

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

На правах рукописи

Чан Цзянлэй

**МАЛОРАКУРСНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор А. И. Солдатов

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	12
1.1 ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	12
1.2 ДЕФЕКТЫ В ДЕТАЛЯХ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	20
1.3 СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	22
1.3.1 Метод акустической эмиссии	23
1.3.2 Технологии рентгеновского контроля	25
1.3.3 Вихретоковый контроль	27
1.3.4 Инфракрасная термография и тепловой контроль	29
1.3.5 Микроволновой метод неразрушающего контроля композитов	31
1.4 УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	33
1.5 УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДЕФЕКТОСКОПЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	47
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ.....	61
2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ КОНТРОЛЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	61
2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТА И РЕШЕТКИ.....	70
2.3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ	71
2.3.1. Основные принципы проецирования и обратного проецирования	72
2.3.2. Разработка модели (алгоритм для модели).....	73
2.3.3. Исследование влияния параметров решетки на томограмму.....	81
2.3.4. Гауссова фильтрация исходной томограммы	83
2.3.5. Мультипликативные методы обработки	88
2.3.6. Исследование средней абсолютной ошибки	91
2.3.7. Исследование предельной чувствительности	92
2.3.8. Разрешающая способность	97
ВЫВОДЫ	99

ГЛАВА 3. АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ	101
3.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	101
3.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	108
3.3.1 Исследование точности определения местоположения дефектов	108
3.3.2 Исследование чувствительности.....	112
3.3.3 Исследование разрешающей способности.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	130

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

С развитием современной промышленности, металлические материалы и сплавы, используемые ранее, становятся все менее пригодными для удовлетворения потребностей практических приложений, особенно в области авиа-, автомобиле- и кораблестроения. Им на смену пришли композитные материалы. В настоящее время композитные материалы широко используются в аэрокосмической технике, мостостроении, судостроении, автомобилестроении, медицинском оборудовании и других областях, тесно связанных с национальным экономическим строительством, научными разработками и национальной обороной [1-4].

Микроструктура композитного материала представляет собой сложную многофазную систему с пространственной анизотропией ее свойств. На стадии производства и использования композитного материала очень высока вероятность возникновения дефектов или повреждений [5-11], таких как разрыв волокна и расслоение внутри материала, которые значительно сокращают несущую способность компонентов и вызывает скрытую опасность крупных инженерных аварий, поэтому регулярное тестирование готового продукта и используемого оборудования является наиболее важной частью производственного процесса [12-18].

Дефект типа «расслоение» - наиболее распространенный вид дефекта в композитных материалах, он является внутренним дефектом и не может быть обнаружен невооруженным глазом, поэтому используются различные методы контроля, среди которых можно выделить ультразвуковой контроль. Ультразвуковой контроль обладает хорошими положительными свойствами: большая глубина обнаружения, точное определение дефекта, высокая чувствительность обнаружения, низкая стоимость, удобство использования и

безвредность для человека. Технология компьютерной томографии широко применяется в области медицины. Технология цифровой обработки изображений способствует развитию современной цифровой обработки сигналов. Эти три элемента органично интегрированы. В нашей работе анализируются и исследуются возможности и преимущества технологии компьютерной томографии (КТ), применяемой для неразрушающего контроля композитных материалов ультразвуковым методом [18-20].

Теневой метод обладает более высоким отношением сигнал/шум и подходит для обнаружения многослойных структур [21-28]. При сканировании поверхности тестируемого объекта акустическими преобразователями расположенными по разные стороны получают теневую картину внутренней структуры зоны контроля. Это позволяет обнаруживать внутренние дефекты и размеры их проекции на плоскость приемного преобразователя. Основным недостатком такого тестирования является невозможность определения глубины залегания дефектов. Решение этой задачи возможно при наличии набора проекций под разными углами, что широко используется в рентгеновской томографии. Многочисленные попытки разработать и испытать оборудование на основе линейных антенных решеток были сделаны в конце прошлого века, в которых теневой метод был применен для контроля резинотехнических изделий. В последние несколько лет были опубликованы работы по малоракурсной ультразвуковой томографии для решения широкого круга задач [29-31]. Однако проблемы улучшения дефектометрических характеристик (точности, чувствительности, шума и разрешающей способности) являются актуальными и в настоящее время. Метод мультипликативной обработки и фильтрации сигналов может улучшить дефектометрические характеристики акустической томографии.

Поэтому основная цель данного исследования заключается в повышение качества томограммы на основе малоракурсного зондирования с мультипликативной обработкой сигналов линейной акустической решетки и Гауссовой фильтрации исходной томограммы.

Объектом исследования в данной работе является малоракурсная

акустическая томография с использованием линейных решеток.

Цель диссертационной работы: исследование малоракурсной акустической томографии с мультипликативным способом обработки сигналов линейной акустической решетки и Гауссовой фильтрацией томограммы для улучшения характеристик системы акустического контроля теневым методом.

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

1. Разработать методику акустической малоракурсной томографии с мультипликативной обработкой сигналов линейной акустической решетки.
2. Разработать методику Гауссовой фильтрацией томограммы.
3. Провести теоретические исследования влияния различных параметров Гауссовой фильтрации на результаты томографии.
4. Провести теоретические исследования мультипликативной обработки сигналов линейной акустической решетки на результаты томографии.
5. Разработать алгоритм реконструкции акустического изображения на основе мультипликативной обработки сигналов линейной акустической решетки.
6. Разработать макетный образец прибора и провести его испытания.

Методы исследований. Для решения теоретических задач диссертации были использованы метод обратных проекций, теория дифракции Кирхгофа и компьютерное моделирование. Экспериментальные исследования выполнены с использованием метода физического эксперимента и последующей обработкой данных статистическими методами.

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

1. Разработана компьютерная модель реконструкции зоны контроля, которая позволяет проводить исследования дефектометрических характеристик системы контроля при изменении параметров линейной решетки в широком диапазоне с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов и Гауссовой фильтрацией исходной томограммы.

2. Предложена методика Гауссовой фильтрации томограммы, позволяющая уменьшить среднюю абсолютную ошибку восстановления томограммы.
3. Предложен мультипликативный способ получения томограммы зоны контроля при теневом методе на основе принципа перемножения сигналов акустической решетки, позволяющий увеличить разрешающую способность, точность определения координат дефекта и чувствительность контроля.
4. Создан многоканальный акустический дефектоскоп на основе малоракурсного зондирования для контроля композитов, обладающий лучшими техническими характеристиками по сравнению с аналогами.

Теоретическая значимость работы состоит в дальнейшем развитии метода теневой малоракурсной ультразвуковой томографии на основе мультипликативной обработки сигналов акустической решетки и Гауссовой фильтрации исходной томограммы для контроля композитных материалов, исследовании и анализе погрешностей определения координат дефектов, оценке влияния различных параметров линейной акустической решетки на результат контроля.

Практическая значимость.

1. Алгоритм мультипликативной обработки сигналов акустической решетки позволяет получать томограмму высокого качества и может быть применен при разработке дефектоскопов нового поколения.
2. Модель акустической малоракурсной томографии с аддитивной и мультипликативной обработкой сигналов акустической решетки позволяют исследовать акустический тракт трансмиссионного томографа.
3. Создан акустический теневой малоракурсной томограф, нашедший практическое применение в компании HENGJI PROPERTY Co Ltd и в учебном процессе Томского политехнического университета.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель акустического тракта, позволяет исследовать зону контроля на основе аддитивной и мультипликативной обработки сигналов акустической решетки, проводить Гауссову фильтрацию исходной томограммы при изменении

параметров акустического тракта в широких пределах.

2. Предложенный способ мультипликативной обработки на основе принципа перемножения сигналов акустической решетки позволяет получить разрешающую способность по дальности 50 мм в центре зоны контроля и 90 мм на ее краях, угловая разрешающая способность 11,5 мм в центре и 15 мм на ее краях. Погрешность определения координат дефектов не более 9% для линейной решетки из 16 элементов и расстоянии между решетками 400 мм
3. Гауссова фильтрация исходной томограммы с оптимальными параметрами окна позволяет получить разрешающую способность по дальности 13.5 мм в центре зоны контроля, и уменьшить среднюю абсолютную ошибку восстановления томограммы с 0.53 до 0.045 для антенной решётки из 16 элементов.

Личный вклад автора: участие в постановке задач. Автором лично предложен мультипликативный способ обработки сигналов акустической решетки для теневого метода контроля и Гауссова фильтрация томограммы при малоракурсной томографии, разработана компьютерная модель и проведено исследование точности, разрешающей способности, чувствительности и средней абсолютной ошибки восстановления томограммы. Изготовлен и внедрен макет ультразвукового дефектоскопа.

Апробация работы.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на международных и российских конференциях:

- на ИАМП-2018 тринадцатая всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» г. Бийск, 2018
- на "Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий" г. Томск, 2018
- на XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ ИННОВАЦИОННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ (МИКМУС - 2018), г. Москва, 2018
- на 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON

2019 г. Томск, 2019

- на «XVI Международной школы-конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Инноватика-2020»» г. Томск, 2020

- на XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, г. Томск, 2020

- IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, Altai, Russia, 2021

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, из них 1 статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ, 2 статьи в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science и 7 публикаций в сборниках российских и международных конференций.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается непротиворечивостью полученных в исследовательской части работы результатов с данными других авторов, совпадением экспериментальных и расчетных значений.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 131 страницу, 67 рисунков и 5 таблиц. Обзор литературных источников содержит 106 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, раскрыто современное состояние исследований в области ультразвукового контроля, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведена характеристика современных полимерных композитных материалов (ПКМ), которые особенно привлекательны для применения в авиации и космонавтике из-за их исключительных физических свойств. На стадии производства и использования ПКМ очень высока вероятность возникновения дефектов или повреждений, например расслоения, включения,

трещины, раковины и т.д. Эти дефекты и повреждения часто не имеют видимых следов на поверхности материала, но значительно сокращают несущую способность компонентов и вызывает скрытую опасностью крупных инженерных аварий.

Существуют различные методы для неразрушающего контроля ПКМ: метод акустической эмиссии, рентгеновский контроль, вихретоковый контроль, инфракрасная термография, тепловой контроль и т.д. Ультразвуковой контроль является наиболее распространенный методом. На рынке присутствуют ультразвуковые дефектоскопы для контроля композиционных материалов. Основная задача данной работы является разработка способа улучшения дефектометрических характеристик дефектоскопа с использованием линейных решёток.

Во второй главе проведено теоретическое исследование малоракурсной ультразвуковой томографии на основе теневого метода контроля с использованием линейных решеток. Томография считается малоракурсное, если получен набор данных при угловых ракурсах меньше чем 90 градусов. Приведена модель для исследования малоракурсной томографии, исследован мультипликативный способ реконструкции томограммы и Гауссова фильтрация исходной томограммы.

В третьей главе описаны практические результаты применения выполненных научных исследований. Раздел 3.1 посвящен описанию оригинального алгоритма реконструкции томографического изображения. Приведены описание структурной схемы, фотография установки для проведения экспериментальных исследований, а также технические характеристики акустического дефектоскопа на основе малоракурсного зондирования, который успешно эксплуатируется в компании HENGJI PROPERTY Co Ltd company. Раздел 3.2 посвящен описанию результатов экспериментальных исследований погрешности по определению координат дефектов, разрешающей способности и чувствительности. Показаны различные томограммы нескольких зон контроля с внутренними дефектами.

Каждая глава заканчивается обобщающими выводами.

В заключении перечислены основные результаты исследования, полученные в процессе подготовки диссертации.

Результаты, указанные в диссертационной работе, получены либо автором лично, либо совместно с коллегами – в равном участии, а также при непосредственном участии автора при разработке действующего макета прибора.

Автор лично провел:

- обзор современных теоретических исследований и серийно выпускаемых приборов для ультразвукового контроля,

- исследования угловой разрешающей способности и разрешающей способности по дальности,

- исследования чувствительности метода малоракурсного зондирования,

- исследования погрешности определения координат дефектов в зоне контроля,

- разработку и исследований мультипликативного способа реконструкции томографического изображения для теневого метода с использованием антенных решеток,

- разработку и исследования способа гауссовой фильтрации исходной томограммы,

- разработку алгоритма и программы реализации гауссовой фильтрации исходной томограммы.

При непосредственном участии автора была проведена разработка и изготовление ультразвукового дефектоскопа на основе малоракурсного зондирования.

Большинство проведенных исследований и разработок выполнены с участием сотрудников отделения электронной инженерии Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Характеристика и применение композиционных материалов

Качественные материалы являются основой повышения производительности труда и уровня жизни человека. Композитный материал - это многофазный материал, состоящий из двух или более компонентов с различными характеристиками и различной формой. Сохраняя основные характеристики исходных компонентов, композитный материал демонстрирует некоторые новые характеристики, которые не являются частью исходного компонента. Композитный материал имеет следующие характеристики: микроскопический гетерогенный материал с отличной адгезией различных компонентов, объемная доля составляющих компонент более 10% в формируемом композитном материале. Согласно этому определению композитные материалы широко применяются в изделиях из бетона в качестве арматуры, в производстве автомобильных шин в качестве шинного корда и т. д. [1, 3, 4].

Из анализа состава и внутреннего строения композиционных материалов, можно сделать вывод, что он включает три основных физических фазы. Одна называется матрицей, фаза которой является непрерывной, другая называется фазой армирования, которая окружена матрицей. Третья называется интерфейсом, которая возникает на границе между фазой армирования и фазой матрицы. Дальнейшее изучение на уровне микроструктуры показало, что в процессе компаундирования, фаза армирования и фаза матрицы на границе соединения становятся сложной структурой, которая отличается от матричной фазы и фазы армирования. В то же время обнаружено, что структура и морфология влияют на макроскопические характеристики композитов, поэтому микроскопическая область вблизи границы раздела влияет на свойства композитов. Таким образом, это становится третьей фазой композитов, которая называется межфазной. Следовательно, композитный материал состоит из матричной фазы, фазы

армирования и промежуточной фазы. Структура и природа этих трех фазы, их конфигурация и взаимодействие, а также относительное содержание определяют уникальные характеристики композитных материалов. «Словарь материалов» дает общее определение композитного материала: композитные материалы - это новые материалы, которые представляют собой комбинации различных типов материалов, таких как органические полимеры, неорганические полимеры или металл и т. д. с помощью гибридной технологии. Это не только сохраняет ключевую особенность исходных компонентов, но также появляются характеристики, которые не характерны для исходных компонент.

В определении подчеркивается важная особенность композитных материалов, заключающаяся в том, что они проектируемые. В промышленности, композитный материал обычно относится к материалу, имеющему отличные интегрированные характеристики, который сделан из армированной фазы с высокой прочностью и хрупкостью, и матричного материала с низким модулем упругости и прочности через определенный процесс обработки. Композитный материал в современном материаловедении обычно упоминается как волокно или арматура внутри полимера или армированная полимерная матрица. Это определение охватывает суть композитных материалов, а именно концепцию усиления посредством арматуры. Волокно является наиболее широко используемым и наиболее эффективным армированием, поэтому композитный материал, о котором часто говорят, является узким определением композитного материала, т.е. композитный материал армированный волокном.

Постоянное стремление авиакосмической промышленности и производителей к повышению характеристик коммерческих и военных самолетов постоянно стимулирует разработку улучшенных конструкционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. Композиционные материалы - это один из таких классов материалов, которые играют важную роль в современных и будущих компонентах аэрокосмической отрасли. Композитные материалы особенно привлекательны для применения в авиации и космонавтике из-за их исключительного отношения прочности и жесткости к плотности, а также

превосходных физических свойств. Свойства разных конструкционных материалов приведены в таблице 1.1 [39].

Таблица 1.1. Свойства разных конструкционных материалов

Материал	Прочность, σ , МПа	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль упругости, Е, ГПа
Стеклопластик	1920	2120	70
Углепластик	780-1800	1450-1600	170
Органопластик	2000	1300	95
Боропластик	1200	2000	270
Алюминиевый сплав	500	2700	75
Титановый сплав	1000	4400	110
Высокопрочная сталь	1400	7800	210

Одно из первых применений композитного материала было около 30 лет назад, когда армированный бором эпоксидный композит был использован для обшивки оперения американских истребителей F14 и F15. Первоначально композитные материалы использовались только во вторичных конструкциях. Однако с развитием технологии композитных материалов и повышением уровня ее применения все больше композитных материалов стало использоваться в основных конструкциях, таких как крылья и фюзеляжи. На рис. 1.1 приведены некоторые типы самолетов, в планере которых используется значительное количество композитных материалов [40].

Первоначально процентное соотношение структурной массы композитов в планерах было не очень большим, например, около 2 процентов в F15. Однако этот процент повышался по мере развития технологии производства композитов: с

19 процентов в F18 до 24 процентов в F22. AV-8B Harrier GR7 имеет композитные секции крыла, а GR7A имеет композитную заднюю часть фюзеляжа.

В Eurofighter широко используются композитные материалы: в обшивке крыла, передней части фюзеляжа, флаперонов и руля направления. Упрочненные эпоксидные покрытия составляют около 75 процентов внешней поверхности. В целом, около 40 процентов веса конструкции Eurofighter составляет композитный материал, армированный углеродным волокном. Другие европейские истребители обычно содержат от 20 до 25 процентов композитных материалов по весу: 26 процентов для Dassault Rafae1 и от 20 до 25 процентов для Saab Gripen и EADS Мако.

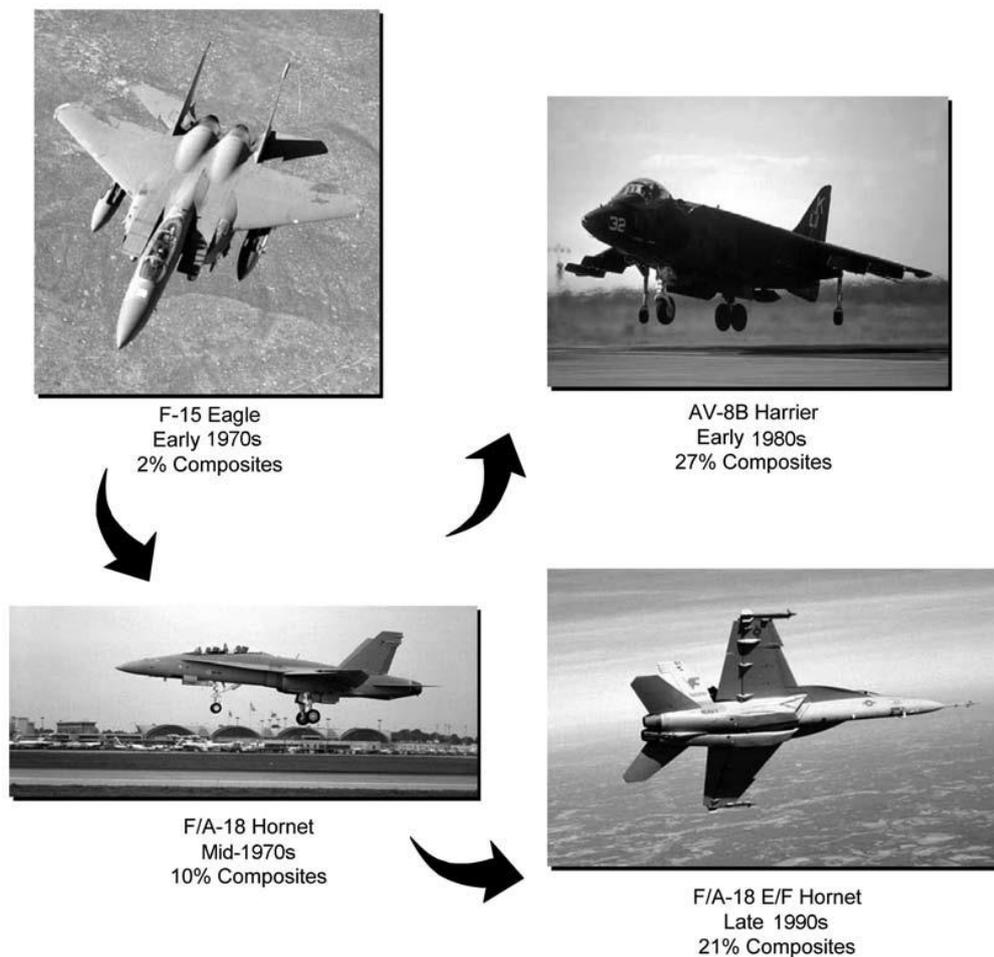


Рисунок 1.1 – Некоторые типы самолетов, в планере которых используется значительное количество композитных материалов

Использование композитных материалов в коммерческих транспортных самолетах также является привлекательным, поскольку уменьшенный вес планера

обеспечивает лучшую экономию топлива и, следовательно, снижает эксплуатационные расходы. Впервые композитный материал в коммерческом самолете был использован компанией Airbus в 1983 году в руле направления самолетов A300 и A310, а затем в 1985 году в вертикальном оперении. В последнем случае около 2000 деталей (без крепежа) металлического ребра были сокращены до менее 100 деталей для композитного ребра, что снизило его вес и стоимость производства. Позже ячеистый сердечник с лицевыми панелями из углепластика использовался для лифта самолета A310. После этих успехов, композитные материалы были использованы для всей конструкции хвостового оперения самолета A320, которая также имела композитную обшивку фюзеляжа, обтекатели киля, фюзеляжа, нижние панели доступа и дефлекторы передней и задней кромки, закрылки, гусеничные обтекатели, спойлеры, элероны, двери колес, двери обтекателя опор главной передачи и гондолы. Кроме того, панели пола были изготовлены из стеклопластика. В общей сложности композиты составляют 28 процентов веса планера A320.

Самолеты A340-500 и 600 имеют дополнительные композитные конструкции, в том числе заднюю прижимную переборку, килевую балку и часть неподвижной передней кромки крыла. Последнее особенно важно, так как оно представляет собой первое крупномасштабное использование компонента из термопластичного композита на коммерческом транспортном самолете. Композитные материалы позволили снизить вес на 20 процентов, а также сократить время производства и повысить устойчивость к повреждениям этих самолетов.

В самолете A380 от 20 до 22 процентов по весу составляют композитные материалы. В нем также широко использует ламинат GLARE (алюминиевый сплав, армированный стекловолокном), который применен в переднем обтекателе, верхних оболочках фюзеляжа, короне и боковых панелях, а также в верхних частях корпуса носовой и кормовой частях фюзеляжа. Ламинат GLARE состоит из четырех или более листов алюминиевого сплава толщиной 0,38 мм (0,015 дюйма) и связующей пленки из стекловолокна. GLARE обеспечивает снижение

веса от 15 до 30 процентов по сравнению с алюминиевым сплавом, а также имеет очень хорошее сопротивление усталости. Верхняя и нижняя панели обшивки A380, а также передний, центральный и задний лонжероны содержат углепластик, который также используется для задней переборки давления, балок пола верхней палубы, а также для элеронов, интерцепторов и внешних закрылков. Обтекатель днища состоит из около 100 композитных сотовых панелей [41].

Самолет Boeing 777, первый полет которого состоялся 10 лет назад, примерно на 20 процентов состоит из композитных материалов по весу, причем композитные материалы используются для неподвижной передней кромки крыла, панелей задней кромки, закрылков и флаперонов, интерцепторов и подвесных элеронов. Кроме того композитные материалы используются при производстве балок пола, обтекателя крыла и дверей шасси. Использование композитных материалов для оперения позволяет сэкономить около 1500 фунтов веса.

