневого метода в неразрушающем контроле с применением ультразвукового излучения известно давно [23, 24]. В основном, использование ограничивалось акустическим трактом, образованным одним излучателем и одним приёмником. Однако, начиная с семидесятых годов прошлого столетия, делались неоднократные попытки разработки и исследования аппаратуры, основанной на линейных антенных решётках [25, 26]. В качестве преимущества предлагаемых решений указывалось на высокую производительность контроля по сравнению с одиночным каналом.

Активное совершенствование теневого метода контроля началось с внедрением реконструктивной томографии, вычислительный аппарат которой основан на преобразовании И. Радона. Убедительные достижения наблюдаются в медицинской диагностике, основанной на рентгеновской томографии. Неразрушающий контроль, и особенно ультразвуковой неразрушающий контроль таких успехов не демонстрирует. Связано это с вполне объективными обстоятельствами. В первую очередь, это сложности получения необходимого набора проекций. Зачастую возможность получения ограничена размерами и конфигурацией контролируемого изделия и антенной решетки. Например, весьма эффективен теневой контроль для исследования многослойных композиционных материалов. Однако их плоскостная конфигурация вообще исключает почти все проекции кроме проекций по нормали к поверхности за исключением малоракурсных.

Термин «малоракурсная» по отношению к томографии может иметь два значения. Во-первых, это может означать, что имеется всего две проекции, которые сдвинуты на угол 90° . Анализ такой ситуации приведён в работе [27,29]. Во-вторых, это может отражать ситуацию, когда имеется ограниченный набор проекций, причём диапазон углов, под которыми они

получены, составляет значительно меньше 90° [28, 30]. Именно такое положение возникает при контроле многослойных композиционных материалов. Задача данной главы состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении.

2.1 Расчет амплитуды сигнала на приемнике

При контроле теньвым методом амплитуда сигнала на приемнике будет определяться поглощением и расхождением упругих колебаний в контролируемой среде [31]:

$$U = \frac{U_0}{L} e^{-\alpha L}, \quad (2.1)$$

где U_0 – амплитуда колебания частиц вблизи источника; U – амплитуда на расстоянии L от источника; α – коэффициент поглощения; e – число Непера ($e = 2,72$).

При наличии дефекта амплитуда сигнала на приемнике будет дополнительно уменьшаться за счет дефекта:

$$U = \frac{1}{\mu} \frac{U_0}{L} e^{-\alpha L}, \quad (2.2)$$

где μ – коэффициент ослабления сигнала дефектом.

При теньвом методе контроля получают как правило теньвую картинку объекта контроля, т.е. проекцию внутренней структуры объекта контроля на плоскость приемника. Однако при использовании акустических решеток можно провести трехмерную реконструкцию объекта контроля. В этом случае амплитуда сигнала в заданной точке будет определяться суммой сигналов от нескольких источников, проходящих к конкретному приемнику через эту точку:

$$U_i = \sum_{i,j} \frac{U_j}{L_{i,j}} e^{-\alpha L_{i,j}}, \quad (2.3)$$

где U_j – амплитуда колебания частиц вблизи источника с номером j ; U_i – амплитуда на расстоянии L от источника с номером j ; i – номер точки, j – номер элемента излучающей антенны, α – коэффициент затухания [38, 40].

На рис. 2.1 показан акустический тракт для теневого метода контроля с использованием акустических антенных решеток.

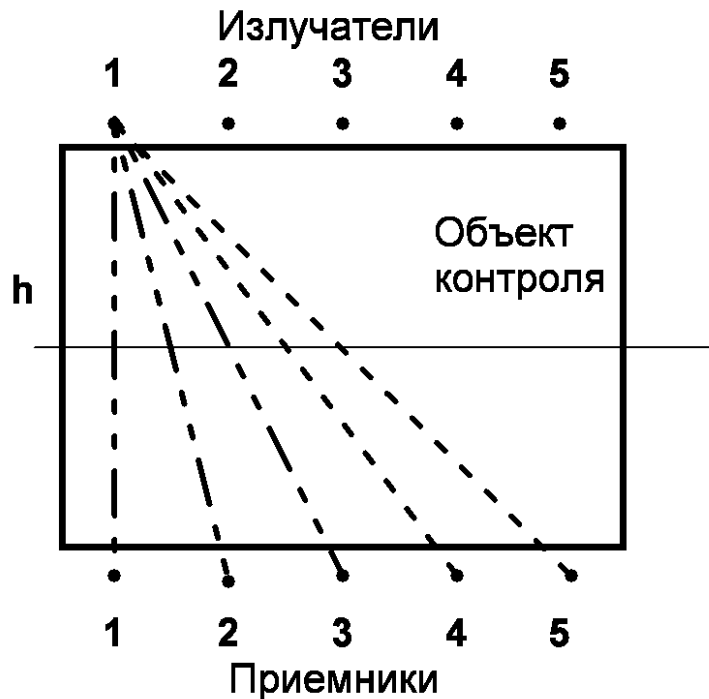


Рис. 2.1. Акустический тракт теневого метода контроля с использованием точечных элементов акустических антенных решеток

Условием прохождения луча от i -го излучателя к j -му приемнику через точку с координатами (x_n, y_n) является решение уравнения [32]:

$$(x_n - x_i)(y_j - y_i) = (x_j - x_i)(y_n - y_i), \quad (2.4)$$

где (x_n, y_n) – координаты исследуемой точки N, (x_i, y_i) – координаты излучателя, (x_j, y_j) – координаты приемника.

Однако количество лучей, проходящих через различные области объекта контроля, будет различным. Результаты расчета количества лучей через различные области прямоугольного объекта контроля приведены на рис. 2.2. При расчете были выбраны следующие параметры: расстояние между соседними излучателями в антенной решетке равно 10 мм, расстояние между приемной и излучающей антенными решетками 400 мм, расстояние между соседними приемниками в антенной решетке равно 10 мм, размер излучателя равнялся размеру приемника и составлял 6 мм.

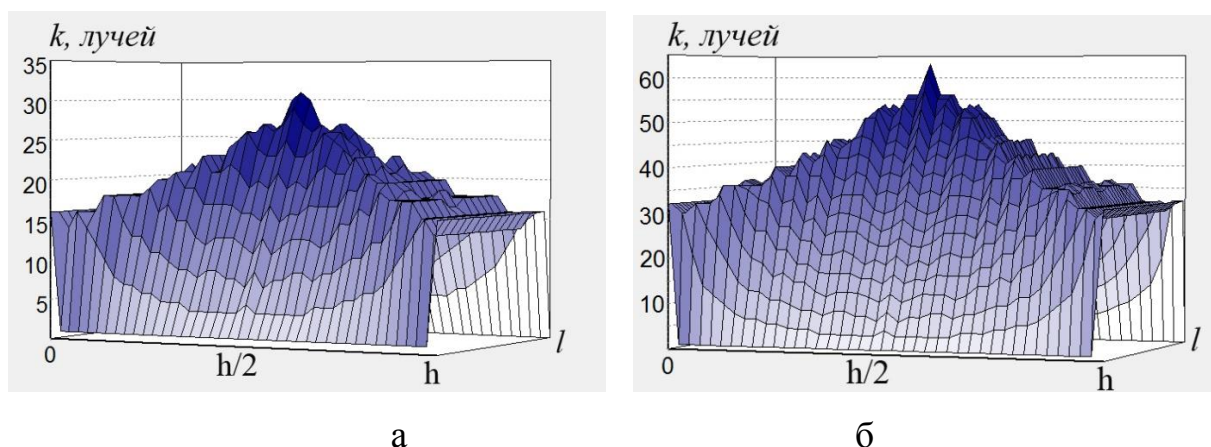


Рис. 2.2. Распределение количества лучей, проходящих через различные зоны объекта контроля, а – количество элементов в антенной решетке равно 16, б – количество элементов в антенной решетке равно 32

При указанных параметрах в центре зоны контроля количество лучей составляет 31 когда количество элементов в антенной решетке равно 16, составляет 63 когда количество элементов в антенной решетке равно 32, на краях зоны контроля на той же глубине (слева и справа от центра) – 1. При увеличении дистанции от излучающей решетки количество лучей монотонно увеличивается и достигает максимума на дистанции равной половине расстояния до приемной антенной решетки, затем монотонно уменьшается. Из рисунка видно, что количество лучей в центре зоны контроля существенно превышает количество лучей на краях зоны контроля. Кроме того, распределение количества лучей по зоне контроля крайне неравномерное, поэтому распределение амплитуды сигнала в зоне контроля будет также

неравномерным даже при отсутствии дефектов. Это необходимо учитывать при расчете томографического изображения [46, 48].

Влияние количества элементов антенной решетки на распределение количества лучей в центре зоны контроля показано на рис. 2.3. В расчете использовались следующие данные: размер излучающей антенной решетки равнялся размеру приемной антенной решетки и составлял равно 16 мм, расстояние между приемной и излучающей антенными решетками 400 мм, расположение элементов в решетках равномерное, размер излучателя равнялся размеру приемника и составлял 6 мм.

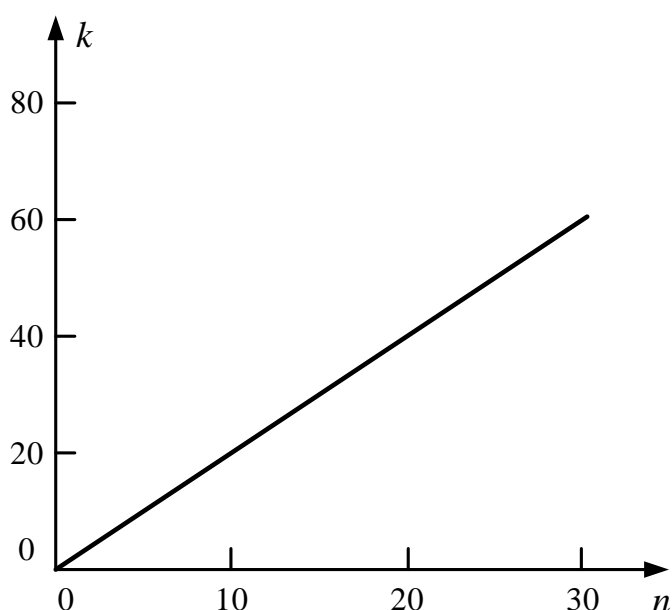


Рис. 2.3. Зависимость количества лучей в центре зоны контроля от количества элементов антенной решетки

Если излучатель и приемник имеют размеры отличные от точечного, то в этом случае акустический тракт будет представлен рис. 2.4.

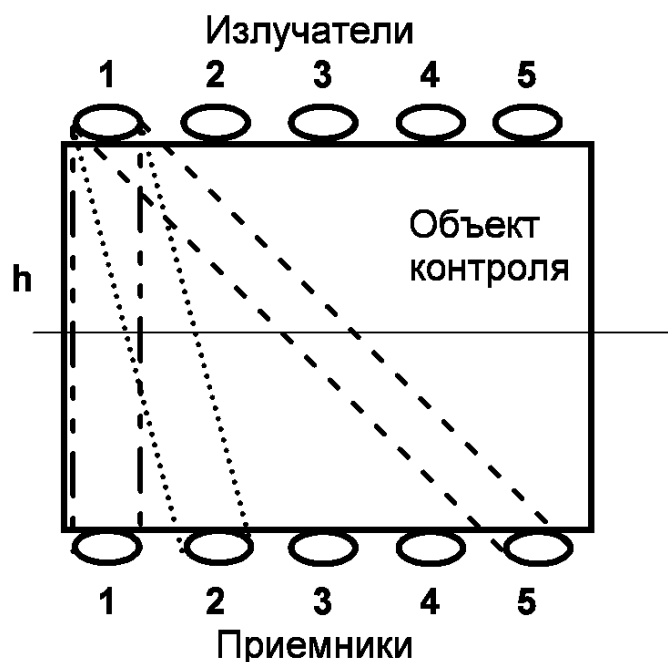


Рис. 2.4. Акустический тракт теневого метода контроля с использованием элементов акустической антенной решетки отличных от точечного.

Анализ акустического тракта производится путем представления каждого излучателя и приемника акустических решеток в виде набора из k точечных элементов. Условием прохождения k -го луча от i -го излучателя к j -му приемнику через точку с координатами (x_n, y_n) является решение уравнения [32]:

$$\left[x_n - \left(x_i + m \frac{d}{k} \right) \right] (y_j - y_i) = \left[\left(x_j + m \frac{d}{k} \right) - \left(x_i + m \frac{d}{k} \right) \right] (y_n - y_i), \quad (2.4)$$

где (x_n, y_n) – координаты исследуемой точки N, (x_i, y_i) – координаты центра излучателя, (x_j, y_j) – координаты центра приемника, d – диаметр излучателя и приемника, k – количество элементов, из которых состоит каждый излучатель и приемник, m – номер луча, который может изменяться:

$$m = -\frac{k}{2} \dots \frac{k}{2}.$$

Для количественной оценки выявляемости дефектов при теневом методе контроля используют коэффициент k_D , который определяется отношением амплитуды сигнала на приемнике при наличии дефекта к амплитуде сигнала на приемнике при отсутствии дефекта при неизменном зондирующем сигнале:

$$k_D = \frac{A_D}{A_0}, \quad (2.5)$$

где A_0 – амплитуда сигнала на приемнике при отсутствии дефекта, A_D – амплитуда сигнала на приемнике при наличии дефекта.

Коэффициент k_D изменяется от 0 до 1, значение его тем меньше, чем больше дефект, и оно не зависит от номинального значения амплитуды сигнала A_0 [1]. При моделировании используются две одинаковых линейных антенных решетки, расположенные параллельно. Одна решетка является излучателем, а другая – приемником. Эти решетки являются эквидистантными, а элементарные преобразователи их составляющие абсолютно одинаковы. При моделировании будет использоваться коэффициент k_D , как основа для построения томографического изображения.

Алгоритм работы акустического тракта основан на принципе: элементы излучающей решетки излучают последовательно один за другим, а все элементы приемной решетки принимают одновременно. В результате формируется множество, состоящее из n^2 данных измерения, где n – число элементов в антенной решётке. Состав и конфигурация акустического тракта показаны на рис. 2.5.

Условия функционирования моделируемого акустического тракта предполагают оптикогеометрическую нотацию траекторий излучения. На основании теории дифракции Кирхгофа [33] и предположении о наличии абсолютно плоских волн в данном акустическом тракте можно утверждать, что дифракционный интеграл (интеграл Рубиновича) в области тени очень быстро стремится к нулю [58].

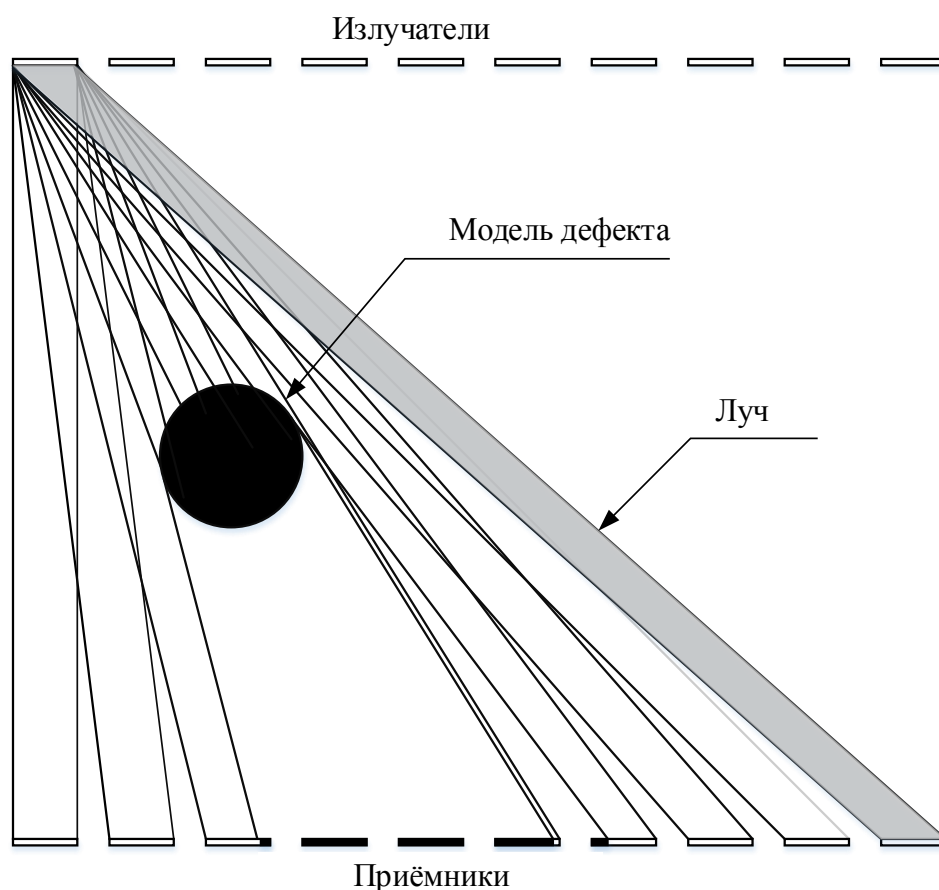


Рис. 2.5. Акустический тракт с использованием акустических антенных решеток

Таким образом, данная цифровая модель акустического тракта справедлива для высокочастотного случая соотношения длины волны и периметра модели дефекта. Кроме того, следует подчеркнуть, что расстояние между излучателем и приёмником предполагается достаточно большим. Следовательно, пьезопреобразователи, составляющие антенные решётки, располагаются в зоне дифракции Фраунгофера, а их рабочая поверхность значительно меньше первой зоны Френеля. Это позволяет считать распределение ультразвукового давления на элементарном приёмном элементе равномерным, а амплитуду принятого сигнала прямопропорциональной «озвученной» поверхности. Кроме того, линейный размер элементов решёток больше длины волны излучения. Поэтому каждая пара элементов излучатель-приёмник формирует лучевую трубку, форма и

размеры которой определяются элементами антенных решёток и расстоянием между приёмником и излучателем.

Моделирование томографической реконструкции теневого метода контроля состоит из двух очевидных этапов. Первый этап содержит процедуру создания множества нормированных сигналов приёмной антенны при условии расположения заданной модели дефекта в зоне контроля. Второй этап заключается в реконструкции по этим исходным данным двумерного томографического изображения [60, 63].

На первом этапе задается дефект в виде одного или двух дисков. При этом была выбрана система координат, показанная на рис. 2.6, причем первый приемник располагается в начале координат. На рис. 2.6 используются следующие обозначения: d – размер пьезоэлементов, r – расстояние между пьезоэлементами, n_d – количество пьезоэлементов в каждой решетке, h – расстояние между решетками, $k_d [i,j]$ – коэффициент пары: излучатель i и приемник j .

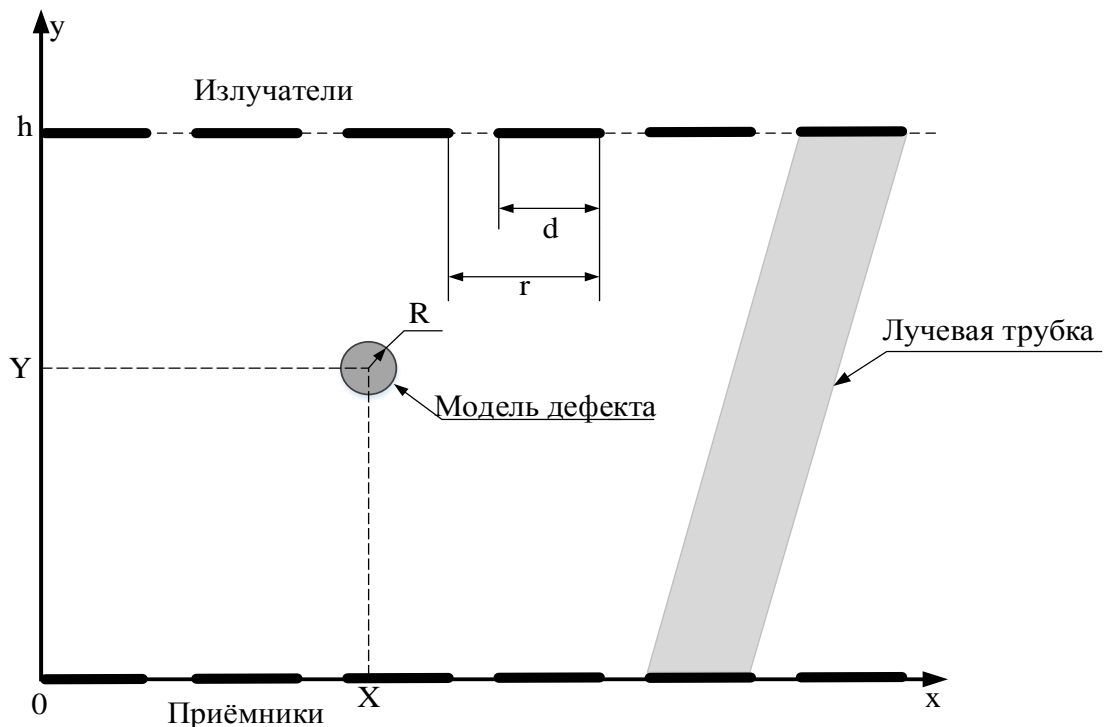


Рис. 2.6. Расположение антенных решёток в декартовой системе координат.

Каждая пара элементов излучатель-приемник имеет свою лучевую трубку, соединенный между излучателем и приемником, и размеры которого ограничены размерам элементов. При моделировании считаем, что только дефект, закрывающий лучевую трубку пары элементов, влияет на амплитуду сигнала, принимаемого приемником, и амплитуда приемного сигнала линейно зависит от площади приемника незакрытой дефектом. Если дефект полностью закрывает лучевую трубку, то на приёмник не поступает сигнал, т.е. коэффициент $k_D = 0$, если дефект частично закрывает лучевую трубку, то коэффициент

$$k_D = 1 - \frac{S_D}{S_0}, \quad (2.6)$$

где S_D – частичная площадь дефекта, закрывающая лучевую трубку; S_0 – площадь сечения лучевой трубки.

Если в лучевой трубке отсутствует дефект, то $k_D = 1$.

Множество сигналов приёмной антенны рассчитывается в соответствии с выражением (2.6) с помощью методов аналитической геометрии.

Для выбранной системы координат, координаты элементов определяются следующим образом.

Координата левого края приемника i :

$$y_p(i) = 0; x_p(i) = (i - 1)r \quad (2.7)$$

Координата правого края приемника i :

$$y'_p(i) = 0; x'_p(i) = x_p + d \quad (2.8)$$

Координата левого края излучателя j :

$$y_i(j) = h; x_i(j) = (j - 1)r \quad (2.9)$$

Координата правого края излучателя j :

$$y'_i(j) = h; x'_i(j) = x_i(j) + d \quad (2.10)$$

Рассмотрим вариант акустического тракта с одним дефектом в виде диска, имеющего радиус r_0 с координатами центра в точке O как показано на рис. 2.7.

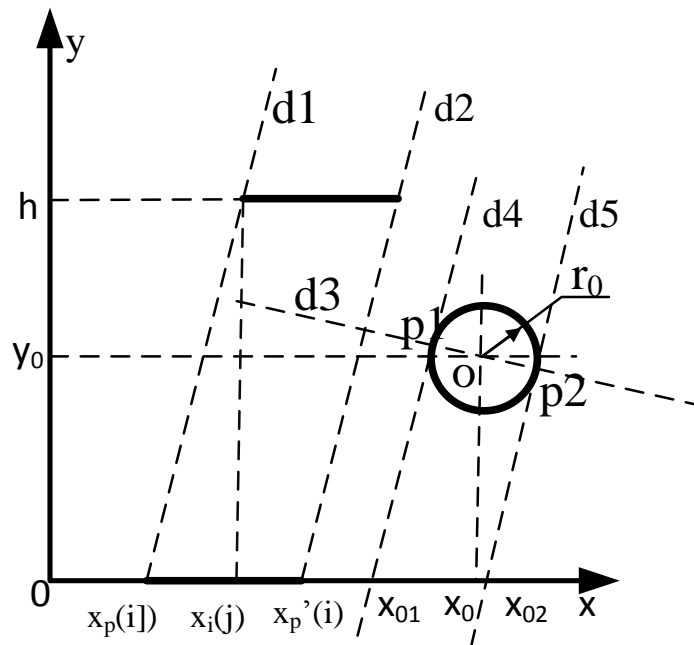


Рис. 2.7. Акустический тракт с одним дефектом круглой формы

Для определения коэффициентов $k_D(i,j)$ пары i -ый излучатель и j -ый приемник рассмотрим относительное положение пучка этой пары и дефекта. Для этого строим перпендикуляр из центра дефекта (линия $d3$ на рис. 2.7) на линию, соединяющую точки с координатами правого края приемника и излучателя (линия $d2$ на рис. 2.7). Затем строим проекцию дефекта на ось Ox ($x_{01}x_{02}$ на рис. 2.7) в новой системе координат ($d2$ - $d3$), проходящей через точку левого края излучателя j в точку левого края приёмника i и сравниваем

координаты этой проекции с координатами точек левого и правого края приемника i . При этом возможны два варианта.

1. Если $i=j$, то

$$x_{01} = x_0 - r_0; \quad x_{02} = x_0 + r_0$$

2. Если $i \neq j$, то x_{01} и x_{02} определяются таким образом: угловой коэффициент линии $d1$, проходящей через точку левого края излучателя $(x_i(j), h)$ и точку левого края приемника $(x_p(i), 0)$, равен:

$$a_1 = \frac{h}{x_i(j) - x_p(j)} \quad (2.11)$$

Уравнение линии $d3$, проходящей через центр дефекта $O(x_0, y_0)$ и перпендикулярно линии $d1$, имеет вид:

$$y = a_2x + b_2, \quad (2.12)$$

где $a_2 = -\frac{1}{a_1}$, $b_2 = y_0 - a_2x_0$

Уравнение круга с центром в точке $O(x_0, y_0)$ и радиуса r_0 имеет вид:

$$r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (2.13)$$

Решая систему уравнений (2.12) и (2.13) получим координаты (x_1, y_1) , (x_2, y_2) точек пересечения круглого дефекта с центром в точке $O(x_0, y_0)$ и линии $d3$. Далее через точки с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) строим линии $d4$ и $d5$ параллельные линии $d1$ (рис. 2.7). Уравнение линии $d4$ будет иметь вид:

$$y = a_1x + b_3,$$

где $b_3 = y_1 - a_1x_1$.

Уравнение линии $d5$:

$$y = a_1x + b_4,$$

где $b_4 = y_2 - a_1 x_2$

Линии d4 и d5 пересекают ось OX в точках $(x_{01}, 0)$ и $(x_{02}, 0)$, следовательно:

$$x_{01} = \frac{-b_3}{a_1} = \frac{-y_1 - a_1 x_1}{a_1} = x_1 - \frac{y_1}{a_1}.$$

Аналогично :

$$x_{02} = x_2 - \frac{y_2}{a_1}$$

При расчете координат x_{01} и x_{02} возможны следующие случаи:

- Если $x_{01} > x_p'(i)$ или $x_{02} < x_p(i)$ то дефект не закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_d(i, j) = 1$.
- Если $x_{01} \leq x_p(i)$ и $x_{02} \geq x_p'(i)$ то дефект полностью закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_d(i, j) = 0$.
- Если $x_{01} \geq x_p(i)$ и $x_{02} \leq x_p'(i)$ то дефект частично закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_d(i, j) = 1 - \frac{2r_0}{d}$.
- Если $x_{01} \leq x_p(i)$ и $x_{02} \leq x_p'(i)$ то дефект частично закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_d(i, j) = 1 - \frac{x_{02} - x_p(i)}{d}$.
- Если $x_{01} \geq x_p(i)$ и $x_{02} \geq x_p'(i)$ то дефект частично закрывает лучевую трубку пары излучатель j - приёмник i и $k_d(i, j) = 1 - \frac{x_p'(i) - x_{01}}{d}$.

Выше приведенный анализ был реализован в виде моделирующей программы, алгоритм которой показан на рис.2.8.