В самолете Boeing 787 (рис.1.2) будут широко использоваться композитные материалы (по оценкам, до 50 процентов), чтобы получить высокую эффективность и уменьшить вес [42].



Рисунок 1.2 – Коммерческий самолет Boeing 787 Dreamliner

Главный прорыв в технологии изготовления самолета Boeing 787 - это более широкое использование композитов. Большая часть основной конструкции изготовлена из композитных материалов, в первую очередь фюзеляжа [44].

За счет использования композитных материалов Су-57 представляет собой прочный и легкий планер, что в совокупности с другими характеристиками обеспечивает самолету отличную маневренность (рис.1.3). Кроме того, использование композитов делает оборудование невидимым для радаров [43].



Рисунок 1.3 – Истребитель Су-57

Самолет A350 XWB - новейший представитель семейства широкофюзеляжных авиалайнеров Airbus (рис.1.4). A350 XWB сочетает в себе последние достижения в конструкции фюзеляжа и крыла за счет использования интеллектуального планера и конструкции крыла из полимера, армированного углеродным волокном.



Рисунок 1.4 – Самолет A350 XWB

Более половины (53%) фюзеляжа самолета состоит из композитных

материалов, чтобы избежать необходимости в проверках на усталость, которые требуются для обычных самолетов из алюминия [45]. Отчасти это связано с тем, что композитные материалы обладают большей устойчивостью к коррозии.

Превосходное соотношение прочности и веса композитов является основой для использования в вертолетах для увеличения полезной нагрузки и производительности в целом. Компания Boeing Vertol использовала композиты для изготовления обтекателей винтокрылых машин с 1950-х годов, а в 1970-х годах изготовила первые композитные лопасти винта. Композиты используются в основных конструктивных элементах многих современных вертолетов, включая самолет с поворотным винтом V22, который на 50 процентов состоит из композитов по весу. Способность композитов к формованию использовалась с особым преимуществом при производстве вертолетов для уменьшения количества составных частей и, следовательно, уменьшения стоимости.

Графитовая эпоксидная смола или полимер, армированный углеродным волокном, стал популярным выбором для современных коммерческих самолетов. Изготовленные из упругих углеродных волокон, залитых эпоксидной смолой, углеродные композитные материалы могут быть уложены в стопку различными способами, чтобы удовлетворить различные требования по сохранению целостности во время высокоскоростного полета. Эти материалы из углеродного волокна примерно так же прочны, как алюминий, но в два раза легче.

Использование композитных материалов снижает вес пассажирского самолета на 20-40% (рисунок 1.5) и снижает стоимость большинства инженерных конструкций [46-48].

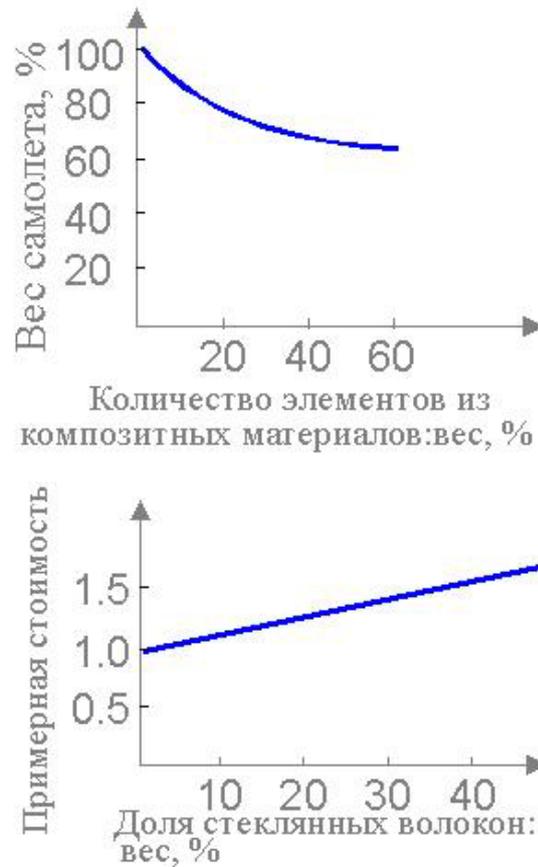


Рисунок 1.5 – Изменение веса (а) и стоимости (б) самолета при использовании композитных материалов

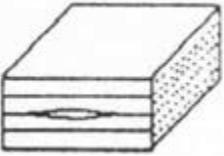
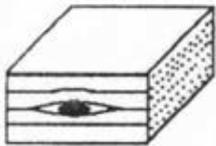
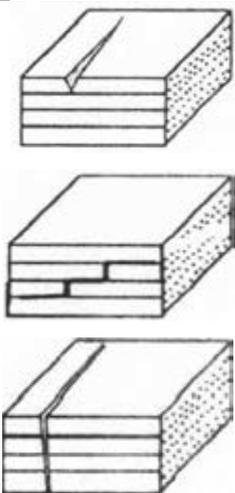
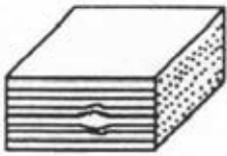
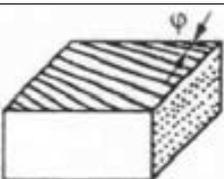
Увеличение содержания волокна не приводит к резкому увеличению материальных затрат.

1.2 Дефекты в деталях из полимерных композитных материалов

При производстве изделий из полимерных композитных материалов (ПКМ) возникают различные дефекты. В таблице 1.2 представлены различные виды дефектов в ПКМ при производстве и обслуживании и приведены количественные и качественные показатели дефектов с указанием причин их возникновения [1, 5, 46].

Таблица 1.2 – Виды дефектов в ПКМ

Вид дефекта	Изображение	Количественные и	Причины образования
-------------	-------------	------------------	---------------------

	дефекта	качественные показатели	
Расслоение		Геометрическая форма, размеры по осям, координаты	Наличие посторонних веществ и пленок. Нарушение технологии изготовления конструкции: высокая температура, повышенная скорость охлаждения, некачественный препрег, остатки пленки подложки.
Инородное включение		Геометрическая форма, размеры по осям, координаты.	Наличие посторонних веществ при изготовлении,
Трещина		Геометрическая форма, размеры по осям, координаты. Направление трещины.	Нарушение технологического режима. Неравномерные напряжения, перегрузки при изготовлении, транспортировке, хранении и эксплуатации
Раковина		Геометрическая форма, размеры по осям, координаты	Увеличенная доля летучих элементов. Нарушение технологического режима
Отклонение угла армирования		Угол отклонения от заданного направления.	Ошибки при изготовлении пакета. Деформация пакета при транспортировке

Представленные в таблице 1.2 различные виды дефектов ПКМ приводят к ухудшению их характеристик и могут стать причиной серьезных аварий. Поэтому так важен неразрушающий контроль целостности ПКМ.

1.3 Средства контроля полимерных композитных материалов

Из-за сложности состава композиционных материалов и нестабильности в процессе производства в структуре композиционных материалов могут возникать дефекты, которые нужно контролировать [9,10,49]. В процессе использования композитных материалов из-за физических и химических факторов, таких как усталостная нагрузка, удар молнии, низкоскоростной удар и коррозия, материал также будет поврежден. Возникновение и развитие повреждений приводит к серьезному снижению прочности и жесткости материала и сокращению срока службы конструкции. Основные формы повреждений углепластика показаны в таблице 1.2.

Причина, по которой композитные материалы стали широко использоваться, помимо их собственных превосходных характеристик, это преимущества от сочетания одновременно проводимых исследований и разработка вспомогательных технологий, тесно связанных с материалами, поэтому контроль качества является ключом к удовлетворению проектных требований и обеспечению качества продукции. Среди них очень важную роль в продвижении играет технология неразрушающего контроля [50-55]. Целью и задачей неразрушающего контроля является использование разумных и эффективных технологий и методов контроля для своевременного и точного обнаружения дефектов и повреждений материалов, чтобы заложить основу для дальнейшей оценки надежности материалов и конструкций. Результаты исследования показывают, что композитные материалы не будут внезапно разрушаться при нормальных условиях использования. Разрушения материалов обычно вызваны накоплением дефектов и повреждений. Поэтому необходимо принять передовые технологии неразрушающего контроля для проверки внутренней части

композитных материалов в процессе производства и обслуживания, что будет способствовать объективной, точной и надежной оценке качества для повышения безопасности и надежности изделий из композитных материалов.

В настоящее время широко используемые методы неразрушающего контроля композитных материалов в основном включают визуальный метод, ультразвуковой метод, рентгеновский метод, оптический метод, микроволновый метод и метод акустической эмиссии. Визуальный метод в основном используется для обнаружения дефектов, которые можно наблюдать невооруженным глазом на поверхности композитных материалов. Дефекты внутри композитного материала не могут быть идентифицированы визуальным методом. Кроме того на результат контроля сильно влияет человеческий фактор и он имеет ограниченную разрешающую способность.

1.3.1 Метод акустической эмиссии

На раннем этапе разработки технологии акустической эмиссии люди осознали важную роль анализа формы волны в оценке характеристик материала. Из-за ограничений технологии обработки сигналов ранние приборы акустической эмиссии редко имели возможность фиксировать переходные процессы и обрабатывать сигналы акустической эмиссии в реальном времени. Основные параметры - это количество сигналов акустической эмиссии, их энергия, частота событий, время нарастания и длительность импульса. Еще одна причина широкого применения методов анализа параметров заключается в том, что с точки зрения большого числа приложений акустической эмиссии, наличие или отсутствие сигналов акустической эмиссии используется для контроля целостности конструкции. Кроме того, в практических приложениях используется большое количество высокочувствительных датчиков акустической эмиссии, которые имеют высокое отношение сигнал / шум, но по некоторым причинам анализ формы или спектра их выходных сигналов не позволяет получить много полезной информации. Поэтому технология анализа формы сигналов акустической эмиссии не получила широкого распространения [56,57].

Быстрое развитие технологии цифровой обработки сигналов (DSP) привело к появлению полностью цифровых инструментов в акустической эмиссии. Это создает условия для анализа переходной формы волны и делает возможным практическое применение. Поскольку лабораторные исследования и инженерный анализ в основном основаны на структуре частотного спектра, изучаются характеристики сигнала акустической эмиссии в частотном спектре, а также сходства и различия форм волн, генерируемых источниками различных механизмов (а также сходства и различия соответствующего частотного спектра и связанных характеристик), поэтому разрабатываются способы идентификации источников акустической эмиссии.

Схема контроля на основе метода акустической эмиссии приведена на рис.1.6.

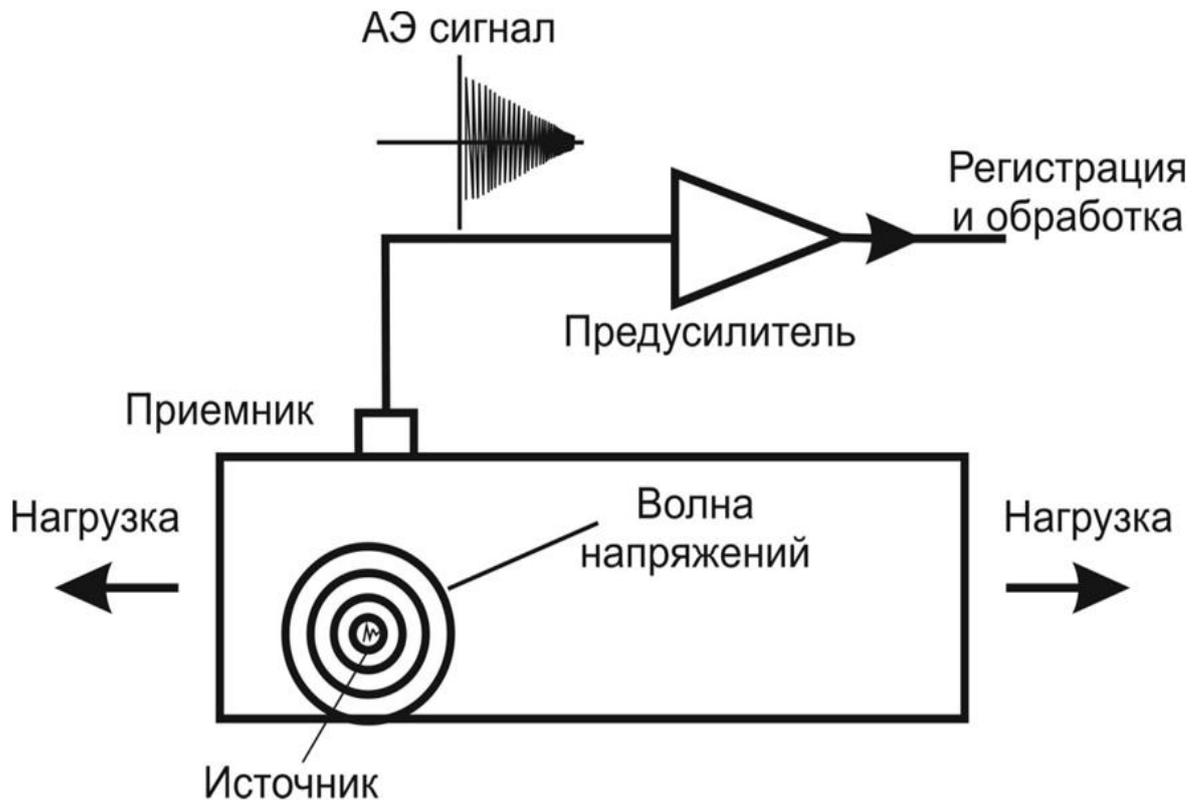


Рисунок 1.6 – Основные принципы акустической эмиссии

Композитные материалы, как правило, всегда являются сильными источниками акустической эмиссии. Источниками сигналов акустической эмиссии являются разрыв волокна, разрушение матрицы, расслоение и раскрытие

клея. Как идентифицировать эти различные источники сигналов акустической эмиссии всегда было проблемой. Эффект Фелисити успешно использовался для прогнозирования разрушения композитных материалов в прошлом. Факты показывают, что технология акустической эмиссии может прогнозировать разрушение композитных материалов раньше, чем другие методы (например, изменение коэффициента затухания ультразвука).

Метод акустической эмиссии в основном используется для неразрушающего контроля композитных несущих элементов конструкций, он имеет высокую чувствительность при обнаружении и локализации трещин, но точность его определения ограничена.

1.3.2 Технологии рентгеновского контроля

Спустя почти 100 лет развития на основе оригинальной технологии пленочной рентгенографии, технология рентгеновского контроля сформировала относительно полную систему, которая состоит из рентгеновской фотографии, рентгеновской визуализации в реальном времени, рентгеновской томографии и т.д. Технология рентгеновского контроля не только не зависит от типа испытываемого композитного материала, но также подходит для контроля большинства дефектов в композитных материалах, таких как расслоение, трещины, усадка, пористость, поры, включения, отслоение и т. д., кроме того положение дефекта тоже не влияет на результат контроля. Результаты контроля с помощью технологии обнаружения рентгеновских лучей интуитивно понятны и надежны. Она также может качественно описывать распределение плотности материалов и количественно измерять плотность материалов. В последние годы произошло бурное развитие технологии рентгеновской компьютерной томографии для контроля сложных структур. Контроль деталей может быть объединен с CAD, CAM и другими производственными технологиями для формирования, так называемого обратного проектирования. Эти преимущества недоступны в других технологиях неразрушающего контроля, поэтому рентгеновская технология является распространенным методом контроля

композитных материалов. С точки зрения получения изображений технология рентгеновского контроля может быть разделена на традиционную технологию и цифровую технологию контроля [11]. Традиционная технология радиографического контроля в основном использует пленку. После многих лет развития технология стала достаточно зрелой, и она также заложила прочную основу для развития других технологий радиографического контроля.

Цифровая технология радиографического контроля является технологией, которая может получать цифровые изображения с помощью детекторной системы и компьютера [58,59]. Цифровая технология обнаружения рентгеновских лучей в основном включает в себя рентгеновскую компьютерную радиографию (CR), технологию формирования изображений в реальном времени (DR, усилитель изображения), технологию реконструкции рентгеновских томографических изображений (СТ), технологию реконструкции рентгеновских микрокомпьютерных изображений, технологию реконструкции трехмерных изображений КТ, технологию обратного рассеяния Комптона (CBS) и т.д.

Для тестирования композитных материалов в стране и за рубежом применяются различные рентгеновские технологии контроля. Однако рентгеновский контроль имеет недостатки: высокие требования к окружающей среде, вредное излучение для человеческого тела и нечувствительность к дефектам расслоения в композитных материалах.

Принципиальная схема рентгеновского вычислительного томографа приведена на рис. 1.7. На базе подобного томографа проектируются промышленные системы контроля корпусов ракетных двигателей твердого топлива из композиционных материалов.

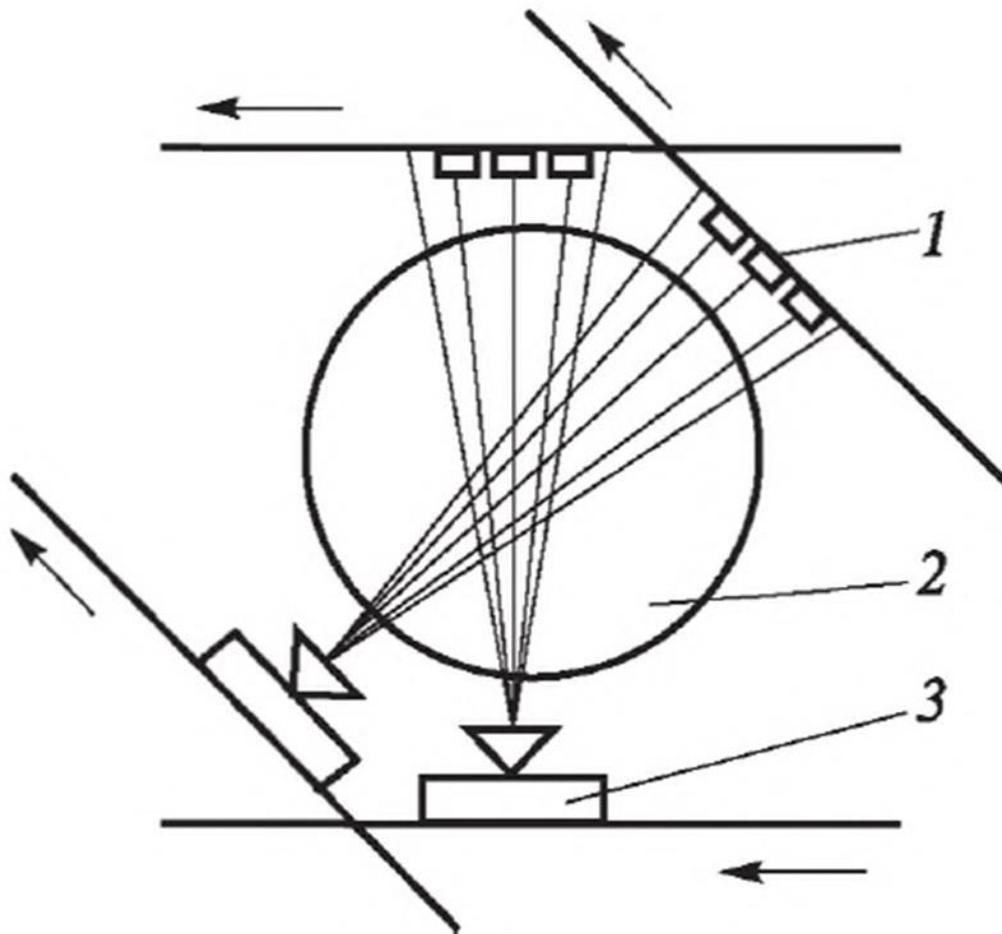


Рисунок 1.7 – Схема рентгеновского вычислительного томографа 1 — детектор; 2 — объект контроля; 3 — рентгеновский источник.

1.3.3 Вихретоковый контроль

Основной принцип вихретокового метода контроля заключается в том, что катушка в вихретоковом датчике генерирует переменное магнитное поле при протекании переменного тока [60-62]. Из-за наличия переменного магнитного поля образец, помещенный рядом с катушкой объект, может индуцировать вихревые токи под действием переменного магнитного поля катушки (р.с.1.8). Вихревой ток приводит к появлению переменного диамагнитного поля. Наложение двух магнитных полей в противоположных направлениях образует составное магнитное поле, которое изменяет магнитное поле катушки, так что ток, протекающий через катушку, также изменяется. Когда напряжение на катушке остается постоянным, а ток катушки изменяется, то сопротивление катушки

изменяется. Измеряя изменение импеданса, можно получить информацию о внутренней характеристике образца, такую как проводимость, проницаемость и дефекты. Однако этот метод подходит только для проводящих композитных материалов. Он не применим к композитным материалам армированным стекловолокном (GFRP) и композитным материалам армированным волокном кевлара (KFRP), но подходит для композитного материала, армированного углеродным волокном (CFRP). Метод вихретокового контроля может обнаруживать содержание волокна и дефекты CFRP, но при контроле необходимо сравнивать со стандартными образцами.

Вихретоковый метод может обнаруживать только повреждения, которые могут вызвать изменение проводимости композитных материалов, такие как дефекты припрыгов из углеродного волокна и преформ RTM (включая извлечение волокна, смещение, складки и неровные зазоры, неравномерную толщину и посторонние предметы), разрушение волокна, ударное повреждение, а также деформация и деформация алюминиевого сотового сэндвича, в то время как такие повреждения, как трещины матрицы, отслоение поверхности раздела волокон и смолы и рафинирование ячеистого сэндвича, не могут быть обнаружены с помощью вихревых токов. Вихретоковый метод является многопараметровым, поэтому на результат контроля влияют различные факторы и бывает довольно сложно оценить качество объекта из-за этого влияния, и в целом чувствительность обнаружения расслоения невысока. Поскольку ударное повреждение включает в себя более серьезные формы повреждения, такие как разрыв волокна и расслоение, метод вихревых токов хорошо применим для обнаружения ударных повреждений композитных материалов. Прибор для вихретокового контроля также можно использовать для измерения и анализа структуры и физических свойств композитного материала, таких как измерение направления волокна и последовательности наслоения, а также объемной проводимости материала.

Способность обнаруживать дефекты в процессе формования композитного материала из углеродного волокна является основным преимуществом метода

вихревых токов, а также привлекательной стороной этого метода [36]. Такие методы, как ультразвук, рентгенография и тепловидение, предъявляют требования к форме тестируемой детали. Поскольку углеродное волокно в преформе волокна RTM и припрыге не склеиваются и твердеют при нагревании, распределение волокон показывает большую дисперсию. По этой причине вышеупомянутые методы не очень чувствительны к обнаружению дефектов в препрегах и преформах волокна RTM, и композитные материалы должны быть отверждены и сформированы, прежде чем их можно будет контролировать. Вихретоковый контроль основан на принципе электромагнитной индукции, и датчик не обязательно должен контактировать с объектом контроля, а на распространение вихретокового тока не влияет форма материала. Таким образом, вихретоковый метод является одним из надежных методов обнаружения дефектов при производстве углеродного волокна.

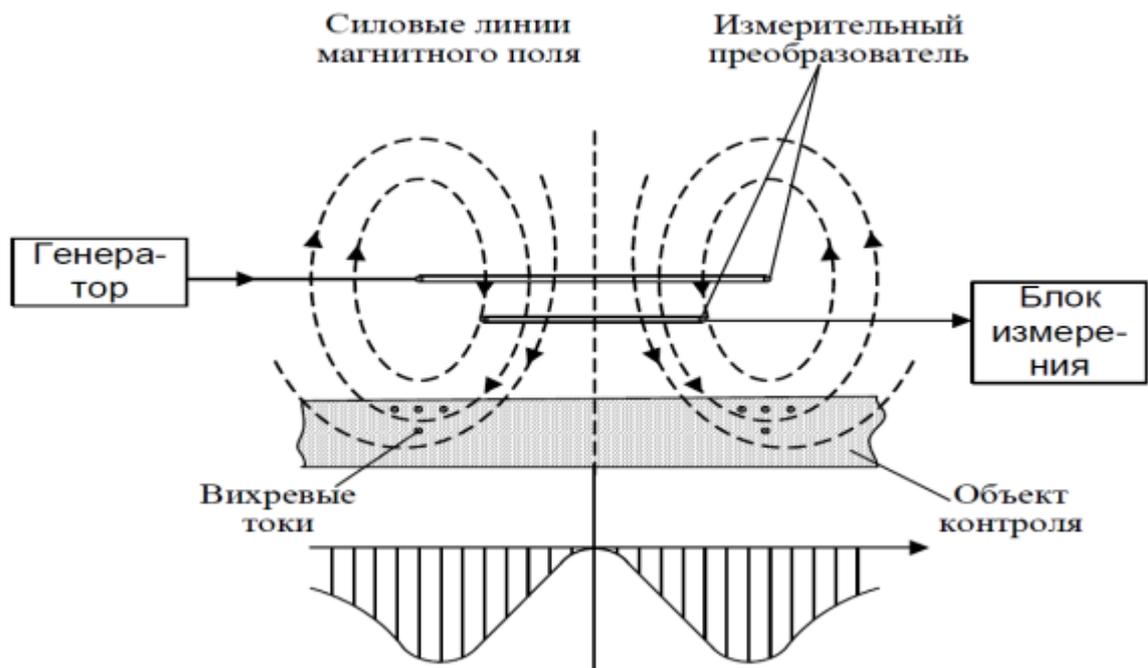


Рисунок 1.8 – Схема принципа действия прибора с накладным ВТП

1.3.4 Инфракрасная термография и тепловой контроль

Это развивающаяся междисциплинарная технология неразрушающего контроля. Эта технология использует инфракрасную тепловизионную камеру для

регистрации изменений температуры на поверхности объекта и обнаружения внутренних дефектов в материалах путем анализа характеристик изменений температуры поверхности. Инфракрасные тепловизионные технологии обнаружения можно разделить на два типа: пассивные и активные (рис.1.9). Технология пассивного инфракрасного тепловизионного обнаружения не требует внешнего теплового возбуждения. Она в основном определяет наличие дефектов и отклонений внутри объекта путем измерения разницы температур между отдельными областями объекта. Обычно используется для контроля оборудования или электронных компонентов в работе.

В технологии активного инфракрасного тепловизионного контроля необходимо использовать источники возбуждающего тепла, такие как световое возбуждение (включая импульсную лампу, галогенный свет или лазер и т.д.), микроволновое, ультразвуковое, вихретоковое, термический фен, электрическое одеяло и т.д. для нагрева испытуемой детали, а также использовать инфракрасное тепловое излучение. Прибор регистрирует изменение температуры поверхности измеряемого объекта и определяет информацию о дефектах внутри материала путем извлечения и анализа характеристик теплового сигнала. Технология активного инфракрасного тепловизионного контроля подразделяется на различные типы: импульсное тепловидение, синхронное тепловизионное изображение (или модулированное тепловизионное изображение), тепловизионное радиолокационное изображение или тепловое изображение с частотной модуляцией и т.д. По типу внешнего возбуждения можно разделить на фототермографию (тепловыделение при фототермическом эффекте), микроволновую термографию (тепловыделение, микроволновое излучение), вибрационную или ультразвуковую термографию (механическую вибрацию или тепловыделение ультразвуком), вихретоковое тепловидение (нагрев проводящей среды с помощью электромагнитной индукции) и магнитотермическую визуализацию (нагрев магнитном поле) и т.д. Кроме того, его также можно классифицировать путем объединения метода возбуждения и типа источника возбуждения или метода обработки теплового сигнала, такого как импульсно-

фазовый метод (РРТ), длинноимпульсное тепловизионное изображение (LPT), тепловизионное изображение с оптической фазовой синхронизацией (OLIT), тепловидение с вихретоковыми импульсами (ЕСРТ) и ультразвуковая синхронизация тепловидения (ULIT) и т. д. [64-67]

Инфракрасное тепловидение можно использовать для обнаружения расслоений, включений, проникновения воды в сотовую структуру и ударных повреждений в композитных материалах из углеродного волокна, а результаты на дисплее интуитивно понятны и просты для понимания. Однако чувствительность этого метода быстро снижается по мере увеличения глубины дефекта, и на него легко влияют температура окружающей среды и поток воздуха. Проводимость тепла будет увеличивать и размывать отображение тепловой карты на краю дефекта и ухудшать четкость.

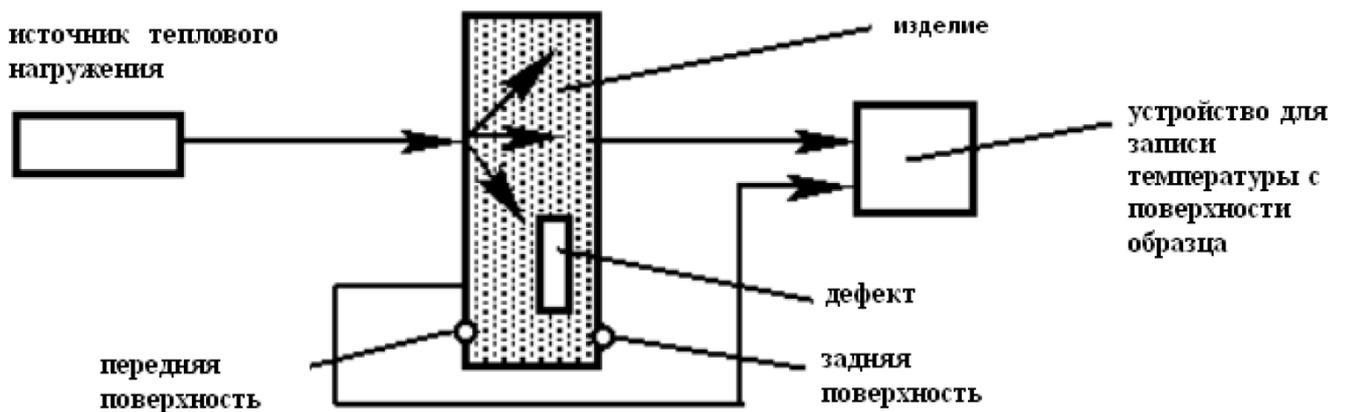


Рисунок 1.9 – Схема активного теплового контроля

1.3.5 Микроволновой метод неразрушающего контроля композитов

Технология микроволнового неразрушающего контроля началась в 1960-х годах, и как новая технология контроля она привлекает все большее внимание в стране и за рубежом. Микроволна - это высокочастотная электромагнитная волна, характеризующаяся короткой длиной волны, высокой частотой и шириной полосы пропускания. Длина волны составляет от 1 до 1000 мм, а частота обычно составляет от 300 МГц до 300 ГГц. Основной принцип неразрушающего контроля микроволнового излучения состоит в том, чтобы использовать взаимодействие

между микроволнами и объектом контроля (рис.1.10). С одной стороны, микроволны будут отражаться, рассеиваться на границе раздела сред и проходить через эту границу. С другой стороны, микроволны также могут взаимодействовать с исследуемым материалом. В это время на микроволновое поле будут влиять электромагнитные и геометрические параметры материала. Контроль внутренних дефектов материала может быть проведен путем измерения изменения основных параметров СВЧ-сигнала. Характеристики сильного проникновения и низкого затухания микроволн в диэлектрических материалах, таких как композитные материалы, определяют, что этот метод очень подходит для неразрушающего контроля композитных материалов. Он может преодолеть недостатки других методов контроля композитных материалов и показывает свое превосходство. По имеющимся данным, в 1960-х годах Соединенные Штаты использовали микроволну для неразрушающего контроля, а позже использовали миллиметровую микроволновую секцию для обнаружения дефектов в армированной стекловолокном пластмассовой оболочке больших ракетных твердотопливных ракетных двигателей и качества внутреннего сопла. Рабочая частота микроволн была увеличена с начальных 10 ГГц до более 300 ГГц [68, 69].

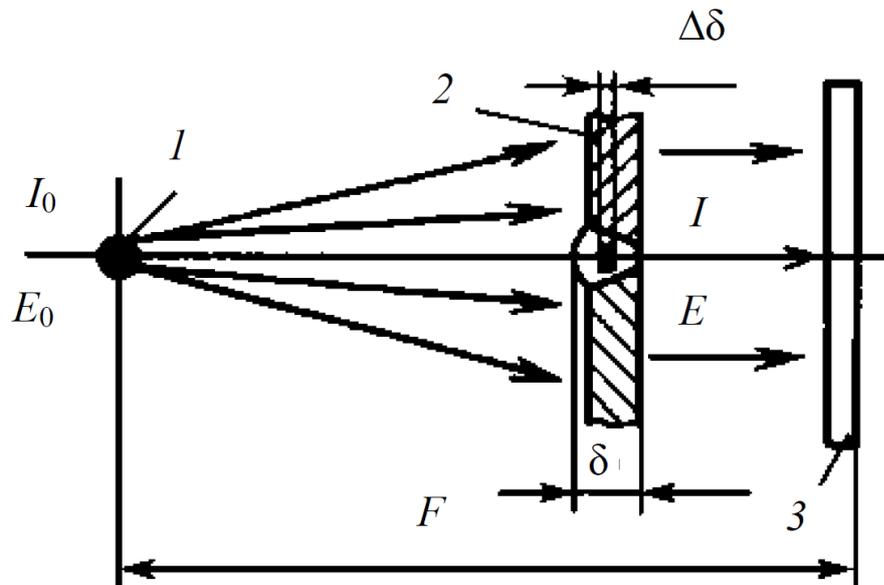


Рисунок 1.10 – Схема просвечивания: 1 – источник; 2 – изделие; 3 – детектор; F – фокусное расстояние; δ – толщина контролируемого объекта; $\Delta\delta$ – размер дефекта; I – интенсивность излучения; E – энергия излучения

1.4 Ультразвуковые методы контроля композиционных материалов

Ультразвуковой контроль - это технология, которая использует характеристики распространения ультразвука в твердых телах (отражение, преломление, пропускание, затухание и т. Д.) для проведения неразрушающего контроля промышленных материалов и изделий. Ультразвук, излучаемый пьезоэлектрическим преобразователем, вводится в проверяемый объект через связующее вещество (масло, вода или другое связующее вещество), волна отражения генерируется на дефекте или границе раздела и возвращается в виде эха или передается в виде проникающей волны. На приеме, поскольку уровень сигнала может изменяться, судят о внутренних дефектах (расслоение, отверстие, включение и т. д.) [70-72].

Ультразвуковой контроль имеет широкий диапазон обнаружения и подходит для многих типов объектов контроля. Он может не только контролировать структуру различных металлических и неметаллических материалов, но также проводить контроля более сложных структур после дополнительной обработки сигналов. Нужно только настроить правильные параметры, выбрать подходящую технологию ультразвукового контроля. Ультразвуковой контроль не предъявляет особых требований к размеру исследуемого материала: в зависимости от выбранной частоты минимальная толщина может быть около 1 мм, а максимальная может достигать нескольких метров. Будь то дефекты различных форм и размеров на поверхности или внутри материала, ультразвуковой контроль может быть наиболее эффективным решением для контроля. Ультразвуковая дефектоскопия также имеет такие преимущества, как высокая чувствительность, сильное проникновение, быстрая скорость контроля, низкая стоимость и безвредность для человеческого организма. Принцип работы ультразвукового контроля заключается в том, что в процессе контроля ультразвуковые волны будут отражаться от дефекта, и на экране появится эхо-сигнал от дефекта. Форма и амплитуда волны от дефекта зависит от геометрической формы дефекта. Дефект можно оценить в соответствии с

характеристиками эхо-сигнала.

В дополнение к дефектоскопии, ультразвук также может использоваться для определения толщины материалов, на практике широко используются цифровые ультразвуковые толщиномеры. Принцип работы в основном такой же, как и у эхо импульсного метода. Благодаря автоматическому расчету его можно использовать для определения толщины крупных и сложных компонентом. Ультразвук играет очень важную роль при контроле участков, которые трудно обнаружить вручную. Ультразвуковой контроль позволяет получить многие рабочие параметры, которые нелегко получить напрямую путем измерения ультразвуковых параметров материала. Каждая технология контроля имеет свои преимущества и недостатки, поэтому при реальном производстве необходимо учитывать именно цель контроля. Также необходимо учитывать форму, размер и характерные параметры испытуемого образца. Правильный выбор наиболее подходящей технологии тестирования имеет большое влияние на эффективность и точность ультразвукового контроля. Чтобы выбрать правильный метод контроля, вы должны иметь достаточный опыт применения ультразвукового контроля, особенно ультразвукового контроля композитных материалов, поскольку сигнал ультразвукового контроля композитных материалов очень сложен. Ультразвуковой контроль композитных материалов при его производстве начался только в последние годы и еще не утверждены правила ультразвукового контроля композитных материалов. Поэтому после того, как многие дефектоскописты изучили принципы ультразвукового контроля, они не могут проводить правильные ультразвуковые испытания композитных материалов. Чаще всего используется метод тестирования контактного типа с одним зондом продольной волны с вертикальным падающим импульсом и отражением. Основным принципом этого метода заключается в том, что при распространении ультразвуковых волн внутри материала она сталкивается с внутренней дефектной структурой материала. Из-за разницы между акустическим импедансом дефекта и акустическим импедансом материала ультразвуковой сигнал отражается и рассеивается. Между волной излучения сигнала и волной отражения от нижней

поверхности появляется волна, отраженная от дефекта. По амплитуде сигнала отражения ультразвука обнаруживают внутренние дефекты материала или детектируют, что содержание смолы в композитном материале недостаточное, или имеются расслоения, трещины, поры, включения шлака и т.д. Ультразвуковой контроль может не только обнаруживать различные распространенные дефекты в компонентах композитного материала и определять расположение и размер дефектов, но также получать многие важные параметры материала, выполнять качественные испытания материала или обнаруживать и моделировать конкретную структуру и форму материала. Применение неразрушающего ультразвукового контроля и электронного отображения результатов контроля в реальном времени также имеет определенные преимущества в плане экономии производственных затрат и повышения эффективности проверки.

Применение ультразвукового контроля в области композитных материалов также имеет недостатки. Есть определенные требования к структуре композитных материалов, так как чрезмерно сложная структура композитных материалов оказывает большое влияние на точность ультразвукового контроля. Даже композитные материалы с одинаковой структурой могут иметь разные эхо-сигналы при ультразвуковом контроле. Как определить, вызвана ли эта разница дефектами изготовления материала или неоднородностью самого материала, является самой большой трудностью в области обнаружения дефектов композитного материала. Обычные ультразвуковые датчики используют иммерсионную среду и предъявляют определенные требования к чистоте поверхности материала. Это является ограничивающими узкими местами, которые влияют на широкое использование ультразвукового контроля.

Хотя ультразвуковой контроль пережил десятилетия большого развития и широко используется, он в основном сосредоточен в области металлических материалов. Это связано с тем, что структура самого металлического материала относительно проста, генерируемый эхо-сигнал очень четкий, а анализ также очень прост. Многие принципы ультразвукового контроля могут быть четко отражены через металлические материалы. По разным причинам существует

множество факторов, влияющих на использование ультразвукового контроля композитных материалов. Например, содержание смолы может быть изменено в пределах допустимого диапазона, отражения ультразвуковых волн, генерируемых границей раздела между волокном и смолой, дифракция ультразвуковых волн, генерируемых отверстиями волокна, и так далее. Поскольку ультразвуковой контроль имеет много преимуществ, которых нет у традиционных методов контроля, в сочетании с растущим прогрессом технологии ультразвукового контроля, возможно использование ультразвукового контроля для неразрушающего контроля композитных материалов. Многие компании начали постепенно использовать ультразвуковой контроль для обнаружения дефектов, что не только повышает эффективность контроля, но и создает экономические выгоды. С развитием технологии ультразвукового контроля внедряется автоматизированный ультразвуковой контроль. Ультразвуковой контроль композитных материалов становится все более интересным и приветствуется основными производителями компонентов композитных материалов.

Ультразвуковой контроль может обнаруживать дефекты композитного материала, такие как расслоение, поры, трещины, ударные повреждения, а также проводить качественные и количественные измерения параметров дефектов. По сравнению с другими технологиями неразрушающего контроля технология ультразвукового контроля имеет выдающиеся преимущества, такие как высокая скорость контроля, высокая чувствительность обнаружения, безвредность для человеческого тела, а также простое и легкое автоматическое обнаружение при сканировании.

При неразрушающем контроле композитных материалов ультразвуковой контроль является одним из наиболее широко используемых методов. В таблице 1.3 приведены наиболее часто используемые методы ультразвукового контроля и их технические характеристики

Таблице 1.3. Методы и технические характеристик ультразвукового контроля

Технология ультразвукового контроля	Технические характеристики
-------------------------------------	----------------------------

Технология ультразвукового С-сканирования	Интуитивно понятный дисплей, простое управление, количественный анализ
Ультразвуковой волноводный контроль	Используя метод линейного сканирования, быструю скорость обнаружения, можно использовать для количественного анализа
Технология ультразвуковых фазированных решеток	Электронная фокусировка, позволяющая быстро контролировать структуры сложной формы
Нелинейный ультразвуковой контроль	Чувствителен к микроскопическим дефектам и может использоваться для прогнозирования срока службы
Технология ультразвукового неразрушающего контроля с воздушной связью	Нет необходимости использовать иммерсионную среду, высокая скорость обнаружения, обычно используется для качественного анализа

Технология ультразвукового С-сканирования - это отображение данных ультразвукового контроля С-типа (рис.1.11). Ультразвуковое С-сканирование может давать результаты обнаружения на основе изображений и может визуально отображать информацию о дефектах в определенном диапазоне глубин контролируемой детали: количественные и качественные, а также более точно определять координаты расположения дефектов, при этом влияние человеческого фактора снижено. Поэтому широко используется технология ультразвукового С-сканирования, и существует множество типов систем обнаружения ультразвукового С-сканирования, которые постоянно развиваются и появляются новые продукты для различных приложений и целей. Благодаря совершенствованию системного программного и аппаратного обеспечения

область применения ультразвуковой технологии С-сканирования постоянно расширяется [73, 74].

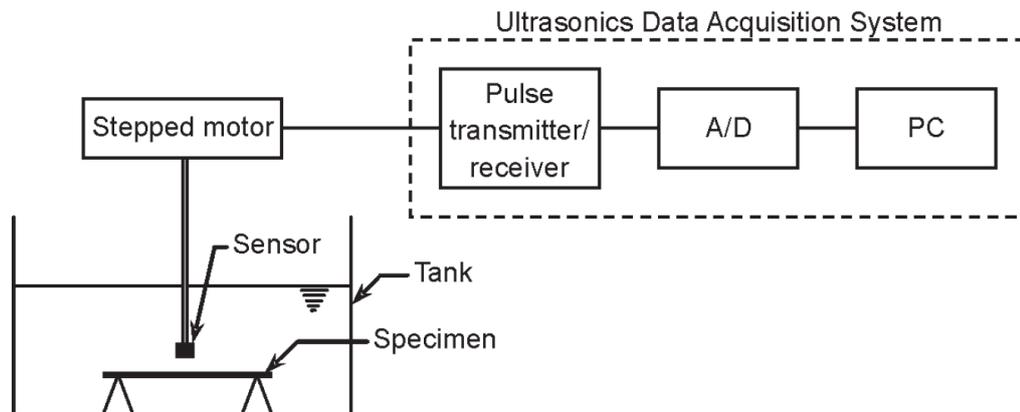


Рисунок 1.11 – Принцип работы ультразвукового С-сканирования

Ультразвуковой волноводный контроль (также известный как дистанционное ультразвуковое зондирование) в основном используется для контроля трубопроводов, включая бесшовные трубы из низкоуглеродистой стали, углеродистой марганцевой стали, аустенитной нержавеющей стали, двойной нержавеющей стали и других марок стали, применяемых при изготовлении прямошовной и спиральношовной труб. Он может применяться в сетях нефте- и газопроводов (таких как трубопроводы природного газа, вертикальные трубопроводы в пламенных обогревателях нефтеперерабатывающих заводов, воздушные трубопроводы сжиженного газа с изоляционной средой и защитой из минеральной ваты); трубопроводные сети на нефтехимических предприятиях (например, без изоляции шламопроводы для транспортировки синтетических углеводородов CO и H, поперечные трубопроводы на нефтехимических предприятиях), конечные трубопроводы, соединительные трубопроводные сети, морские трубопроводные сети (например, стояки морских платформ, сферические опоры трубопроводов), трубопроводные сети электростанций, структурные трубопроводные системы, трубопроводы, проходящие через насыпи и под ними (например, подземные водопроводные трубы, трубопроводы в резервуарах для хранения и стенах плотин, подземные трубопроводы на пересечениях дорог), сложные или надземные трубопроводные сети (такие как надземные

трубопроводы, вертикальные или горизонтальные или изогнутые трубы), трубы под изоляцией (например, аммиачные трубы с изоляцией); трубы с кожухами защитных слоев (например, покрытия, изоляция из пенополиуретана, изоляция из минеральной ваты), покрытие эпоксидной смолой, покрытие эпоксидной смолой с асфальтом, покрытие ПВХ и т.д. Технология ультразвукового контроля позволяет обнаруживать внутреннюю и внешнюю коррозию или эрозию, кольцевые трещины, перекосы сварных швов, дефекты сварки, усталостные трещины и другие дефекты в трубопроводе. Новейшие модели ультразвукового контроля с помощью магнитострикционных преобразователей могут применяться к неферромагнитным материалам и неметаллическим материалам. Помимо контроля трубопроводов, его также можно использовать для обнаружения стержней, стальных кабелей и пластин.

Преимущество ультразвукового волноводного контроля заключается в том, что ультразвуковые волны могут распространяться на большие расстояния с небольшим затуханием. Набор эхо-сигналов из одного положения позволяет проводить быстрый контроль стенки трубы за один раз (100% покрытие толщины стенки трубы). Процесс контроля прост, иммерсионная среда не требуется, а рабочая температура может достигать $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 938\text{ }^{\circ}\text{C}$. Необходимо только снять небольшой кусок антикоррозионного слоя, чтобы поместить датчик для тестирования, особенно при контроле на больших расстояниях, когда подземные трубы не выкапываются.

Механизм генерации ультразвуковых волн аналогичен механизму возбуждения волн Лэмба в тонких пластинах, с последующей интерференцией и геометрической дисперсией за счет многократных возвратно-поступательных отражений в среде с ограниченным пространством и дальнейшим сложным наложением акустических сигналов (рис.1.12). Основные типы волн ультразвуковых волноводных приложений включают крутильную волну (Torsional Wave) и продольную волну (Longitudinal Wave).