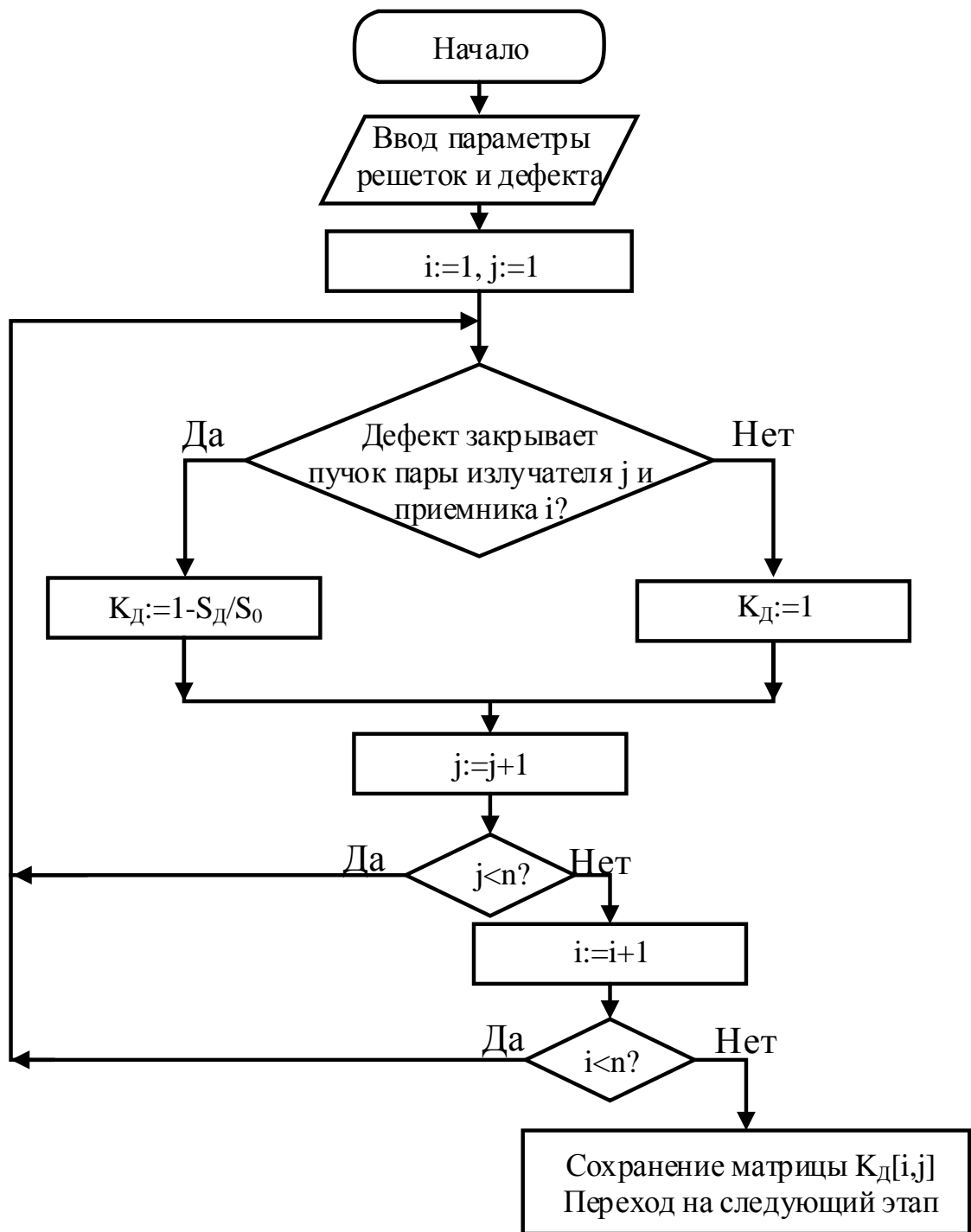


Рис. 2.8. Алгоритм расчета коэффициентов k_d при наличии одного дефекта круглой формы в зоне контроля

Рассмотрим вариант акустического тракта с двумя дефектами в виде дисков, имеющих радиусы r_{01} и r_{02} , и соответственно координаты центров (x_{01}, y_{01}) , (x_{02}, y_{02}) . В приведенном примере для определенности выбрано

$x_{01} \leq x_{02}$ как показано на рис. 2.9. При этом нужно учитывать случай, когда дефекты закрывают друг друга.

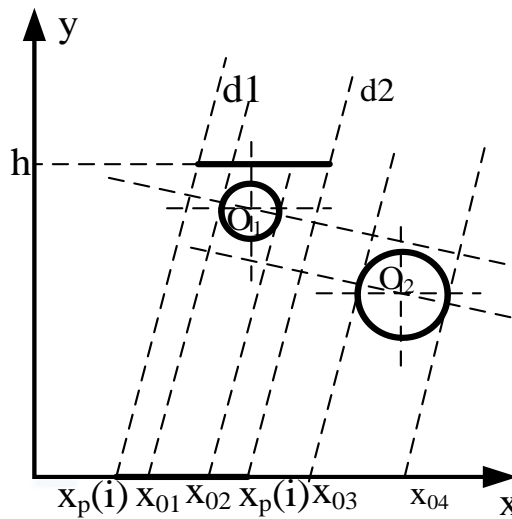


Рис. 2.9. Акустический тракт с двумя дефектами круглой формы

Для определения коэффициентов $k_d [i,j]$ пары i -ый излучатель и j -ый приемник рассмотрим относительное положение пучка этой пары и дефекта. Аналогично методики определения коэффициентов для акустического тракта с одним дефектом, находим проекции $x_{01}x_{02}$ и $x_{03}x_{04}$ для каждого дефекта и для каждой пары излучатель j - приёмник i .

Для акустического тракта с двумя дефектами возможны следующие случаи:

- Если $x_{02} \leq x_{03}$ то дефекты не закрывают друг друга, и $k_d(i,j)$ рассчитывается для каждого дефекта :

$$k_{d1}(i,j) = 1 - \frac{d_{01}}{d}$$

и

$$k_{d2}(i,j) = 1 - \frac{d_{02}}{d},$$

где d_{01} , d_{02} – части дефектов, которые закрывают лучевую трубку.

Тогда результирующий коэффициент равен:

$$k_d(i, j) = 1 - \frac{(d_{01} + d_{02})}{d} = k_{d1}(i, j) + k_{d1}(i, j) - 1.$$

- Если $x_{01} \leq x_{03} \leq x_{04} \leq x_{02}$ то первый дефект полностью закрывает второй дефект, и $k_{d1}(i, j)$ принимает значение как случай, когда присутствует только первый дефект $k_d(i, j) = k_{d1}(i, j)$.

- Если $x_{03} \leq x_{01} \leq x_{02} \leq x_{04}$ то второй дефект полностью закрывает первый дефект, и $k_{d1}(i, j)$ принимает значение как случай, когда присутствует только второй дефект $k_d(i, j) = k_{d2}(i, j)$.

- Если $x_{02} \geq x_{03}$ то дефекты частично закрывают друг друга $k_{d1}(i, j)$ принимает значение как случай, когда присутствует только один дефект, имеющий проекцию $x_{01}x_{04}$.

Выше приведенный анализ был реализован в виде моделирующей программы, алгоритм которой представлен на рис. 2.10.

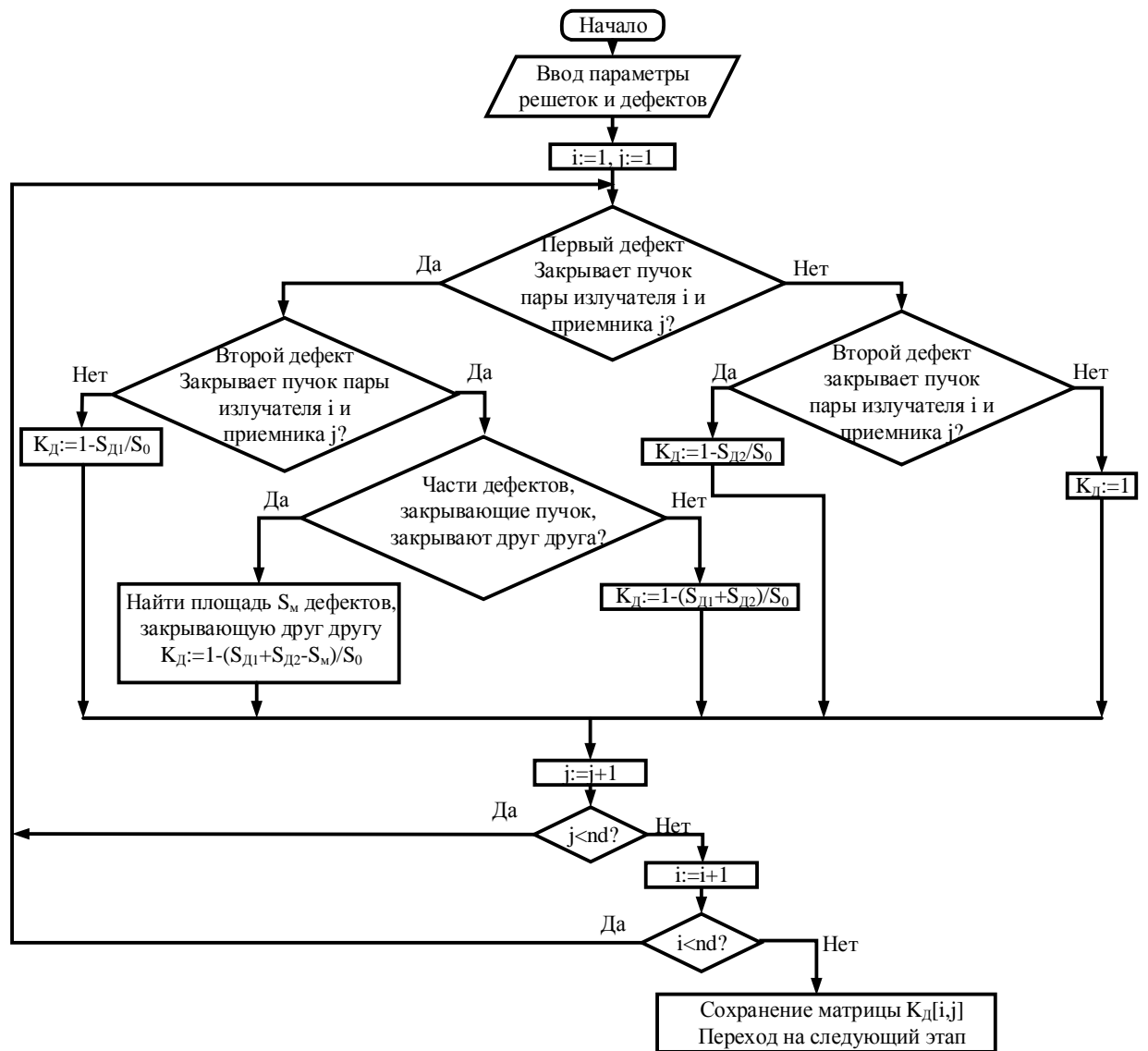


Рис. 2.10. Алгоритм расчета коэффициентов k_d при наличии двух дефектов круглой формы в зоне контроля

Второй этап моделирования содержит процедуру реконструкции томографического изображения двумерной области, представляющей собой зону контроля между приёмной и передающей антенными решётками. Реконструкция основана на несколько модифицированном методе обратных проекций. Реконструктивная томография строится таким образом: контролируемая область, находящаяся в пространстве между решетками, разбивается на конечные элементы, считающиеся точками. Для декартовой системы координат удобно использовать квадраты, которые в дальнейшем

играют роль пикселей изображения. Затем, методами аналитической геометрии, определяются все лучевые трубки, пересекающие данный элемент [63, 65, 66]. Степень контрастности вычисляется путём суммирования коэффициентов k_d , найденных предварительно на предыдущем этапе моделирования. Как было показано выше, количество лучевых трубок, проходящих через различные области объекта контроля, будет различным, поэтому полученное множество данных нормируется к единице.

Алгоритм восстановления томографического изображения зоны контроля показан на рис. 2.11. При моделировании принимаются следующие обозначения: *step* - шаг отсчета, через который разбивается область контроля на конечные элементы; *ix*, *iy* – количество конечных элементов, на которые разбивается контролируемая область по осям *ox* и *oy* соответственно; *k*, *q* – номера элементов; *count*- количество лучевых трубок, проходящих через рассматриваемый конечный элемент.

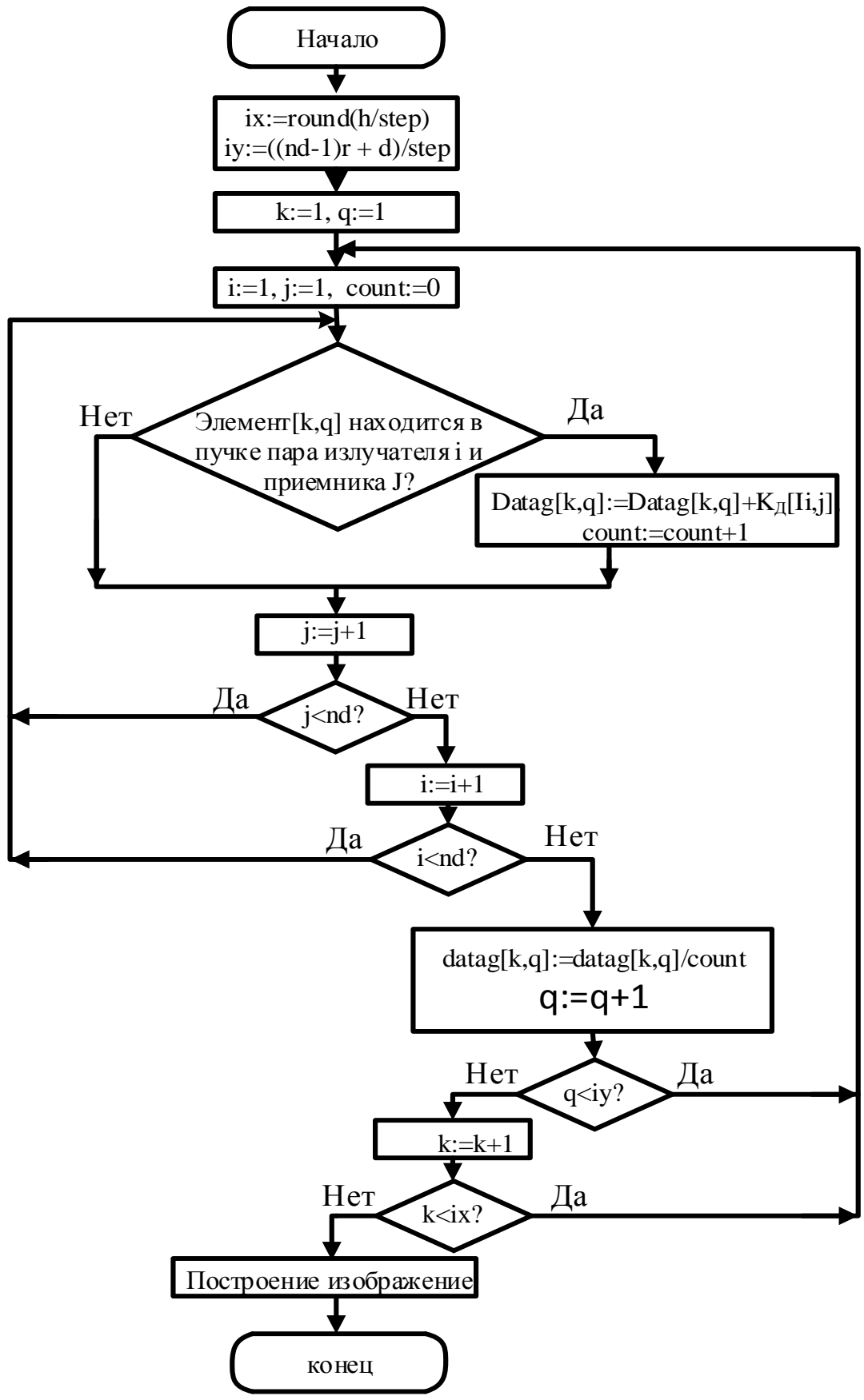


Рис. 2.11. Алгоритм восстановления местоположения дефектов

Для каждого конечного элемента, например точка $M(x_0, y_0)$, рассмотрим все возможные лучевые трубки, в которых находится эта точка. Строим проекцию точки $M(x_0, y_0)$, на ось OX (x_m рис. 2.12) в новой системе координат ($d2-d3$), проходящей через точку левого края излучателя j в точку левого края приёмника i . Если $x_p(i) \leq x_m \leq x_p'(i)$ то точка $M(x_0, y_0)$, находится в пучке пары излучатель j - приёмник i . При этом возможны два варианта. Если $i = j$ то $x_m = x_0$. Если $i \neq j$ то через точку $M(x_0, y_0)$ строим линию $d3$ параллельно линии $d1$ и найдем точку x_m на пересечении линии $d3$ и оси OX . Уравнение линии $d3$ имеет вид (рис. 2.12):

$$y = a_1 x + b,$$

где:

$$a_1 = \frac{h}{x_i(j) - x_p(i)},$$

$$b = y_0 - a_1 x_0.$$

Следовательно:

$$x_m = \frac{-b}{a_1} = x_0 - \frac{y_0(x_i(j) - x_p(i))}{h}$$

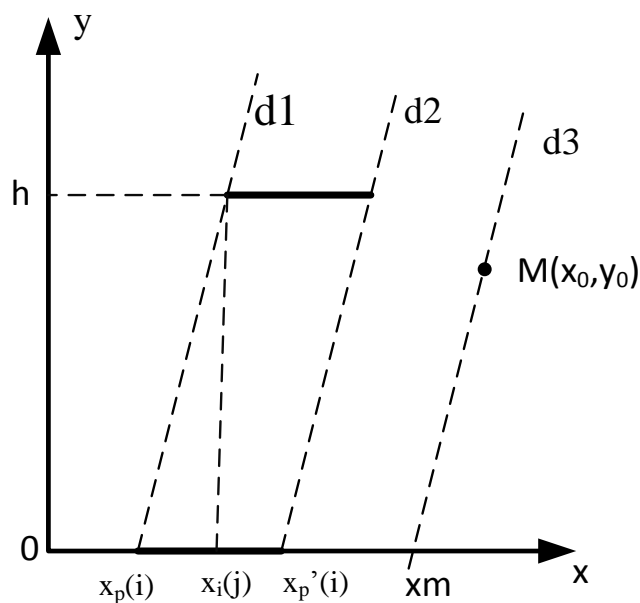


Рис. 2.12. проекция точки $M(x_0, y_0)$, на ось OX

Амплитуда сигнала в точке $M(x_0, y_0)$, используемая для построения томографического изображения, получена путем суммирования всех коэффициентов пар излучатель – приёмник, имеющих лучевые трубки, проходящие через точку M и затем пронормирована с учетом количества лучевых трубок.

По описанному алгоритму была разработана программа моделирования на языке Delphi. Программа состоит из двух формы (form): основная форма (рис. 2.13) и форма для наблюдения результатов моделирования в виде трехмерного изображения (рис. 2.14).

В основной форме (рис. 2.13) оператор вручную вводит исходные параметры в соответствующие окошки. Все параметры можно разделить на две части.

1. Характеристики акустического тракта:

- число пьезоэлементов, составляющих линейную акустическую эквидистантную антенную решётку;
- характерный линейный размер пьезоэлемента в миллиметрах;
- расстояние между пьезоэлементами в решётке, также в миллиметрах;
- расстояние между антенными решётками, т.е. продольный размер зоны контроля, который отсчитывается в миллиметрах.

2. Характеристики модели дефектов и зоны контроля:

- размер элемента разбиения зоны контроля в миллиметрах;
- радиус модели первого дефекта в миллиметрах;
- радиус модели второго дефекта в миллиметрах;
- координаты расположения центра модели первого дефекта в зоне контроля в миллиметрах;
- координаты расположения центра модели второго дефекта в зоне контроля в миллиметрах;

Дополнительно на закладке интерфейса программы размещается окошко включения фильтрации типа ρ^n и порядок фильтра. Кроме того, программа позволяет включить сетку линий на графиках, иллюстрирующих результаты моделирования, а расстояния между линиями по горизонтали и по вертикали могут выбираться оператором произвольно. Также предусмотрена возможность выбора моделирования одного или двух дефектов. Последняя возможность необходима при анализе такого важного параметра как разрешающая способность системы контроля.

Запуск программы осуществляется нажатием на кнопку «ОК». Результаты автоматических вычислений выводятся в графической форме, причём амплитудные значения представлены цветовой гаммой.

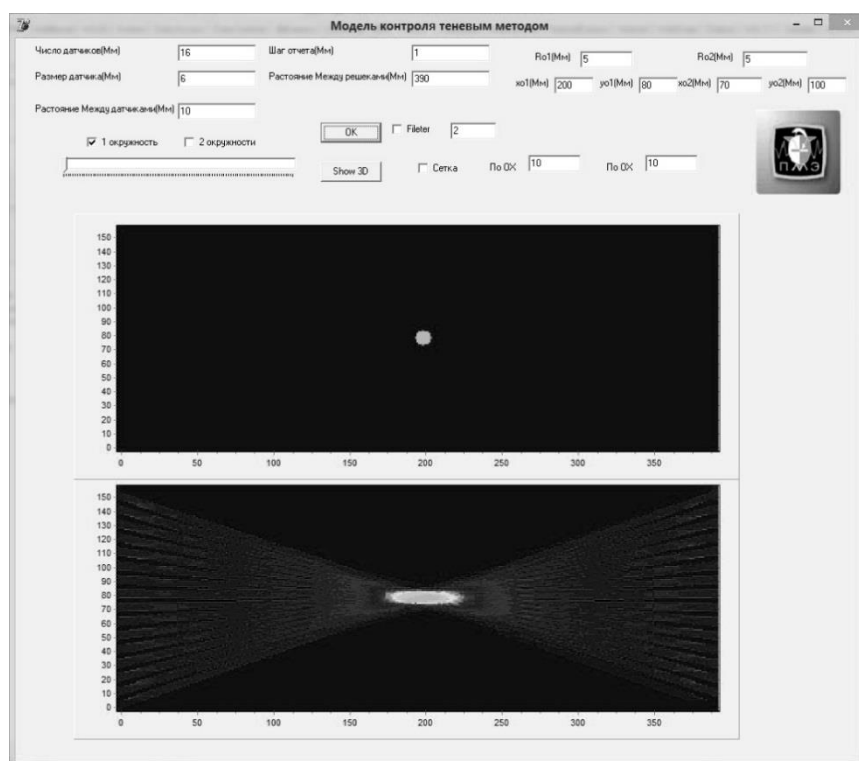


Рис. 2.13. Графический интерфейс программы моделирования контроля.

Графическая часть интерфейса разделена на две части. На верхней части отображается модель дефекта в виде диска в декартовой системе координат. Её размеры и положение полностью соответствуют выбранным

исходным параметрам. На второй нижней части воспроизводится томографическое изображение, полученное в результате моделирования по методу обратных проекций.

При нажатии на кнопку «Show 3D», появляется ещё один график. Он предназначен для наблюдения результата моделирования в виде трехмерного изображения. На этом графике можно не только определить положение дефекта, но и оценить амплитуду сигнала с возможностью изменения угла наблюдения. Он показан на рис. 2.14.

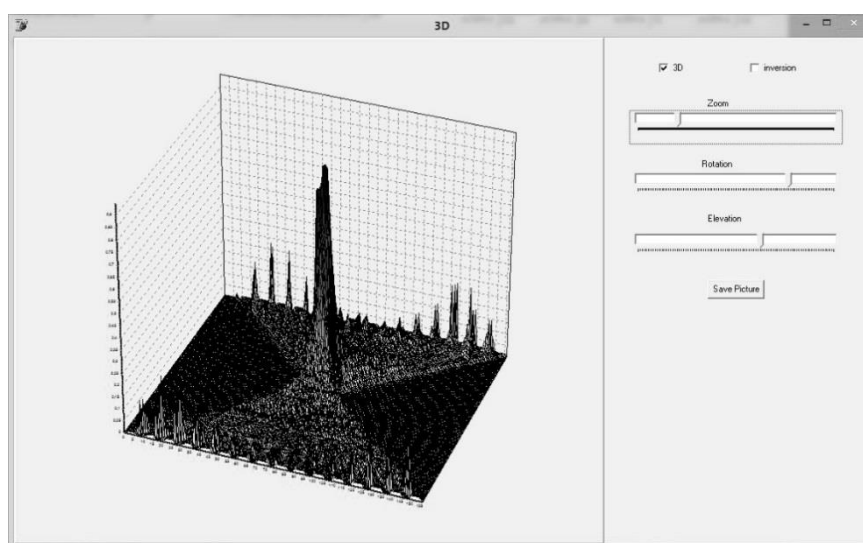


Рис. 2.14. График результата моделирования в виде трехмерного изображения.

Исследования, проведённые на базе представленной системы моделирования, позволили выявить ряд интересных особенностей томографии с помощью антенных решёток. Первый, вполне ожидаемый, результат показал возможность выделения зоны вероятного расположения дефекта в акустическом тракте теневого дефектоскопа. Оказалось, что размер этой зоны зависит от величины дефекта и места его расположения. Для определённых соотношений размера пьезоэлемента и размера дефекта степень локализации может быть весьма высокой. Такой пример показан на рис. 2.13. Причём, размер в направлении продольной оси антенной решётки

почти точно соответствует размеру дефекта. В ортогональном направлении, т.е. вдоль акустических лучей, размер дефектной зоны в несколько раз больше, чем реальный размер дефекта. Наилучший результат фиксируется в центре акустического тракта. Перемещение модели дефекта в сторону излучателя или приёмника приводит к заметному увеличению томографического изображения дефекта вдоль акустических лучей. Это иллюстрирует рис. 2.15. На нём явно видно значительное, по сравнению с рис. 2.13, увеличение горизонтального размера дефектной зоны.

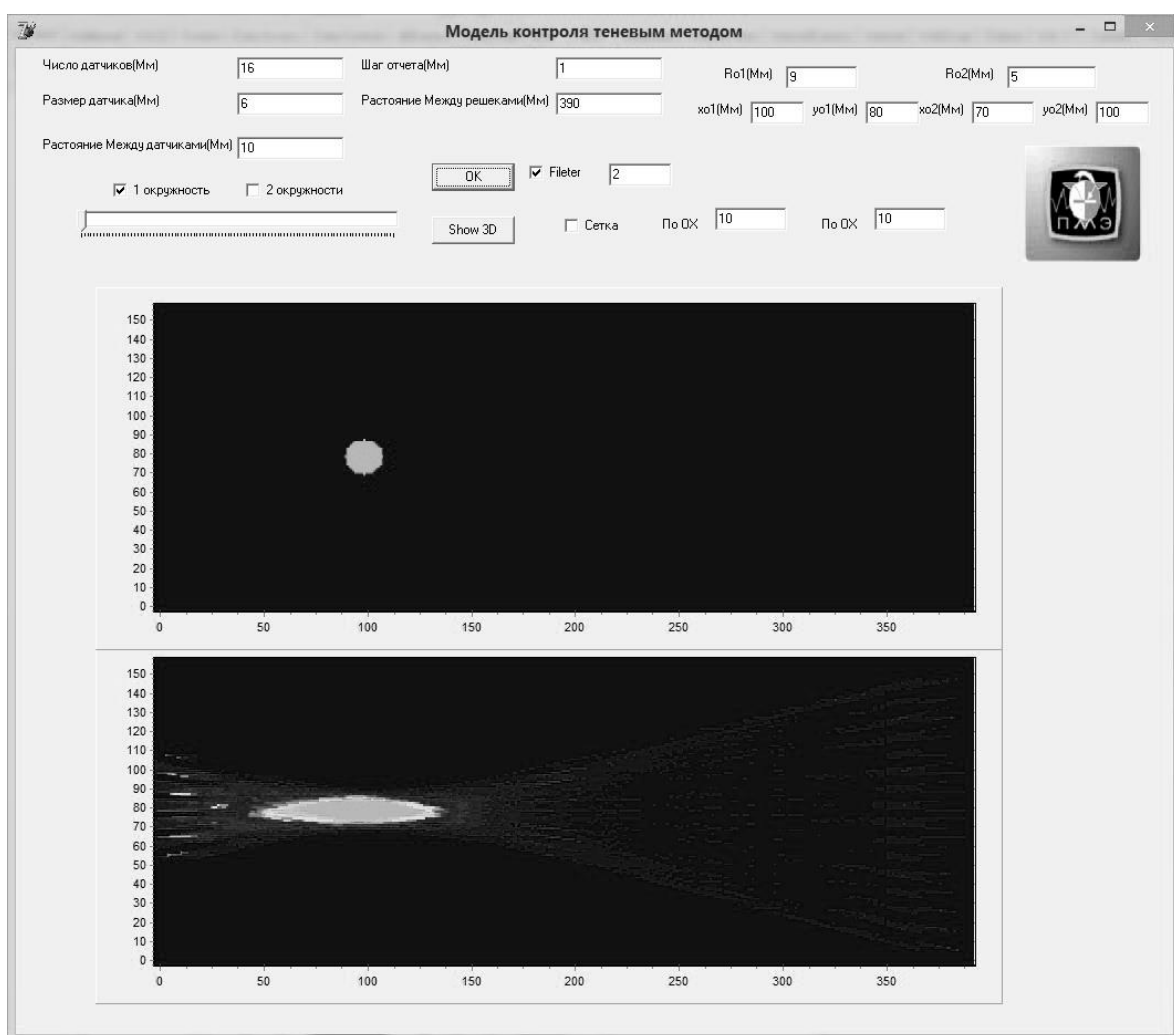


Рис. 2.15. Модель дефекта смещена в сторону излучателей

С использованием этой модели были проведены исследования точности определения координат положения акустического образа дефекта при перемещении модели дефекта размером 6мм перпендикулярно решёткам

вдоль линии, проходящей через центр зоны контроля. Результаты исследований показаны на рис. 2.16. Из рис. 2.16, видно, что модель позволяет с погрешностью не более 3% определять координаты дефекта в акустическом тракте, содержащем две антенных решетки по 16 элементов

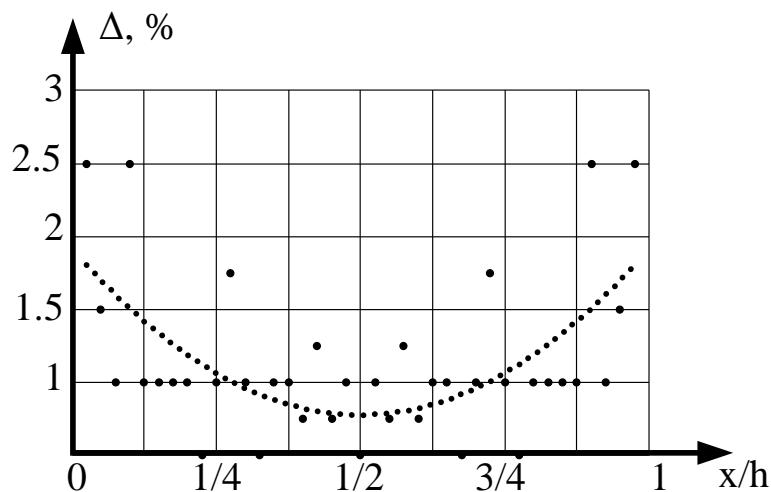


Рис. 2.16. Результаты исследования точности определения координат положения акустического образа дефекта при перемещении модели дефекта размером 6мм перпендикулярно решёткам вдоль линии, проходящей через центр зоны контроля, h – расстояние между решетками, x - расстояние между излучателем и дефектом.