Характеристикой крутильной волны является то, что частица колеблется в направлении окружности трубы, а волна распространяется в осевом направлении

трубы. На энергию упругой волны меньше влияет жидкость, заполняющая трубу (при акустическом контроле жидкость может течь в трубе). Этот тип контроля имеет очень высокую чувствительность к продольным глубоким трещинам и изменению поперечного сечения трубы в широком диапазоне частот. Эхо-сигнал может содержать информацию о дефектах в направлении оси трубы. Преимущества метода: простота идентификации сигнала, небольшое количество преобразователей, небольшой вес, низкая стоимость, эффект диффузии из-за жидкой среды в трубке небольшой, большое расстояние контроля и высокая чувствительность к осевым дефектам.

При использовании продольной волны частица колеблется в осевом направлении трубы и волна распространяется в этом же направлении. Амплитуда эхо-сигнала мало связана с формой дефекта. Его можно использовать только в узком частотном диапазоне. Эхо-сигнал не такой четкий, как при контроле крутильной волной. На качество контроля большое влияние оказывает состояние поверхности контакта зонда (краска, неровности и т. д.) и очень высокая чувствительность к изменению площади поперечного сечения стенки трубопровода.

Формы сигналов в двух режимов имеют свои собственные характеристики и могут дополнять друг друга в практических приложениях.

Принцип работы ультразвукового волноводного контроля: акустическая решетка излучает пучок ультразвукового импульса, этот импульс распространяется по окружности и по всей толщине стенки трубы. При обнаружении дефектов металла, вызванных коррозией, или дефектов на внутренней и внешней стенках трубы, из-за изменения поперечного сечения (толщины) трубы будут появляться отраженные волны, возвращающиеся к той же решетке датчиков. Расположение, размер и коррозионное состояние внутренних и внешних дефектов трубопровода может быть определено анализом отраженных сигналов. Ультразвуковой прибор для контроля с направленной волной может автоматически определять режим работы (продольная волна или крутильная волна) и может различать коррозию трубопровода и характеристики

трубопровода (опора, колено, тройник, фланец, контур сварного шва и т. д.).

В то же время, поскольку размер композитной пластинчатой конструкции продолжает увеличиваться, а условия эксплуатации являются суровыми, эффективные методы неразрушающего контроля и быстрого осмотра композитной пластинчатой конструкции для обеспечения целостности конструкции и эксплуатационной безопасности стали важнее. В последние годы ультразвуковая волноводная технология стала одним из быстрых и эффективных методов контроля для широкого спектра конструкций из композитных материалов. Волна Лэмба является одним из типов ультразвуковых волноводных волн, распространяющихся в пластине и применяется для идентификации и локализации дефектов в многослойной структуре плоского композитного изделия. Ультразвуковая волноводная технология имеет преимущества, которых нет у других методов неразрушающего контроля [75]:

- (1) Большой диапазон обнаружения и высокая эффективность. Небольшое количество датчиков можно использовать для контроля объектов на большом расстоянии;
- (2) Комплексное тестирование. Он может обнаруживать все дефекты по поперечному сечению структуры на пути распространения ультразвуковых волн и отличить множество типов дефектов в композитных материалах;
- (3) Многопараметрическая оптимизация может использоваться для улучшения способности детектирования дефектов. Ультразвуковые направленные волны обладают многомодовыми характеристиками. Регулируя режим и частоту, можно выбрать подходящие режимы одиночной или многолучевой направленности для контроля дефектов и улучшения достоверности контроля.

Из-за анизотропии и высокого затухания композитных материалов контроль структур композитных материалов с помощью ультразвукового волновода становится все более сложным. В последние годы, чтобы повысить эффективность контроля и возможности распознавания дефектов композитных пластинчатых конструкций, основное внимание уделялось практическому исследованию и теоретическому анализу распространения ультразвуковых волн,

методов контроля и методов обработки акустических сигналов. Ультразвуковые направляющие волны имеют хороший потенциал применения для неразрушающего контроля композитных пластин и мониторинга состояния конструкций.

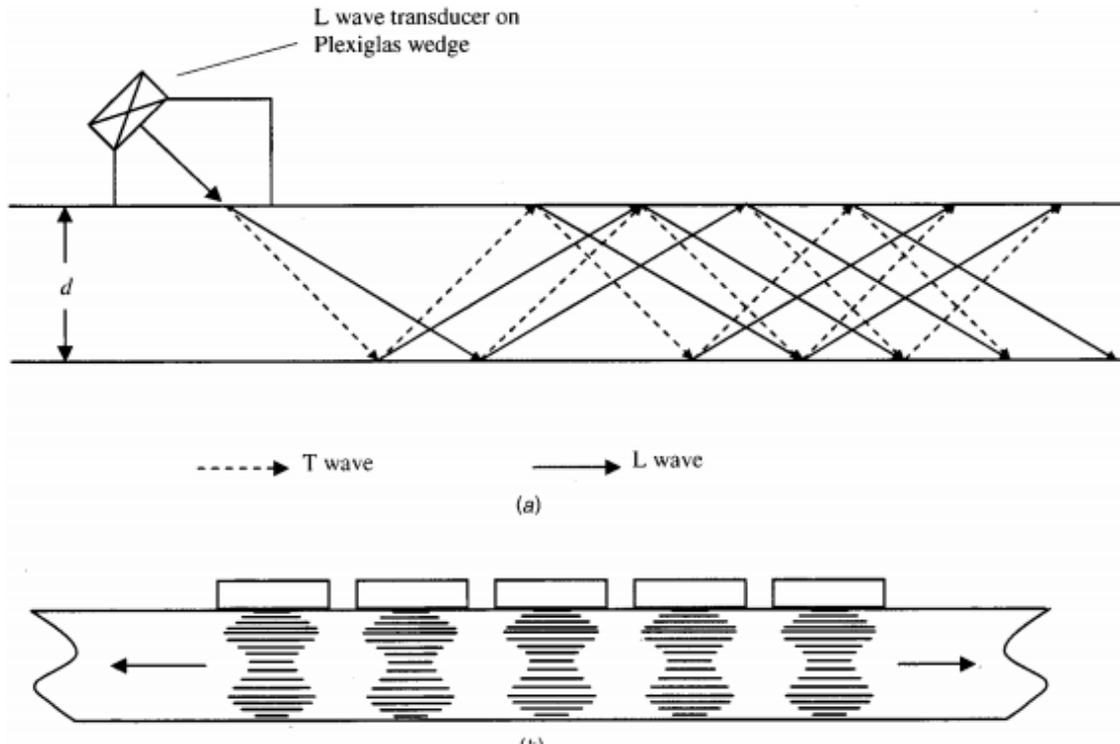


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема ультразвукового волноводного контроля

Для датчиков с фазированной решеткой, один элемент эквивалентен одному традиционному датчику, который требует возбуждения высоковольтным электрическим импульсом для генерации ультразвука. Для ультразвукового контроля углепластика из-за особой структуры композитных материалов коэффициент затухания ультразвука в материале углепластика намного больше, чем в металле. Следовательно, препятствие для ультразвука из углепластика будет увеличиваться, вызывая большие потери звуковой энергии. Это основная проблема при ультразвуковом контроле материалов из углепластика. Кроме того, важной проблемой при техническом обслуживании конструкций из композитных материалов самолетов является эффективное обнаружение дефектов в соответствии с характеристиками повреждений и типичными типами

повреждений, чтобы обеспечить основу для технического обслуживания конструкций из композитных материалов и допусков на ремонт [76-81]. Согласно статистике, обычные повреждения в конструкциях авиационных композитных материалов в основном сосредоточены на краю объекта или отверстия, например, заклепочное соединение является ключевой частью проверки и обслуживания. Однако размер этих частей невелик, что препятствует размещению ультразвуковых датчиков и обнаружению дефектов. С другой стороны, если для контроля используется обычный одноэлементный ультразвуковой датчик, сечение акустического луча датчика будет небольшим, а диапазон контроля маленьким. Что еще более важно, ультразвуковой луч, излучаемый датчиком, может обнаруживать дефекты только в определенном положении, из-за чего можно пропустить дефект, или необходимо постоянно изменять положение датчика или угол падения звукового луча, чтобы ультразвуковой луч мог падать перпендикулярно области контроля. Хотя технология ультразвукового контроля является зрелой технологией неразрушающего контроля с высокой чувствительностью обнаружения, для устранения вышеуказанных недостатков технология ультразвуковых фазированных решеток предоставляет новую возможность (рис. 1.13).

Технология ультразвуковых фазированных решеток для авиационных композиционных материалов имеет множество уникальных преимуществ по сравнению с традиционной технологией ультразвукового контроля, но контроль разности фаз является ключом к определению технологии ультразвуковых фазированных решеток. На точность фазированной решетки влияют в основном следующие два фактора:

- (1) Физическая реализация разности фаз контролируется точностью задержки аппаратной системы. В настоящее время точность задержки новейшей системы ультразвуковых фазированных решеток может достигать нескольких наносекунд.
- (2) Анизотропия авиационных композитных материалов вызывает неоднородность скорости распространения ультразвука. Следовательно, будет происходить фазовое отклонение, что приведет к фокусировке ультразвукового

луча не в заданной точке. Кроме того фазовое искажение синтезированного сигнала увеличит фокусное пятно и, соответственно, уменьшит амплитуду эхо-сигнала, отношение сигнал / шум и разрешающую способность. Таким образом, использование технологии ультразвуковых фазированных решеток для проверки конструкций из композитных материалов является сложной задачей и для толстых композитных материалов трудно получить точные результаты контроля [76].

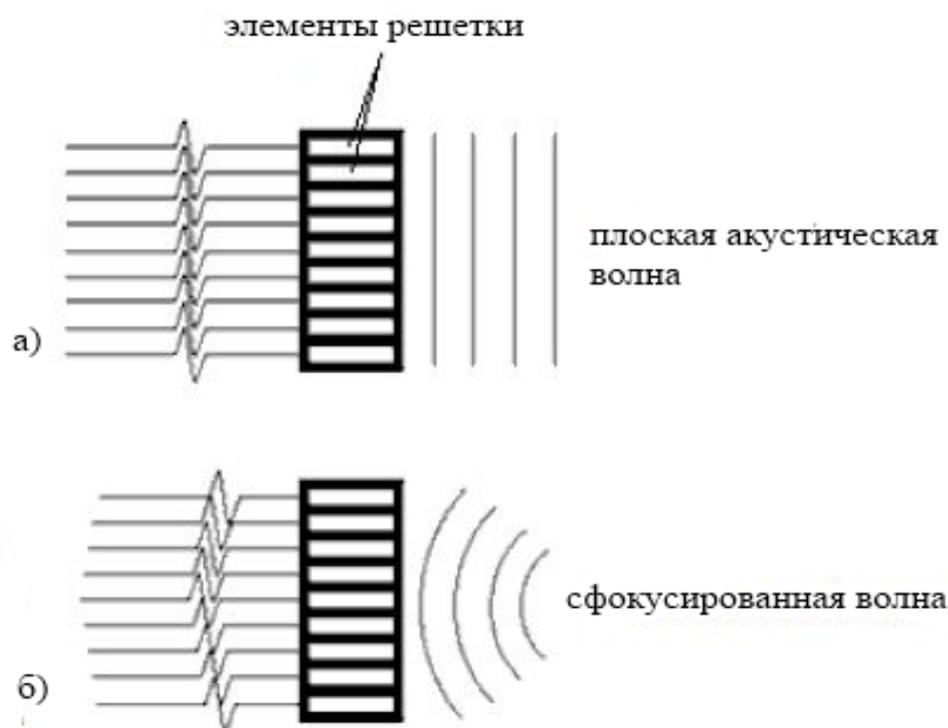


Рисунок 1.13 – Распространение сигнала в фазированных решетках: а) без задержки импульсов, б) с задержкой импульсов.

Технология ультразвукового неразрушающего контроля с воздушной связью (также называется воздушный ультразвуковой контроль) обладает такими преимуществами, как бесконтактный, непогружаемый и т. д., что способствует быстрой процедуре контроля в режиме онлайн и может применяться для крупномасштабного контроля компонентов композитных материалов (рис. 1.14). Когда ультразвуковые волны распространяются в воздухе, затухание больше, чем у других иммерсионных сред, поэтому энергия акустического сигнала, которая может достигать преобразователя, мала и содержит шумовые сигналы. Из-за

большого различия акустических импедансов между материалом преобразователя и воздуха, ультразвуковой преобразователь с воздушной связью имеет низкую эффективность, узкую полосу частот и длительную импульсную остаточную вибрацию, что не позволяет достичь чувствительности, отношения сигнал / шум и разрешения обычных систем ультразвукового контроля. С появлением новых материалов и быстрым развитием технологии микрообработки, разработка высокоэффективных ультразвуковых преобразователей с воздушной связью сделала

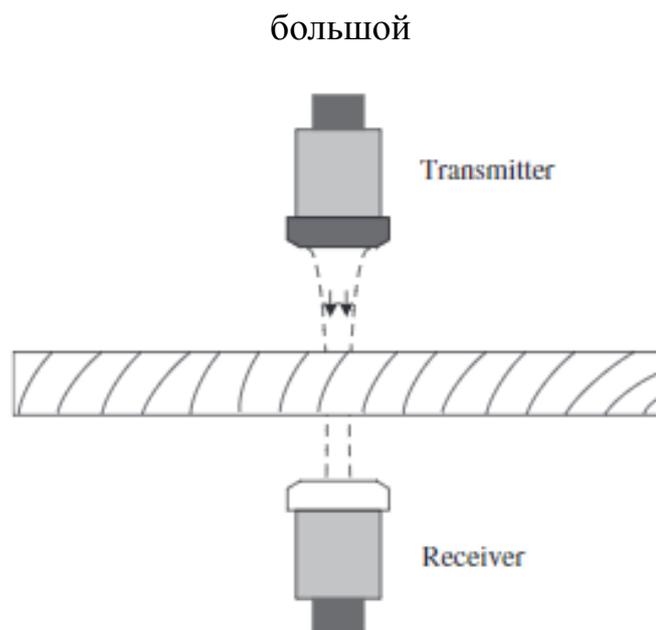


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема ультразвукового контроля

При использовании технологии ультразвукового контроля с воздушной связью для контроля композитных материалов многие зарубежные эксперты и ученые провели множество теоретических и экспериментальных исследований [80-88]. Этот метод в основном используется для обнаружения расслоения листов композитного материала из стекловолокна и углеродного волокна и других дефектов обработки, а также для получения изображений с помощью С-сканирования и волновой томографии Лэмба, а также для проведения различных экспериментальных исследований [82, 84].

Нелинейный ультразвуковой контроль (рис.1.15).

Нелинейный эффект среды или взаимодействие между небольшими

дефектами и акустической волной конечной амплитуды при распространении в материале используется для оценки характеристик материала и обнаружения мелких дефектов. Источником сигнала нелинейного отклика является в основном ангармонизм кристаллической решетки, микроскопические дефекты кристаллической решетки, характеристики микроструктуры и другие неоднородности [85]. Таким образом, обнаружение и оценка изменений микроструктуры и искажения решетки могут быть реализованы с помощью нелинейного ультразвука. Нелинейный ультразвук обладает высокой точностью при обнаружении микроскопических дефектов. Из анализа частотного спектра принятого сигнала сложно определить местоположение дефекта по полученному сигналу, поэтому он имеет определенные недостатки в локализации дефекта.

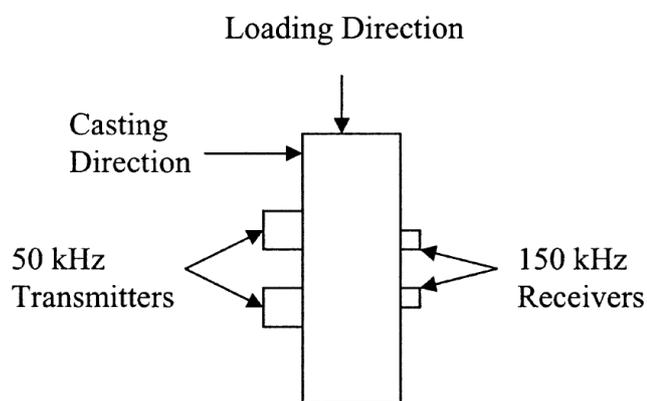


Рисунок 1.15 – Расположение датчиков и нагрузки на образце

В настоящее время для контроля композитных материалов используется типовое оборудование для ультразвукового контроля. Но в то же время у них есть свои ограничения. Во-первых, в теновом варианте работают устройства, которые можно использовать для проверки изделий толщиной более 10 мм, но поскольку они работают в одноканальном режиме, они не могут определить глубину дефекта. Во-вторых, сложно контролировать изделия толщиной более 10 миллиметров устройствами, работающими в эхо-импульсном режиме.

1.5 Ультразвуковые дефектоскопы для контроля композиционных материалов

Ультразвуковая автоматическая система контроля обычно состоит из ультразвукового детектора и зонда, механического сканера, управления схемой сканирования, устройства отображения и записи и т. д. С развитием компьютерных технологий в существующей системе контроля настройка приборов, управление процессом сканирования, а также запись и анализ результатов координируются компьютерным программным обеспечением. Сбор данных завершается компонентом сбора (например, картой сбора данных), и собранные данные передаются на компьютер для отображения, хранения и обработки. Механический сканер превратился из первоначальной двухосевой и трехосной системы в шестиосевую, десятиосную или более сложную систему. Он может не только выполнять простое трехосное сканирование плоскости, но также и тела вращения, такие как диск, вал и автоматическое сканирование крупногабаритных компонентов из композиционных материалов с пространственной криволинейной поверхностью. Кроме того, существуют системы сканирования, предназначенные для вращения трубок и стержней, ручные или автоматические системы С-сканирования и т. д.

Основную долю на международном рынке занимают израильская компания ScanMaster, британская компания (USL), Япония (Olympus), GE Inspection and Control Technology (GEMCS), американская компания (PAC), американская компания SDI и так далее. Продукция этих компаний - это в основном оборудование среднего и крупного масштаба. Аппаратное обеспечение имеет отличную производительность и мощные программные функции. Однако цена систем высока, затраты на обслуживание высоки, а цикл обслуживания длительный [86, 91].

Для дефектов расслоения большой площади, возникших на ранней стадии производства и применения композитных материалов на основе смол, существуют относительно зрелые технологии контроля, в то же время, благодаря повышению уровня технологии материалов, углублению понимания,

постоянному совершенствованию оборудования и точному контролю, как правило, легче контролировать выход качественной продукции, даже если эти дефекты возникают, их можно очень легко обнаружить с помощью современной более совершенной технологии С-сканирования. Чтобы снизить стоимость эксплуатации композитных материалов, продлить срок их службы необходимо в полной мере использовать технологию проектирования устойчивости композитных материалов к повреждениям и полностью использовать их несущую способность в течение срока службы. Следовательно, требуется более точная технология количественного контроля композитных материалов, особенно новых композитных материалов, таких как структуры с шовным соединением и композитные материалы с керамической матрицей. Но технология ультразвукового С-сканирования обычно может обеспечить только результат обнаружения плоской проекции в направлении глубины.

OmniScan SX (рис. 1.16), дефектоскоп, основанный на более чем 20-летнем опыте работы с фазированными решетками и использующий ДНК OmniScan [92]. Для повышения простоты использования OmniScan SX оснащен новым оптимизированным программным интерфейсом, отображаемым на сенсорном экране 8,4 дюйма (21,3 см). Прибор OmniScan SX работает только с одним типом датчиков, не является модульным, прибор прост в эксплуатации, экономичен и предназначен для менее требовательных приложений.

OmniScan SX выпускается в двух моделях: SX PA и SX UT. SX PA представляет собой блок с фазированной антенной решеткой 16/64 PR, который, как и SX UT, оснащен обычным каналом для эхо- импульсного сигнала (режим TOFD). По сравнению с OmniScan MX2, SX на 33% легче и на 50% меньше, что обеспечивает беспрецедентный уровень портативности для OmniScan.



Рисунок 1.16 – MXU для OmniScan SX

Сенсорный экран OmniScan SX предлагает вариант полноэкранного режима, который обеспечивает максимальную видимость, по сути превращая многие функции меню в простые операции с сенсорным экраном. Интуитивно понятный интерфейс обеспечивает плавный выбор меню, масштабирование, регулировку ворот, движения курсора, а также ввод текста и значений. Эти функции, наряду с другими интегрированными функциями премиум-класса, включая простые в использовании мастера настройки и калибровки, быструю частоту обновления дисплеев S-сканирования и A-сканирования, а также высокую частоту повторения импульсов (PRF), делают OmniScan SX высокоэффективным инструментом проверки.

OmniScan SX полностью совместим с обширным ассортиментом сканеров, датчиков и аксессуаров Olympus, а также со специализированным программным обеспечением, NDT SetupBuilder и OmniPC. В совокупности полное семейство программного и аппаратного обеспечения способствует оптимизированному и

эффективному рабочему процессу проверки, от проектирования и настройки до сбора данных и анализа.

В новом программном обеспечении OmniScan есть усовершенствования для повышения функциональности при контроле сварных соединений и коррозии. В стремлении к постоянному совершенствованию интерфейс программного обеспечения был упрощен, а время отклика оптимизировано, чтобы удовлетворить пожелания клиентов. Новые функции включают:

- Экспорт C-Scan
- Новый End-View с объединением групп
- Чередование
- Коэффициент затухания при анализе
- Прокрутка макетов для облегчения интерпретации
- Улучшенная доступность с большим количеством интерактивных меню
- Оптимизированные основные меню
- Бортовое комплексное сканирование
- Трассировка лучей изогнутой геометрии для продольных швов.