2.2 Разрешающая способность акустического тракта, образованного антенными решётками

Разрешающая способность является одной из основных характеристик любого метода контроля. Особенно важное значение приобретает данный параметр в случае представления информации в виде В- или С-сканов. Традиционный теневой контроль не требует особых методов исследования разрешающей способности. Очевидно, что речь может идти только о фронтальной разрешающей способности аппаратуры и она равна величине излучателя и приёмника. В случае томографического изображения

добавляется ещё одно измерение, направленное вдоль акустических лучей. Способность фиксации двух дефектов отдельно именно в этом направлении требует дополнительных исследований [67, 68, 69].

Обратимся к рис. 2.17 и дополним его изображениями лучевых трубок, которые проходят через некоторую произвольную точку в зоне контроля. Предположим, что там расположен некий объект, который имеет меньшие размеры, чем размеры пьезопреобразователей, составляющих эквидистантные антенные решётки. В то же время, он полностью поглощает или отражает акустическое излучение, создавая "тень" на рабочей плоскости приёмной антенны. Данную ситуацию иллюстрирует рис. 2.17.

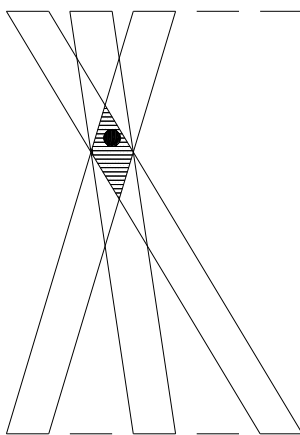


Рис. 2.17. Формирование аналога PSF для теневого метода контроля.

Чёрный диск, показанный на рисунке, представляет собой дефект. Попадая одновременно в несколько "лучевых трубок" он создаёт зону, которая формируется их пересечением. Эта зона показана штриховкой. Она характеризуется максимальным уровнем сигналов, которые соответствуют выражению (2.6). Следовательно, реконструкция томографического изображения, основанная на методе обратных проекций, выделит эту область как зону возможного расположения дефекта. Таким образом, заштрихованный участок можно классифицировать как аналог функции рассеяния точки (PSF), но только для теневого метода контроля при использовании антенных решёток в качестве излучателя и приёмника

излучения. Тогда, фронтальная и продольная разрешающие способности будут равны соответствующим размерам PSF.

Анализ геометрических построений рис. 2.17 показывает, что фронтальная разрешающая способность равна, примерно, размеру элемента антенной решётки. Продольная разрешающая способность, характеризующая качество томографического изображения, будет равна большей диагонали заштрихованной области. В данном случае качество изображения следует понимать как степень соответствия размера дефекта его реконструированному виду.

Наименьшее значение продольной разрешающей способности R_y будет наблюдаться в центре зоны контроля. Это значение определяется выражением:

$$R_y = \frac{h \cdot d}{r \cdot (n-1) + d}. \quad (2.14)$$

Обозначения в формуле (2.14) соответствуют обозначениям, приведённым на рис. 2.17.

Отклонение дефектной зоны от центра акустического тракта приводит к ухудшению продольной разрешающей способности. Происходит это вследствие уменьшения числа ракурсов и снижения численных значений углов обзора. Другими словами, снижается количество активных элементов антенной решётки и её длина как бы уменьшается. Используя выражение (2.14) нетрудно установить зависимость продольной разрешающей способности при перемещении дефектной зоны от края решётки к её центру вдоль образующей. Весьма наглядным является графическое представление такой зависимости. На рис. 2.18 приведён график для следующих конкретных параметров акустического тракта:

- Количество элементов $n=16$,
- Размер элемента $d=6$ мм,
- Расстояние между центрами элементов $r=10$ мм,

– Расстояние между антенными решетками $h=400$ мм.

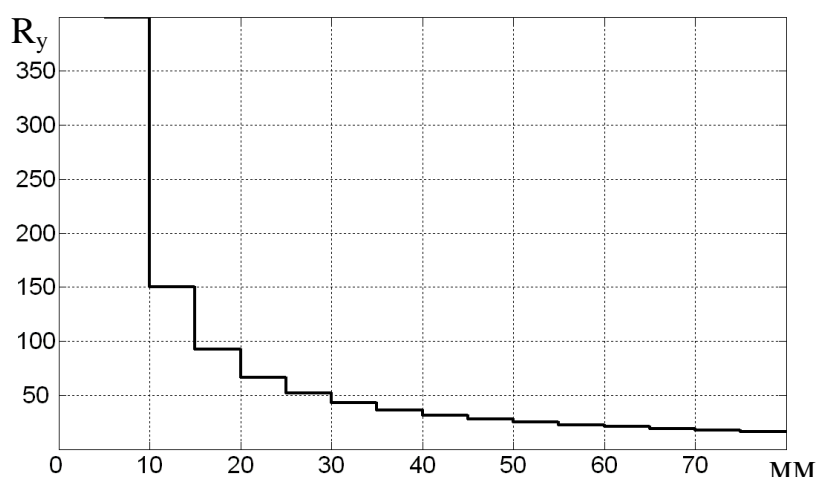


Рис. 2.18. Зависимость разрешающей способности от положения в акустическом тракте.

Дискретизованный вид зависимости связан с тем, что разрешение в пределах дефектной зоны неизменно. Отсчёт по оси абсцисс указан в миллиметрах и начало его совпадает с краем антенной решётки. Очевидно, что на данном графике зависимость охватывает область от начала до центра акустического тракта. Вторая половина будет полностью симметрична относительно центра. График на рис. 2.18 иллюстрирует характер изменения продольной разрешающей способности вдоль рабочей поверхности линейных антенных решёток. В ортогональном направлении, т.е. вдоль направления излучения аналогичная зависимость будет иметь несколько иной вид. Опуская несложные вспомогательные геометрические построения, приведём конечный результат исследования зависимости продольной разрешающей способности в данном измерении. Эта зависимость показана на рис. 2.19.

По оси абсцисс отложены расстояния в миллиметрах дефектных зон от центра акустического тракта в направлении к излучателям или приёмникам. Также, как и на предыдущем графике, величина разрешающей способности указана в миллиметрах. Кроме того, как и на предыдущем графике, приведена только половина зависимости, т.к. система симметрична относительно центра

акустического тракта.

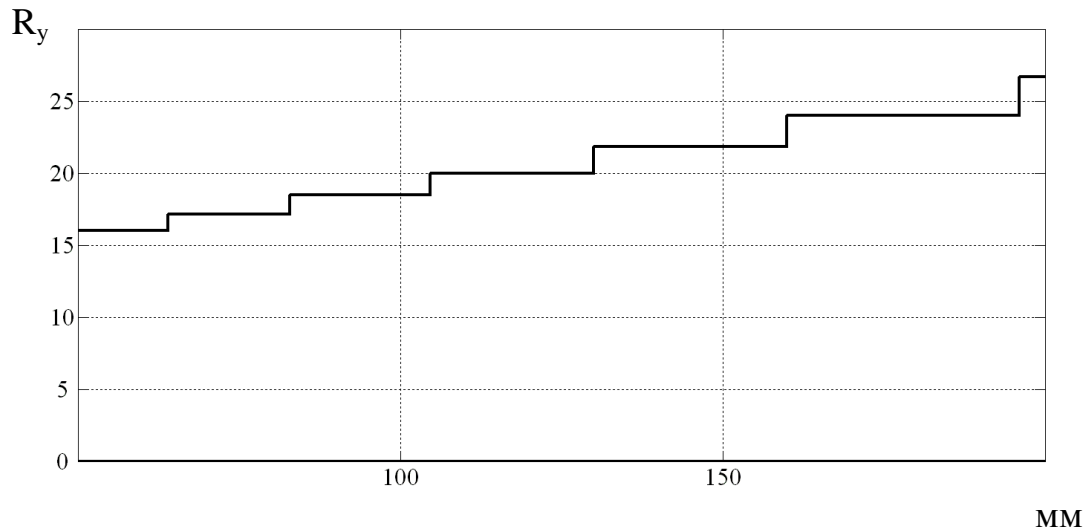


Рис. 2.19. Зависимость разрешающей способности в направлении от центра акустического тракта к излучателю или приёмнику.

Полученные аналитические выражения зависимости продольной разрешающей способности от параметров акустического тракта, образованного антенными решётками в теновом варианте с томографической реконструкцией двумерного изображения дефектной области, верифицированные числовым компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями, показали вполне удовлетворительные соответствия. На рис. 2.20 и рис. 2.21 показаны томограммы, полученные в результате моделирования.

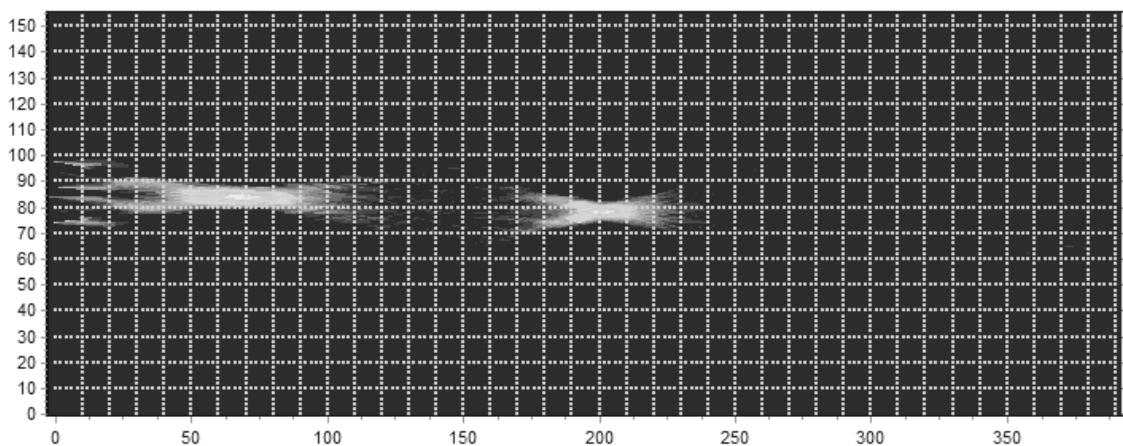


Рис. 2.20. Моделированная томограмма. Два дефекта расположены вдоль акустических лучей.

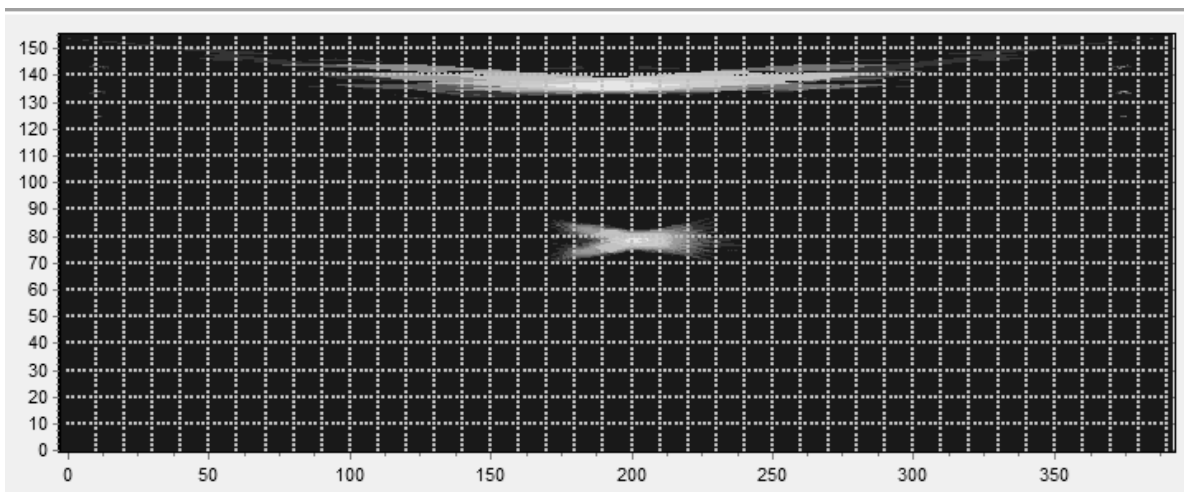


Рис. 2.21. Моделированная томограмма. Два дефекта расположены поперёк акустических лучей.

На рис. 2.22 и рис. 2.23 приведены результаты экспериментальных исследований. Нумерация по осям x и y показана условно. Первый экспериментальный результат иллюстрирует реконструированное изображение дефектных зон в случае расположения дефектов на одной линии вдоль акустических лучей, причём первый из них размещён возле середины излучающей решётки, а второй – возле середины приёмной решётки. Вторым графиком – результатом реконструкции дефектов, расположенных в середине акустического тракта, но смещённых поперёк акустических лучей.

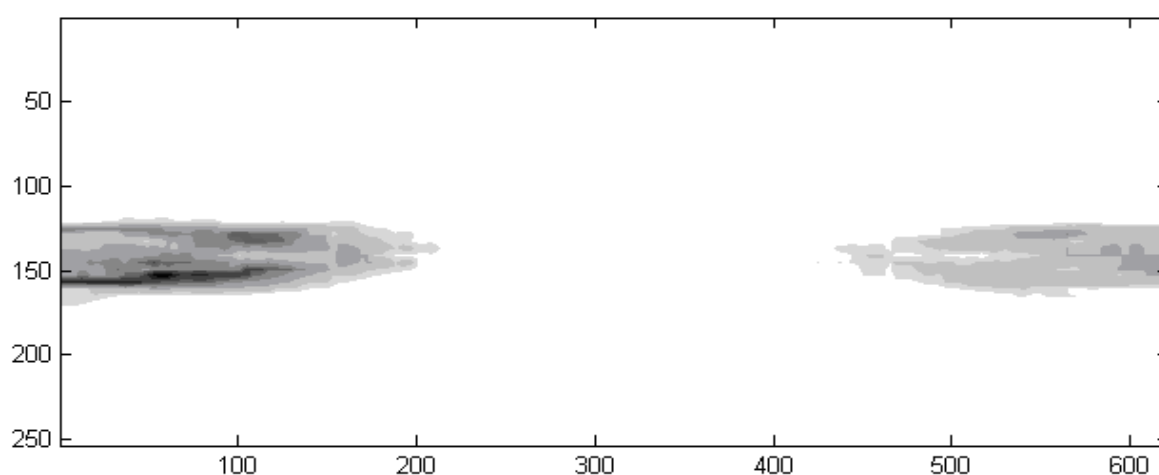


Рис. 2.22. Экспериментальная томограмма. Два дефекта расположены вдоль акустических лучей.

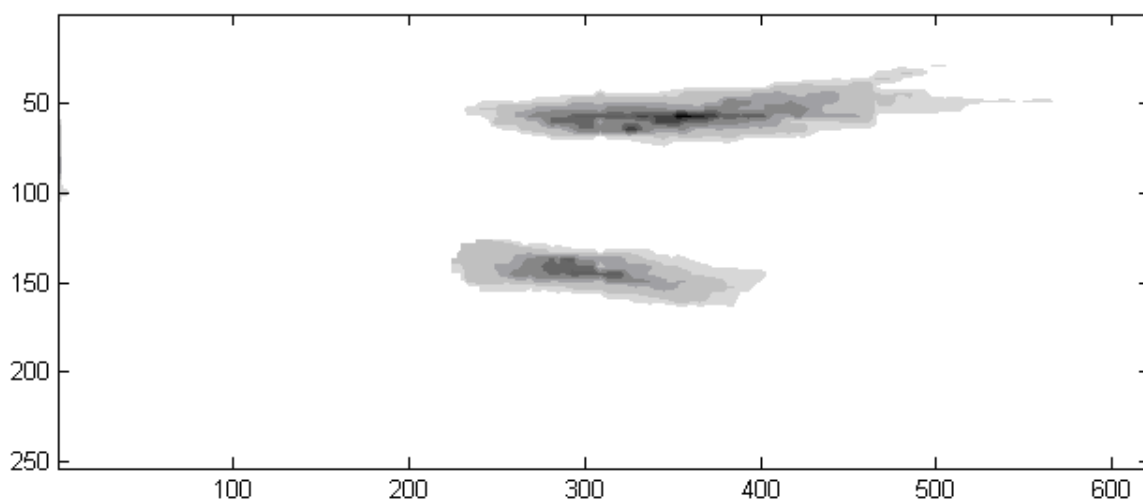


Рис. 2.23. Экспериментальная томограмма. Два дефекта расположены поперёк акустических лучей.

Исследование разрешающей способности показали высокую потенциальную возможность фиксации двух дефектов, расположенных на одной вертикали. На рис. 2.21 и рис. 2.23 видно, что два дефекта уверенно фиксируются на томографическом изображении. Причём, дефект, смещённый к краю зоны контроля, генерирует изображение худшего качества.

Еще одна особенность выявилась при расположении моделей дефектов на одной горизонтальной линии. Если размеры моделей выбраны одинаковыми, то на изображении ослабляется тень того дефекта, который расположен ближе к приёмнику. Отмеченная закономерность подтверждается экспериментально.

2.3 Исследование предельной чувствительности

Чувствительность системы контроля является одной из важнейших характеристик систем неразрушающего контроля. Определение чувствительности системы акустического контроля малоракурсным теневым методом проведем с использованием теории дифракции Кирхгофа [31, 32]. В соответствии с теорией, луч попадающий в край препятствия будет

распространяться во все стороны (рис. 2.22). Для удобства расчетом будем считать, что луч проходящий в точку C имеет амплитуду A_0 . Тогда прямой луч проходящий в точку K приемника будет иметь вид, считая что фаза сигнала равна нулю:

$$F_{\text{пр}}^{\text{Б}} = \frac{A_0}{L} \sin(\omega t), \quad (2.15)$$

где L – расстояние от приемника до дефекта.

Дифракционный луч из точки C будет приходиться в точку B с запаздыванием и амплитудой:

$$F_{\text{диф}}^{\text{Б}} = \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.16)$$

где φ – фаза дифракционного сигнала [70, 74].

Фазу дифракционного сигнала можно найти из выражения:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{L^2 + (R + r)^2} - L \right), \quad (2.17)$$

Результирующая амплитуда сигнала в точке B будет состоять из суммы прямого и двух дифракционных сигналов в двумерной модели:

$$A_{\text{рез}}^{\text{Б}} = F_{\text{пр}}^{\text{Б}} + F_{\text{диф1}}^{\text{Б}} + F_{\text{диф2}}^{\text{Б}}, \quad (2.18)$$

где $F_{\text{диф1}}^{\text{Б}}$ – дифракционный сигнал от точки C , $F_{\text{диф2}}^{\text{Б}}$ – дифракционный сигнал от точки M .

Сигнал на приемнике в области акустической тени (между точками A и K) от дефекта будет определяться суммой двух дифракционных сигналов:

$$A_{\text{рез}}^{\text{А}} = F_{\text{диф1}}^{\text{Б}} + F_{\text{диф2}}^{\text{Б}}. \quad (2.19)$$

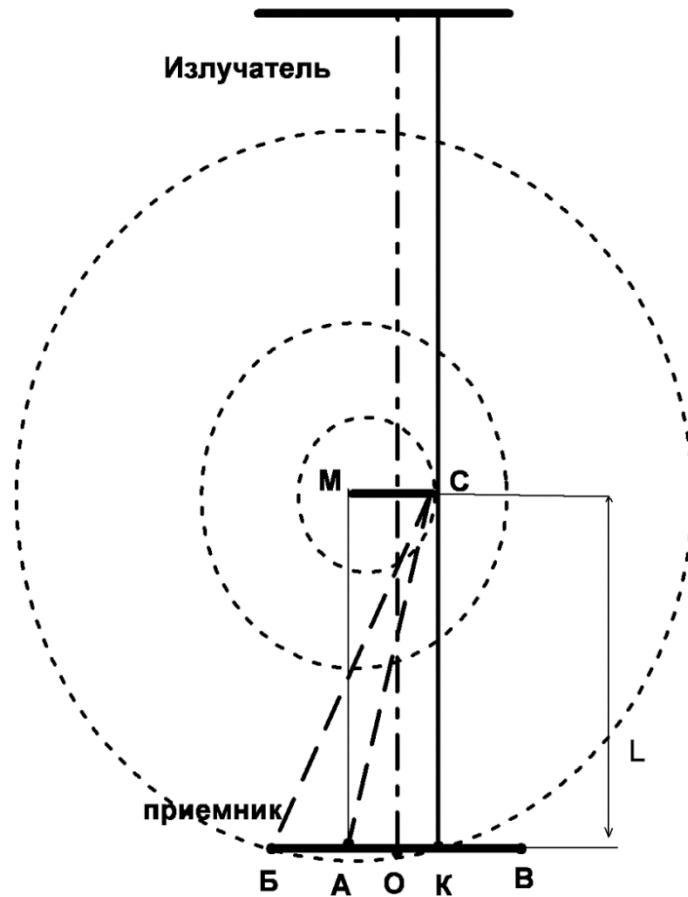


Рис. 2.24. Дифракционная картина по методу Кирхгофа

Зная отдельные составляющие можно определить результирующий сигнал по всей поверхности приемника:

$$A_{\text{рез}} = \int_B^A (F_{\text{пр}} + F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx + \int_A^K (F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx + \int_K^B (F_{\text{пр}} + F_{\text{диф1}} + F_{\text{диф2}}) dx$$

С учетом выражения 2.18 и 2.19 получаем:

$$A_{\text{рез}} = \int_B^A \left(\frac{A_0}{L} \sin(\omega t) + \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_2) \right) dx + \int_A^K \left(\frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_2) \right) dx + \int_K^B \left(\frac{A_0}{L} \sin(\omega t) + \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{A_0}{L^2} \sin(\omega t + \varphi_2) \right) dx \quad (2.20)$$

При осесимметричном расположении дефекта относительно оси приемника, выражение (2.20) упрощается:

$$A_{рез} = 2 \int_B^A (F_{пр} + F_{диф1} + F_{диф2}) dx + 2 \int_A^K F_{диф1} dx, \quad (2.21)$$

Решение уравнения 2.20 для частного случая, когда расстояние между излучающим и приемным преобразователями превышает пять длин ближней зоны а размеры дефекта меньше длины волны, было найдено в работе [34]:

$$\frac{P_d}{P_0} = k_d = 1 - 4 \cdot S_d S_{пр} / (\lambda \cdot h)^2 \quad (2.22)$$

где P_d – амплитуда акустического сигнала на приемнике при наличии дефекта в лучевой трубке, P_0 - амплитуда акустического сигнала на приемнике при отсутствии дефекта в лучевой трубке, S_d – площадь дефекта, $S_{пр}$ – площадь преобразователя, λ – длина волны, h – расстояние между преобразователями.

При использовании акустических решеток ослабление прямого сигнала будет разным при различных ракурсах зондирования (рис. 2.25.б), так как будет изменяться площадь дефекта, затеняющая приемник. При этом следует рассмотреть три случая расположения дефекта:

- в середине между приемным и зондирующим преобразователями,
- смещенным к приемному преобразователю,
- смещенным к зондирующему преобразователю.

Рассмотрим случай расположения дефекта в середине между приемным и зондирующим преобразователями (рис. 2.25.а). В этом случае эффективная площадь «тени», попадающая на приемные преобразователи одинакова для всех ракурсов:

$$k_{d13} = k_{d22} = k_{d31} = 1 - 4 \cdot S_d S_{пр} / (\lambda \cdot h)^2, \quad (2.23)$$

где $k_{Д13}, k_{Д22}, k_{Д31}$ - коэффициенты для пар 1-3, 2-2 и 3-1 соответственно.

При реконструкции томографического изображения результирующий коэффициент ослабления сигнала в области расположения дефекта будет равен:

$$k_{Д\Sigma} = \frac{k_{Д1} + k_{Д2} + k_{Д3}}{3} = 1 - 4 \cdot S_{Д} S_{пр} / (\lambda \cdot h)^2, \quad (2.24)$$

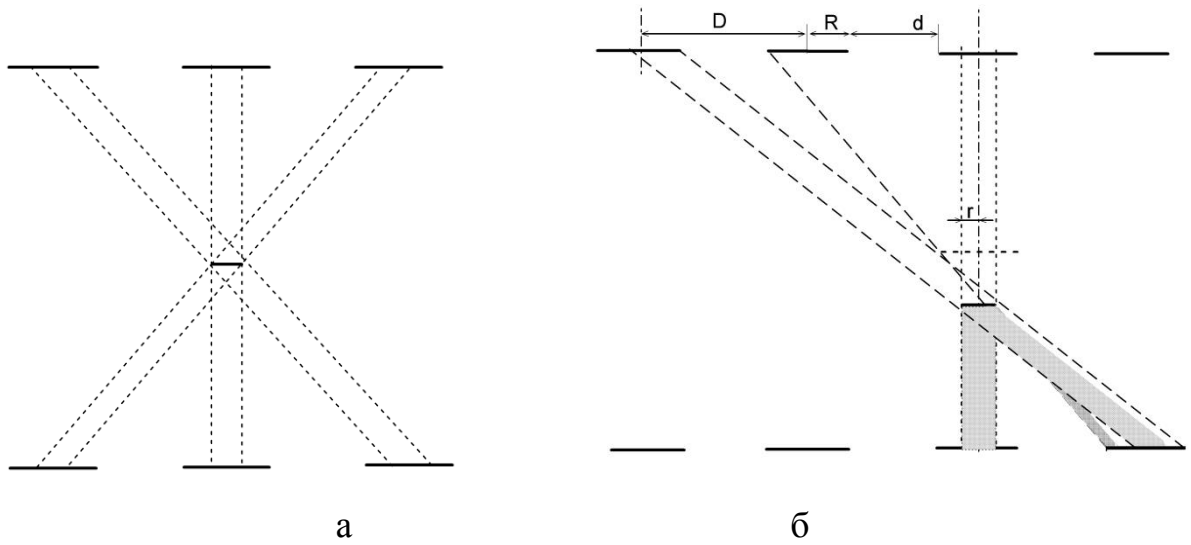


Рис. 2.25. Варианты расположения дефекта в акустическом тракте теневого метода контроля с использованием акустических антенных решеток, а – в середине между приемным и зондирующим преобразователями, б – смещенным к одному преобразователю.

Следовательно, предельная чувствительность теневого метода контроля одинакова для одиночных преобразователей и антенных решеток. Однако, при наличии шумов, которые всегда присутствуют в электронном тракте аппаратуры контроля, чувствительность системы контроля будет определяться уровнем шумов электронного тракта, точнее минимальным уровнем изменения полезного сигнала, который можно зафиксировать при данном уровне шумов.

Распространяясь в среде, ультразвуковые волны затухают, и их интенсивность, а, следовательно, и амплитуда колебания частиц среды уменьшаются с увеличением расстояния от источника [85, 86].

Затухание обусловлено поглощением упругих колебаний средой, т.е. переходом энергии упругой волны в другие виды энергии, в частности в тепловую, рассеянием звука на неоднородностях среды, в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении распространения волны, а также расхождением звукового луча по мере удаления от источника.

Плоская волна в однородной среде затухает в основном в результате поглощения ультразвука. Амплитуда колебания ультразвука уменьшается с расстоянием l согласно выражению [24]:

$$A=A_0 e^{-\alpha l} \quad (2.25)$$

где A_0 – интенсивность ультразвука вблизи источника; A – амплитуда на расстоянии l от источника; α – коэффициент поглощения.

Величину сигнала на приемнике можно найти, зная коэффициент преобразования электрической энергии в механическую, соотношение площадей приёмного преобразователя и сферы на расстоянии l от излучателя, а также уровня зондирующего сигнала:

$$U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{изл}}}{l} \cdot k_{\text{пр1}} \cdot k_{\text{пр2}} \cdot e^{-\alpha l} \frac{S_{\text{пр}}}{S_0}, \quad (2.26)$$

где $k_{\text{пр1}}$ – коэффициент преобразования электрической энергии в энергию упругих волн, $k_{\text{пр2}}$ – коэффициент преобразования энергии упругих волн в электрическую энергию, l – расстояние между излучателем и приемником, $U_{\text{изл}}$ – напряжение, подаваемое на излучатель, $S_{\text{пр}}$ – площадь приемного преобразователя, S_0 – площадь сферы на расстоянии l от излучателя.

На рис. 2.26 представлены результаты расчета амплитуды сигнала на приемнике в соответствии с выражением (2.26)

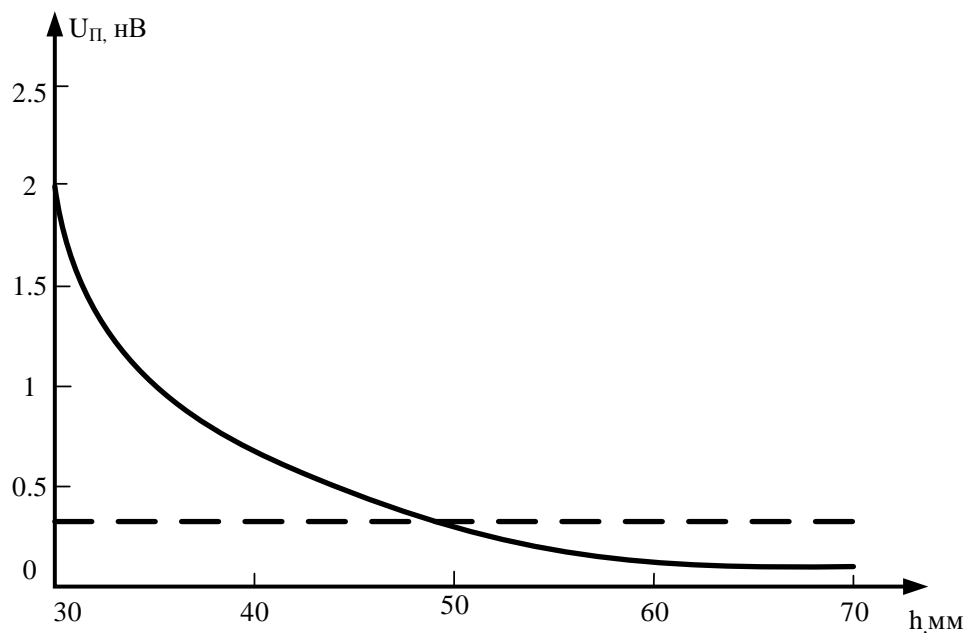


Рис. 2.26. Зависимость амплитуды сигнала на приемнике от расстояния между приемным и излучающим пьезоэлементами при отсутствии дефекта в зоне контроля, сплошная линия – амплитуда сигнала на приемнике, штриховая линия – уровень шумов.

Порог чувствительности P любого приёмного устройства на электронных компонентах определяется выражением [35]:

$$P = k \cdot T_0 \cdot k_{ш} \cdot k_0 \cdot \Delta F, \quad (2.27)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,37 \cdot 10^{-23}$ Вт·с/град; T_0 – абсолютная температура входных цепей приёмника; $k_{ш}$ – коэффициент шума приёмника; k_0 – соотношение сигнал/шум; ΔF – шумовая полоса приёмника.

Порог чувствительности приёмника может быть выражен также в

вольтах. Для этого используем известное соотношение, связывающее мощность и напряжение.

$$U = \sqrt{\frac{P}{R}} \quad (2.28)$$

где R – входное сопротивление первого усилительного каскада.

Большинство производителей интегральных усилительных микросхем указывают в перечне эксплуатационных параметров либо коэффициент шума, либо спектральную плотность его собственных шумов, приведённую ко входу [36, 37], поэтому, для вычисления конкретного значения пороговой чувствительности необходимо, в первом случае, воспользоваться выражением (2.29) после предварительной подстановки в него выражения (2.28). Во втором случае, когда дано значение спектральной плотности, пороговая чувствительность может быть рассчитана по формуле:

$$U = N \cdot \sqrt{\Delta F} \quad (2.29)$$

где N – спектральная плотность шумового напряжения, обычно измеряемая в $\text{нВ/Гц}^{1/2}$, ΔF – полоса частот.

Типовое значение спектральной плотности шума для интегральных усилителей широкого применения составляет $2 \text{ нВ/Гц}^{1/2} \dots 10 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$. В специальных малошумящих разработках эта величина может достигать $0,7 \text{ нВ/Гц}^{1/2} \dots 1 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

Иногда входные каскады усилителей целенаправленно выполняют на дискретных элементах. Шум этих устройств обычно обусловлен активным элементом. Например, современные биполярные высокочастотные транзисторы (типа BC850) имеют спектральную плотность шумового напряжения в пределах $1 \text{ нВ/Гц}^{1/2} \dots 3 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

Например, для полосы пропускания усилителя в 100 кГц напряжение шумов будет 0,3 мкВ и на дистанции в 40 см уровень полезного сигнала будет только в 3 раза превышать уровень шумов (рис. 2.27). При наличии дефекта уровень сигнала будет уменьшаться пропорционально уменьшению площади приемника. На рис. 2.27 представлены результаты расчета амплитуды сигнала на приемнике при наличии дефекта в соответствии с выражением 2.26.

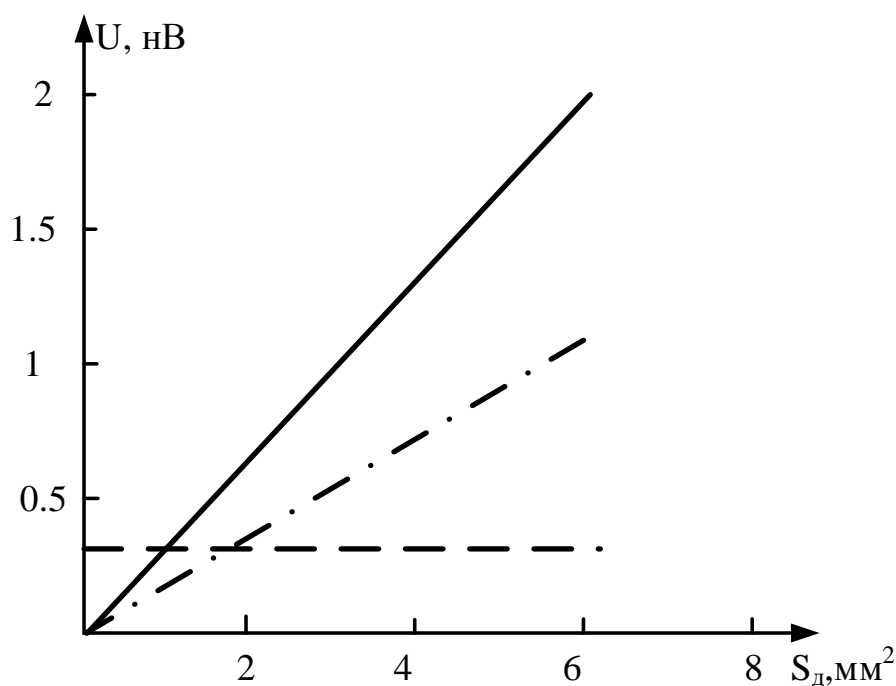


Рис. 2.27. Зависимость уменьшения амплитуды сигнала на приемнике от площади дефекта в зоне контроля, сплошная линия – на дистанции 30 см, штрихпунктирная линия - на дистанции 40 см, штриховая линия – уровень шумов.

Из рис. 2.27 видно, что дефект площадью 0,9 mm^2 на дистанции 30 см изменяет амплитуду сигнала на величину равную уровню шумов и следовательно он обнаружен не будет, а на дистанции 40 см можно обнаружить дефект площадью более 1,8 mm^2 . В теновом методе контроля с использованием антенных решеток используется коэффициент k_d , определяемый выражением (2.5). Амплитуда шумов, присутствующая в обоих переменных выражения (2.5) возрастет на 3 дБ (в $\sqrt{2}$ раз) в

результатирующем выражении при определении коэффициента k_D , а эквивалентная амплитуда полезного сигнала может уменьшиться от -6 до -20 дБ, при изменении коэффициента k_D от 0,9 до 0,1. При дальнейшей обработке сигналов для реконструкции томографического изображения с использованием коэффициента k_D , коэффициент увеличивается в 32 раза в центре зоны контроля, а амплитуда шумов в $\sqrt{32}$ раз (рис. 2.26) при использовании 16-ти элементной антенной решетке.

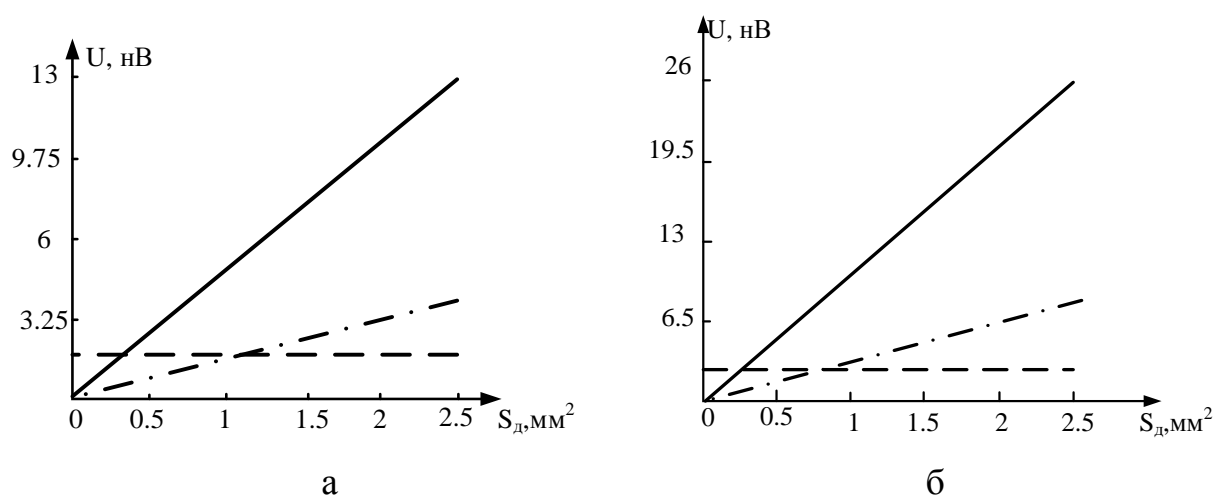


Рис. 2.28. Зависимость уменьшения амплитуды сигнала на приемнике от площади дефекта в зоне контроля при реконструкции томографического изображения, сплошная линия – на дистанции 30 см, штрихпунктирная линия – на дистанции 40 см, штриховая линия – уровень шумов, а – количество элементов в антенной решетке равно 16, б – количество элементов в антенной решетке равно 32.

Из рис. 2.28.а видно, что при реконструкции изображения на дистанции 30 см дефект размером 0,5 мм² обнаружить не удастся и на дистанции 40 см не удастся обнаружить дефект размером 1,1 мм². Превышение сигнала на 3 дБ над уровнем шумов дает дефект размером около 1,5 мм² на расстоянии 40 см.

Из рис. 2.28.б видно, что при реконструкции изображения на дистанции 30 см дефект размером 0,25 мм² обнаружить не удастся и на дистанции 40 см не удастся обнаружить дефект размером 0,7 мм².

Превышение сигнала на 3 дБ над уровнем шумов дает дефект размером около 0,9 мм² на расстоянии 40 см.

Результаты расчета предельной чувствительности в центре зоны контроля представлены на рис. 2.29. В расчетах использовались следующие параметры антенной решетки: диаметр одного элемента антенной решетки 6 мм, расстояние между центрами двух соседних элементов антенной решетки 10 мм.

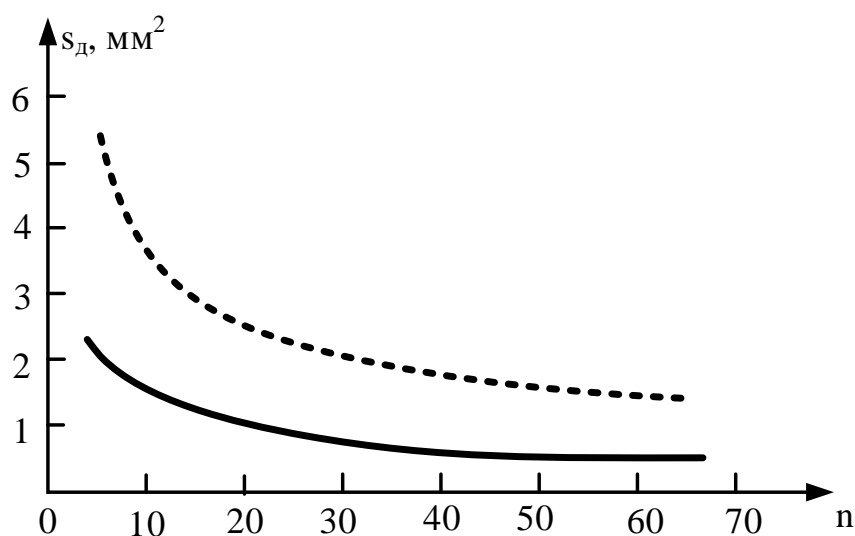


Рис. 2.29. Зависимость минимального размера обнаруживаемого дефекта, расположенного в центре зоны контроля, от количества элементов антенной решетки, пунктирная линия – расстояние между антенными решетками 500 мм, сплошная линия – расстояние между антенными решетками 400 мм.

Увеличение количества элементов антенной решетки приводит к увеличению чувствительности. При 64 элементах антенной решетки система позволяет обнаруживать дефекты размером 0,6 мм² в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при увеличении расстояния до 500 мм чувствительность ухудшается практически в два раза. При тех же параметрах система позволяет обнаружить дефект размером более 1,4 мм².

Таким образом, малоракурсная реконструкция томографического изображения с использованием n элементов в антенных решетках позволяет

увеличить предельную чувствительность системы контроля в \sqrt{n} раз в центре зоны контроля [88, 89].

Рассмотрим случай смещения дефекта к приемному преобразователю (рис. 2.25.б). В этом случае площадь акустической тени дефекта уменьшается для всех ракурсов падения прямого луча кроме нормального. Из геометрических построений можно определить предельное расстояние до приемника, при котором тень от дефекта на приемнике будет отсутствовать:

$$l_{\text{пред}} = \frac{h}{nd+nR} [R - r + (k - 1)d], \quad (2.30)$$

где h – расстояние между приемной и излучающей решетками, d – расстояние между элементами в решетке, R – радиус приемного и излучающего элемента антенных решеток, r – радиус дефекта, n – номер элемента излучающей антенной решетки, k – номер элемента приемной антенной решетки.

Результаты расчета предельной дальности для различных размеров дефекта приведены на рис.2.30. В расчетах использовались следующие данные: расстояние между антенными решетками $h=400$ мм, радиус дефекта $r=5$ мм, расстояние между пьезоэлементами в антенной решетке 10 мм, радиус пьезопреобразователя $R = 2,5$ мм, количество элементов в антенной решетке – 16.

При изменении расстояния между дефектом и приемником радиус тени на приемнике для всех ракурсов кроме прямого будет уменьшаться в соответствии с выражением:

$$r_{\text{тень}} = \frac{R}{h/2 - l_{\text{пред}}} \cdot r - \frac{R \cdot l_{\text{пред}}}{h/2 - l_{\text{пред}}} \quad (2.31)$$

Соответственно будет уменьшаться и площадь «акустической тени» от дефекта:

$$S_{\text{Дт}} = \pi \cdot r_{\text{тень}}^2 \quad (2.32)$$

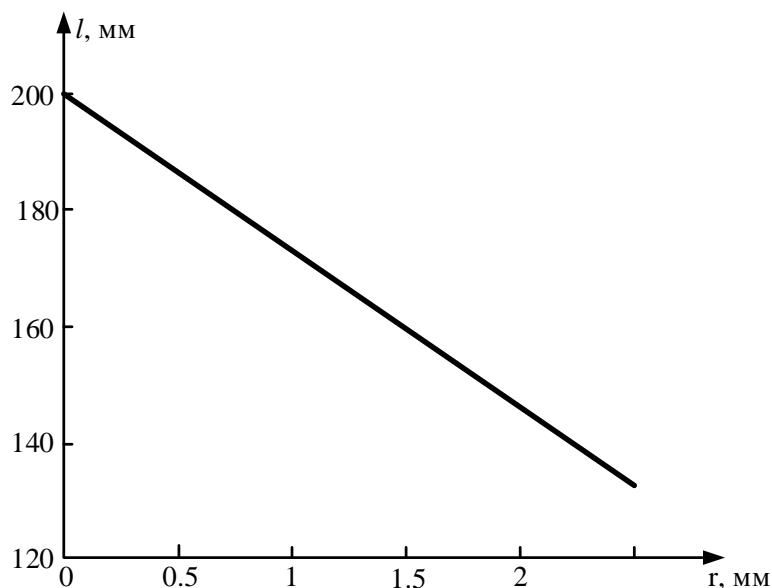


Рис. 2.30. Зависимость предельного расстояния между приемником и дефектом, при котором отсутствует тень от дефекта на приемнике, от радиуса дефекта

Соответственно выражение 2.24 примет вид:

$$k_{D\Sigma} = \frac{k_{D1} + k_{D2} + k_{D3} + \dots + k_{Dn}}{n} = \frac{1}{n} \cdot \left[1 - \frac{4S_D \cdot S_{\text{пр}}}{(\lambda \cdot h)^2} + (n - 1) \cdot \left(1 - \frac{4S_{D\Gamma} \cdot S_{\text{пр}}}{(\lambda \cdot h_i)^2} \right) \right] \quad (2.33)$$

где n – количество лучей, проходящих через точку, в которой определяют коэффициент.

За счет уменьшения количества лучей на краю зоны контроля чувствительность уменьшаться. В результате чувствительность в центре зоны контроля оказывается выше. Количество лучей в точке с координатами (x, y) определяется из эмпирического выражения:

$$n = 2N - \sqrt{(|x^3| + y^2)}, \quad (2.33)$$

где N – количество элементов в антенной решетке, x – координата точки вдоль антенной решетки, y – координата точки поперек антенной решетки.

Координата x изменяется в пределах $\left(-\frac{N}{2} \leq x \leq \frac{N}{2}\right)$ и определяется из выражения:

$$x = \frac{l_i}{D},$$

где l_i – расстояние от центра антенной решетки до исследуемой точки, D – расстояние между центрами соседних элементов антенной решетки.

Координата y изменяется в пределах $\left(-\frac{h}{2D} \leq x \leq \frac{h}{2D}\right)$ и определяется из выражения:

$$y = \frac{h_i}{D},$$

где h_i – расстояние от центра зоны контроля до исследуемой точки.

Исходя из разного количества лучей в различных областях зоны контроля и различного значения коэффициента k_D предельная чувствительность будет различной. Однако она выше, чем в одноканальном варианте в \sqrt{n} раз, которое определяется из выражения (2.33) [94].

ВЫВОДЫ

Теоретические и экспериментальные исследования разрешающей способности и предельной чувствительности акустического тракта, образованного акустическими эквидистантными антенными решётками в качестве генератора зондирующего излучения и его приёмника позволили сделать следующие выводы.

1. Применение томографической реконструкции в теновом методе ультразвукового контроля с помощью эквидистантных линейных антенных решёток позволяет выявить взаимное расположение нескольких дефектов, расположенных в зоне контроля, с определённой разрешающей способностью.

2. Установлена дискретизованная зависимость как фронтальной, так и продольной разрешающих способностей при смещении дефекта от центра симметрии акустического тракта, позволяющая прогнозировать оптимальный размер зоны контроля.
3. Чувствительность теневого метода контроля с томографической реконструкцией зоны контроля с использованием эквидистантных линейных антенных решёток выше, чем при использовании одиночных преобразователей.
4. Установлена зависимость минимально обнаруживаемого размера дефекта от его положения в зоне контроля, позволяющая прогнозировать оптимальный размер зоны контроля.
5. Достоверность полученных соотношений подтверждена численным компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях.

ГЛАВА 3. АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

В настоящее время системы УЗ визуализации стали важнейшим техническим средством для диагностики различных объектов, дополняющим рентгеновские устройства отображения [38]. Эти методы позволяют видеть внутреннюю структуру объекта контроля, как изображение удобное для восприятия человеком. Отметим, что при рентгеновской визуализации используется трансмиссионный метод, при котором визуализируется картина представляющая собой распределение поглощающей способности внутренней структуры объекта контроля по визуализируемому участку. В процессе визуализации количественная мера коэффициента поглощения рентгеновских лучей отображается на другую количественную меру, например яркость изображения или цвет изображения. При использовании акустических полей также возможно получение изображения отображающего коэффициент прохождения ультразвука через исследуемую структуру. Однако такие методы визуализации не нашли широкого распространения в технике, т.к. они требуют двустороннего доступа и не позволяли строить трехмерную картину объекта контроля [39,40].

3.1 Экспериментальная установка

Для проверки теоретических расчетов была создана экспериментальная установка, использующая антенные решетки. Структурная схема установки показана на рис. 3.1. Созданная установка состоит из следующих узлов: 1 – генератор зондирующих импульсов, 2 и 6 – коммутаторы, 3 – излучающая антенная решетка, 4 – контролируемый объект, 5 – приемная антенная решетка, 7 – усилитель, 8 – пиковый детектор, 9 – аналого-цифровой преобразователь, 10 – блок управления и обмена данными с компьютером по интерфейсу USB, 11 – компьютер, 12-иммерсионная среда.

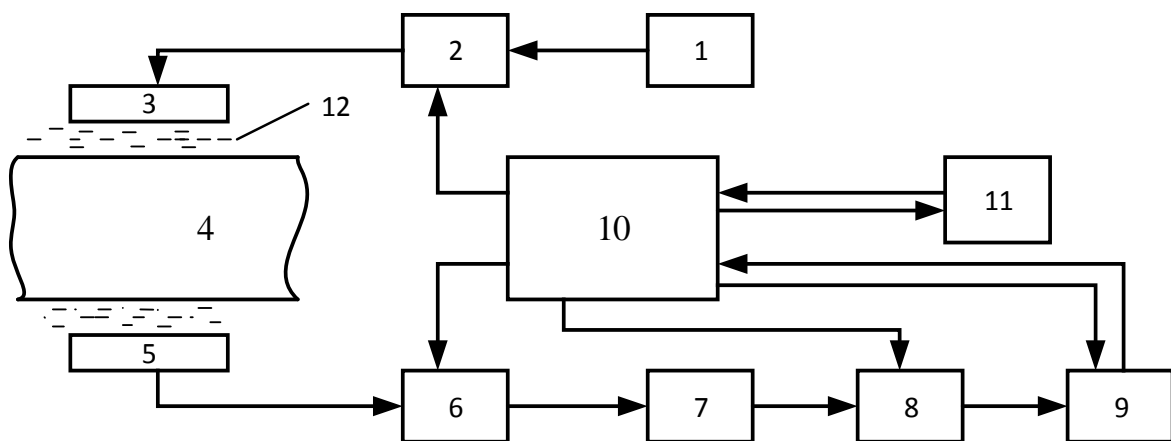


Рис. 3.1. Структурная схема прибора для контроля теньвым методом.

Прибор работает следующим образом: получая команду запуска от компьютера, блок управления и обмена данными с компьютером (10) формирует короткий импульс (рис. 3.2.а) и передает его коммутатору (2), одновременно формируется длинный импульс $t_{и1}$ (рис. 3.2.б), который поступает в коммутатор (6). Короткий импульс открывает ключ в коммутаторе (2), соответствующий первому преобразователю на излучающей решетке. При этом первый преобразователь подключается к генератору зондирующих импульсов и на него подается напряжение возбуждения в виде короткого импульса. Первый преобразователь преобразует электрический сигнал в ультразвуковой сигнал, который проходит через контролируемый объект и поступает на все преобразователи приёмной решетки. Приемные преобразователи преобразуют ультразвуковой сигнал в электрические сигналы, но на усилитель (7) через коммутатор (6) поступает только сигнал первого приемного преобразователя, т.к. блок управления и обмена данными с компьютером выдал импульс управления на коммутатор (6) только для первого канала. Усилитель усиливает это сигнал (сигнал 1 на рис. 3.2.г) и передает его на пиковый детектор. Блок управления и обмена данными с компьютером через время, необходимое для прохождения ультразвукового сигнала через объект контроля формирует импульсный сигнал $t_{и2}$ (рис. 3.2.в), который запускает пиковый детектор. Детектор запоминает

максимальную амплитуду электрического сигнала (сигнал 2 на рис. 3.2.г), и передает его на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

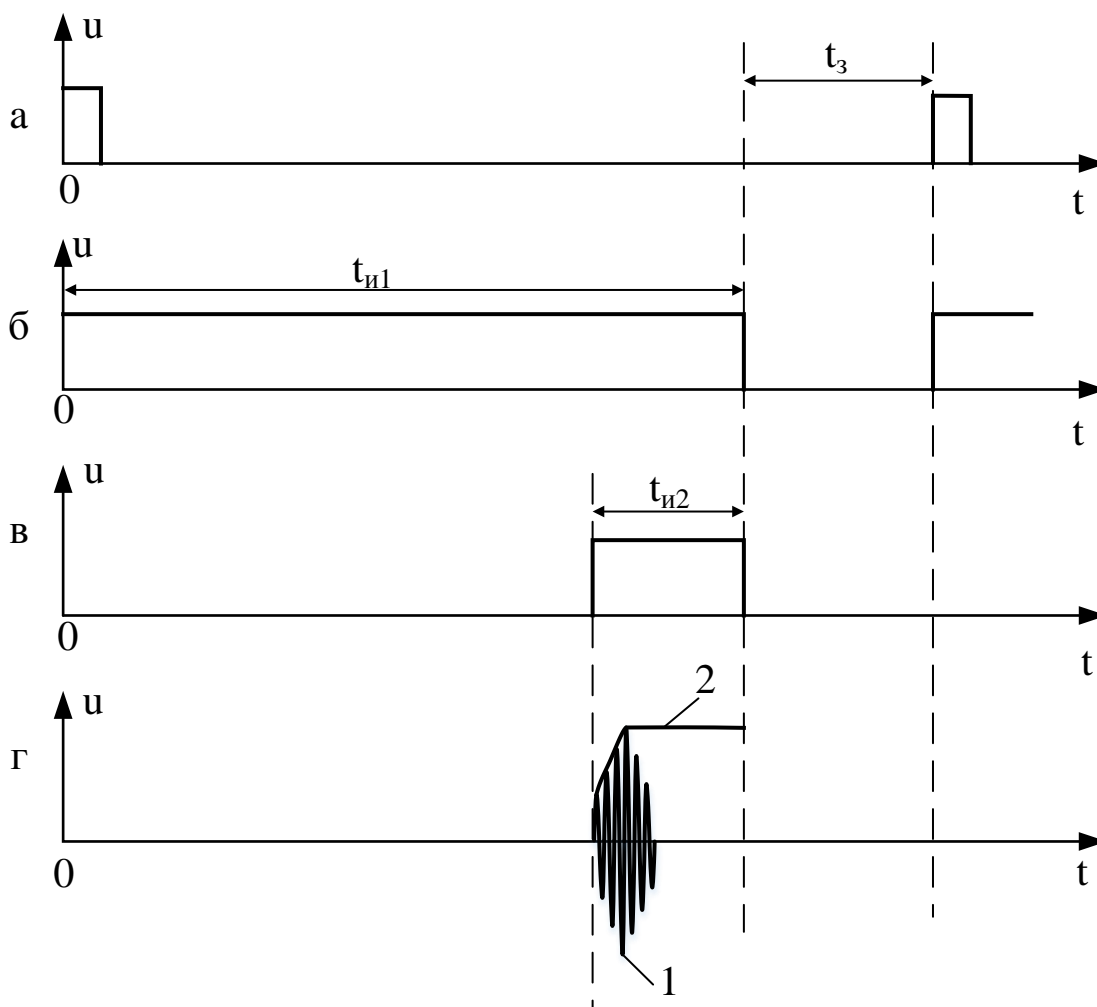


Рис. 3.2. Сигналы

По окончании импульса управления детектора запускается АЦП и затем цифровой код сигнала передается в блок управления, после этого производится сброс пикового детектор. Полученные данные сохраняются в памяти в интервале времени t_3 (рис. 3.2.а). Это процесс повторяется для следующих пар излучателей-приемников: первый излучатель – второй приемник, затем первый излучатель – третий приемник, ... первый излучатель – последний приемник, второй излучатель – первый приемник, ... последний излучатель – последний приемник. Полученная матрица данных передается в компьютер через USB интерфейс.

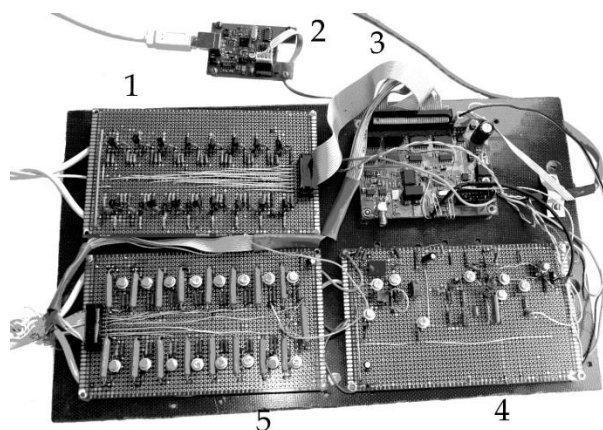


Рис. 3.3. Блок электроники экспериментальной установки, 1-блок коммутатора для излучателей, 2- блок обмена данным с ПК, 3- блок управления, 4- блок усилителя и пикового детектора, 5- блок коммутатора для приёмников.

Все узлы прибора размещены на 5 платах: 1-блок коммутатора для излучателей, 2- блок обмена данными с ПК, 3- блок управления, 4- блок усилителя и пикового детектора, 5- блок коммутатора для приёмников. Прибор питается от внешнего источника +12В, -12В и +5В и использует внешний генератор зондирующих импульсов +50В [35].

В экспериментальной установке используются две одинаковые линейные антенные решётки, состоящие из 16 круглых пьезоэлементов диаметром 6 мм и толщиной 3 мм (рис. 3.4). Расстояние между центрами пьезоэлементов равно 10 мм.

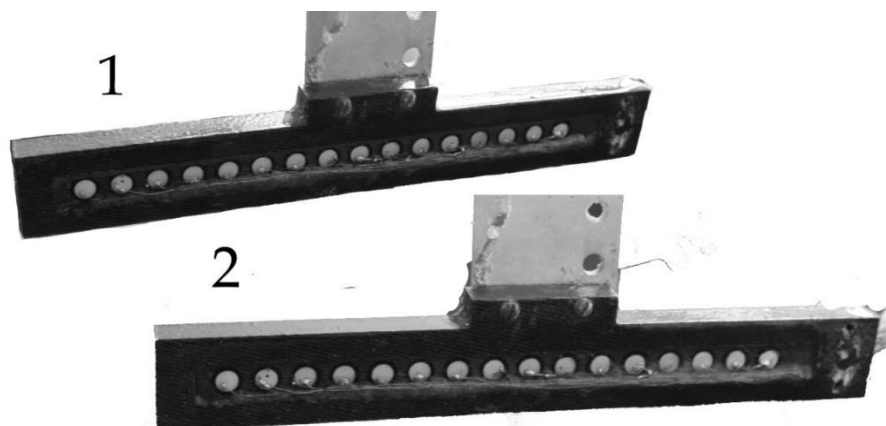


Рис. 3.4. Линейные решётки, 1- излучающая, 2- принимающая

Такие пьезоэлементы излучают ультразвук с длиной волны $\lambda = 6\text{ мм}$, следовательно, рабочая частота равна:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2,95 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^{-3}} \approx 500 \text{ кГц}$$

где v - скорость ультразвука в пьезокерамике [97, 98].