Подробные технические характеристики прибора приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Технические характеристики

Корпус	Вес	3,4 кг с батареей
	Размеры (Ш x В x Г)	267 × 208 × 94 мм
Хранение данных	Размер файла данных	300 МБ
	Запоминающие устройства	стандартных запоминающих устройств USB, Карта памяти SDHC
Порты входа/выхода	Выход видеосигнала	Выход SVGA
	Звуковая сигнализация	Да

	Порты USB	2 USB порта,совместимые с характеристиками USB 2.0
Линии ввода/вывода Дисплей	Выход питания	5 В
	Цифровой выход	3 цифровых выхода TTL
	Цифровой вход	4 цифровых входа TTL
	Кодировщик	2-осевой линейный кодировщик
	Разрешение	800 пикселейх 600 пикселей
	Вход синхроимпульсов	5 В TTL
	Выключатель устройства сбора данных	Да
	Размер	21,3 см (8,4 дюйма) по диагонали
	Количество цветов	16 миллионов
	Яркость	600 кд/м ²
	Углы просмотра	По вертикали: от -60° до 80°;По горизонтали: от -80° до 80°
	Тип	TFT LCD
Питание	Количество	1
	Тип	Аккумулятор Smart Li-ion

	Продолжительность работы батареи	6 часов при нормальных условиях работы	
Условия эксплуатации	Температура хранения	-20 °С - 70 °С без батареи -20 °С - 60 °С с батареей	
	Относительная влажность	Макс. 70% при 45°С без образования конденсата	
	Диапазон рабочих температур	-10 °С - 45 °С	
	Степень защиты корпуса	IP66	
	Устойчивость к ударам	MIL-STD-810G 516.6	
Характеристики УЗ (модуль OMNISX-1664PR)	Распознавание датчика	Автоматическое	
	Количество законов фокусировки	256	
	Разъемы	2 разъема УЗ: LEMO 00 1 разъем для ФР-датчика: Olympus PA	
Генератор/Приемник	Апертура	16 элементов	
	Количество элементов	64 элемент	
	Генератор	Канал УЗ	Каналы ФР
	Напряжение	95 В, 175 В и 340 В	40 В, 80 В и 115 В

	Форма импульса	Отрицат. прямоугольный импульс	также
	Длительность импульса	Настраивается от 30 до 1 000 нс, разрешение 2,5 нс	Настраивается от 30 до 500 нс; разрешение 2,5 нс
	Выходное сопротивление	< 30 Ω	35 Ω (режим импульс-эхо); 30 Ω (режим раздельно-совмещенный)
	Усиление	От 0 до 120 дБ, макс. входной сигнал 34,5 мВр-р (полная высота экрана)	От 0 до 80 дБ, макс. входной сигнал 550 мВр-р (полная высота экрана)
	Приемник	Канал УЗ	Каналы ФР
	Входное полное сопротивление	60 Ω (режим импульс-эхо); 50 Ω (режим генератор-приемник)	60 Ω (режим импульс-эхо); 150 Ω (режим раздельно-совмещенный)
	Полоса пропускания	от 0,25 до 28 МГц (-3 дБ)	От 0,6 до 18 МГц (-3 дБ)

Формирование луча	Количество групп	1	
	Тип сканирования	Секторное или линейное	
	Сбор данных	Канал УЗ	Каналы ФР
	Частота оцифровки	100 МГц	100 МГц
	Максимальная ЧЗИ	До 6 кГц (С-скан)	
	Обработка данных	Канал УЗ	Каналы ФР
	Число точек данных	До 8 192	
	Усреднение в реальном времени	УТ: 2, 4, 8, 16, 32, 64	РА: 2, 4, 8, 16
	Детектирование	РЧ, полная волна, полуволна +, полуволна –	
	Фильтр	3 низкочастотных, 6 полосовых и 3 высокочастотных фильтров (8 низкочастотных для TOFD)	3 низкочастотных, 3 полосовых и 5 высокочастотных
	Фильтрация	Сглаживание по диапазону частоты датчика	

	видео	
Визуализация данных	Частота обновления А-скана	А-скан: 60 Гц; S-скан: 60 Гц
Программируемая ВРЧ	Количество точек	40 дБ/10 нс
	Максимальное нарастание	3
Синхронизация данных	По кодировщику	От 1 Гц до 6 кГц
	По внутреннему таймеру	16: одна кривая ВРЧ на канал для законов фокусировки
Сигнализации	Условия	Любая логическая комбинация стробов
	Количество	На двух осях: от 1 до 65 536 меток

Компания Olympus представила новый ультразвуковой роликовый ФР-преобразователь RollerFORM, предназначенный для контроля композиционных и других материалов с гладкой ровной поверхностью (рис.1.17). RollerFORM — это не только доступная замена двумерным системам сканирования, но и эффективная альтернатива иммерсионным методам контроля.

Уникальный эластичный материал шины колеса RollerFORM специально разработан для обеспечения высокого качества ультразвукового контроля, не уступающего иммерсионному. Достаточно минимального количества жидкости и небольшого давления на преобразователь для получения качественного акустического контакта и четкого сигнала даже в сложных позициях сканирования.

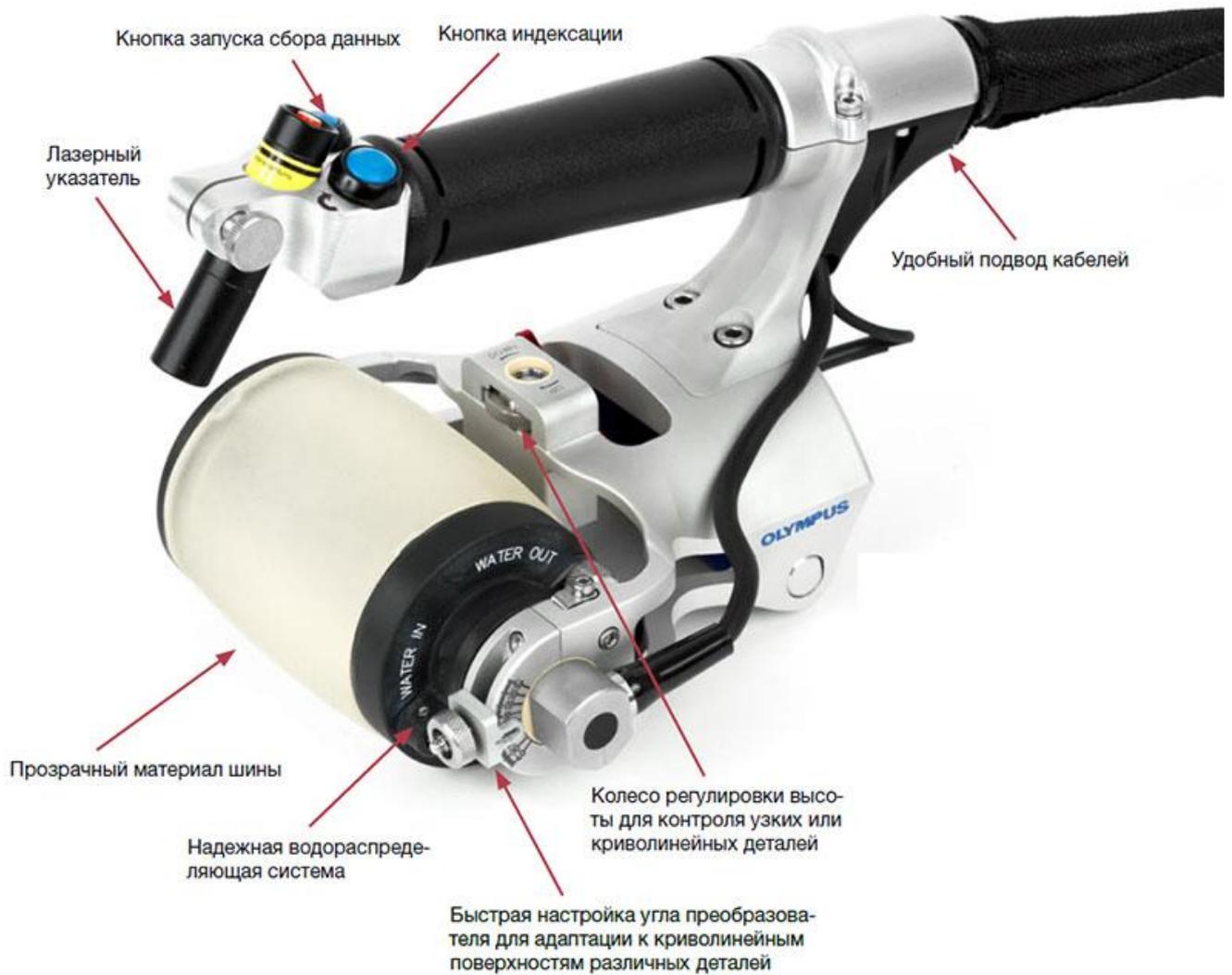


Рисунок 1.17 – Роликовый ФР-преобразователь[93]

Основные характеристики

- Превосходный акустический контакт при использовании минимального количества жидкости
- Акустический импеданс, равен сопротивлению воды
- 25-миллиметровая линия задержки позволяет выполнять контроль композитных материалов толщиной до 50 мм
- Широкая зона покрытия: до 51,2 мм
- Может использоваться в соответствии с существующими процедурами контроля самолетостроительных предприятий.
- Стандартная комплектация
- ФА-преобразователь с разъемом OmniScan

- Влагозащищенный кодировщик с разъемом для OmniScan MX2/SX
- Лазерный указатель
- Индексная кнопка и кнопка запуска сбора данных
- Запасные детали
- Нагнетающий/разбрызгивающий насос

Ультразвуковой преобразователь RollerFORM, в сочетании с ФР-дефектоскопами OmniScan® и FOCUS™ LT, использует ультразвуковые лучи с углом ввода 0° для контроля материалов в процессе их производства и технического обслуживания. Самые распространенные области применения включают: определение расслоений и пористости композитных материалов, а также измерение остаточной толщины стен. Встроенная кнопка индексации и эргономичный дизайн RollerFORM обеспечивают быстрое картирование поверхности материала путем получения многочисленных однострочных С-сканов и их объединения в единое изображение в режиме реального времени. Встроенный лазерный указатель облегчает выполнение точного прямолинейного сканирования.

В дополнение к превосходному акустическому контакту, шина колеса RollerFORM выполнена из специального эластичного материала, имеющего акустический импеданс практически равный водному. Конструкция преобразователя способствует эффективной передаче ультразвука в объект контроля без нежелательных эхо-сигналов и обеспечивает оптимальную разрешающую способность (1 мм) в подповерхностной зоне в композиционных материалах при использовании ФР-преобразователя с частотой 5 МГц. ФР-преобразователь с частотой 3,5 МГц используется для контроля толстых материалов с высоким уровнем затухания. Прозрачный материал шины преобразователя позволяет легко и быстро определять присутствие воздушных пузырьков или загрязняющих примесей в водяном резервуаре.

Таблица 1.5. Технические характеристики

Описание	Значение
----------	----------

Разрешение сканирования подповерхностных дефектов (плоские отражатели диаметром 3 мм)	1 мм при 5 МГц 1,5 мм при 3,5 МГц
Минимальная кривизна поверхности (радиус выпуклости)	50 мм
Габариты (Д x Ш x В)	235 × 145 × 150 мм
Вес (без воды)	1,5 кг

LS-200-COPA - Иммерсионный сканер с фазированной решеткой для автоматического контроля композитных панелей, обшивок и стрингеров [94].

Погружные сканеры ScanMaster LS-200-COPA представляют собой эффективное автоматизированное решение для ультразвукового контроля деталей из углеродных и армированных стекловолокном полимеров, таких как обшивки, стрингеры и лонжероны. При проверке используется технология многоканальных ультразвуковых фазированных решеток (РА), которая хорошо зарекомендовала себя для таких приложений.

LS-200-COPA укомплектован полным набором инструментов и аксессуаров, в том числе многоосный карданный поворотный манипулятор, а также сложные тактильные датчики, специально разработанные для проверки плоских и изогнутых деталей из углепластика (рис.1.18). Эти датчики вместе с программным обеспечением для трехмерного отслеживания поверхности и возможностями многоосного кодирования позволяют проверять детали сложной геометрии.

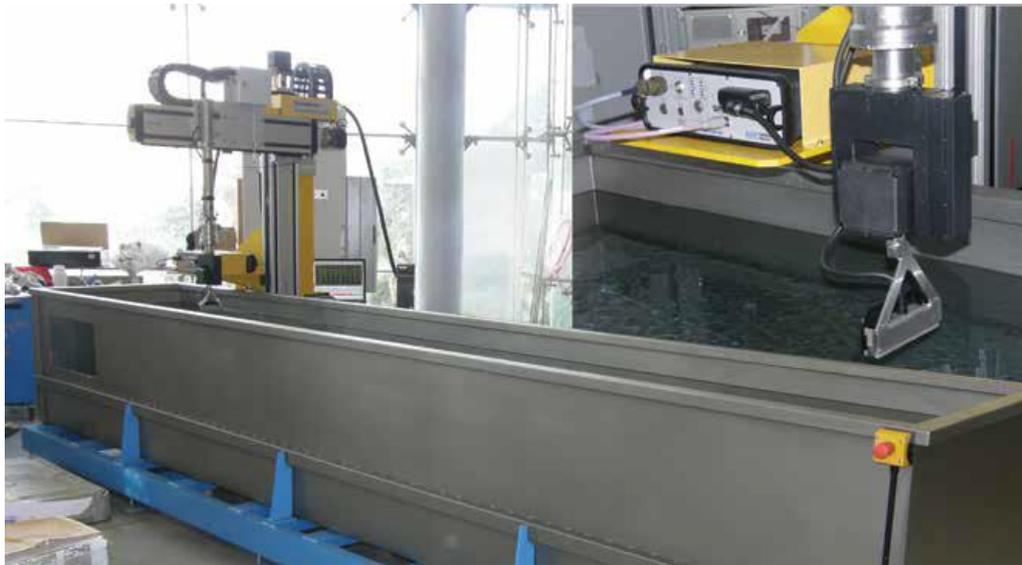


Рисунок 1.18 – LS-200-COPA иммерсионный сканер с фазированной решеткой

Эти инструменты и аксессуары, вместе с плоскими и изогнутыми линейными преобразователями с фазированной решеткой, позволяют сканировать и получать С-сканы (амплитуда и глубина) сложных областей с обнаружением расслоений и пористости (рис.1.19). Такие участки можно обследовать с механическим отслеживанием поверхности или без него. Проверка радиусов может выполняться как изнутри, так и снаружи, в зависимости от доступности, формы и размера.



Рисунок 1.19 – Датчики и рабочая среда LS-200-COPA

LS-200-COPA имеет следующие особенности и преимущества

- Высокая гибкость, позволяющая автоматизировать сканирование различных деталей, таких как обшивка, кромка, радиус и стрингер, в одной системе.

- Простое программирование деталей, включая отслеживание трехмерного контура с помощью интуитивно понятных инструментов обучения, включая импорт файлов САПР.
- Высокая производительность
- Полное сканирование A-Scan и C-сканирование (2D и 3D)
- Изображение и размер дефекта в 3D-презентации
- Соответствие требованиям Airbus и Boeing.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Компьютерная томография относится к отображению поперечного сечения объекта путем сбора данных о передаче или отражении с многих различных направлений. Эта технология оказала революционное влияние на диагностическую медицину, поскольку она позволяет врачам наблюдать за внутренними органами пациентов с беспрецедентной точностью, и этот метод также является особенно безопасным. Рентгеновская томография, используемая в медицине, в основном основана на коэффициентах ослабления рентгеновских лучей для формирования изображений тканей. Однако медицинская визуализация также была успешно достигнута с помощью радиоизотопов, ультразвука и магнитного резонанса, и параметры визуализации в каждом случае разные.

Существует также много немедицинских приложений для получения изображений. Например, теневой метод используется для контроля многослойных композиционных материалов. Однако, необходимость обеспечения акустического контакта при контроле делает невозможным получение полноракурсных проекций. Но небольшое количество проекции под небольшим углом к поверхности контролируемого изделия можно получить, такой подход называется малоракурсным [95-101]. Данная глава посвящена анализу возможностей акустической томографии при малоракурсном зондировании.

2.1. Исследование акустического поля при контроле композитных материалов

Ультразвук относится к упругим волнам с большой частотой. Ультразвук подразделяется на продольные волны, поперечные волны, поверхностные волны, волны Рэлея и волны Лэмба. В приборах акустического контроля чаще всего используется продольная волна. Некоторые специальные приборы акустического контроля используют другие формы волн. Продольные волны могут распространяться в твердых телах, газах и жидкостях и поэтому находят наиболее

широкое применение. Низкочастотный ультразвук - длина волны относительно большая, поэтому можно контролировать только макроскопическую структуру материала. При контроле композитного материала, в котором затухание упругих волн существенно выше, чем в стали, максимальная толщина контролируемого материала существенно меньше. Поэтому частота акустического контроля композитных материалов должна быть ни слишком высокая, ни слишком низкая, поэтому в зависимости от толщины конкретного материала производится выбор рабочей частоты датчика.

Композиционные материалы обычно состоят из двух частей: матричного материала и армирующего материала, они проявляют анизотропные характеристики в макроскопическом представлении, распространение ультразвуковых волн внутри него намного сложнее, чем в изотропной среде. Изучение распространения волн в анизотропных твердых телах в различных направлениях и законов распространения упругих волн в анизотропных материалах имеет важное значение для понимания характеристик акустического поля в композитных материалах и проведения акустического неразрушающего контроля этих материалов. На основе теоретических знаний о распространении ультразвука в анизотропных средах изучаются характеристики распределения акустического поля в композитных материалах, а также прогнозируются результаты расчета и моделирования осевого и радиального сечений акустического поля.

Сложность распространения ультразвука в композитных материалах проистекает из анизотропии материала: по-первых - разные характеристики распространения волн в разных направлениях, во-вторых - разнообразие форм ультразвуковых волн. В отличие от чистых продольных волн и чистых поперечных волн, распространяющихся в изотропном твердом теле, квазипродольные волны распространяются в анизотропных твердых телах. Называются квазипродольными волнами или квазипоперечными волнами, потому что направление колебаний частиц таких ультразвуковых волн больше не строго параллельно или перпендикулярно направлению распространения волны, а находится под

определенным углом. Кроме того, в анизотропных средах наблюдается такое явление, что фазовая скорость и групповая скорость акустических волн различны, а энергия акустических волн распространяется в направлении групповой скорости.

Когда ультразвуковые волны распространяются в композитных материалах, диаметр волокна (диаметр нити из стекловолокна составляет около 10-20 мкм, диаметр нити из углеродного волокна составляет около 5-10 мкм) меньше, чем длина ультразвуковой волны (при частоте менее 20 МГц длина волны более 100 мкм). Поэтому композитный материал можно рассматривать как однородную анизотропную среду, исключая влияние микроструктуры материала и сохраняя симметрию композитного материала.

Поскольку при ультразвуковом контроле обычных материалов используются продольные волны, рассмотрим только формулы расчета скорости продольных волн в твердых телах, жидкостях и газах.

Формула скорости продольной волны в твердой среде:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad 2.1$$

Формула скорости продольной волны в жидкости и газе:

$$C_L = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad 2.2$$

где E - модуль упругости материала, ρ - плотность материала, σ - коэффициент Пуассона материала, B - модуль объемной упругости жидкости и газа.

Согласно приведенной выше формуле скорость продольной волны определяется модулем упругости материала или модулем объемной упругости, плотностью и коэффициентом Пуассона. Скорость продольной волны для различных материалов фиксирована при стандартных условиях: скорость продольных волн в стали составляет около 5900 м/с, около 1500 м/с в воде и 340 м/с в воздухе. Как правило, скорость продольной волны в композитах на основе

свол больше, чем в воде, и меньше, чем в стали, около 2400-2900 м/с [1, 2, 3, 5]. Перед использованием ультразвуковых инструментов необходимо рассчитать удельную скорость продольной волны путем измерения толщины образца и времени распространения эхо-сигнала. Поскольку скорость упругой волны в конкретном материале обычно фиксирована, то можно определить длину волны:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 2.3$$

где c - скорость ультразвука, f - частота ультразвука.

Звуковое давление и интенсивность ультразвука - это физические величины, которые используются для описания акустического поля. В идеальных условиях звуковое давление плоской гармонической волны без ослабления описывается выражением:

$$P = -\rho c A \omega \sin \omega \left(t - \frac{S}{c} \right) = \rho c u \quad 2.4$$

где A - амплитуда смещения частицы, ω - угловая скорость, u - скорость вибрации частицы, ρ - плотность среды, t - время, S - дистанция, c - скорость распространения упругой волны.

Из приведенной выше формулы видно, что существует максимальное звуковое давление, то есть амплитуда акустического давления $\rho c A \omega$. При фактическом сравнении уровня акустического давления нет необходимости сравнивать звуковое давление в каждый момент времени, достаточно сравнивать только амплитуду акустического давления, чтобы получить силу ультразвука. Амплитуда акустического давления $\rho c A \omega$ - это то, что мы обычно называем ультразвуковым давлением, обычно обозначаемое символом P . На приборе для акустического контроля высота импульса, отображаемая на экране, генерируется ультразвуковым давлением после усиления, поэтому существует пропорциональная зависимость амплитуды от акустического давления. Интенсивность ультразвука обычно обозначается символом I , также известным

как плотность потока энергии. Она определяется как энергия волны, перпендикулярная направлению распространения ультразвуковой волны через единицу площади за единицу времени. Интенсивность ультразвука обычно принимается как среднее значение плотности потока энергии за определенный период.

Между ультразвуковым давлением и интенсивностью ультразвука существует следующая зависимость:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \quad 2.5$$

Акустический импеданс - важный акустический параметр материала, который связан с выбором конкретных релевантных параметров при испытании. Акустический импеданс обычно определяется математически как произведение плотности среды и скорости упругой волны. При отражении ультразвуковых волн в процессе распространения, следует учитывать влияние импеданса на распределении энергии при прохождении ультразвука через среду и отражении. Буква Z обычно используется для обозначения акустического импеданса:

$$Z = \rho c \quad 2.6$$

Для композитных материалов из углеродного волокна скорость ультразвука составляет 2,4-2,9 км/с, а плотность - 1,5-2,0 г/см³, как правило, Z - 3.6-5.8×10³ кг/(м² · с).

Когда ультразвуковые волны проходят из одной среды в другую среду, на границе раздела сред происходит отражение части энергии и прохождение другой части. Прошедшие ультразвуковые волны попадают во вторую среду, а отраженные ультразвуковые волны отражаются обратно в первую среду. Коэффициент прохождения определяется следующим соотношением:

$$t = \frac{p_t}{p_0} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad 2.7$$

где, p_t - звуковое давление проходящей волны, p_0 - звуковое давление падающей волны, Z_1 - акустический импеданс первой среды, Z_2 - акустический импеданс второй среды.

Эта формула является физической основой акустического контроля. Благодаря этой формуле решающим фактором для способности границы раздела двух сред передавать и отражать ультразвуковые волны является разница в импедансе сред по обеим сторонам границы. Чем больше разница, тем сильнее отражательная способность границы раздела двух сред, чем меньше разница, тем слабее отражение ультразвука, тем сильнее передаточная способность. Затухание ультразвуковых волн в основном вызвано рассеянием ультразвуковых волн кристаллическими зернами в материале или поглощением самого материала. Затухание упругих волн в среде имеет следующий закон:

$$p = p_0 e^{-\alpha L} \quad 2.8$$

где p_0 - давление ультразвуковой волны на выходе излучателя, p - ультразвуковое давление внутри материала на расстояние L , α - коэффициент затухания.

Коэффициент затухания имеет определенную зависимость от самого материала и ультразвуковых параметров. Чем выше частота ультразвука, тем больше коэффициент затухания, чем больше диаметр зерна внутри материала, тем больше коэффициент затухания. В реальном контроле необходимо использовать частоту, обеспечивающую необходимую дистанцию, чувствительность и разрешающую способность. Если частота слишком высокая, затухание будет слишком большим. Чтобы улучшить проникновение ультразвуковых волн в материал, следует выбирать низкочастотные датчики.

Ультразвуковой контроль использует прохождение ультразвуковых волн через границу раздела, вызванную какой-либо причиной внутри материала, и принимает отраженный сигнал определенной интенсивности и вычисляет время прохождения упругой волны. Затем эти данные используются для дальнейшего анализа местоположения, размера и причин образования границы раздела внутри материала. Некоторые передовые инструменты акустического контроля могут

напрямую получать эти параметры и давать интуитивно понятные результаты испытаний, такие как В-сканирование, С-сканирование и так далее [74]. При использовании наиболее распространенных А-сканов или проведении исследований по ультразвуковому тестированию и разработке передовых моделей сканирования необходимо понимание теоретических основ их получения, что позволяет определить информацию о дефектах при контроле.

При расчете акустического поля все препятствия в процессе распространения упругой волны можно определить как акустические барьеры, или для краткости барьеры. Когда упругая волна встречает барьер, она вызывает три явления: отражение, прохождение и дифракцию. В нормальных условиях барьер обладает достаточным изоляционным эффектом, а энергия передачи очень мала. В модели рассматривается дифракция упругой волны, возникающая на краях акустического барьера, когда упругая волна встречает барьер во время распространения.