Акустический тракт экспериментальной установки содержит иммерсионную ванну и систему перемещения антенных решеток, закрепленную на иммерсионной ванне, рис. 3.5.

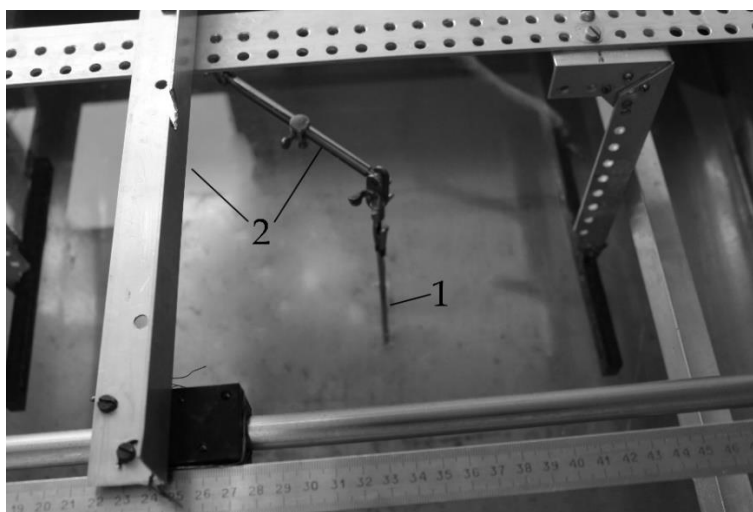


Рис. 3.5. Акустический тракт экспериментальной установки, 1 – дефект, 2 механизм перемещения

При реконструкции томографического изображения зоны контроля исследуемого объекта, используется матрица опорных данных $A_0(i, j)$, полученная с образца без дефектов и матрица данных $A(i, j)$, полученная с контролируемого объекта, из которых вычисляется матрица коэффициентов:

$$k_d(i, j) = \frac{A(i, j)}{A_0(i, j)}, \quad (3.1)$$

где $i, j=1..n$, n – количество пьезоэлементов в каждой антенной решетке.

Алгоритм реконструкции контролируемого объекта аналогичен алгоритму восстановления местоположения дефектов в модели.

Для повышения надежности контроля (повышение вероятности обнаружения дефекта и повышения точности измерения координат дефектов) используется система сканирования поверхности объекта контроля по направлению, совпадающему с продольной осью решетки. При этом обе антенных решетки перемещаются по двум параллельным линиям с заданным шагом. Шаг сканирования выбирается меньше расстояния между пьезоэлементами в антенной решетке, это позволяет получить дополнительные ракурсы теневого контроля и повысить качество томографического изображения. Полученные данные будут иметь вид трехмерной матрицы $A(s, i, j)$, где s – номер положения антенной решетки при сканировании, i – номер излучателя, j – номер приёмника.

Матрица коэффициентов рассчитывается по следующей формуле:

$$k_d(s, i, j) = \frac{A(s, i, j)}{A_0(i, j)} \quad (3.2)$$

При сканировании, каждое положение антенных решеток имеет свою зону контроля, расположенную между приёмной и передающей антенными решётками и каждый локальный элемент контролируемой области может находиться в одной или нескольких зонах контроля при различных положениях антенных решеток. Для каждого локального элемента контролируемой области $M(k, q)$ данные для построения томографического изображения вычисляются по следующей формуле:

$$datag(k, q) = \frac{\sum_{is=1}^{counts} datag(is, k, q)}{ns} \quad (3.3)$$

где is – положения решетки, при котором в зоне контроля находится элемент $M(k, q)$, $datag(is, k, q)$ – массив данных для is -го положения антенных решеток, counts- количество всех возможных положений антенных решеток, при которых элемент $M(k, q)$ находится в зоне контроля [99].

3.2 Экспериментальные исследования

С использованием представленной выше установки были проведены экспериментальные исследования.

3.2.1 Исследование точности определения местоположения дефектов

При приведении экспериментов использовались образцы с искусственными дефектами, имеющие форму цилиндра диаметра 3мм, 6мм, 9мм. Координаты центра дефекта на томограмме определяются автоматически с помощью специальной программы обработки путем вычисления минимального значения коэффициента K_d .

a. Продольная точность определения координат дефекта.

В первом эксперименте дефект располагался в зоне контроля в иммерсионной ванне и перемещался по направлению от излучающей решётки к приемной решётке с шагом 10мм, а расстояние между излучающей и приемной решетками равнялось 400 мм. (рис. 3.6).

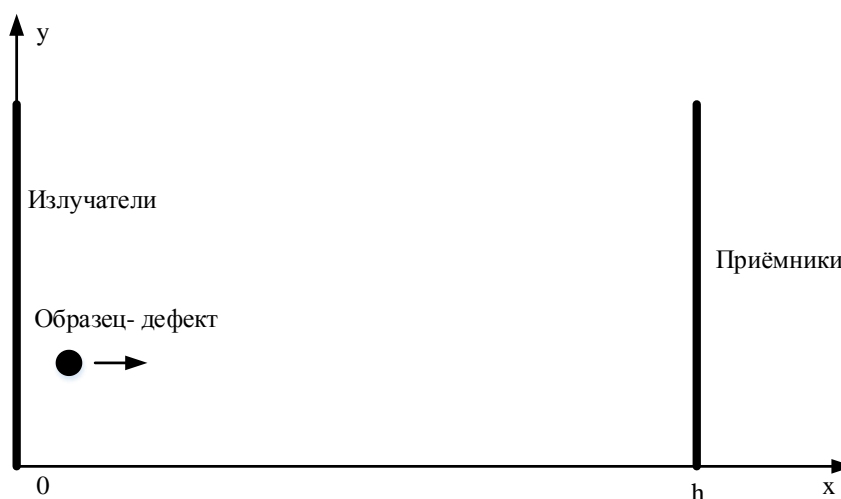


Рис. 3.6. Схема для исследования погрешности в определении продольной координаты дефекта.

На рис. 3.7, рис. 3.8, рис. 3.9 показана зависимость погрешности определения местоположения дефектов разного размера от расстояния между дефектом и излучающей решёткой.

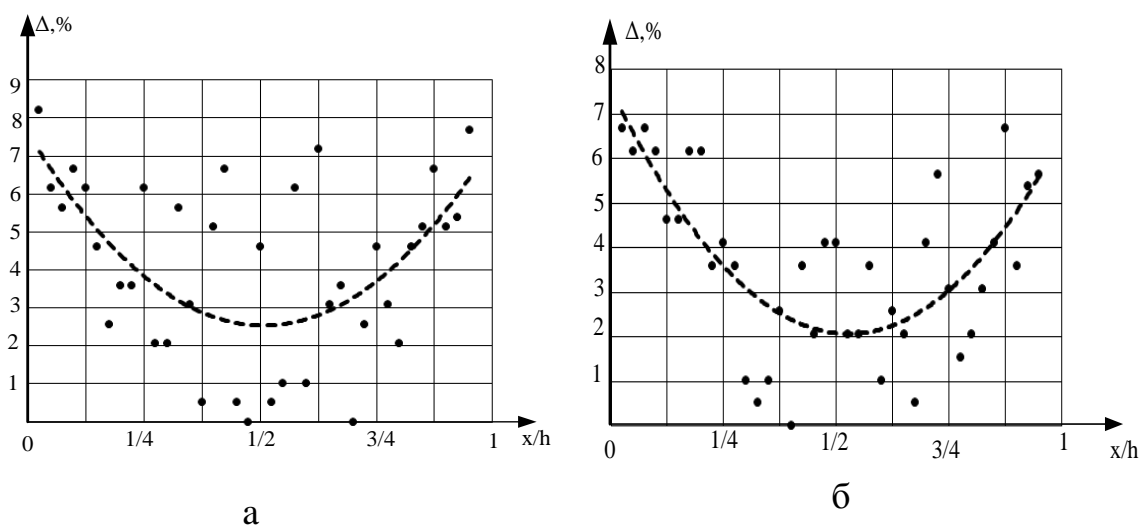


Рис. 3.7. Зависимость погрешности определения продольной координаты положения дефекта от расстояния между дефектом диаметром 3мм и излучающей антенной решеткой, а-при фронтальном расположении дефекта напротив шестого пьезоэлемента; б- при фронтальном расположении дефекта напротив восьмого пьезоэлемента.

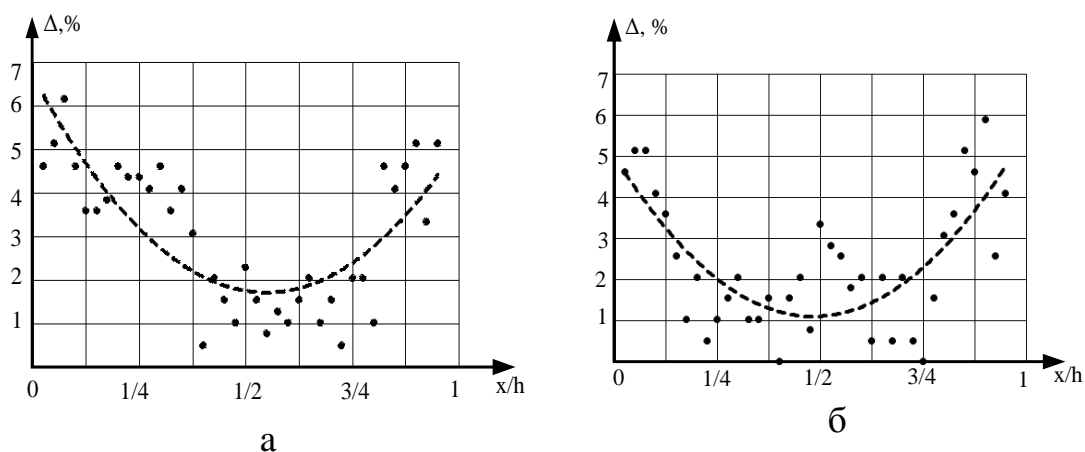


Рис. 3.8. Зависимость погрешности определения продольной координаты положения дефекта от расстояния между дефектом диаметра 6мм и излучающей антенной решеткой, а- при фронтальном расположении дефекта напротив шестого пьезоэлемента; б- при фронтальном расположении дефекта напротив восьмого пьезоэлемента.

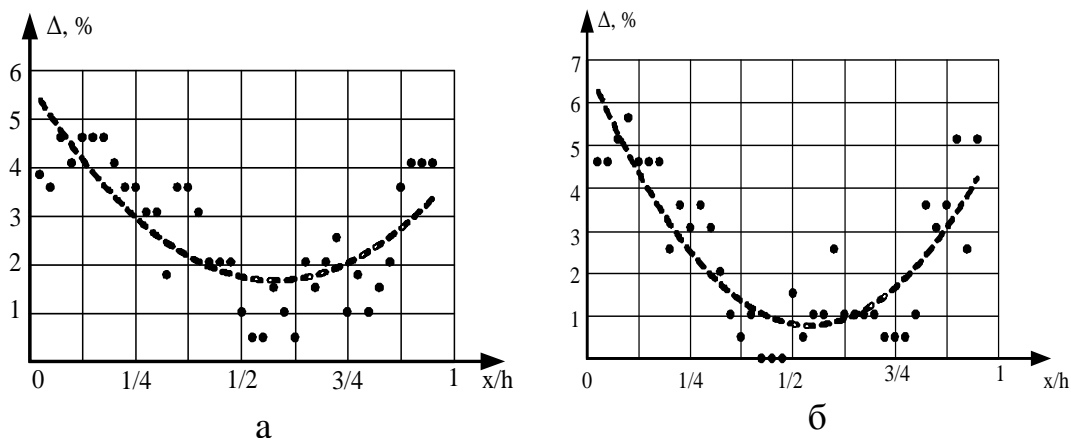


Рис. 3.9. Зависимость погрешности определения продольной координаты положения дефекта от расстояния между дефектом диаметра 9мм и излучающей антенной решеткой, а- при фронтальном расположении дефекта напротив шестого пьезоэлемента, б- при фронтальном расположении дефекта напротив восьмого пьезоэлемента.

Из рис. 3.7, 3.8 и 3.9 видно, что наименьшая погрешность определения продольной координаты дефекта наблюдается в центре зоны контроля, т.е. когда дефект расположен напротив восьмого пьезоэлемента и на расстоянии равном половине расстояния между антенными решетками.

б. Фронтальная точность определения координат дефекта

При экспериментальном исследовании фронтальной погрешности определения координат дефекта каждый образец располагался в зоне контроля в иммерсионной ванне и перемещался вдоль решётки с шагом 5 мм на разных расстояниях от излучающей решётки (рис. 3.10.).

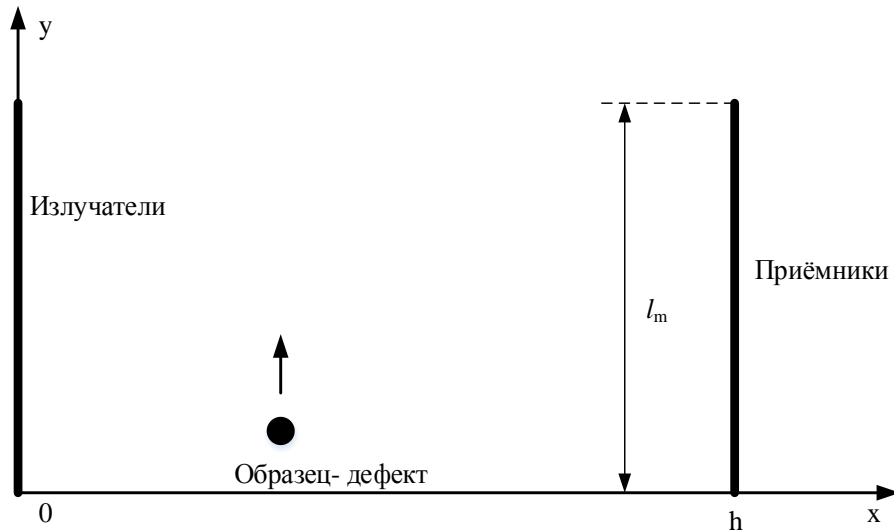


Рис. 3.10. Схема для исследования погрешности в определении фронтальной координаты дефекта.

На рис. 3.11, рис. 3.12, рис. 3.13 показана зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефектов разного размера от фронтального положения дефекта. При этом дефект находился на расстоянии 150мм и 200мм от излучающей решётки, а расстояние между излучающей и приёмной решетками равнялось 400 мм.

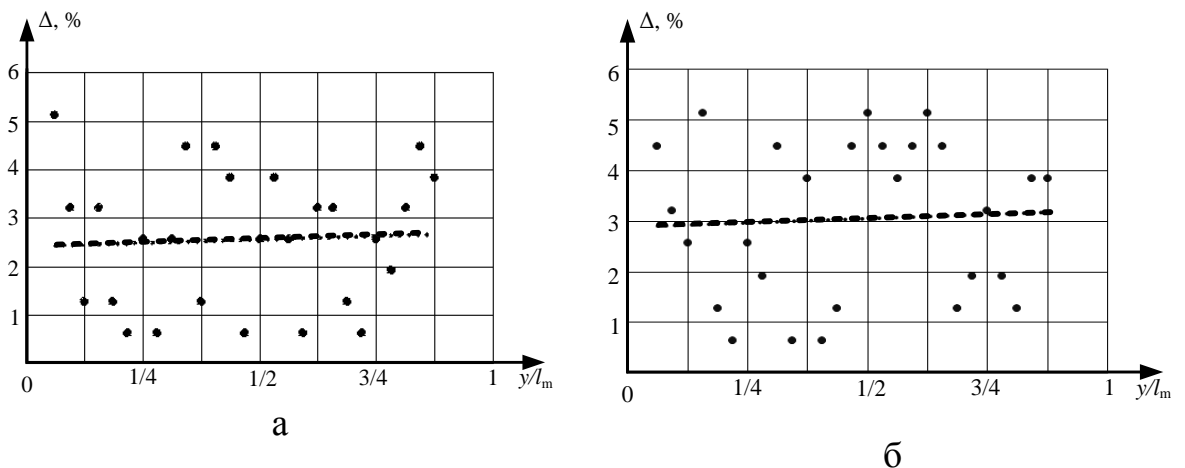


Рис. 3.11. Зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефекта при смещении дефекта вдоль антенной решеткой при фронтальном смещении дефекта для дефекта диаметра 3мм; а- при расстоянии 150 мм до излучающей антенной решетки; б- при расстоянии 200 мм до излучающей антенной решетки.

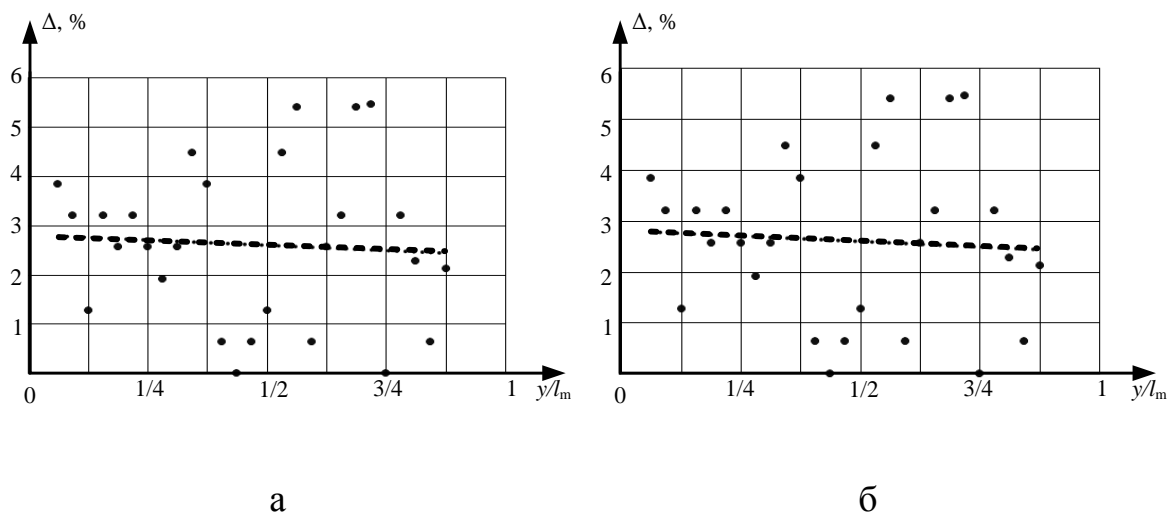


Рис. 3.12. Зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефекта при смещении дефекта вдоль антенной решеткой при фронтальном смещении дефекта для дефекта диаметра 6мм; а -при расстоянии 150 мм до излучающей антенной решетки; б- при расстоянии 200 мм до излучающей антенной решетки.

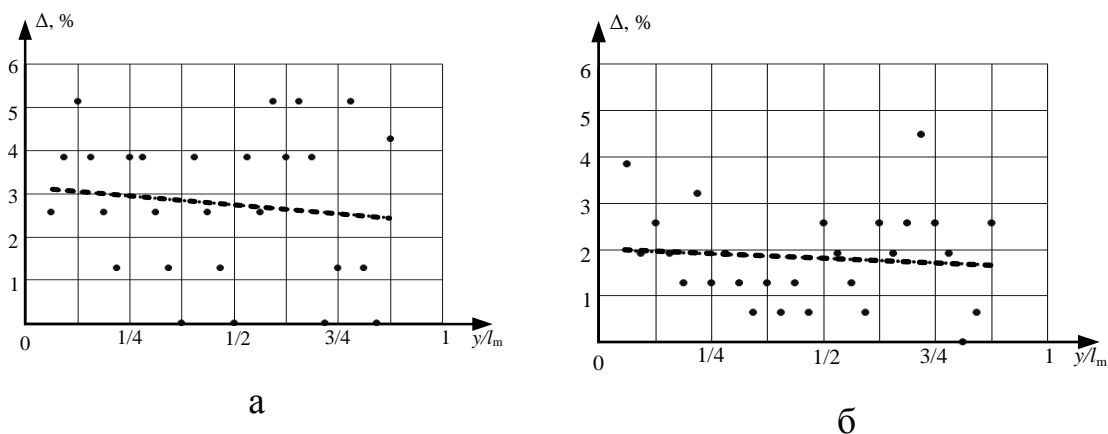


Рис. 3.13. Зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефекта при смещении дефекта вдоль антенной решеткой при фронтальном смещении дефекта для дефекта диаметра 9мм; а -при расстоянии 150 мм до излучающей антенной решетки; б- при расстоянии 200 мм до излучающей антенной решетки.

Из рис. 3.11, 3.12 и 3.13 видно, что наименьшая погрешность определения фронтальной координаты дефекта наблюдается в центре зоны

контроля, т.е. когда дефект расположен напротив восьмого пьезоэлемента и на расстоянии равном половине расстояния между антенными решетками.

3.2.2 Исследование коэффициента K_d

Величина K_d влияет на контрастность изображения дефекта в зоне контроля, поэтому очень важно знать как будет зависеть коэффициент K_d от пространственного положения дефекта и от его размеров. Кроме того коэффициент K_d будет определять размеры «акустической тени» дефекта и соответственно определять размеры «акустического образа» дефекта.

1. Влияние пространственного положения дефекта на коэффициент K_d .

Изменение коэффициента K_d при перемещении дефекта поперек решётки будет характеризовать продольную контрастность «акустического образа» дефекта на томографическом изображении зоны контроля. В этом эксперименте дефект располагался в зоне контроля в иммерсионной ванне и перемещался вдоль линии соединяющей шестые элементы излучающей и приемной решёток с шагом 10 мм (рис.3.6). Полученная зависимость коэффициента K_d от положения дефекта при перемещении дефекта вдоль линии соединяющей шестые элементы антенных решеток показана на рис. 3.14. На рис. 3.15 показана такая же зависимость, но дефект перемещался вдоль линии соединяющей восьмые элементы антенных решеток.

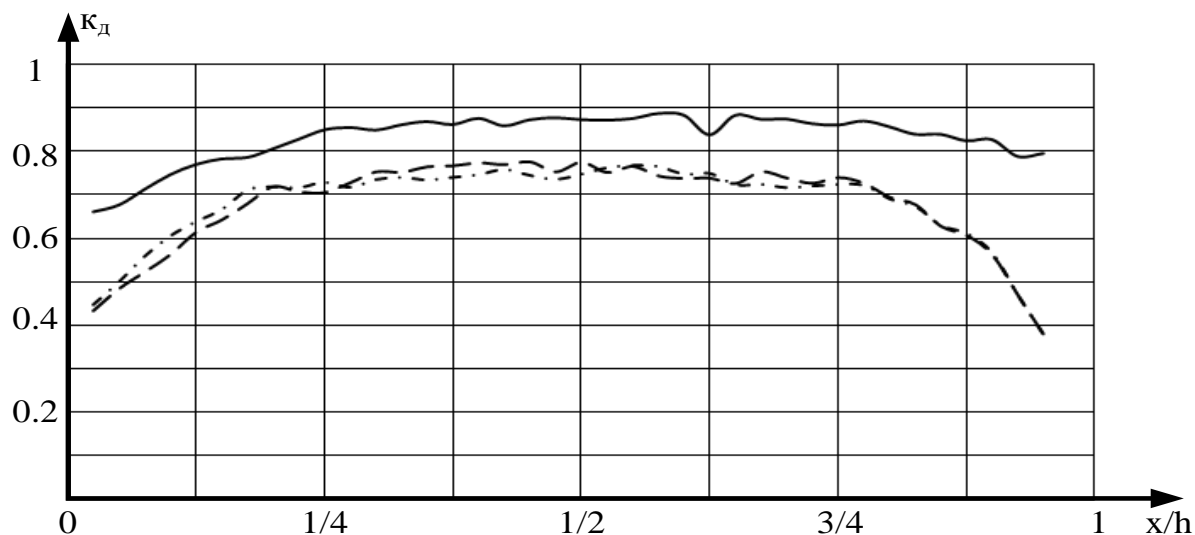


Рис. 3.14. Зависимость K_d от расстояния между дефектом и излучателем при расположении дефекта напротив 6 элемента антенной решетки, сплошная линия – дефект диаметра 3мм, штрихпунктирная линия - дефект диаметра 6мм, штриховая линия – дефект диаметра 9мм.

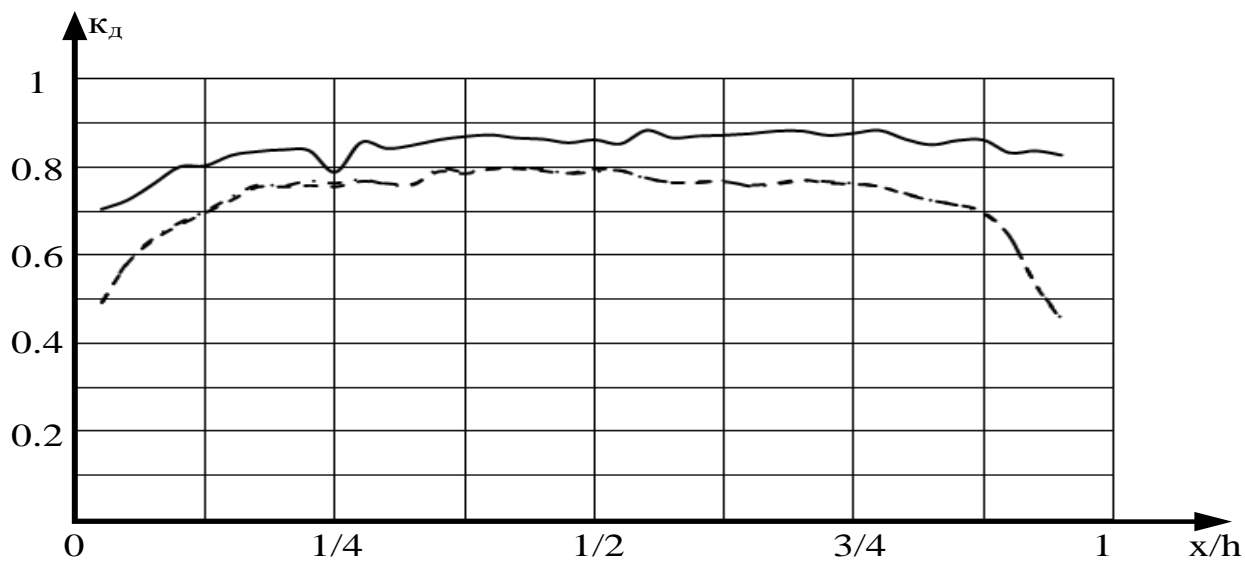


Рис. 3.15. Зависимость K_d от расстояния между дефектом и излучателем при расположении дефекта напротив 8 элемента антенной решетки, сплошная линия – дефект диаметра 3мм, штрихпунктирная линия - дефект диаметра 6мм, штриховая линия – дефект диаметра 9мм.

Анализ рис. 3.14 и 3.15 позволяет сделать следующие выводы. Вблизи антенных решеток коэффициент k_d имеет минимальное значение и

увеличивается при увеличении расстояния до $h/4$, где h – расстояние между антенными решетками. При дальнейшем увеличении расстояния коэффициент K_d не изменяется сохраняя свое значение на уровне 0,8 – 0,9 в зависимости от размеров дефекта. На расстоянии $3h/4$ коэффициент k_d начинает уменьшаться достигая величины 0,45 на границе зоны контроля, рядом с антенной решеткой. Следовательно, наименьшая контрастность изображения будет наблюдаться в центре зоны контроля. В этой же области размер «акустического образа» дефекта будет в наибольшей степени соответствовать размерам реального дефекта, соответственно погрешность определения продольной координаты дефекта будет минимальна в центре зоны контроля.

Изменение коэффициента K_d при перемещении дефекта вдоль решётки будет характеризовать погрешность определения фронтальной координаты дефекта и фронтальную контрастность «акустического образа» дефекта на томографическом изображении зоны контроля. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.16 и 3.17. На рис. 3.16 представлена зависимость коэффициента K_d при перемещении дефекта вдоль решётки на расстоянии 150 мм от излучающей решётки. На рис. 3.17 представлена такая же зависимость, но дефект перемещался на расстоянии 200 мм от излучающей решетки.

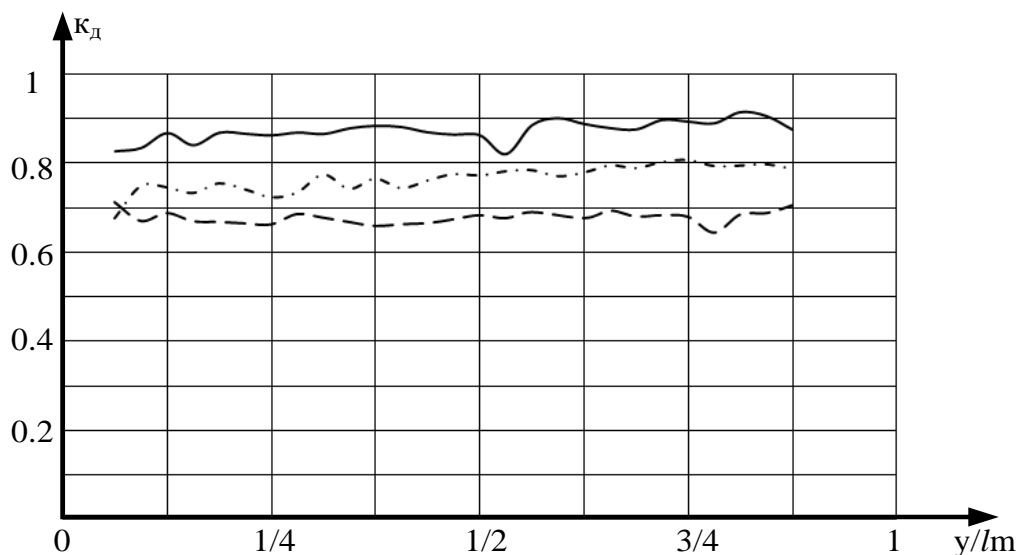


Рис. 3.16. Зависимость K_d от смещения дефекта вдоль решетки на расстоянии 150 мм от излучающей антенной решетки для разных размеров дефекта, сплошная линия – дефект диаметра 3мм, штрихпунктирная линия - дефект диаметра 6мм, штриховая линия – дефект диаметра 9мм.

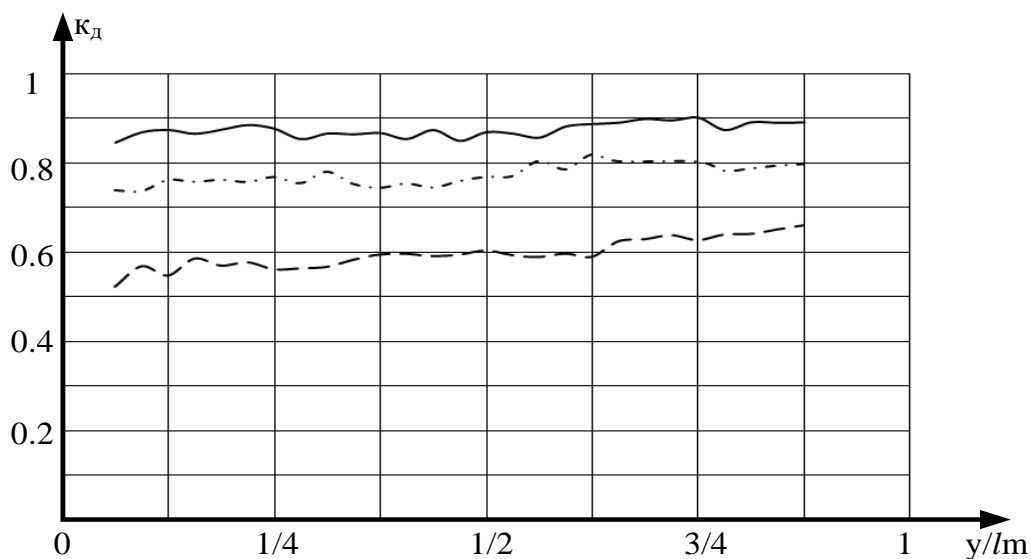


Рис. 3.17. Зависимость K_d от смещения дефекта вдоль решетки на расстоянии 200 мм от излучающей антенной решетки для разных размеров дефекта, сплошная линия – дефект диаметра 3мм, штрихпунктирная линия - дефект диаметра 6мм, штриховая линия – дефект диаметра 9мм.

Анализ рис. 3.16 и 3.17 позволяет сделать следующие выводы. Коэффициент K_d практически не изменяется во всем диапазоне перемещений. Следовательно, фронтальная контрастность изображения

будет постоянной по всей зоне контроля и соответственно фронтальный размер «акустического образа» дефекта будет также постоянным, соответственно погрешность определения фронтальной координаты дефекта будет тоже постоянной.

2. *Исследование зависимости коэффициента K_d от размера дефекта при разных местоположениях дефекта.*

Для оценки соответствия «акустического образа» дефекта реальным размерам были проведены исследования зависимости коэффициента K_d от размера дефекта при разных пространственных местоположениях дефекта. При приведении экспериментов использовались образцы-дефектов имеющие форму цилиндра диаметром 3мм, 4мм, 5мм, 6мм, 7мм, 8мм, 9мм, 10мм, 11мм. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.18.

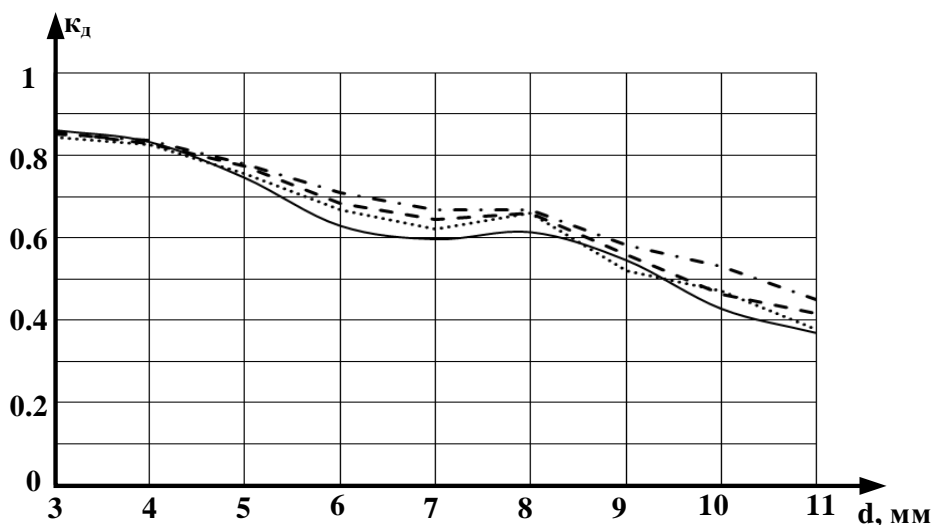


Рис. 3.18. Зависимость K_d от размера дефектов в разных местах зоны контроля,
 сплошная линия – координаты (100мм,60мм), штрихпунктирная линия–
 координаты (200мм,90мм), Штриховая линия – координаты (200мм,60мм),
 пунктирная линия – координаты (100мм,90мм)

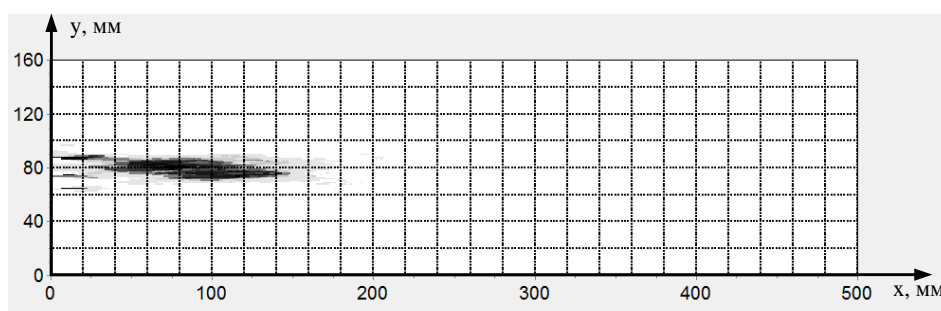
Анализ рис. 3.18. показывает, что при увеличении размеров дефекта вне зависимости от положения дефекта коэффициент K_d в центре «акустического образа» дефекта уменьшается. Это приводит к увеличению

контрастности томографического изображения «акустического образа» дефекта в зоне контроля.

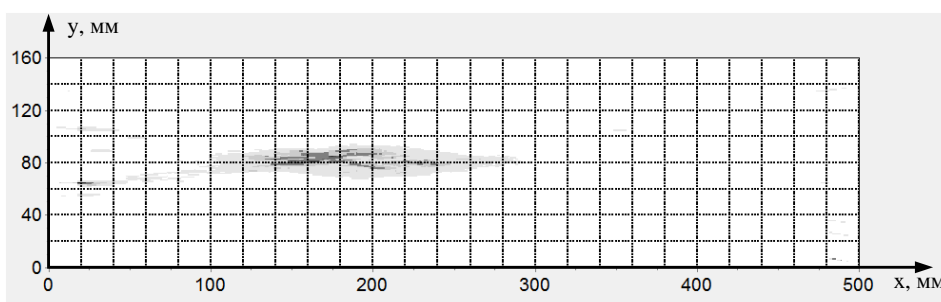
3.2.3 Исследование чувствительности

Экспериментальное исследование разрешающей способности системы контроля проводилось путем размещения дефектов разных диаметров в разных местах зоны контроля (рис3.10). Томографические изображения результатов контроля представлены на рис.3.19 – 3.23.

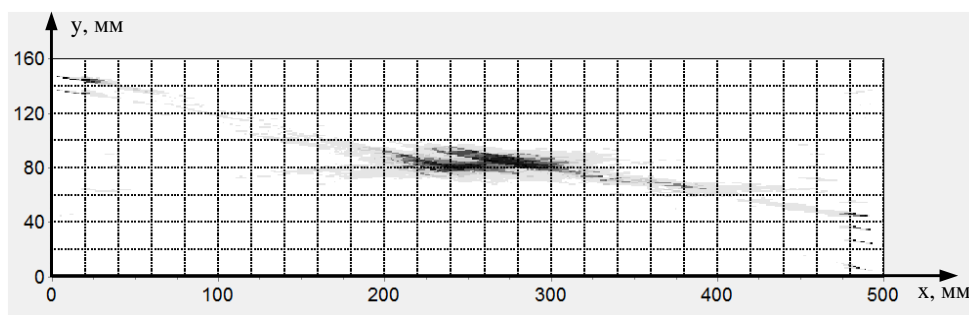
На рис.3.19 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $1,5 \text{ мм}^2$ расположенным в центре антенных решеток. На рис.3.20 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $1,3 \text{ мм}^2$ расположенным также в центре антенных решеток.



а



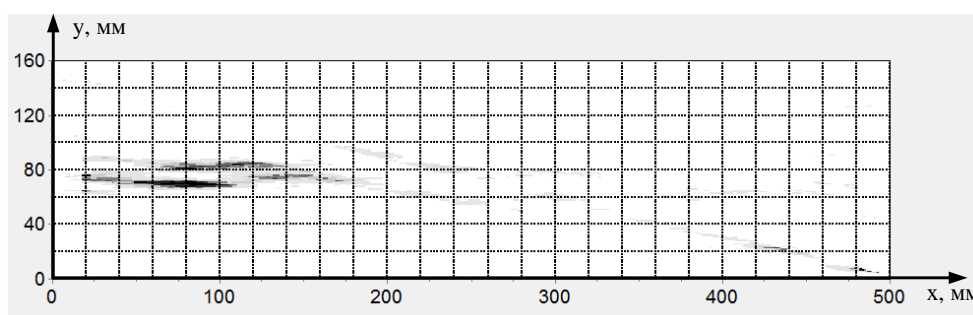
б



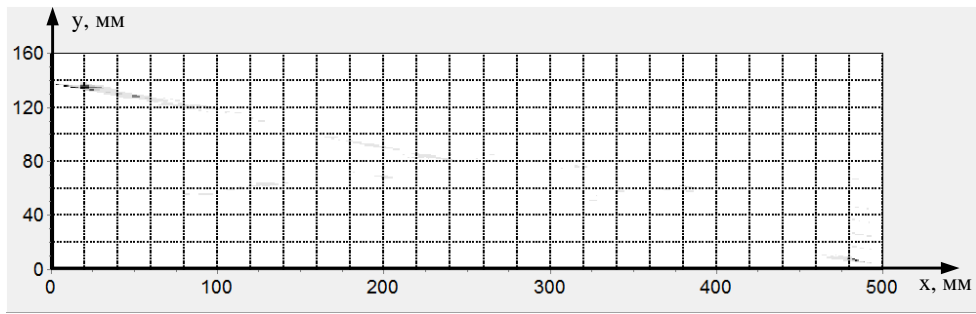
в

Рис. 3.19. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм и размером дефекта $1,5 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки, в – дефект расположен на расстоянии 250 мм от решетки.

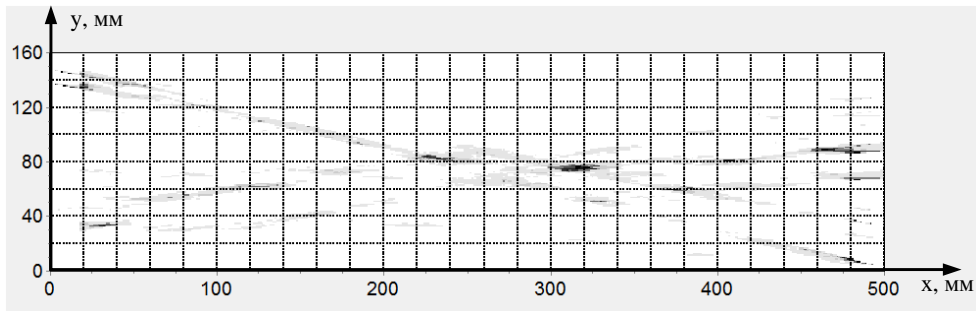
Из рис. 3.19 и 3.20 видно, что чем ближе дефект расположен к антенной решетке, тем лучше результаты реконструкции томограммы. Это объясняется большим диапазоном изменения коэффициента K_d при смещении дефекта поперек решетки, что было отмечено выше. Кроме того дефект $1,3 \text{ мм}^2$ не детектируется, следовательно чувствительность система контроля в центре зоны контроля составляет $1,5 \text{ мм}^2$.



а



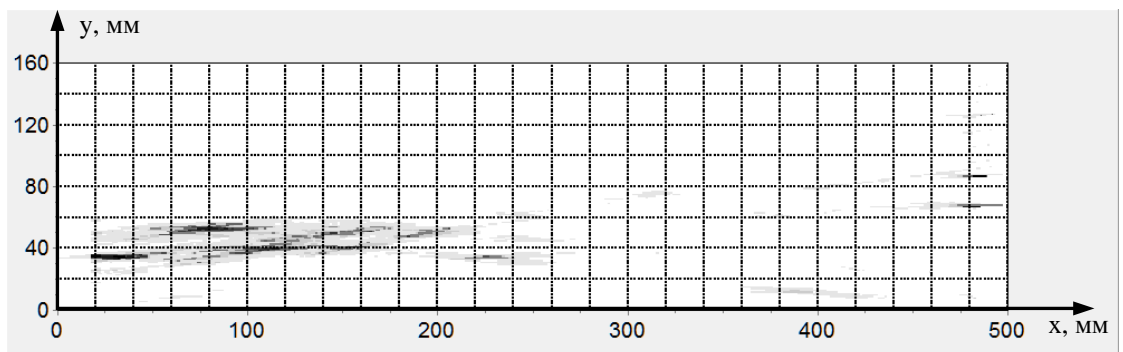
б



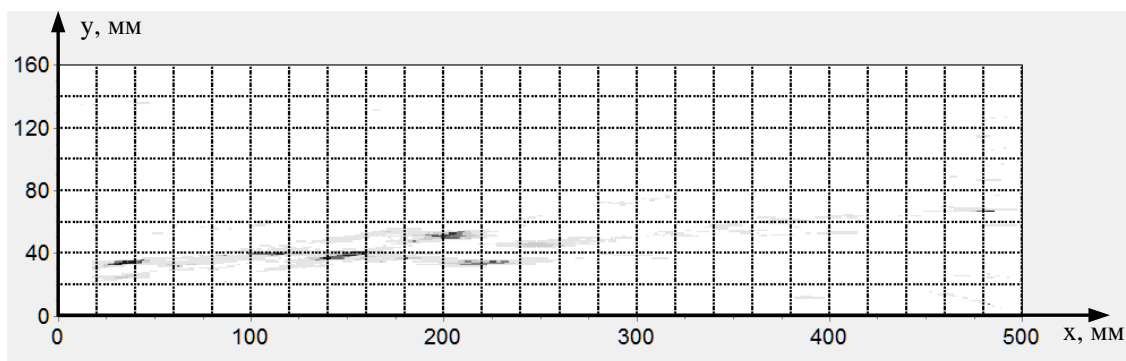
в

Рис. 3.20. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм и размером дефекта $1,3 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки, в – дефект расположен на расстоянии 250 мм от решетки.

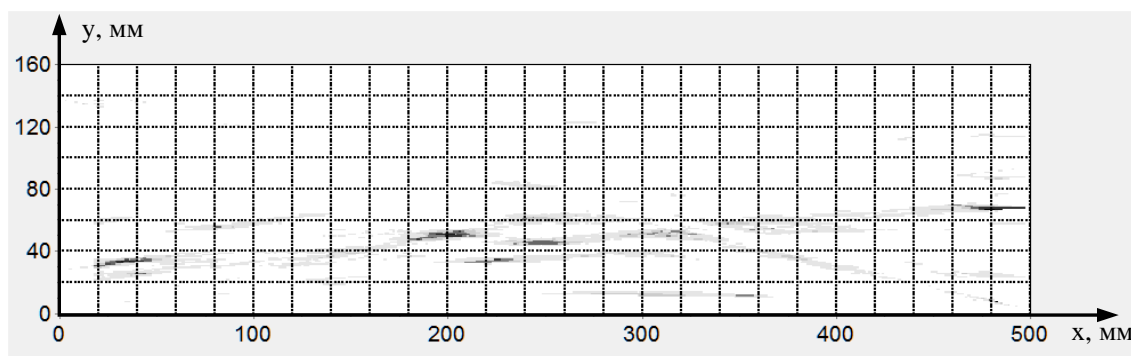
На рис. 3.21 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $1,5 \text{ мм}^2$ расположенным на краю антенных решеток. А на рис.3.22 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $2,0 \text{ мм}^2$ расположенным также на краю антенных решеток.



а

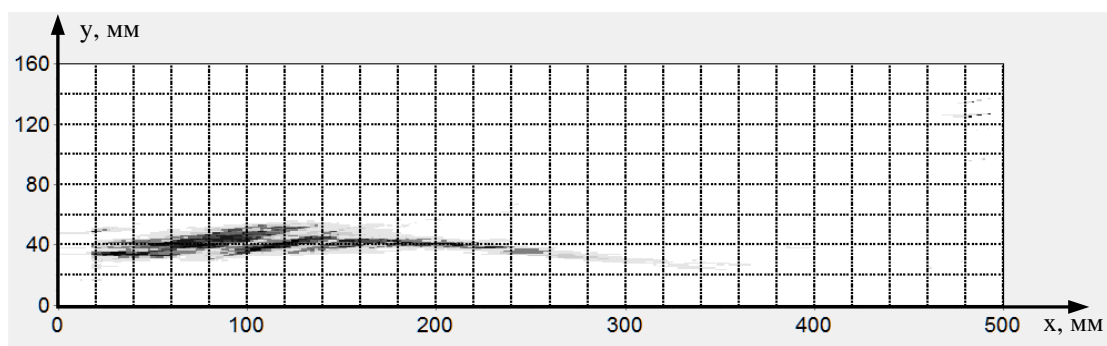


б

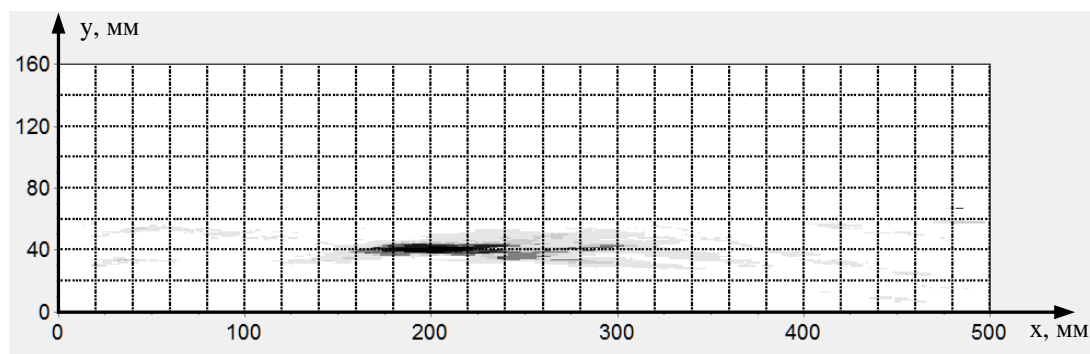


в

Рис. 3.21. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм и размером дефекта $1,5 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки, в – дефект расположен на расстоянии 250 мм от решетки.



а

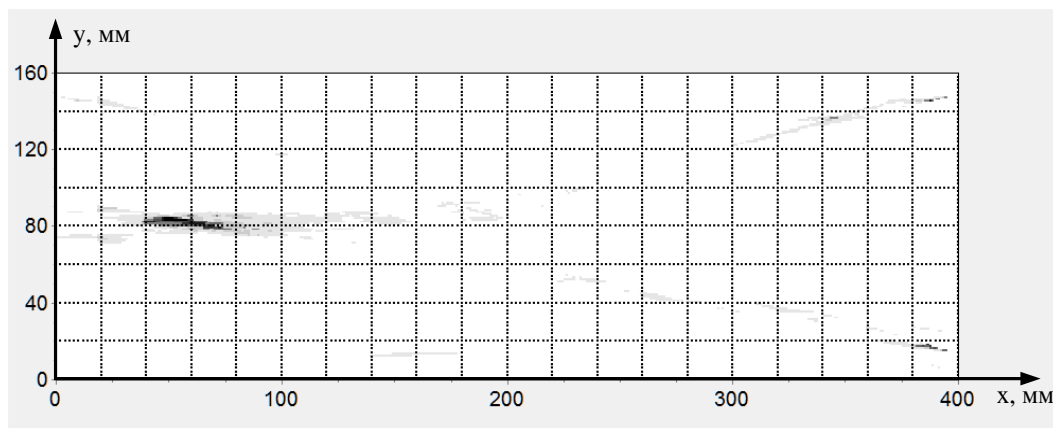


б

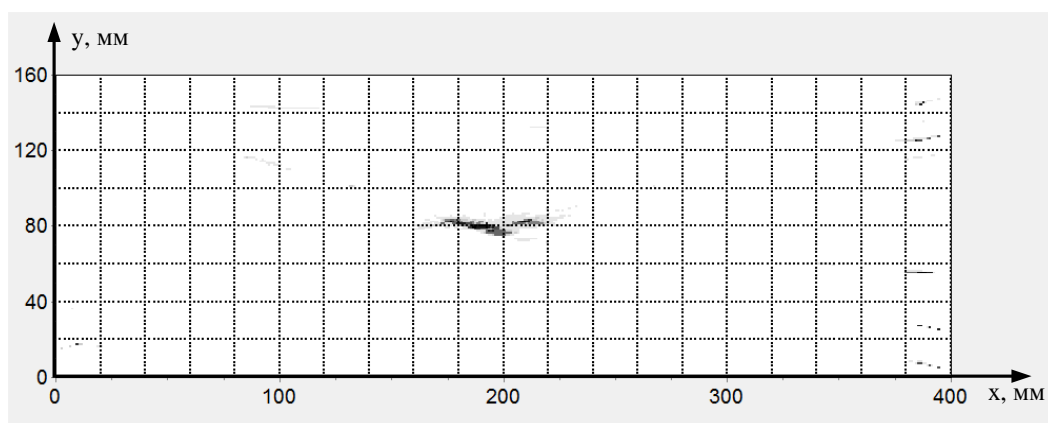
Рис. 3.22. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм и размером дефекта $2,0 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки

При смещении дефекта к краю антенных решеток минимальное значение коэффициента K_d составляет 0.97. Следовательно, при наличии дефекта амплитуда сигнала изменяется не значительно и сопоставима с уровнем шумов. Поэтому на краю зоны контроля дефект $1,5 \text{ мм}^2$ не детектируется. Чувствительность на краю зоны контроля хуже и составляет 2 мм^2 .

При изменении расстояния между антенными решетками чувствительность изменяется. Она увеличивается при уменьшении дистанции. На рис. 3.23 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $0,9 \text{ мм}^2$ расположенным в центре антенных решеток. А на рис. 3.24 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $1,1 \text{ мм}^2$ расположенным также в центре антенных решеток. Расстояние между антенными решетками в этом случае составляло 400 мм.



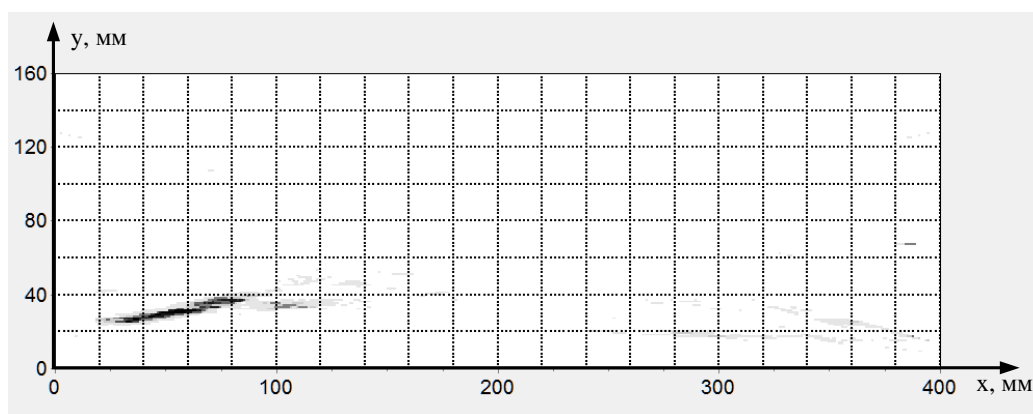
а



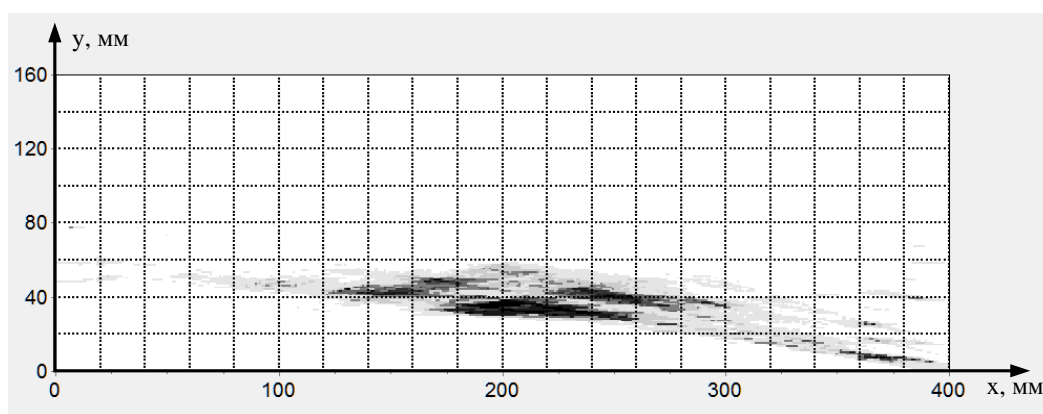
б

Рис. 3.23. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм и размером дефекта $0,9 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки

Чувствительность системы для этого случая составила $0,9 \text{ мм}^2$ в центре зоны контроля. При смещении дефекта к краю антенной решетки чувствительность ухудшается. Как видно из рис. 3.24 она составила $1,1 \text{ мм}^2$ на краю зоны контроля.



а



б

Рис. 3.24. Томограммы зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм и размером дефекта $1,1 \text{ мм}^2$, а – дефект расположен на расстоянии 100 мм от решетки, б – дефект расположен на расстоянии 200 мм от решетки

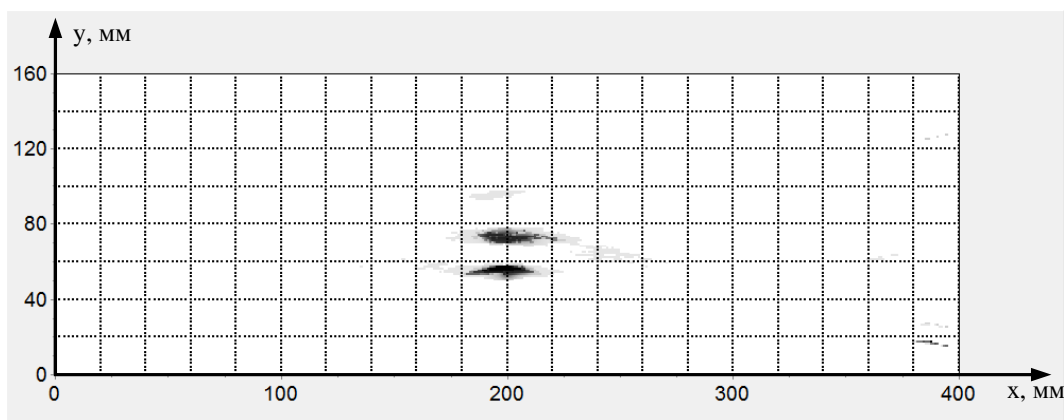
Дефект детектируется в центре зоны контроля, когда расстояние между дефектом и приемной антенной решеткой равно расстоянию между дефектом и излучающей антенной решеткой.

3.2.4 Исследование разрешающей способности

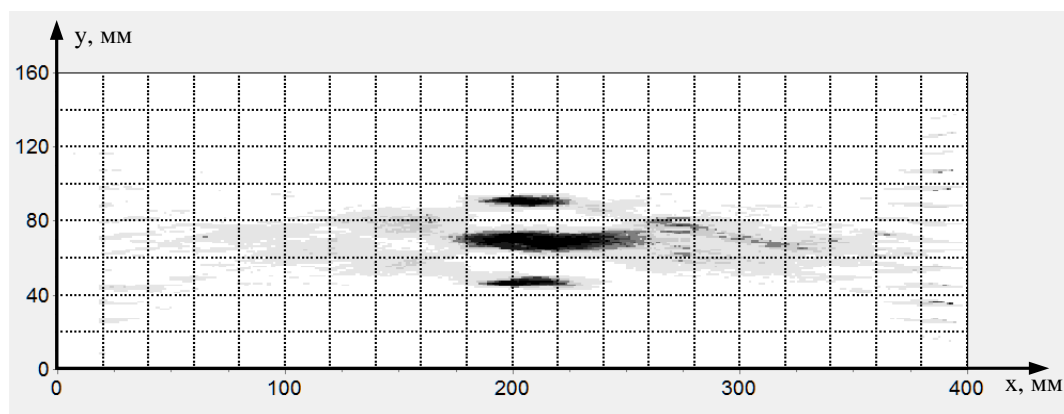
Экспериментальное исследование разрешающей способности многоканального ультразвукового трансмиссионного дефектоскопа проводилось путем размещения двух одинаковых дефектов в разных местах

зоны контроля (рис3.10). Томографические изображения результатов контроля представлены на рис. 3.25 – 3.27.