Когда упругая волна проходит через верхние и боковые поверхности ограниченного барьера и достигает точки приема, она образует интерференционное поле. Кроме того, когда волна встречает препятствия во время передачи, возникают отражение и дифракция. Интенсивность дифракции ультразвука тесно связана с отношением размера препятствия к длине волны [17]. Это можно описать как:

$$k = 2\pi fa / c = 2\pi a / \lambda,$$

где k - волновое число, f , c и λ - частота, скорость и длина волны, a - величина, которая представляет размер препятствия, если это сфера, a - радиус сферы.

Размер всех объектов относителен, и размер объекта часто можно измерить в длинах волн. Коэффициент k представляет собой относительную величину размера объекта и длины волны. Интенсивность акустической дифракции тесно связана со значением k . Чем меньше k , тем сильнее явление акустической дифракции, и чем больше k , тем слабее явление акустической дифракции. Когда k

$= 1$, отношение диаметра сферы к длине волны мало, то часть энергии упругой волны будет огибать сферу. Когда $k \ll 1$, дифракция сильная и упругая волна будет поддерживать исходный путь распространения, как будто сферы не существует. При $k \gg 1$, дифракция очень слабая и за отражателем образуется акустическая тень. Дифракция также возникает, когда акустические волны проходят через барьер с круглыми отверстиями [102].

Теория волновой акустики изначально возникла из оптики. Акустическое давление каждой точки приема в дифрагированном акустическом поле получается путем решения волнового уравнения с определенными граничными условиями. Самые ранние решения волновой теории основаны на принципе Гюйгенса-Френеля в качестве основной отправной точки и интегральной теореме Гельмгольца-Кирхгофа, основанной на уравнении Грина. Мы используем программное обеспечение COMSOL Multiphysics для анализа методом конечных элементов распределение дифракционного акустического поля в зоне контроля (рис.2.1).

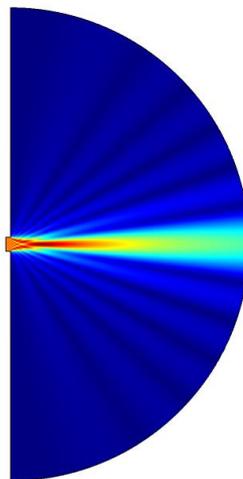


Рисунок 2.1 – Акустическое поле, излучаемое ультразвуковым датчиком

На рис.2.2 приведен пример распределения акустического поля в упругой среде, содержащей отражатель в зоне контроля. При расчете были использованы следующие параметры: длина волны 5 мм, размер сенсора 3 см, размер дефекта 3

см. На рисунке видно акустическое поле после дифракции, оно невелико, и отраженное поле, которое можно рассматривать как акустический луч.

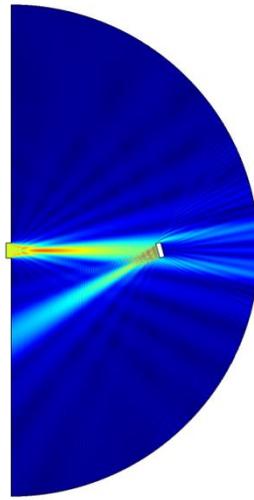


Рисунок 2.2 – Акустическое поле, излучаемое ультразвуковым датчиком при наличии отражателя

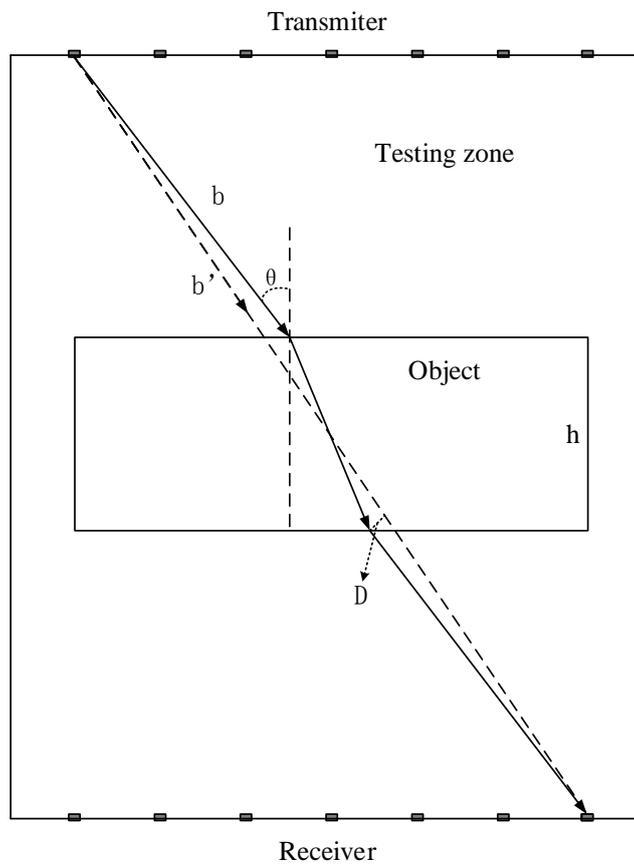


Рисунок 2.3 – Изменение направления акустической волны при наличии рефракции

На рисунке 2.3 анализируется ошибка определения координат дефекта, вызванная рефракцией: образец помещается в ванну с иммерсионной средой, а матрица излучателей и матрица приемников размещаются с обеих сторон от образца. Направление распространения упругой волны изменяется из-за рефракции, что вызывает ошибки.

Выражение для расчета максимальной ошибки имеет следующий вид:

$$D_{\max} \approx 0.5 \frac{c_m}{2c_o} * h$$

где D - погрешность, h — толщина объекта, c_m – скорость ультразвука в иммерсионной среде, c_o – скорость ультразвука в объекте.

Для угла $\theta = 30^\circ$ и толщины объекта $h = 10$, $D_{\max} \approx 0.5 \frac{c_w}{2c_o} * h = 0.125h = 1,25$ и очевидно что, чем больше толщина объекта, тем больше погрешность. В нашей модели и экспериментальной установке, угол падения меньше 30° , и использовался круглый металлический цилиндр диаметром 6 мм как дефект, поэтому можно не учитывать погрешность из-за преломления. При толщине дефекта больше чем 10 мм при реконструкции томограммы надо учитывать погрешность из-за преломления акустического луча.

2.2. Исследование направленности элемента и решетки

Для исследование направленности элемента используется коэффициент K , учитывающий излучение акустической волны под углом (θ):

$$K = A(\theta)/A(0) \quad 2.9$$

где $A(0)$ – амплитуда акустического сигнала под углом $\theta=0^\circ$, $A(\theta)$ – амплитуда акустического сигнала под углом θ .

При расчете диаметр излучателя и приемника составили 4 мм, и длина волны равна $\lambda=6\text{мм}$.

Разделим элемент на n точечных источников, тогда направленность в дальней зоне определится по формуле:

$$k(\theta) = \frac{\sin\left[n \cdot \left(\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin(\theta)\right)\right]}{n \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{b}{\lambda} \cdot \sin(\theta)\right)}, \quad 2.10$$

где d – размер излучателя, $b = \frac{d}{n}$, n – количество точечных источников.

Результат расчета по формуле(2.10) представлен на рис. 2.4. Из рисунка видно что, при $\theta \leq 30^\circ$ можно считать, что амплитуда одинаковая (отклонение не превышает 5%).

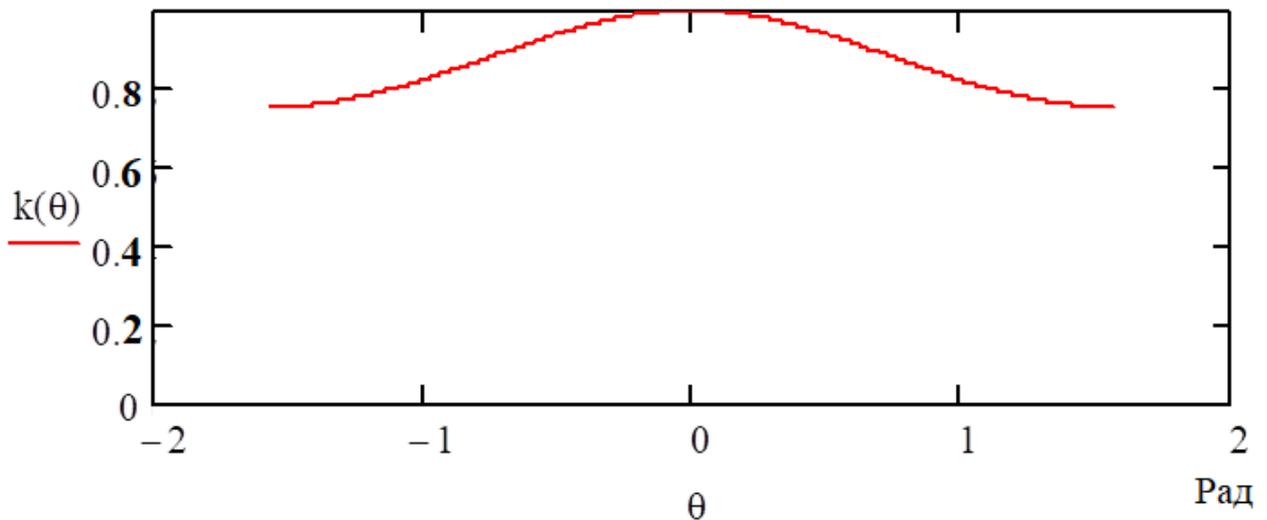


Рисунок 2.3 – Нормированная диаграмма направленности $k(\theta)$ одиночного излучателя

2.3. Компьютерная томография

По сути, томография предполагает проецирование реконструированных изображений. Строго говоря, проекция под данным углом представляет собой интеграл изображения в направлении, указанном углом. Однако в широком

смысле проекция означает информацию, полученную из передаваемой энергии, когда в качестве источников энергии используются ультразвук или микроволновое излучение, это отличается от того, когда в качестве источников энергии используются рентгеновские лучи. Рентгеновские лучи не являются дифракционными и распространяются по прямой линии, в то время как ультразвуковые волны и микроволны дифрагируют, а волновое поле рассеивается почти во всех направлениях [102]. С математической точки зрения, как решить функциональную задачу при реконструкции проекции, можно проследить по статье, опубликованной Радоном в 1917 году. Нынешний бум в томографии произошел от рентгеновского компьютерного томографа, изобретенного Хаунсфилдом. Он и Аллан Кормак получили Нобелевскую премию в 1972 году. Он независимо изобрел некоторые алгоритмы, которые показывают, что, хотя данные проекции не могут строго удовлетворять реализации алгоритма реконструкции, можно получить качественные изображения. В 1967 году британский инженер-электронщик Годфри Н. Хаунсфил с помощью алгебраических методов успешно реконструировал изображение 80x80 пикселей с точностью до 1%. После этого Рамачандран и Лакшминараянан предложили алгоритм сверточной проекции, а Шепп и Логан применили технику визуализации. Алгоритм сверточной проекции значительно сокращает время реконструкции и улучшает качество изображения.

2.3.1. Основные принципы проецирования и обратного проецирования

Томография - это, по сути, математическая связь между проекцией и обратной проекцией [20,103]. Основным принцип обратного проецирования - равномерное распределение измеренного значения проекции для каждой точки в соответствии с ее исходным путем. Значения проекции в каждом направлении накладываются на изображение после обратного проецирования для вывода исходного изображения.

Для нашей модели потери на границе раздела, вызванные чрезмерной

разницей акустического импеданса в дефекте, являются основной причиной, влияющей на амплитуду принимаемого сигнала. Так как преломление и отражение вызовут большие ошибки при падении под большим углом будем использовать только реконструкцию с малоугловым сканированием, что конечно приводит к существенному уменьшению количества данных сканирования по сравнению с реконструкцией с полноракурсным сканированием, что увеличивает сложность реконструкции и снижает точность.

Задача следующих разделов состоит в анализе возможностей акустической томографии именно в таком, втором значении. Поэтому в следующих разделах приведены модель и алгоритм, использованные в этой работе для малоракурсного сканирования.

2.3.2. Разработка модели (алгоритм для модели)

На рис. 2.5 показан акустический тракт теневого метода при малоракурсном зондировании с использованием линейных решеток. Выявляемость дефектов определяется коэффициентом k_d , который определяется по формуле:

$$k_d = A_d/A_0 \quad 2.15$$

где A_d – амплитуда приемного акустического сигнала при наличии дефекта, A_0 – амплитуда приемного сигнала при отсутствия дефекта.

Акустический тракт состоит из двух ультразвуковых решеток приемной и излучающей, а объект контроля располагается между ними. При контроле каждый преобразователь излучающей антенной решетки поочередно излучает упругую волну, а прием сигналов происходит всеми преобразователями приемной решетки. Полный набор будет содержать m^2 акустических сигналов, где m - количество преобразователей в каждой линейной решетке [29, 70].

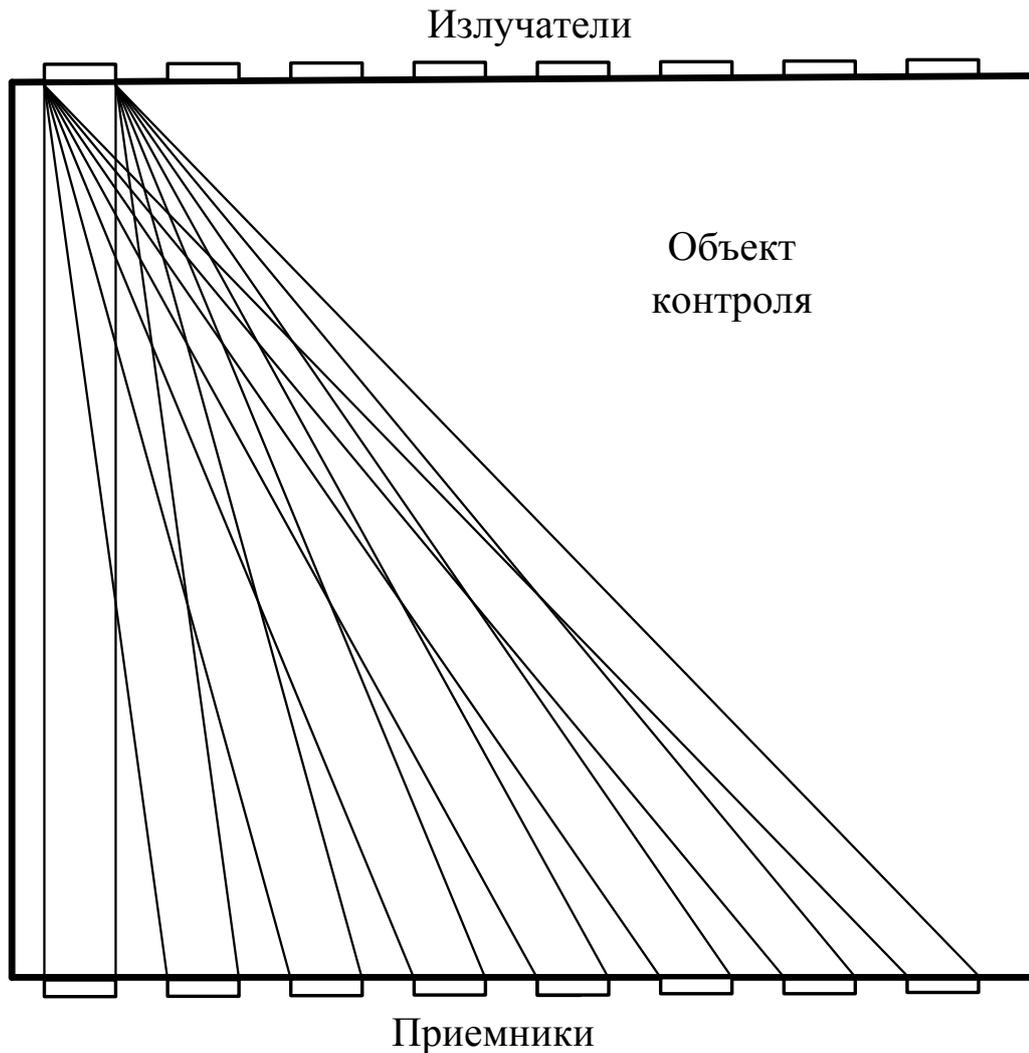


Рисунок 2.5 – Акустический тракт малоракурсной томографии.

Алгоритм работы акустических решеток основан на принципе: пьезопреобразователи излучающей антенной решетки излучают упругие волны поочередно один за другим, а пьезопреобразователи приемной антенной решетки принимают одновременно. В итоге получается набор из m^2 акустических сигналов, где m – число пьезопреобразователей в каждой антенной решётке. Акустический тракт малоракурсной томографии показан на рис. 2.5. Условия функционирования моделируемого акустического тракта предполагают использование лучевого принципа распространения упругой волны. На основании теории дифракции Кирхгофа [102] 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 [103].

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 акустического давления на элементарном приёмном элементе равномерным, а амплитуду принятого сигнала прямо пропорциональной «озвученной» поверхности. Кроме того, линейный размер элементов решёток больше длины волны излучения. Поэтому каждая пара элементов излучатель-приемник формирует лучевую трубку, форма и размеры которой определяются элементами антенных решёток и расстоянием между приёмником и излучателем. При моделировании считаем, что только дефект, закрывающий лучевую трубку пары элементов, влияет на амплитуду сигнала, принимаемого приёмником, и амплитуда приемного сигнала линейно зависит от площади приемника незакрытой дефектом. Коэффициент определяется по форме:

$$k_d = 1 - S_d/S \quad 2.16$$

где S_d - площадь проекции дефекта на приемник; S - площадь приёмника.

Для двумерной модели вместо площади используем длину элемента:

$$k_d = 1 - D_d/D \quad 2.17$$

где D_d - длина проекции дефекта на приемник; S - длина приёмника.

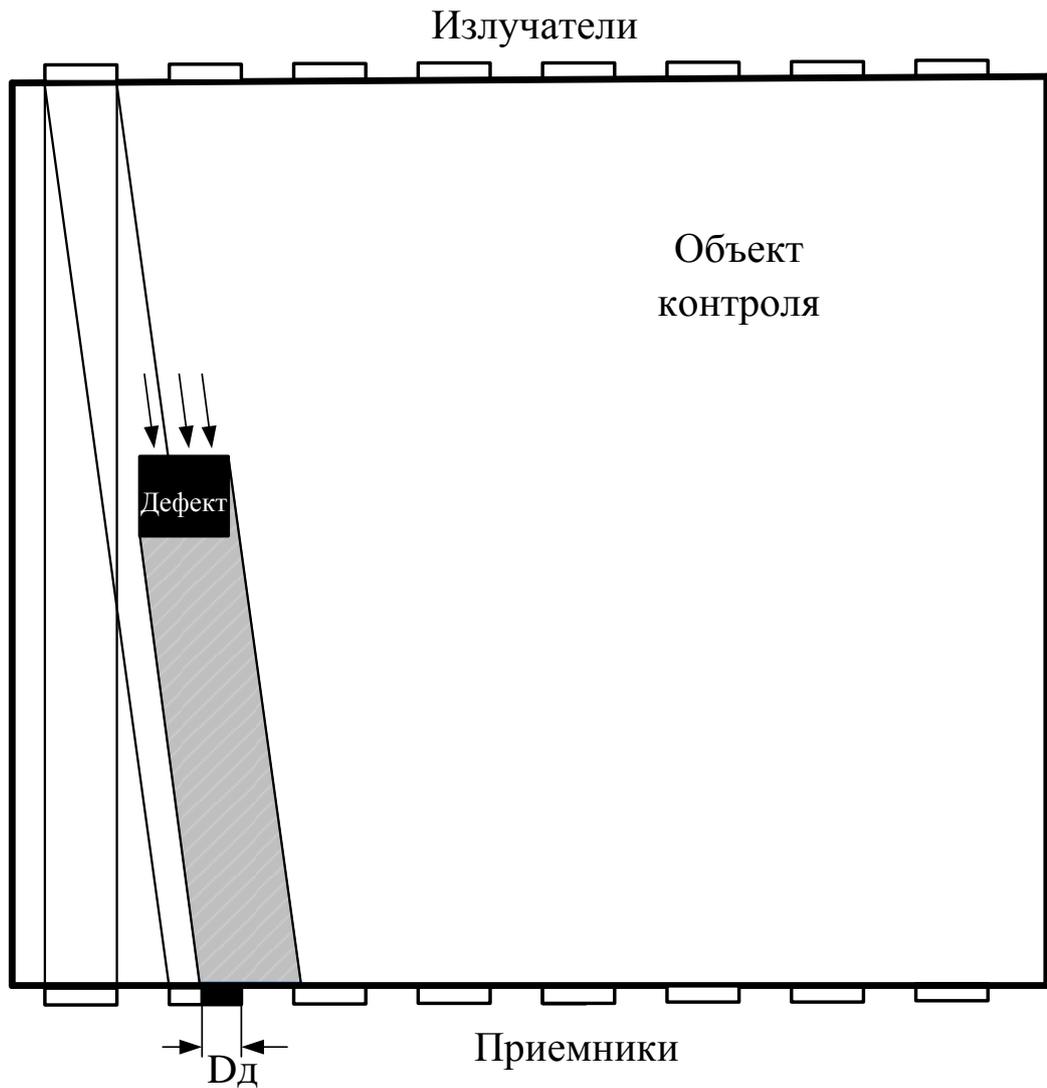


Рисунок 2.6 –Акустическая тень от дефекта на приемнике

Из рисунка видно, что первый приемник не попадает в область акустической тени дефекта, а для 2-го приемника длина проекции, которая закрывает лучевую трубку равна (D_d).

Моделирование томографии теневого метода контроля состоит из двух этапов. Первый этап содержит процедуру создания множества нормированных сигналов приёмной антенны при условии расположения заданной модели дефекта в зоне контроля (рис.2.7).

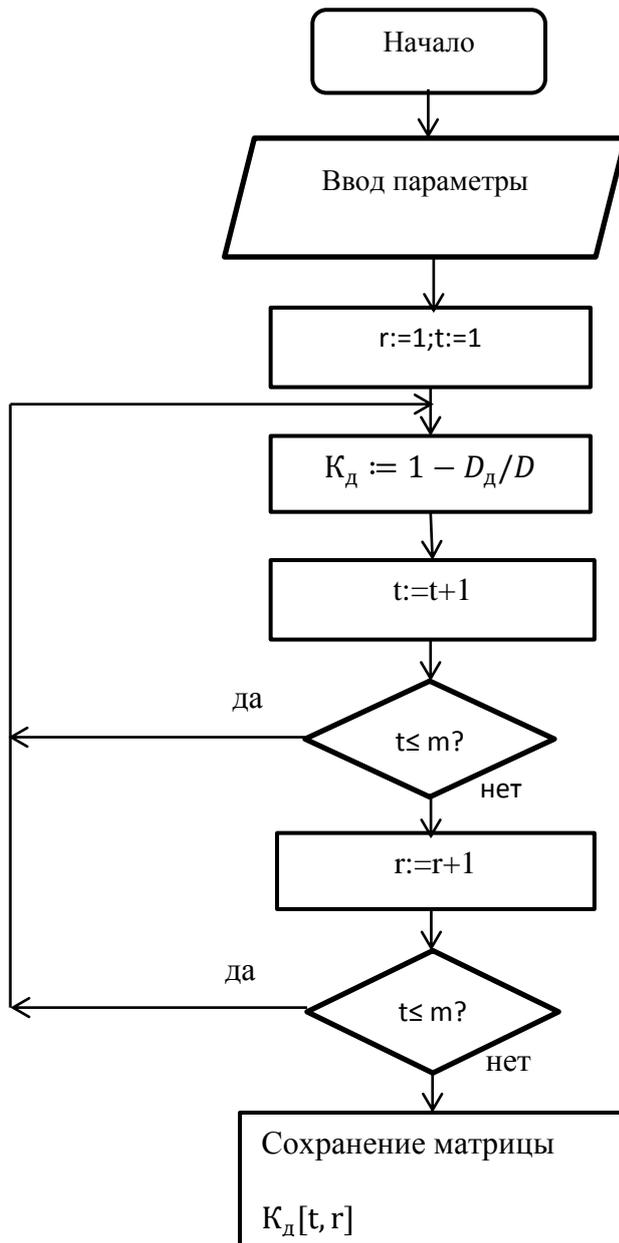


Рисунок 2.7 –Алгоритм расчета коэффициентов K_d в зоне контроля

Второй этап заключается в реконструкции по этим исходным данным двумерной томограммы. При этом была выбрана система координат, показанная на рис. 2.8, причем первый приемник располагается в начале координат. На рис. 2.8 используются следующие обозначения: m – количество элементов в решетке, h – расстояние между излучающей и приемной решетками, D – диаметр элемента, l – длина решетки, t – номер излучателя, r – номер приемника.

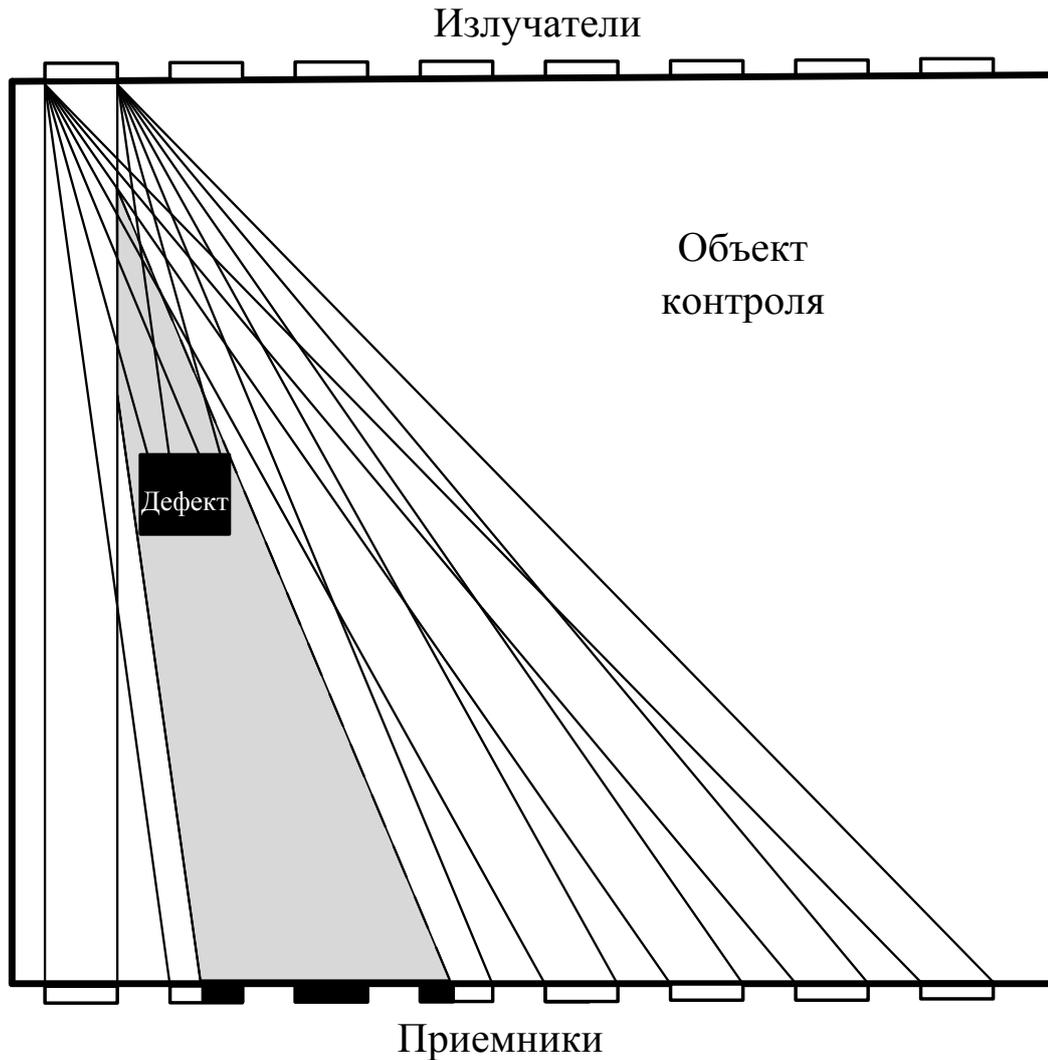


Рисунок 2.8 – Акустический тракт зоны контроля при наличии одного дефекта.

Из рисунка видно, что первый элемент приемной решетки не находится в акустической тени дефекта при зондировании первым элементом излучающей решетки. Второй приемный элемент частично находится в акустической тени, размер которой примерно равен $(D/2)$. Третий элемент приемной решетки полностью находится в акустической тени. Четвертый элемент приемной решетки частично находится в акустической тени. Подобным образом получается теневая картина дефекта на плоскость приемной решетки для каждого элемента излучающей решетки. Алгоритм расчета коэффициентов K_d представлен на рис. 2.7 [104].

Акустический тракт зоны контроля при наличии двух дефектов в зоне

контроля показан на рис.2.9.

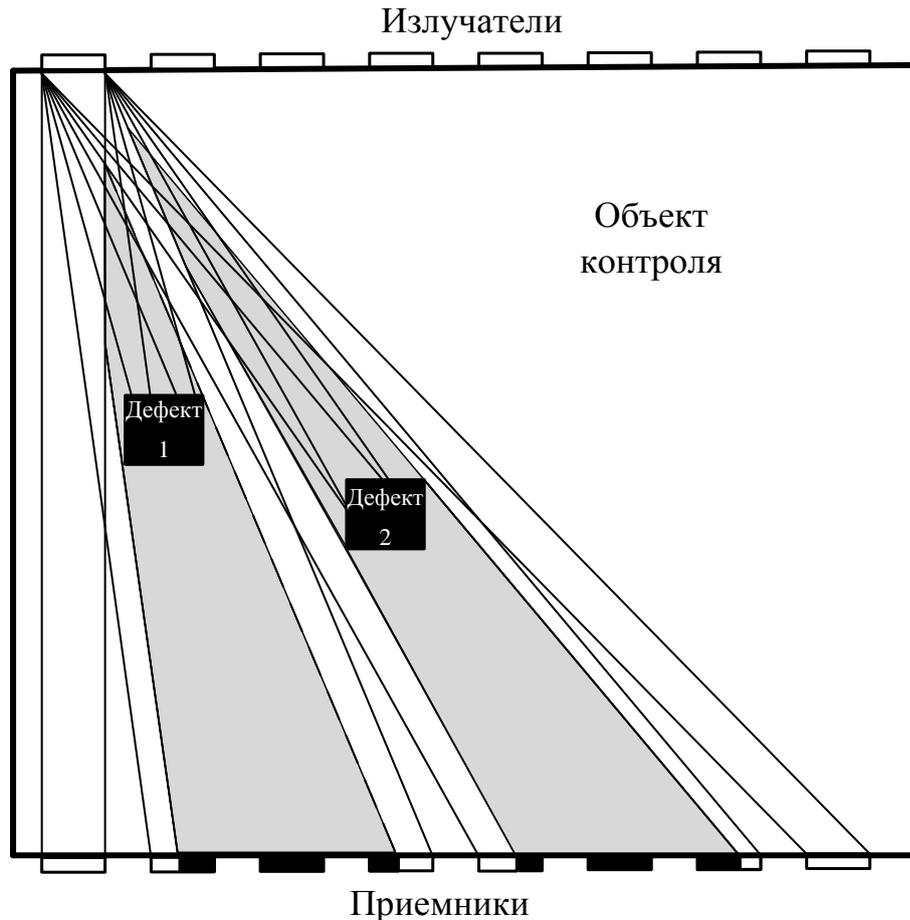


Рисунок 2.9 – Акустический тракт зона контроля теневого метода при наличии двух дефектов

Из рисунка видно, что первый элемент приемной решетки не находится в акустической тени дефекта при зондировании первым элементом излучающей решетки. Второй приемный элемент частично находится в акустической тени, размер которой примерно равен $(D/2)$. Третий и шестой элемент приемной решетки полностью находится в акустической тени. Четвертый, пятый и седьмой элемент приемной решетки частично находится в акустической тени. Пятый приемный элемент частично находится в акустической тени, размер которой примерно равен $(D/2)$. Подобным образом получается теневая картина дефекта на плоскость приемной решетки для каждого элемента излучающей решетки.

Нормируем полученные коэффициенты при аддитивной обработке:

$$A(x, y) = \frac{K_r}{K_t} = \frac{\sum K_d[t, r]}{\sum K_0[t, r]} \quad 2.18$$

где $A(x, y)$ – нормированные коэффициенты для точки с координатами (x, y) зоны контроля, K_d – сумма амплитуд принятого сигнала при наличии дефекта в зоне контроля, K_0 – сумма амплитуд принятого сигнала при отсутствии дефекта.

Алгоритм реконструкции томограммы при наличии двух дефектов приведен на рис.2.10. Алгоритм учитывает расположение дефектов в зоне лучевых трубок каждой пары «излучатель-приемник».



Рисунок 2.10 – Алгоритм реконструкции зоны контроля

По описанному алгоритму была разработана модель на основе пакета прикладных программ MathCad. Результаты моделирования представлены в виде двумерного изображения (томограммы), а амплитуда сигнала закодирована цветом.

2.3.3. Исследование влияния параметров решетки на томограмму

Для исследования выберем 3 типа решеток с количеством элементов 8, 16 и 32 в каждой решетке, длина решеток и размеры элементов одинаковые и не меняются. Результаты моделирования показаны на рисунках 2.11-2.14

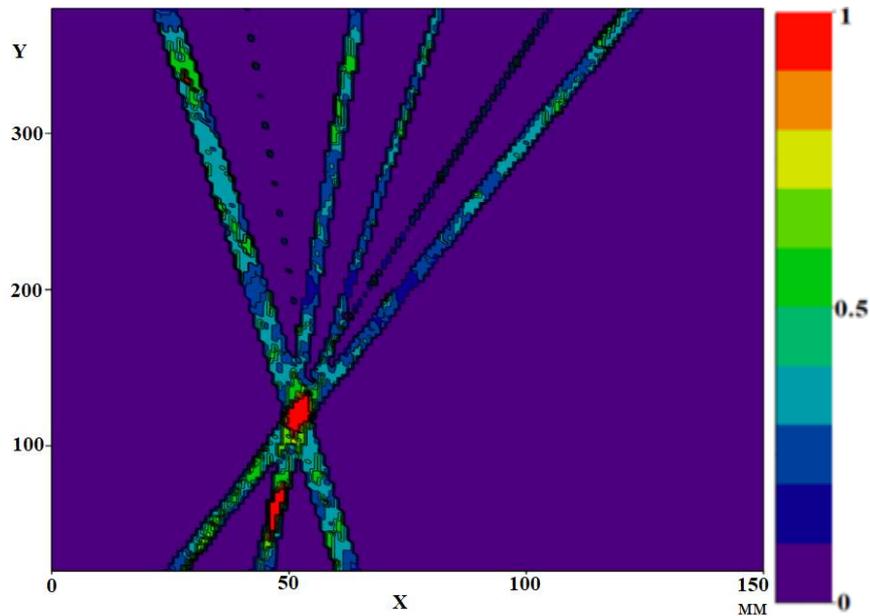


Рисунок 2.11 – Реконструкция зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм при: количестве элементов в решетке – 8, длина решетки – 150мм, расстояние между решетками – 400мм, расстояние между элементами – 21.4мм

Из за слишком малого количества элементов в решетке появились артефакты. В частности появилось акустическое изображение второго (несуществующего) дефекта, который отображается красным цветом также как и реальный дефект. Кроме того видна лучевая структура томограммы.

Ложные дефекты исчезли при увеличении количества элементов в решетке в два раза. В тоже время неоднородная структура томограммы сохранилась, т.е. многолучевой характер изображения не изменился. Однако координаты центра дефекта можно довольно точно определить по томограмме (рис.2.12).

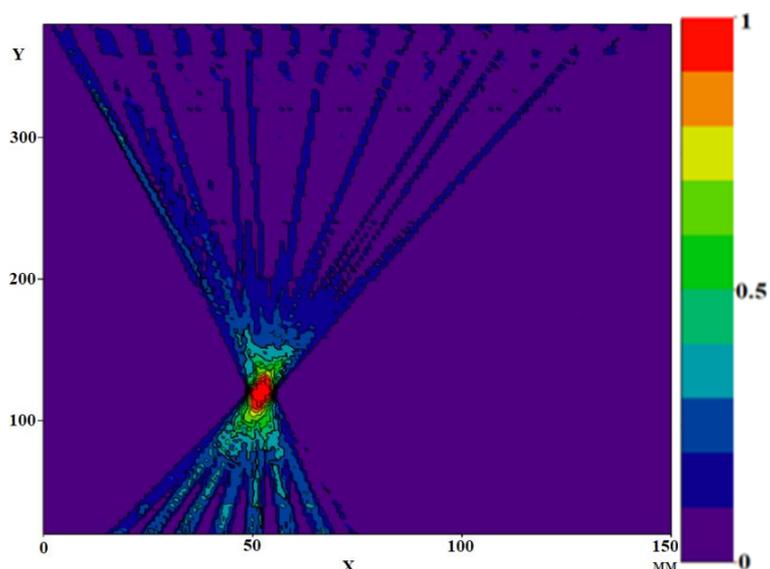


Рисунок 2.12 – Реконструкция зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм при: количестве элементов в решетке – 16, длина решетки – 150мм, расстояние между решетками – 400мм, расстояние между соседними элементами – 10мм.

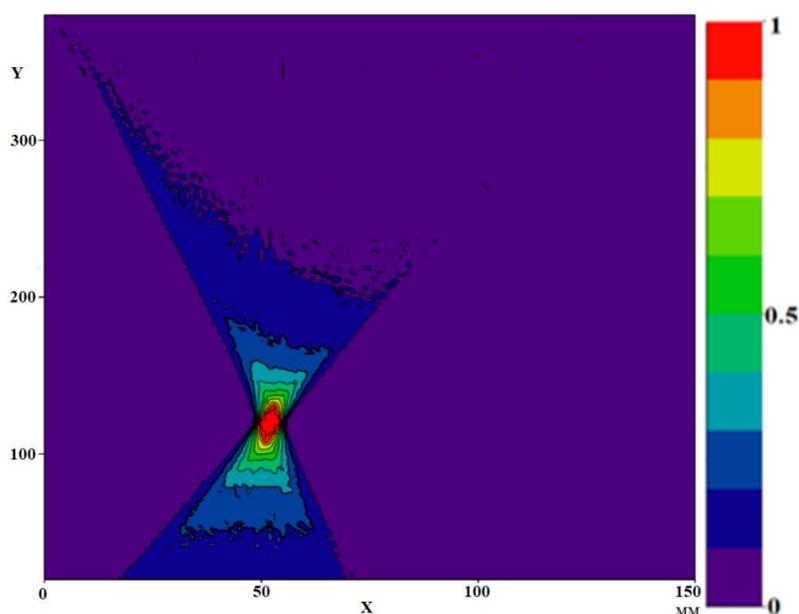


Рисунок 2.13 – Реконструкция зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм при количестве элементов в решетке равном 32 длина решетки – 150 мм, расстояние между решетками – 400 мм, расстояние между элементами – 4.83 мм

При увеличении количества элементов в решетке до 32 увеличилось время реконструкции, но качественно томограмма улучшилось несущественно.

Результат томографии также зависит от угла сканирования: в нашей модели длина решетки определяет максимальный угол сканирования. Для исследования влияния углового ракурса на качество томограммы были проведены исследования для разных размеров акустической решетки. Для исследования были выбраны решетки с размерами 80, 150 и 300 мм, при этом расстояние между соседними элементами осталось неизменным.

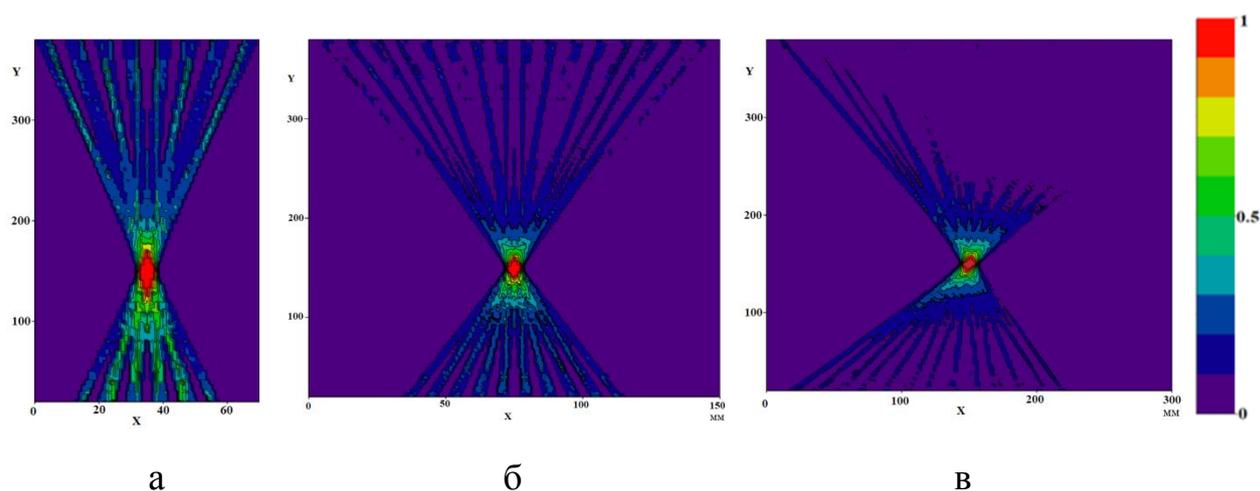


Рисунок 2.14 – Результат томографии дефекта радиусом 3 мм, расстояние между решетками – 400 мм, расстояние между элементами – 10 мм, а - количество элементов в решетке – 8, б – количество элементов в решетке – 16, в – количество элементов в решетке – 32

Из рис. 2.14 видно, что чем больше угол сканирования, тем выше качество изображения. Но при длине решетки равной 310 мм, угол падения увеличился до 37 градусов, погрешность, вызванную рефракцией уже надо учитывать. Неровности на поверхности материала могут также привести к превышению критического угла. Поэтому при контроле необходимо соблюдать условие: угол падения меньше критического угла.

2.3.4. Гауссова фильтрация исходной томограммы

Чтобы получить более точные и четкие реконструированные изображения, требуется обработка данных. Для улучшения качества изображения реконструированной зоны контроля была применена Гауссова фильтрация.

Конкретная операция гауссовой фильтрации: использовать шаблон (или свертку, маску) для сканирования каждого пикселя в изображении и использовать средневзвешенное значение серого для пикселей в окрестности, определенных шаблоном, для замены амплитудного значения центрального пикселя шаблона:

$$G(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(u^2+v^2)/(2\sigma^2)} \quad 2.19$$

где u – это расстояние от начала координат на оси абсцисс, v – это расстояние от начала координат на оси ординат, а σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

Величины u и v определяются по координатам пикселя с самой большой амплитудой, σ определяется по среднему значению в области пикселя с максимальной амплитудой.

На рис. 2.15. показана исходная томограмма, полученная в результате моделирования. При моделировании использовалась модель дефекта, имеющего форму диска с радиусом 3 мм.

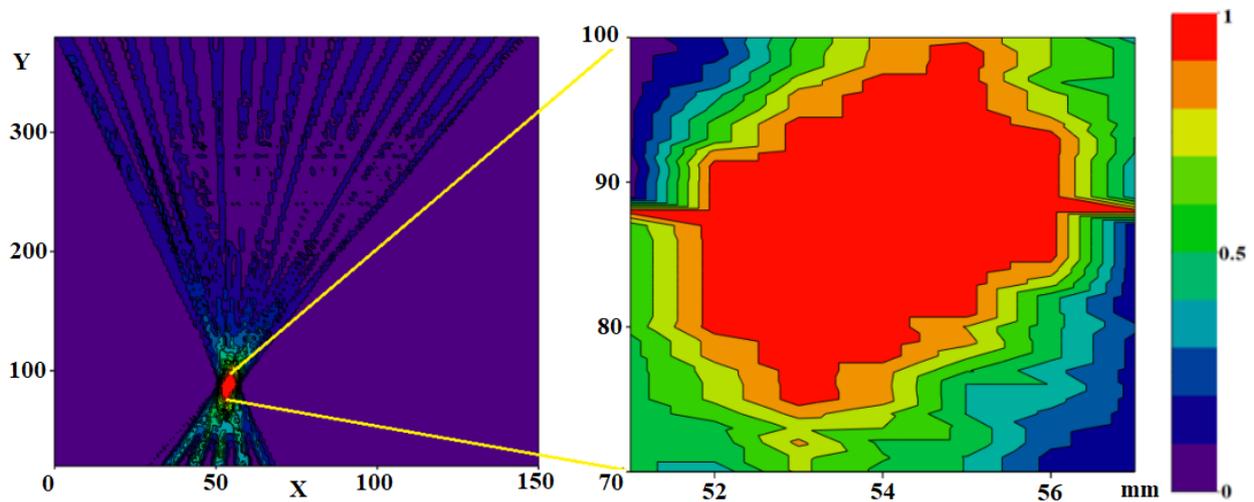


Рисунок 2.15 – Томограмма зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм.

Координаты и размеры дефекта на томограмме определены автоматически с помощью программы, которая написана в программном пакете MathCad, а его алгоритм показан на рис. 2.10. На исходной томограмме периметр дефекта имеет

неровные края и по исходным данным трудно точно определить размеры и координаты дефекта, поэтому применим Гауссову фильтрацию. После этого получаем более сфокусированное изображение дефекта, что позволяет более точно определить координаты и размеры дефекта (рис. 2.17). В интервале распределения 3σ , площадь дефекта составляет 99,7% от общей площади, то есть $3\sigma < l$, где l – длина зоны контроля (в представленном примере $l=160$).