На рис. 3.25 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при различных расстояниях между дефектами.



а

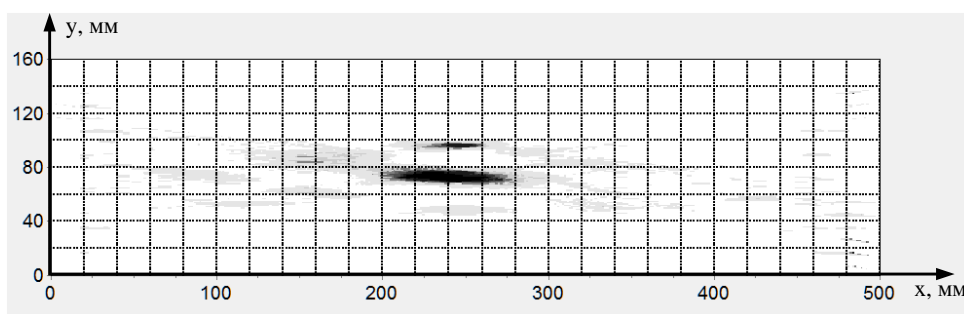


б

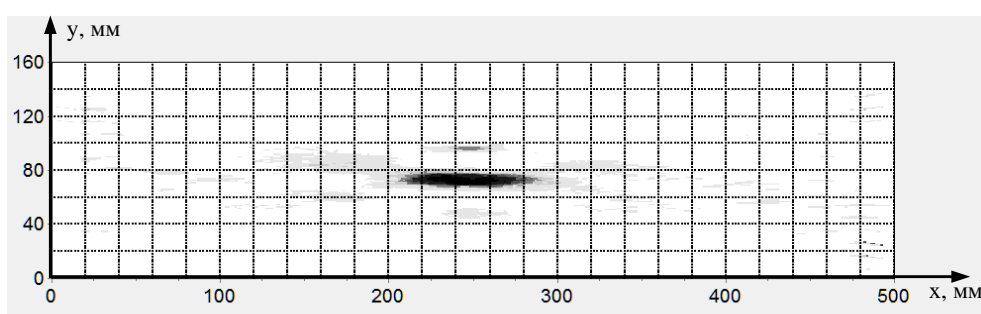
Рис. 3.25. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, а – расстояние между дефектами 17 мм, б – расстояние между дефектами 15 мм

На рис. 3.26 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при

расстоянии между антенными решетками 500 мм, при различных расстояниях между дефектами.



а

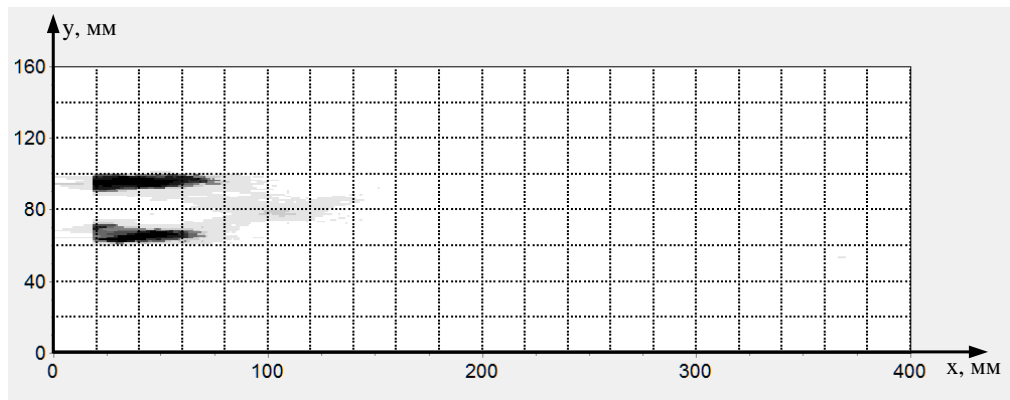


б

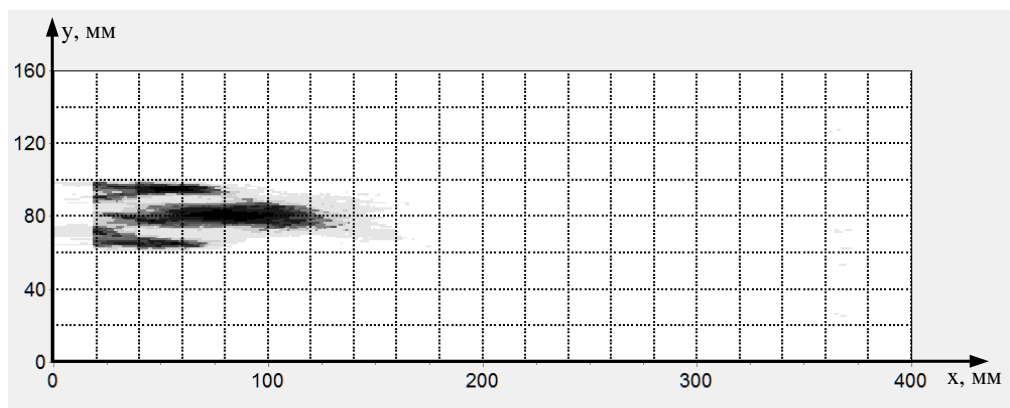
Рис. 3.26. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм, а – расстояние между дефектами 15 мм, б – расстояние между дефектами 17 мм

Из рис. 3.25 и 3.26 видно, что фронтальная разрешающая способность зависит от параметров акустического тракта и при дистанции между антенными решетками 400 мм дефекты находящиеся в центре зоны контроля детектируются по отдельности, если расстояние между ними превышает 17 мм.

На рис. 3.27 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными на расстоянии 50 мм от антенной решетки при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при различных расстояниях между дефектами.



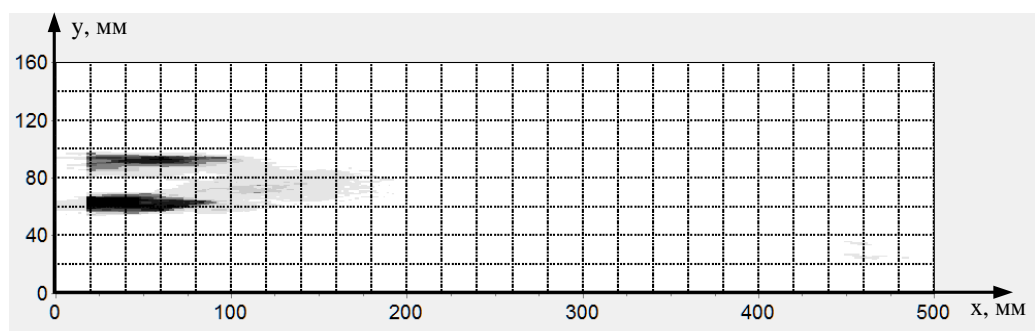
а



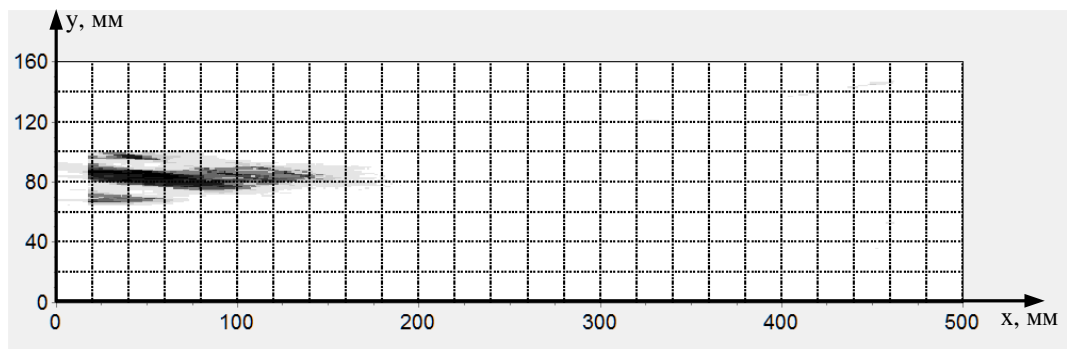
б

Рис. 3.27. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными на расстоянии 50 мм от антенной решетки при расстоянии между антенными решетками 400 мм, а – расстояние между дефектами 15 мм, б – расстояние между дефектами 12 мм

На рис. 3.28 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными на расстоянии 50 мм от антенной решетки при расстоянии между антенными решетками 500 мм, при различных расстояниях между дефектами.



а

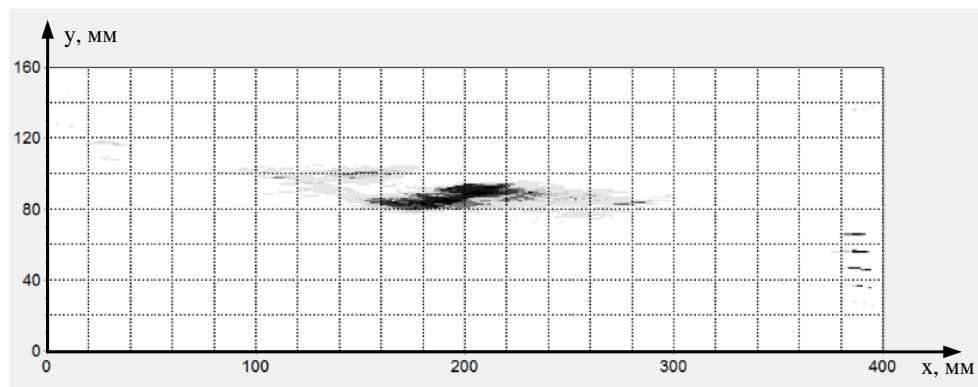


б

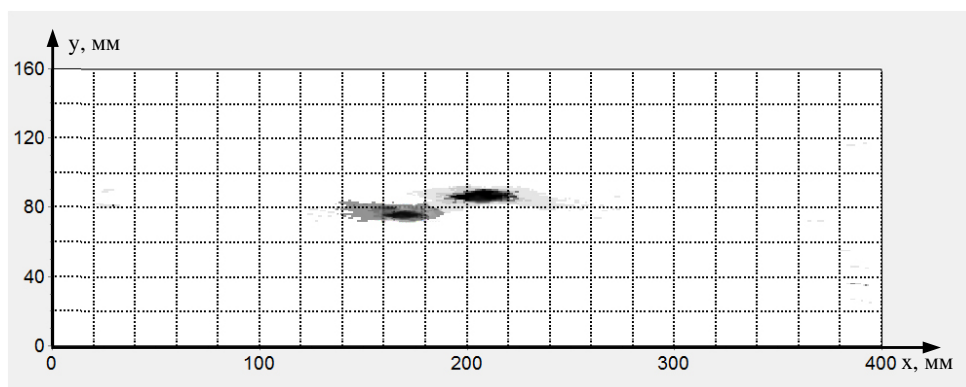
Рис. 3.28. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными на расстоянии 50 мм от антенной решетки при расстоянии между антенными решетками 500 мм, а – расстояние между дефектами 15 мм, б – расстояние между дефектами 12 мм

Из рис. 3.27 и 3.28 видно, что фронтальная разрешающая способность зависит от положения дефектов в зоне контроля и расстоянии 50 мм от антенной решетки дефекты детектируются по отдельности, если расстояние между ними превышает 15 мм.

На рис. 3.29 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при различных расстояниях между дефектами



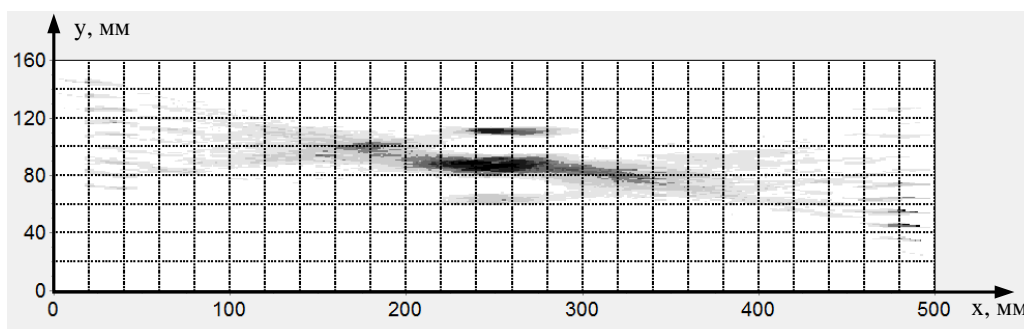
а



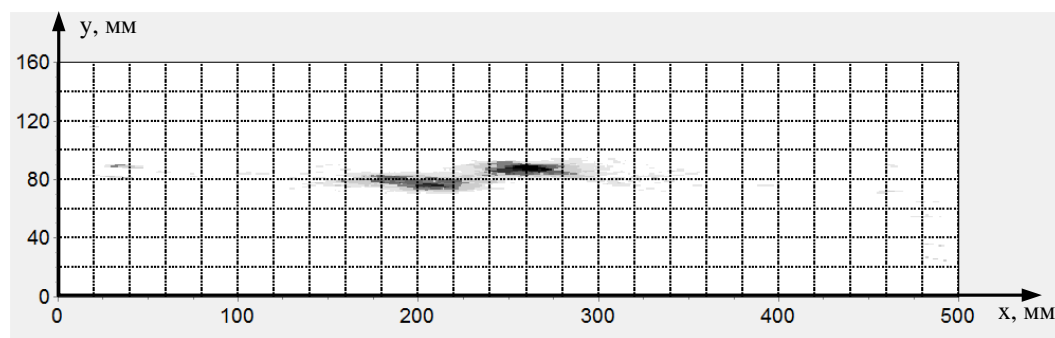
б

Рис. 3.29. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, а – расстояние между дефектами 16 мм, б – расстояние между дефектами 18 мм

На рис. 3.30 представлены томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм, при различных расстояниях между дефектами



а



б

Рис. 3.30. Томограммы зоны контроля с двумя дефектами диаметром 6 мм расположенными в центре зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 500 мм, а – расстояние между дефектами 18 мм, б – расстояние между дефектами 20 мм,

Из рис. 3.29 и 3.30 видно, что продольная разрешающая способность зависит от расстояния между решётками, она равна 18 мм при расстоянии между решётками 400мм и равна 20мм при расстоянии между решётками 500мм

3.3 Интерфейс оператора

Для управления блоком электроники дефектоскопа используется интерфейс оператора, основное окно которого приведено на рис. 3.31. Основное окно содержит несколько вспомогательных окон и кнопок.

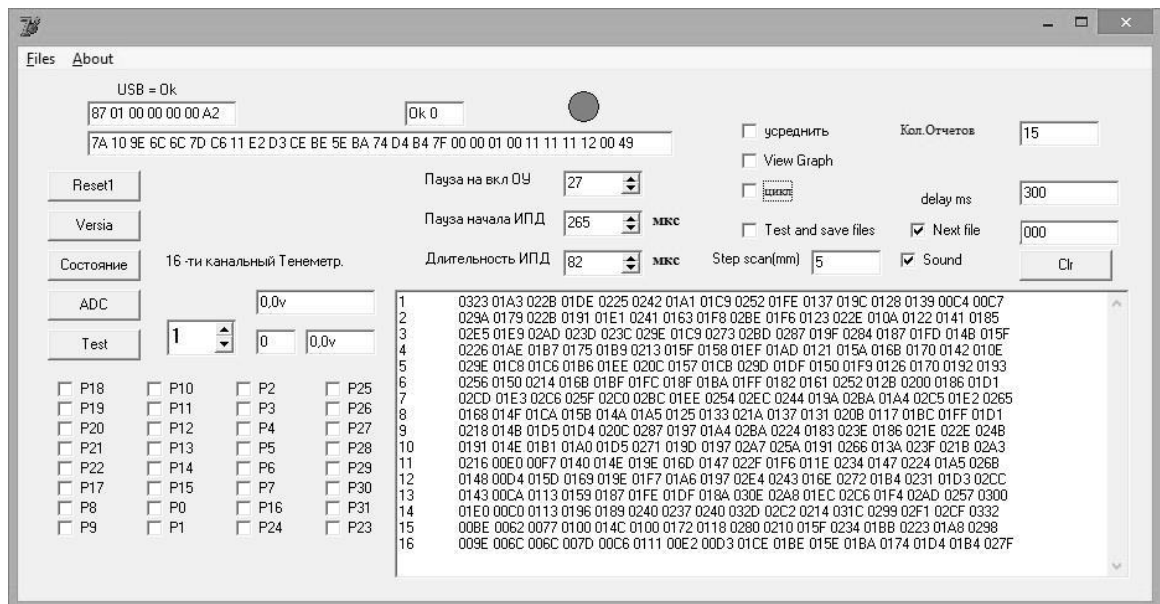


Рис. 3.31. Основное окно управляющей программы.

Рассмотрим основные из них, которые определяют настройки и режим работы блока электроники. В левой верхней части основного окна расположено окно “USB = Ok”, которое показывает состояние готовности интерфейса USB. Ниже этого окна расположены специальные кнопки: «Reset1», «Versia», «Состояние», «ADC» и «Test». При нажатии кнопки «Reset1», система управления будет перезагружаться и принимать начальные параметры настройки. При нажатии кнопки «Versia» в окне «16-ти канальный тенеметр» отображается номер модификации прибора, подключенного к ПК. При нажатии кнопки «Состояние», в окнах “USB = Ok” показывается состояние интерфейса USB: “USB = Ok” если связь прибора с ПК имеется и “USB = off” если связь прибора с ПК отсутствует. При нажатии кнопки «ADC», производится тестирование АЦП. При нажатии кнопки «Test», запускается прибор по заданным параметрам и режиму работы. Параметры приборы задаются с помощью вспомогательных окон, находящихся в средней верхней части основного окна: «Пауза на вкл. ОУ», «Пауза начала ИПД», «Длительность ИПД». В окне «Пауза на вкл. ОУ» устанавливается время t_3 (рис.3.2.а), в микросекундах; в окне «Пауза начала ИПД»

устанавливается длительность импульса $t_{и1}$ (рис.3.2.б) в микросекундах; в окне «Длительность ИПД» устанавливается длительность импульсного сигнала $t_{и2}$ (рис.3.2.в), который запускает пиковый детектор, в микросекундах. Режим работы прибора выбирается окнами, находящими в правой верхней части основного окна: Если в окне «усреднить» присутствует символ «v», то прибор будет циклический запускаться несколько раз и каждый раз данные загружаются в компьютер, затем усредняются и используются при реконструкции томографического изображения зоны контроля. Если в окне «View Graph» присутствует символ «v», то будет возникать дополнительное окно для визуального наблюдения уровней сигналов на приёмниках (рис.3.19.) в реальном времени. В этом окне отображаются 16 рисунков, соответствующие 16 излучателям пронумерованных слева от рисунков. Каждый рисунок содержит 16 гистограмм, показывающих уровень приемного сигналов каждом канале по оси «Y». Номер канала отложен по оси «X».

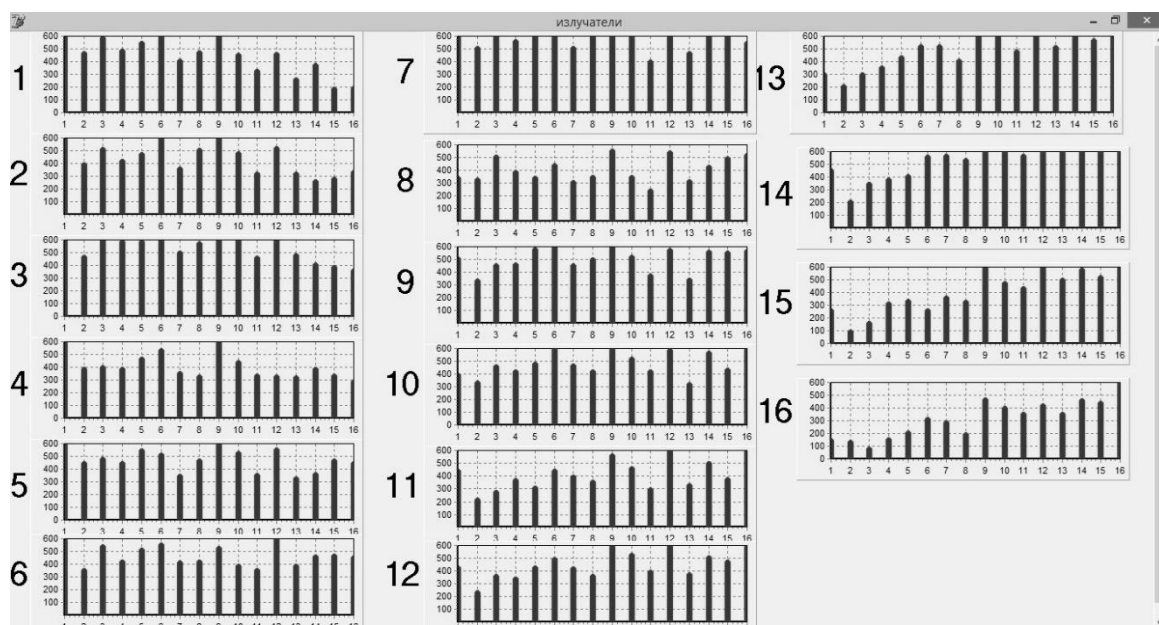


Рис. 3.32. Вспомогательное окно для отображения уровней сигналов на приёмниках при последовательном излучении элементами антенной решетки от 1 до16

Если в вспомогательном окне «цикл» основного окна присутствует символ «v», то прибор будет циклический запускаться через время паузы, устанавливающееся в окне «*delay ms*». Это функция позволяет проверять работоспособность схемы с помощью осциллографа и других приборов. Если в вспомогательном окне «*Test an save files*» присутствует символ «v», то после получения результирующих данных, программа автоматически открывает диалоговое окно для их сохранения (рис. 3.33). Для автоматического создания названия файла используется вспомогательное окно «*Next file*». Для, выбора шага сканирования используется вспомогательное окно «*Step scan(mm)*». Если проводится сканирование, то название файла создается автоматически как показано на рис. 3.33. Причем в названии файла 3 первых цифры указывает номер файла и 3 цифр после буквы «X» указывают координаты положения решёток. Например название файла «020_X100.txt» означает, что 020 это порядковый номер файла, а 100 координата положения решетки. Функции «усреднить» и «*Test an save files*» могут использоваться одновременно. Так же функции «*View Graph*» и «цикл» могут использоваться одновременно. Другие комбинации использовать не рекомендуется. Если не одно из этих вспомогательных окон не отмечено, то при нажатии кнопки «*Test*», прибор запускается только однократно. При этом для сохранения данных, нужно выбрать меню «*Files*», затем выбрать «Сохранить», и ввести название файла. В нижней правой части основного окна, расположено вспомогательное окно для отображения потока данных, которые появляются после нажатия кнопки «*Test*». Кнопка «*clr*» используется для удаления данных в этом окне. Если окно «*Sound*» отмечено, то в конце процесса получения данных будет выработан звуковой сигнал о окончании этого процесса.

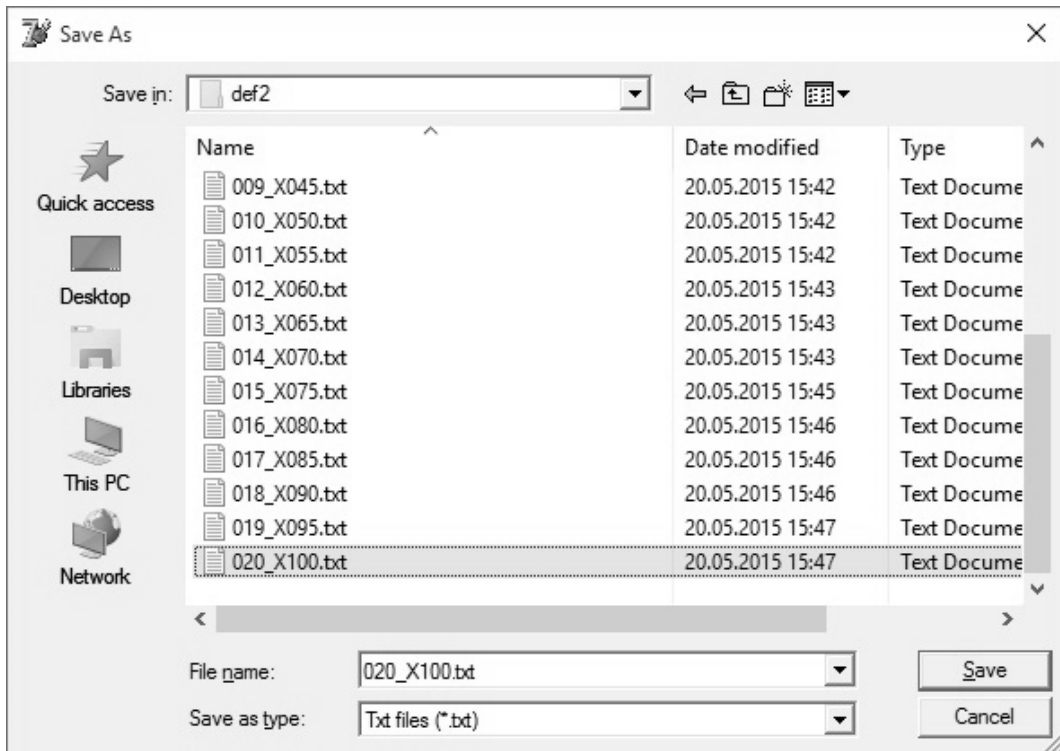


Рис. 3.33. Диалоговое окно для сохранения данных

3.3 Структурная схема многоканального малоракурсного теневого дефектоскопа

Результаты теоретических и экспериментальных исследований были воплощены в теновом малоракурсном дефектоскопе «Multi-channel acoustic shadow flaw detector», использующем антенные решетки. Структурная схема прибора показана на рис. 3.34.

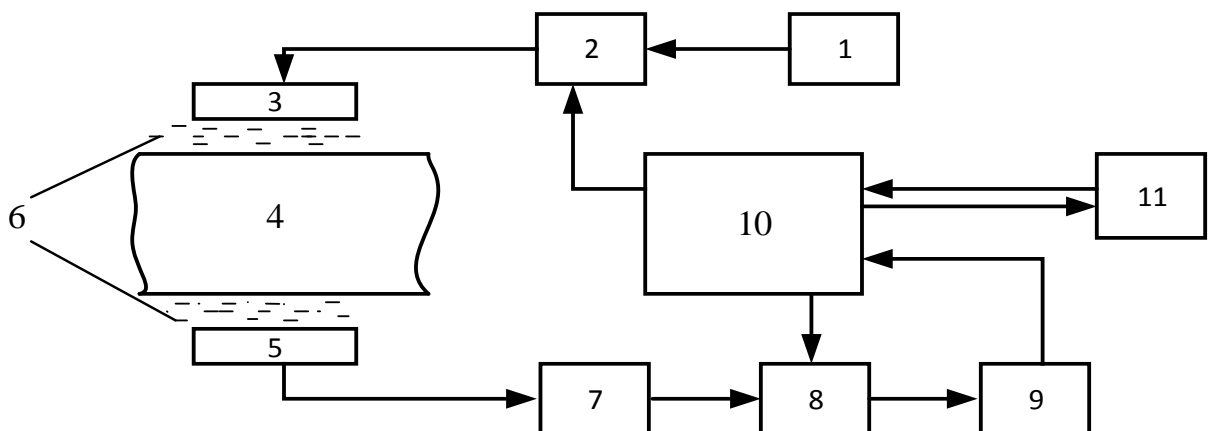


Рис. 3.34. Структурная схема малоракурсного теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector»

Созданный прибор состоит из следующих узлов: 1 – генератор зондирующих импульсов, 2 – коммутатор, 3 – излучающая антенная решетка, 4 – контролируемый объект, 5 – приемная антенная решетка, 6 – среда, проводящая ультразвук, 7 – усилитель, 8 – пиковый детектор, 9 – аналого-цифровой преобразователь, 10 – блок управления и обмена данными с компьютером по интерфейсу USB, 11 – персональный компьютер.

Прибор работает следующим образом: блок управления 10 через коммутатор 2 поочередно возбуждает каждый преобразователь излучающей антенной решетки 3. Сигналы, проходящие через контролируемый объект 4, принимаются всеми преобразователями приёмной антенной решётке 5 одновременно. Приёмники преобразуют ультразвуковые сигналы в электрические сигналы и передают их на усилители 7, соответствующие каждому приёмному преобразователю, по отдельному каналу. Максимальная амплитуда каждого сигнала запоминается отдельным детектором 8 для каждого канала и передается на вход многоканального аналого-цифрового преобразователя 9 (АЦП). По окончании импульса управления детектора 8 запускается АЦП 9. По окончании процесса преобразования цифровой код сигнала с АЦП передается в блок управления 10, после этого производится сброс пикового детектора. Полученные данные сохраняются в памяти блока управления и передаются в ПК 11, в котором осуществляется реконструкция томографического изображения.

При использовании трансмиссионного метода для реконструкции томографического изображения объекта контроля как и для одноканального варианта, использующего только одну пару излучатель- приёмник, требуется образец, в котором отсутствует дефект, чтобы получить опорные сигналы. Но в реальных случаях контроля, не всегда имеется образец для получения матрицы опорных данных. Поэтому в предлагаемом дефектоскопе был реализован следующий подход решения этой проблемы: при сканировании если путь сканирования достаточно длинный, то всегда будет такое

положение антенных решеток, в которых в лучевой трубке пара излучатель i – приемник j отсутствует дефект. Для этого положения антенных решеток полученная амплитуда сигнала пары излучатель i – приемник j будет наибольшей и при отсутствии дефекта в объекте контроля равна амплитуде сигнала для остальных положений антенных решеток. Следовательно, из максимальных значений сигналов пары излучатель i – приемник j получаем матрицу опорных данных $A_0(i, j)$ из полной матрицы данных $A(s, i, j)$, полученной при сканировании. Каждый элемент матрицы $A_0(i, j)$ вычисляется по следующей формуле:

$$A_0(i, j) = \text{MAX}(A(s, i, j)),$$

где $s=1..ns$, ns – количество положений антенных решеток при сканировании.

После получения опорной матрицы $A_0(i, j)$, матрица коэффициентов для построения томографического изображения вычисляется аналогично как в случае использования контрольного образца, т.е по выражению (3.2).

Фотография многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector» представлена на рис. 3.35.



Рис. 3.35. Внешний вид многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector»

Таблица 5

Основные технические характеристики дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector»

Наименование характеристики	Параметр
Максимальный размер зоны контроля без сканирования, мм	160x400
Минимальный шаг сканирования, мм	1
Погрешность определения координат дефекта, %, не более	10
Длина волны зондирующего сигнала, мм	6
Диаметр пьезоэлемента в антенных решетках, мм	5
Расстояние между пьезоэлементами, мм	10
Разрешающая способность	
- в центре зоны контроля, мм, не более	20
- на краю зоны контроля мм, не более	15
Чувствительность	
- в центре зоны контроля, мм, не более	1,3

-на краю зоны контроля, мм, не более	5
Масса блока электроники, Кг, не более	5
Масса антенных решеток, Кг, не более	0,1

Интерфейс оператора многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector» используется от экспериментальной установки, описанной в разделе 3.3. Изготовленный многоканальный малоракурсный акустический теневой дефектоскоп был внедрен на HSTM Vietnam construction consulting company для входного контроля композитных материалов и изделий из них.

С использованием многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector» были проведены эксперименты на многослойных материалах из стеклопластика, предоставленных Заказчиком. Все результаты получены при сканировании контролируемого объекта с шагом 2мм и отсутствии эталонного образца без дефекта. Акустический тракт имел следующие параметры: расстояние между решётками 200мм, количество элементов на одной решетке - 16 круглых элементов диаметра 6мм, расстояние между которыми равно 10мм. Решётки и контролируемые объекты расположены в водной среде.

При исследовании определялась глубина залегания дефекта в контролируемом объекте размером 500x400x200мм, показанном на рис. 3.36. Объект, распложенный в зоне контроля между решётками, имел два слоя с непроклеем в форме круга диаметром 10мм на границе между слоями. Результаты исследования показаны на рис. 3.37

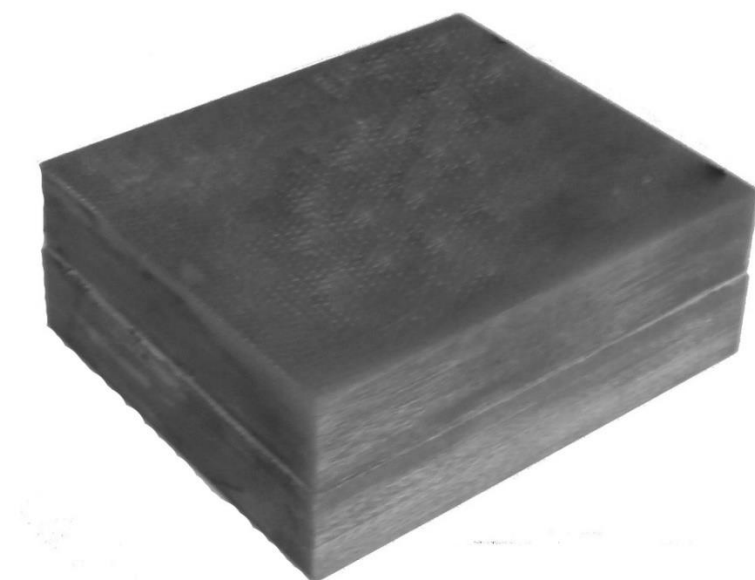


Рис. 3.36. Контролируемый объект №1 размером 500x400x200мм

Из рис. 3.37а видно, что глубина залегания дефекта даже при отсутствии фильтрации определяется с погрешностью не более 10%. Однако размеры акустического образа дефекта существенно превышают размеры реального объекта. При наличии фильтрации увеличивается точность определения глубины залегания дефекта и размеры акустического образа дефекта приближаются к размерам реального объекта.

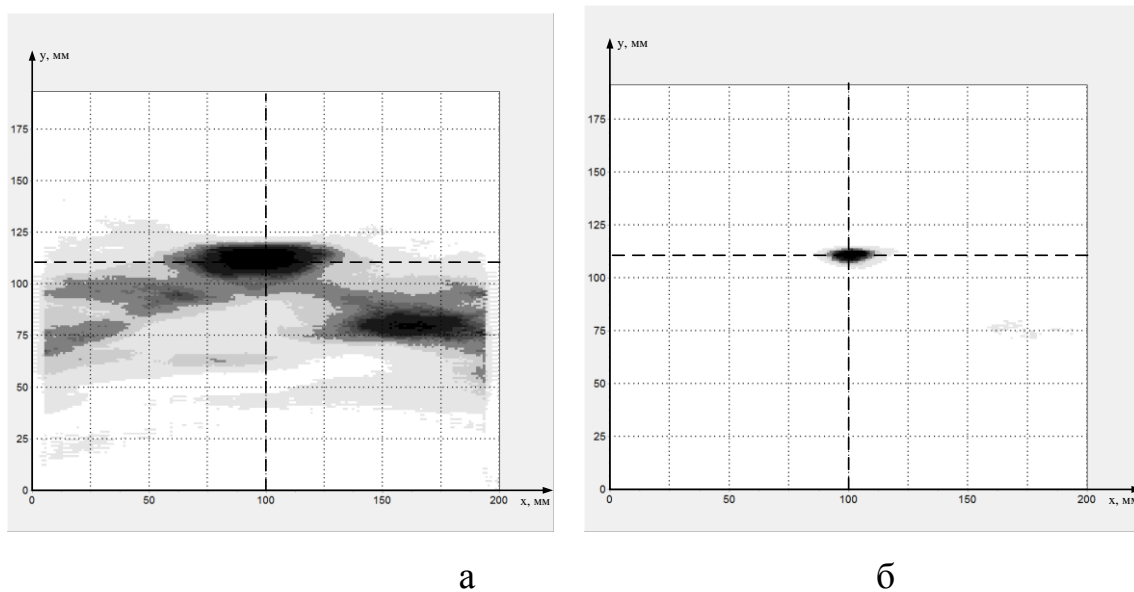


Рис. 3.37. Томограммы объекта №1, а – результат, полученный при отсутствии фильтрации, б- а – результат, полученный с использованием фильтрации типа ρ^n (при $n=6$).

Кроме двуслойного образца были проведены исследования многослойного образца размером 400x300x200мм (рис.3.38). Объект, расположенный в центре между решётками, имеет 9 слоев, и в нем расположен металлическая пластина размером 10X10мм на глубине 50мм. Результаты исследований показаны на рис. 3.39.

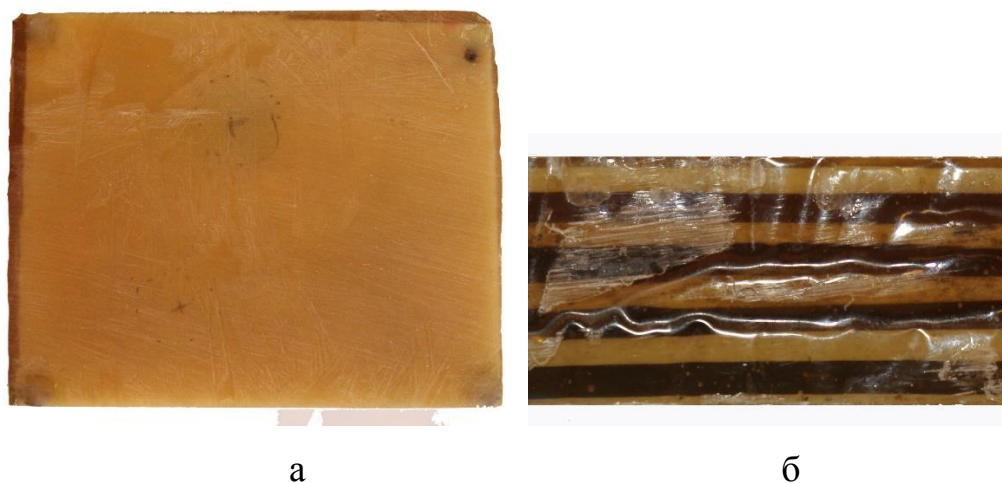


Рис. 3.38. Контролируемый объект №2 размером 400x300x200мм, а- вид сверху, б- вид сбоку.

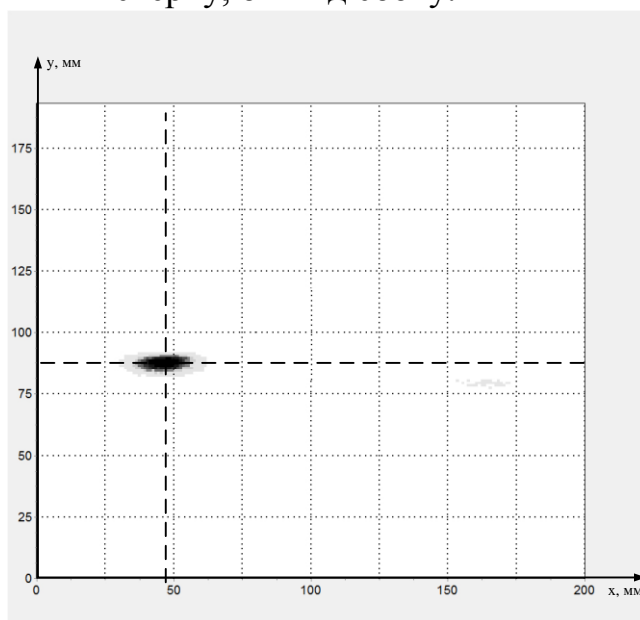


Рис. 3.39. Томограмма объекта №2 размером 400x300x200мм, получений с использованием фильтрации типа ρ^n порядка 6.

Из рис. 3.39 видно, что измеренная глубина залегания дефекта равна 47мм, меньше реального значения, и находится близко к излучателям.

Погрешность составили 3 мм, что меньше заявленной погрешности прибора 10%.

ВЫВОДЫ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что разработанная экспериментальная установка и многоканальный малоракурсный трансмиссионный ультразвуковой дефектоскоп с применением предложенных методов обработки акустических сигналов для реконструкции томографического изображения имеет технические характеристики, превышающие лучшие мировые аналоги. Разработанный дефектоскоп может быть применен для контроля не только композитных материалов разных типов и толщин, но и для контроля паяных конструкций из благородных и черных металлов. Это стало возможным благодаря использованию нового подхода в определении опорных сигналов. Применение антенных решеток с большим количеством элементов позволит увеличить разрешающую способность и чувствительность системы. Разработанный многоканальный малоракурсный акустический теневой дефектоскоп был внедрен на HSTM Vietnam construction consulting company, а экспериментальная установка используется в учебном процессе на кафедре промышленной и медицинской электроники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы:

- получила дальнейшее развитие теория малоракурсной ультразвуковой томографии, основанная на методе обратных проекций для решения трехмерных задач. На основе созданной модели проведен анализ предельной чувствительности, разрешающей способности и точности определения координат залегания дефектов в объекте контроля. Проведенный анализ показал, что наивысшая чувствительность и разрешающая способность наблюдаются вблизи антенных решеток, а точность определения координат дефектов – в центре зоны контроля;
- получил дальнейшее развитие теневой метод контроля, основанный на применении многоэлементных акустических антенных решеток, позволяющий определять глубину залегания дефектов.
- для повышения качества реконструируемого томографического изображения предложен, исследован и внедрен алгоритм реконструкции томографического изображения с автоматической калибровкой всех каналов системы контроля;
- создан и внедрен многоканальный малоракурсный теневой дефектоскоп «Multi-channel acoustic shadow flaw detector», акт внедрения представлен в приложении,
- подготовлены и внедрены в учебный процесс методические материалы по промышленному и медицинскому применению малоракурсной ультразвуковой томографии, акт внедрения представлен в приложении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник: в 2 т. Т.2 / под ред. Ключева В.В. – М.: Машиностроение, 1976. – 326 с.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. / пер. с нем. – М.: Изд. иностр. лит., 1957. – 726 с.
3. Цехановский С. А. Разработка и исследование ультразвукового дефектоскопа с визуализацией дефектов на экране электронно-лучевой трубки: Дис. канд. техн. наук: 05.11.13. – Томск, 1975. – 185 с.
4. Макаров В.С. Акустический дефектоскоп на основе принципа полисканирования для обнаружения внутренних несплошностей и неоднородностей: Дис. кан. техн. наук: 05.11.13 – Томск, 1988. – 170 с.
5. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography (Classics in Applied Mathematics, 32), Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
6. В.П. Якубов, С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов. Микроволновая томография радионепрозрачных объектов. // Дефектоскопия 2011. – №10. – с62-69
7. Календер, В. Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображения и области клинического использования: монография / В. Календер. - М.: Техносфера, 2006, -344 с.
8. Солдатов А.И., Макаров В.С., Сорокин П.В., Солдатов Д.А. Акустическая дефектоскопия многослойных материалов, используемых в вертолетостроении // Контроль. Диагностика, 2013. – №13. – с. 74-77.
9. Филонин А.В. Малоракурсная вычислительная томография в физических исследованиях: Дис. док. техн. наук: 01.04.01. – Самара, 2006. – 463 с.
10. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композиционных материалов в судостроении // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8 (1). – С. 116-117.
11. Браутман Л., Крок Р., Нотон Б. (ред.) Композиционные материалы. Том 3: Применение композиционных материалов в технике. / пер. с англ. Б.Р.

- Горобец, Т.В. Девятко, В.А. Ярцева под редакцией С.Е. Салибекова М.: Машиностроение, 1978. — 511 с.
12. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. - М.: Техносфера, 2004. – 408с.
13. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. Том 5: Разрушение и усталость / Браутман Л., Крок Р. (ред) Перевод с английского под редакцией Г.П. Черепановой. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
14. Каблов Е.Н. (ред.) Конструкционные композиционные материалы. М.: ФГУП ВИАМ, 2012. – 58 с.
15. Пикалов В.В., Казанцев Д.И. Свойства регуляризованного алгоритма Гершберга-Папулиса в задаче веерной томографии // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, № 6. – С. 121-133.
16. Казанцев Д.И., Зеркаль С.М. Преобразование Радона в полосе с веерной системой сбора данных и его обращение применительно к сейсмической томографии // Междунар. конф. "Математические методы в геофизике - ММГ". – Новосибирск, 2003. – С. 208-212.,
17. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 132 с.
18. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.: СВЕН, 2007. – 296 с.
19. Алешин Н.П., Лупачев В.Г., Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие. – Минск: Вышая школа, 1987. – 271 с.
20. Лукьянов В.А., Петрусенко Е.В. Ультразвуковая толщинометрия и дефектоскопия. – М.: РГУ нефти и газа, 2002.
21. Люкшин Б.А. Композитные материалы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 102 с.
22. Вашуков Ю.А. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов Мультимедийный образовательный модуль. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 185 с.

23. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1965. – 416с.
24. ГОСТ 22727 - 88. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля. – Издательство стандартов, 1988 г. – 15 стр.
25. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – Том 3. – 864 с.
26. Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
27. Филонин О.В. Малоракурсная вычислительная томография в физических исследованиях / О.В. Филонин. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук // Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева. – Самара, 2007.
28. Лавинская Е.И. Малоракурсная лазерная томография сложных газодинамических течений. / Е.И. Лавинская, С. Мартемьянов, Ж.Б. Солнье, Н.А. Фомин // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 5. – С. 94-104.
29. Филонин О.В. Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте / О.В. Филонин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2003. – № 1 (3). – С. 136-145.
30. Кутовой В.П. Малоракурсная томография при исследовании пространственных задач. / В.П. Кутовой // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2014. – С. 54-55.
31. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3: Ультразвуковой контроль. / Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с: ил.

32. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
33. Скучик Е. Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Том 1. – 520 с.
34. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М.Баранов, А.И.Гриценко, А.М.Карасевич и др.-М.: Наука, 1998. – 304 с.
35. Справочник по радиоэлектронным системам: В 2-х томах. Т.2 / Под ред. Б.И. Кривицкого. – М.: Энергия, 1977. – 386 с.
36. Интегральные микросхемы. Каталог НИИЭТ. Воронеж, 2013. – 44 с.
37. Воробьев Е.П., Сенин К.В. Интегральные микросхемы производства СССР и их зарубежные аналоги: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
38. Kvasnikov K.G. и др. The use of geometrical acoustics for the solution of visualization problems // Russ. J. Nondestruct. Test, 2014. – Т. 49. – № 11. – С. 625–630.
39. Soldatov A.I. и др. Echography of in-tube sealing units: Simulation and experiment // Russ. J. Nondestruct. Test, 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 255–258.
40. Soldatov A. и др. Dynamic imaging acoustic fields in research practice // 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST): IEEE, 2012. – С. 1–4.
41. Lin W., Xiaofeng M. An iterative parameter estimate method for Polynomial Phase Signal based on Zero-Crossing Test and Least-Square principle // 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011. – Proceedings, 2011. – С. 4340–4343.
42. Schabowicz K. Ultrasonic tomography - The latest nondestructive technique for testing concrete members - Description, test methodology, application example // Arch. Civ. Mech. Eng. 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 295–303.
43. Schickert M. Progress in ultrasonic imaging of concrete // Mater. Struct. 2005. Т. 38. – № 283. – С. 807–815.

44. Hoegh K., Khazanovich L., Yu H.T. Ultrasonic Tomography Technique for Evaluation Concrete Pavements // *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2011. – № 2232. – С. 85-94.
45. Hoła J., Schabowicz K. New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence // *NDT E Int.* 2005. – Т. 38. – № 4. – С. 251-259.
46. Ekenel M. и др. Acousto-ultrasonic technology for nondestructive evaluation of concrete bridge members strengthened by carbon fiber-reinforced polymer // *Transp. Res. Rec.* 2005. – № 1928. – С. 245-251.
47. Jorne F., Henriques F.M. a. a, Baltazar L.G. Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography // *Constr. Build. Mater.* 2014. – Т. 66. – С. 494-506.
48. Goncharsky A. V., Romanov S.Y., Seryozhnikov S.Y. Inverse problems of 3D ultrasonic tomography with complete and incomplete range data // *Wave Motion.* 2014. – Т. 51. – № 3. – С. 389-404.
49. Quinto E.T. Exterior and limited-angle tomography in non-destructive evaluation // *Inverse Probl.* 1999. – Т. 14. – № 2. – С. 339-353.
50. Vauhkonen P.J. и др. Three-dimensional electrical impedance tomography based on the complete electrode model. // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1999. – Т. 46. – № 9. – С. 1150-1160.
51. Arridge S.R., Schotland J.C. Optical tomography: forward and inverse problems // *Inverse Probl.* 2009. – Т. 25. – С. 123010.
52. Norton S.J., Linzer M. Ultrasonic reflectivity imaging in three dimensions: exact inverse scattering solutions for plane, cylindrical, and spherical apertures. // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1981. – Т. 28. – № 2. – С. 202–20.
53. Zenone T. и др. Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations // *Funct. Plant Biol.* 2008. – Т. 35. – С. 1047-1058.
54. Hoyle B.S. Process tomography using ultrasonic sensors // *Meas. Sci. Technol.* 1996. – Т. 7. – № 3. – С. 272-280.

55. Cao M. и др. Full-view photoacoustic tomography using asymmetric distributed sensors optimized with compressed sensing method // *Biomed. Signal Process. Control*. 2015. – Т. 21. – № 0. – С. 19-25.
56. Guo Z. и др. Compressed sensing in photoacoustic tomography in vivo. // *J. Biomed. Opt.* 2010. – Т. 15. – № 2. – С. 021311.
57. Meng J. и др. In vivo optical-resolution photoacoustic computed tomography with compressed sensing. // *Opt. Lett.* 2012. – Т. 37. – № 22. – С. 4573–5.
58. Provost J., Lesage F. The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 585-594.
59. Wang L. V. Prospects of photoacoustic tomography. // *Med. Phys.* 2008. – Т. 35. № 12. – С. 5758-5767.
60. Zhang Y., Hong H., Cai W. Photoacoustic imaging. // *Cold Spring Harb. Protoc.* 2011. – Т. 2011. – № 9. – С. 1015-1025.
61. Yunus F.R.M. и др. Simulation study of electrode size in air-bubble detection for dual-mode integrated electrical resistance and ultrasonic transmission tomography // *Powder Technol.* 2014. – Т. 256. – С. 224-232.
62. Mohd Yunus F.R. и др. Simulation Study of Bubble Detection Using Dual-Mode Electrical Resistance and Ultrasonic Transmission Tomography for Two-Phase Liquid and Gas // *Sensors & Transducer*. – 2013. – Т. 150. – № 3. – С. 97-105.
63. Steiner G., Wegleiter H., Watzenig D. A dual-mode ultrasound and electrical capacitance process tomography sensor // *Proc. IEEE Sensors*. 2005. – Т. 2005. – № 0. – С. 696-699.
64. Rahiman M.H.F., Rahim R.A., Nor Ayob N.M. The front-end hardware design issue in ultrasonic tomography // *IEEE Sens. J.* 2010. – Т. 10. – С. 1276-1281.
65. Rahiman M., Rahim R., Rahim H. ULTRASONIC TOMOGRAPHY–IMAGE RECONSTRUCTION ALGORITHMS // *ijicicorg*. 2012. – Т. 8. – С. 527-538.
66. Самокрутов А.А. Ультразвуковая эхо-томография металлоконструкций. состояние и тенденции / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2007. –Т. 73. – № 1. – С. 50-59.

67. Цысарь С.А. Акустическая томография распределения температуры при нагреве среды фокусированным ультразвуковым пучком / С.А. Цысарь, О.А. Сапожников, В.Г. Андреев // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2009. – Т. 73. – № 4. – С. 558-561.
68. Самокрутов А.А. Ультразвуковая томография металлоконструкций методом цифровой фокусировки антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 21-38.
69. Якубов В.П. Радио - и ультразвуковая томография скрытых объектов / В.П. Якубов, С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 20-25.
70. Якубов В.П. Комплексная радио и ультразвуковая томография скрытых объектов/ В.П. Якубов, С.Э. Шипилов, Д.Я. Суханов, А.В. Козлов. // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 97-100.
71. Пикалов В.В. Свойства регуляризованного алгоритма гершберга-папулиса в задаче верной томографии / В.В. Пикалов, Д.И. Казанцев // Вычислительные технологии, 2008. – Т. 13. – № 6. – С. 121-133.
72. Пат. № 2013146205 РФ. Способ компенсации погрешности измерения ультразвукового локатора/А.И. Солдатов, Ю.В. Шульгина, А.А. Солдатов, Н.В. Дичев. Заявлено 17.10 2014.
73. Комбинационно-синтезированная апертура в ультразвуковой дефектоскопии. принципы и применение / А.А. Самокрутов, В.А. Суворов, В.Г. Шевалдыкин. // Проблемы взаимодействия ВУЗов, НИИ и РАН по подготовке инженерных и научных кадров по неразрушающему контролю и технической диагностике Доклады сессии и круглых столов форума «Территория NDT - 2015». ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр». – 2015. С. 218-230.
74. Бистатическая многопозиционная волновая томография / Д.Я. Суханов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. – Т. 58. . – № 1. – С. 24-30.

75. Повышение достоверности оценки малоразмерных несплошностей металла при ультразвуковой эхо-томографии методом цифровой фокусировки апертуры / А.В. Бишко, А.А. Самокрутов, Н.Ю. Соколов, В.Г. Шевалдыкин. // Доклады XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностик конференции, 2014.
76. Многокурсовая узкополосная ультразвуковая томография с разнесёнными источником и приёмником / Д.Я. Суханов, А.А. Козик. // Известия высших учебных заведений. Физика, 2013. – Т. 56. – № 8-2. – С. 180-183.
77. Измерения в ультразвуковой промышленной томографии / А.А. Самокрутов, В. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика, 2013. – № 10. – С. 10-22.
78. Быстрый вариант k-метода с универсальной настраиваемой схемой сканирования для задач малоразмерной томографии на токамаках / Хованский А.В. // Математическое моделирование, 2013. – Т. 25. – № 6. – С. 15-31.
79. Сравнительная классификация дефектов с использованием методов ультразвуковой томографии и оценки мгновенной частоты эхосигнала / О.В. Немытова, А.Б. Ринкевич, Д.В. Перов // Дефектоскопия, 2013. – № 6. – С. 3-12.
80. Оценка несплошностей металла ультразвуковым дефектоскопом с цифровой фокусировкой антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // В мире неразрушающего контроля, 2013. – № 2 (60) . – С. 8-13.
81. Адаптивная фильтрация изображений в реконструктивной ультразвуковой томографии / Чесалин А.Н., Пыльнов Ю.В. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2013. – Т. 13. – № -5. – С. 128-131.

82. Способ ультразвуковой томографии и устройство для его осуществления / Алёхин С.Г., Самокрутов А.А., Соколов Н.Ю., Шевалдыкин В.Г. патент на изобретение RUS 2458342 25.05.2011
83. Оптимизация и тестирование томографического метода измерения скорости в объеме потока / А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович, М.П. Токарев, М.В. Шестаков. // Теплофизика и аэромеханика, 2011. – Т. 18. – № 4. – С. 555-556.
84. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика, 2011. – № 10. – С. 63-70.
85. Способы сканирования при ультразвуковом контроле / Гурвич А.К. // В мире неразрушающего контроля, 2010. – № 3 (49). – С. 4-6.
86. Сканирование в ультразвуковой томографии / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // В мире неразрушающего контроля, 2010. – № 3 (49). – С. 7-10.
87. Повышение контрастности малоракурсных томограмм, полученных алгебраическими алгоритмами реконструкции / А.В. Лихачев // Вычислительные технологии, 2009. – Т. 14. – № 3. – С. 37-47.
88. Малоракурсная томография: радиоастрономический подход к двумерной и трехмерной реконструкции / М.И. Агафонов, О.И. Шарова // Альманах клинической медицины, 2008. – № 17-1. – С. 133-136.
89. Филонин О.В. Малоракурсная томография / Филонин О. В. Самара, 2006.
90. Метод ультразвуковой томографии и его особенности / В.Д. Вавилов, В.И. Поздьяев, И.В. Вавилов. // Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции Приборы и системы, 2001. – С. 84-87.
91. Ультразвуковая томография: приближенные решения технических задач / Л.А. Славутский // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. 2001. – № 1. – С. 8-18.

92. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер // Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
93. Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
94. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой // Учеб. метод. пособие. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. – 98 с.
95. Журавлев А.К., Лукошкин А.П., Поддубный С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 240 с.
96. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
97. Гостюхин В.Л., Трусов В.Н., Гостюхин А.В. Активные фазированные антенные решетки. – М.: Радиотехника, 2011. – 304 с.
98. Бененсон Л.С. Антенные решётки // под ред. Л.С. Бененсон, В.А. Журавлев, С.В. Попов, Г.А. Постов. – М.: Советское радио, 1966. – 368 с.
99. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. – М.: Радиотехника, 2010. – 144 с.
100. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. – СПб.: СВЕН, 2007. – 296 с.

PHỤ LỤC. Các báo cáo

**HSTM VIETNAM CONSTRUCTION CONSULTING COMPANY LIMITED
(HSTM VIETNAM CC CO., LTD)**

Address: 203 Cau Giay, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Email: hstmvietnam@gmail.com

Tel: +844.3833.6497



Director of HSTM Vietnam CC Co., Ltd

Nguyễn Anh Tuấn

"19" August 2015

**Confirmation
of the Bui Van Dong's thesis researching results usage**

The present statement is that in HSTM Vietnam CC Co.,Ltd, has implemented a multi-channel acoustic shadow flaw. The flaw detector is used to test composite materials. The flaw detector has been designed using research conducted by Bui V.D.

1. A method of few angles non-destructive testing of composite materials and products was made of composite materials, providing comparison with the known analogues the best metrological characteristics to determine the size of the defects.
2. The process of reconstruction of tomographic image that allows to determine the depth of the defect.

Director of HSTM Vietnam CC Co.,Ltd

Nguyen Anh Tuan

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИИКТНУ,

д.т.н., профессор,

 В.И.Бориков

« » 2015 г.

Акт

внедрения результатов диссертационной работы

Буй Ван Донга

Комиссия в составе:

председатель: зав. кафедрой ПМЭ, к.т.н., доцент Губарев Ф.А., члены комиссии: профессор кафедры ПМЭ, Евтушенко Г.С., доцент кафедры ПМЭ, к.т.н. Глотов А.Ф. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Буй В.Д. «Акустический контроль композитных материалов моларакурсным теневым методом», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, используются в учебном процессе на кафедре промышленной и медицинской электроники Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины: «Электронные промышленные устройства», а также при выполнении магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами кафедры.

Председатель комиссии



Ф.А.Губарев

Члены комиссии



Г.С.Евтушенко



А.Ф.Глотов