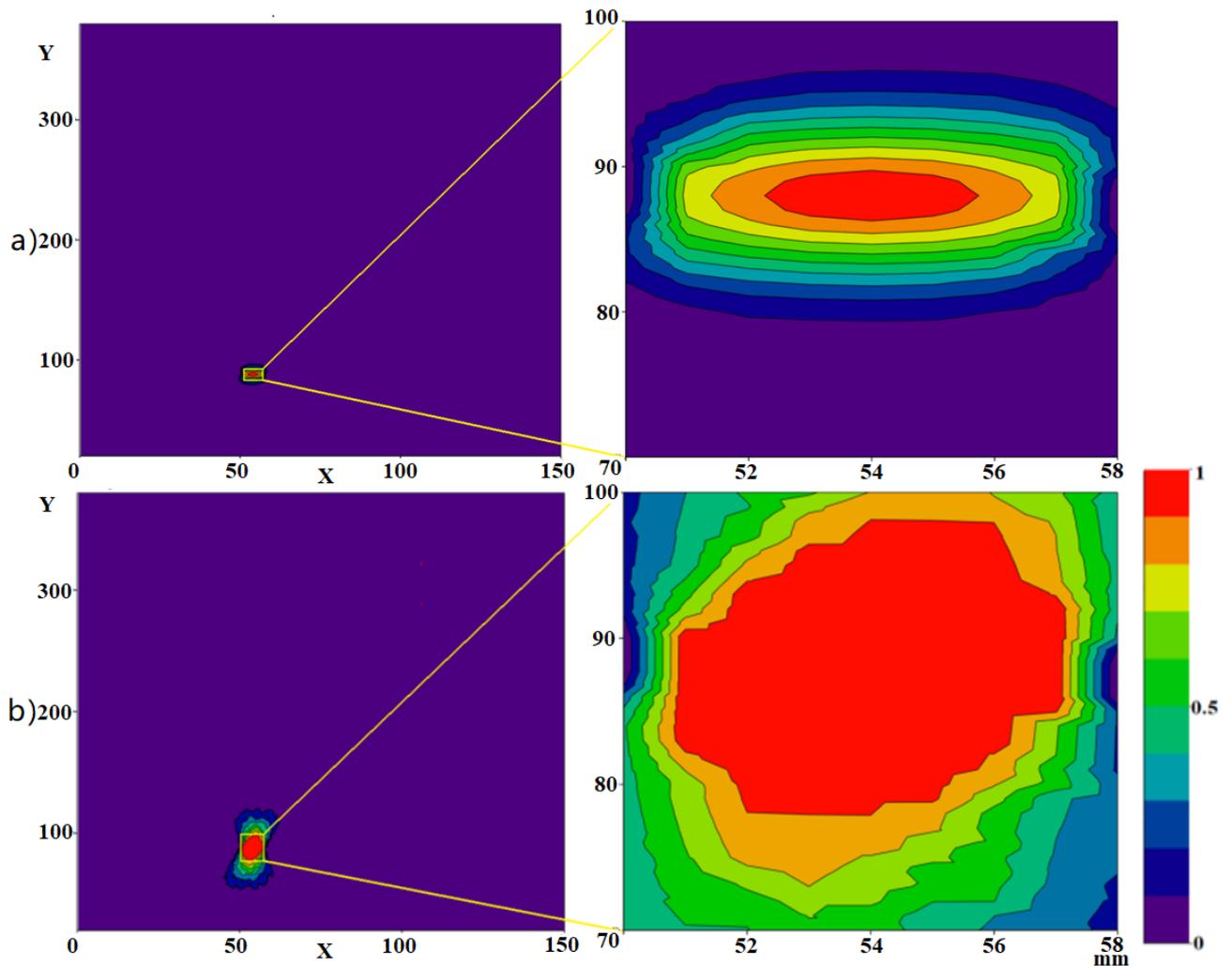


Рисунок 2.16 – Томограммы зоны контроля после Гауссовой фильтрации: а – при $\sigma = 4$; б – при $\sigma = 10$

Функция нормального распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad 2.20$$

где μ – математическое ожидание, x – текущая координата, σ – отклонение от математического ожидания.

При $x = \mu$ функции Гаусса (4) примет вид:

$$f(x)_{MAX} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

при относительном коэффициенте фильтра:

$$\frac{f(x)}{f(x)_{MAX}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad 2.21$$

получим распределение радиуса равное 0.833σ , то есть $0.833\sigma > S$ где S – чувствительность (в приведенном примере $S = \lambda/2$, $\lambda = 5$ мм).

Поэтому:

$$0.333h > \sigma > 0.6\lambda,$$

Для рассматриваемого примера получим;

$$53,3 > \sigma > 1,5.$$

Это теоретический диапазон изменения σ , если дефект имеет форму диска радиусом 3.75 мм, то есть $0.833\sigma > 3.75$, получим $53,3 > \sigma > 1,5$.

Известно что, чем больше значение σ , тем хуже фильтрация и тем меньше подавление артефактов и полученная томограмма меньше отличается от исходного изображения. При уменьшении σ дефект на отфильтрованной томограмме уменьшается в размерах стремясь к точке. Поэтому необходимо найти баланс, при котором размеры дефекта несущественно отличаются от исходного и в тоже время максимально подавлены артефакты. При анализе выбрали σ равно 4 и

10, из рис.2.16 видно что, при $\sigma = 4$ размеры дефекта на томограмме сильно отличаются от реального размера (уменьшилось на 43.6%). При $\sigma = 10$ размеры дефекта на томограмме практически не отличаются от реального размера (уменьшилось на 6.7%). Поэтому выбрали $\sigma = 10$ для обработки экспериментальных данных.

В случае множественных дефектов мы используем сумму множественных гауссовых сверток для фильтрации. На рисунке ниже показаны два дефекта с координатами (54, 88) и (66, 88) соответственно, т.е. они имеют одинаковую координату «у». После фильтрации лучевая структура томограммы сохранилась, поэтому было решено использовать гауссову свертку под небольшим углом (рис.2.17).

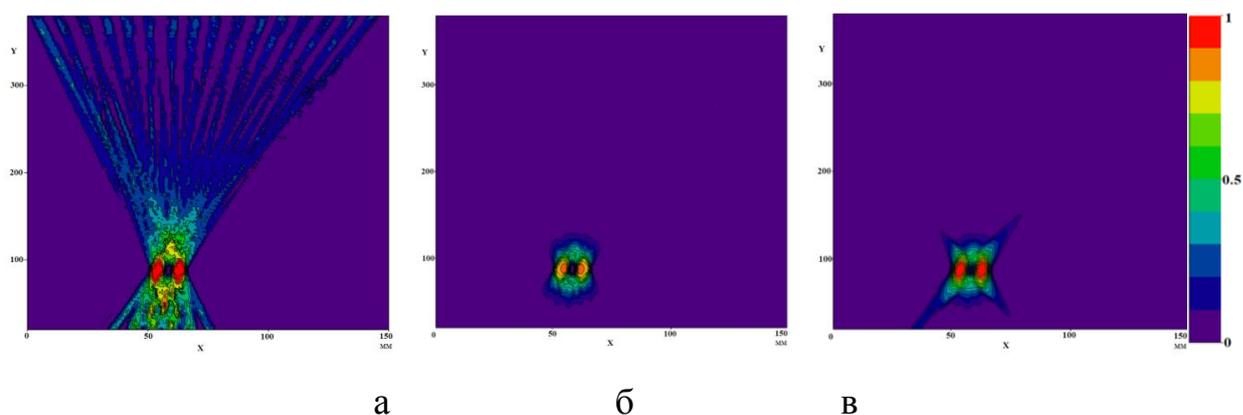


Рис. 2.17. Томограмма зоны контроля с 2 дефектами радиусом 3 мм с расстоянием между ними 12 мм, при $\sigma=10$, количество элементов в решетке – 16, длина решетки – 150мм, расстояние между решетками – 400мм, расстояние между элементами – 10мм: а – исходные данные, б – после Гауссовой фильтрации, в – после малоракурсной Гауссовой фильтрации.

Из рис. 2.17 видно, что после Гауссовой фильтрации и малоракурсной Гауссовой фильтрации, уменьшились артефакты относительно исходной томограммы. Но малоракурсная Гауссова фильтрация дает худшие результаты по сравнению с обычной Гауссовой фильтрацией.

На рис.2.18 показаны два дефекта имеющих одинаковую координату «х». Как видно из приведенных выше рисунков (рис.2.17 и рис.2.18) малоугловая

фильтрация по Гауссу уменьшает искажение исходной томограммы, улучшает разрешение по углу на 10%, сохраняет исходную информацию в большей степени и обеспечивает хороший эффект фильтрации. При этом угловая разрешающая способность выше, чем разрешающая способность по дальности.

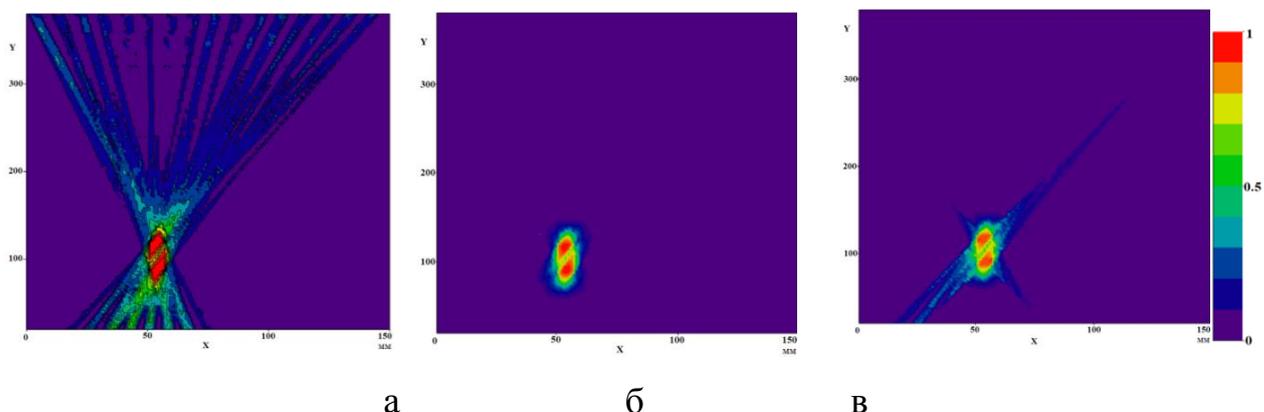


Рисунок 2.18 – Томограмма зоны контроля с 2 дефектами радиусом 3 мм с расстоянием между ними 30мм при количестве элементов в решетке равном 16, длина решетки – 150мм, расстояние между решетками – 400мм, расстояние между элементами – 10мм: а – исходные данные, б – после фильтрации Гауссова при $\sigma=10$, в – малоракусная Гауссова фильтрация при $\sigma=10$.

2.3.5. Мультипликативные методы обработки

В истории изучения антенных решёток в качестве предположения появлялись упоминания о возможности использования мультипликативных методов обработки парциальной информации. Практически непреодолимой трудностью вставал вопрос о необходимости и возможности перемножения зондирующих сигналов, а также создания точных аналоговых перемножителей приёмного тракта. Только достаточное развитие цифровых технологий обработки электрических сигналов открыло широкие возможности применения нетрадиционных способов совершенствования дефектометрических характеристик антенных решёток. Применение аналого-цифровых преобразователей позволяет хранить сигналы в цифровой форме, производить вычисления с использованием не только аддитивных алгоритмов, но также

мультипликативных операций. В результате формируются синтезированные диаграммы направленности, обладающие весьма высокими характеристиками [37,38].

В качестве одной из модификаций методики TFM предлагается использовать операцию перемножения парциальных сигналов антенной решётки.

Рассчитаем амплитуду поверхности томографии при мультипликативной обработке:

$$A(x, y) = N(x, y)^k \prod K_d[t, r] \quad 2.22$$

где $A(x, y)$ - амплитуда поверхности томограммы в точке (x, y) зоны контроля, K_d – амплитуды приемного сигнала (рис. 2.7).

С учётом выражения (2.22) алгоритм расчета будет иметь вид:

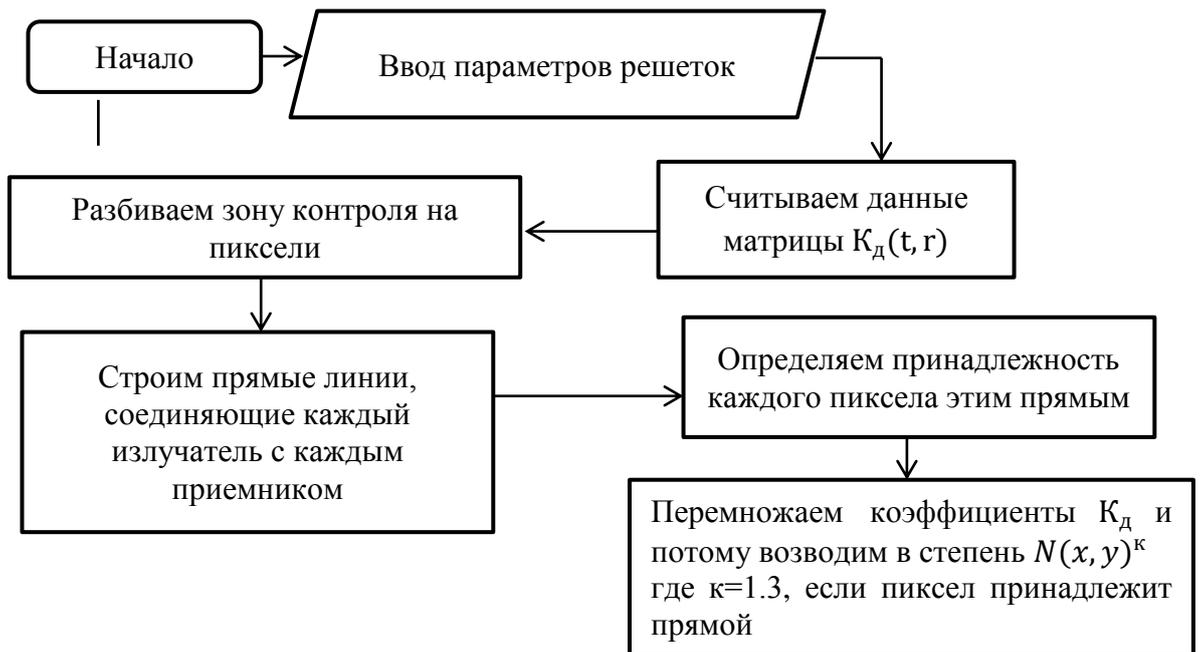


Рисунок 2.19 – Алгоритм реконструкции зоны контроля при мультипликативной обработке

На рис.2.20 показана томограмма, полученная при мультипликативной реконструкции. При моделировании использована модель дефекта в форме диска с радиусом 3 мм.

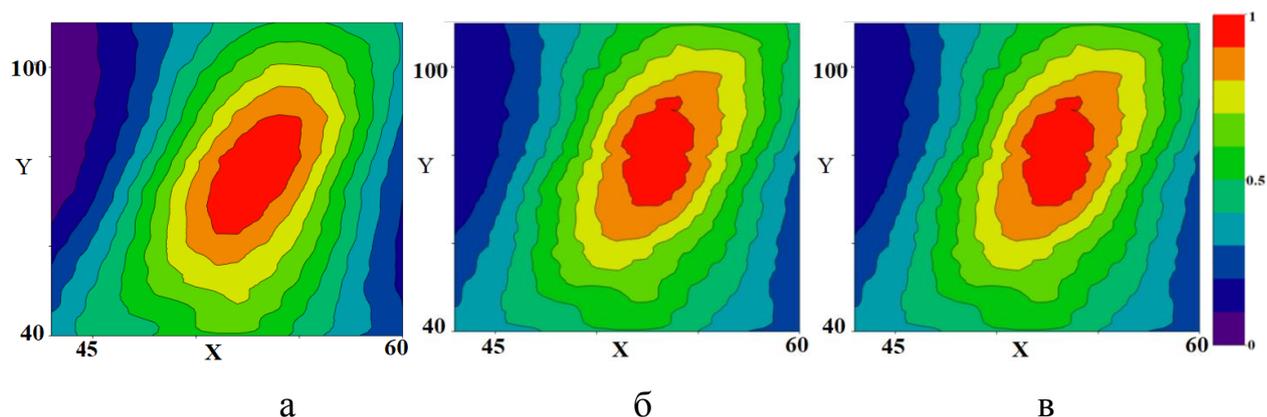


Рисунок 2.20 – Результат расчета томограммы зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм: а – аддитивная обработка при расстоянии между элементами решетки – 10 мм, б – мультипликативная обработка при расстоянии между элементами решетки – 10 мм, в – мультипликативная обработка при расстоянии между элементами решетки – 6.3 мм.

Как видно из рисунка 2.20, шум на 21% меньше, чем при сложении, но есть небольшое отклонение. Координата оси x смещена примерно на 0,5 мм, что объясняется зазором между соседними датчиками. При уменьшении расстояния между датчиками (рис. 2.20.в) погрешность уменьшается до 0,2 мм.

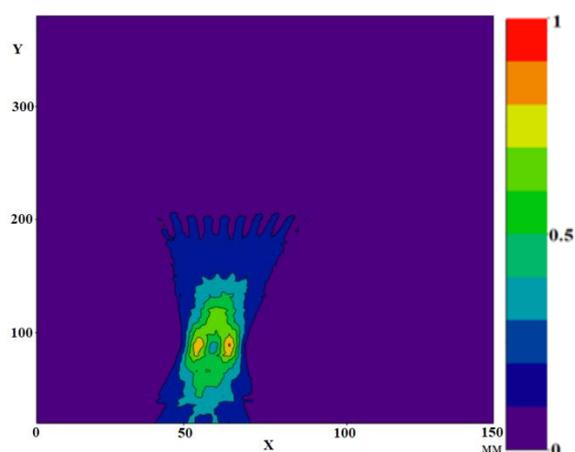


Рисунок 2.21 – Результат расчета томограммы зоны контроля с двумя дефектами, расположенными на расстоянии 30 мм при мультипликативной обработке, количество элементов в решетке – 16, длина решетки – 150 мм, расстояние между решетками – 400 мм, расстояние между элементами – 10 мм.

Из приведенного выше рисунка видно, что томограмма после мультипликативной обработки, существенно лучше, чем после аддитивной обработки, но в разных частях зоны контроля, амплитуда после мультипликативной обработки сильно различается, поэтому для корректировки необходимо использовать поправочный коэффициент.

2.3.6. Исследование средней абсолютной ошибки

В процессе получения исходных данных для томографии в реальном сигнале имеется также шум (неопределенность самого сигнала, электронный шум и т. д.).

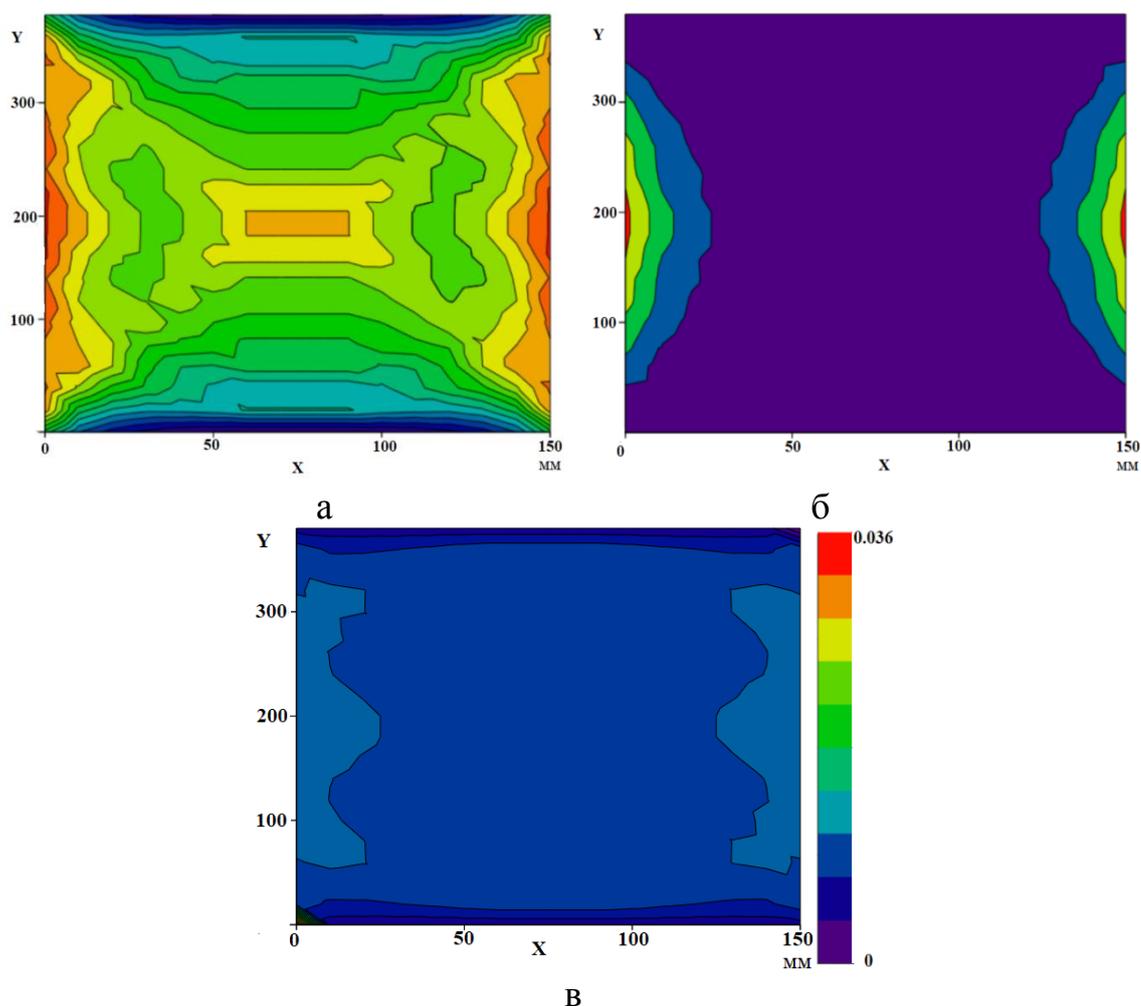


Рисунок 2.22 – Результат расчета средней абсолютной ошибки томограммы зоны контроля с дефектом радиусом 3 мм: а – при аддитивной обработке, б – при мультипликативной обработке, в – при обработке гауссовой фильтрации.

При расчете считаем, что изображение задается таблицей чисел состоящей из M строк и N столбцов. Каждое число в данной таблице описывает один пиксел, который представляется K битами. Во всех рассматриваемых здесь критериях сравнения степень близости изображений определяется числом, которое некоторым образом вычисляется по данным изображениям. Для расчета оценок отличия изображений можно использовать следующий объективный критерии качества: средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |I_{(m,n)} - I_{(m,n)}'|}{MN} \quad 2.23$$

где $I_{(m,n)}$ – реальный сигнал, $I_{(m,n)}'$ – сигнал реконструированного изображения, полученный после моделирования, q – количество точек изображения.

Из приведенного выше рисунка видно, что для мультипликативной и аддитивной обработок средняя абсолютная ошибка является большой, когда дефект расположен на краю зоны контроля. Это связано с тем, что на краю меньше ультразвуковых лучей, участвующих в реконструкции томограммы. Средняя абсолютная ошибка при обработке гауссовой фильтрацией на много меньше, чем при аддитивной и мультипликативной обработках. Коэффициент шума в центре зоны контроля при мультипликативной обработки меньше, чем у аддитивной обработки.

2.3.7. Исследование предельной чувствительности

Чувствительность является важной характеристикой систем неразрушающего контроля. Используя теорию дифракции Кирхгофа [102], чувствительность акустического малоракусного теневого метода может быть определена. Согласно этой теории, лучи, падающие на край препятствия, распространяются во всех направлениях (рис.2.23).

Для случая, когда расстояние между излучателем и приемником превышает

пять длин ближней зоны, а размеры дефекта меньше длины волны, было найдено решение в работе [34]:

$$\frac{p_d}{p_0} = k_d = 1 - 4S_d S_{пр} / (\lambda \cdot h)^2 \quad 2.24$$

где p_d – амплитуда приемного акустического сигнала при наличии дефекта в акустической лучевой трубке, p_0 – амплитуда приемного акустического сигнала при отсутствии дефекта в акустической лучевой трубке, S_d – площадь дефекта на приемнике, $S_{пр}$ – площадь элемента, λ – длина волны, h – расстояние между преобразователями.

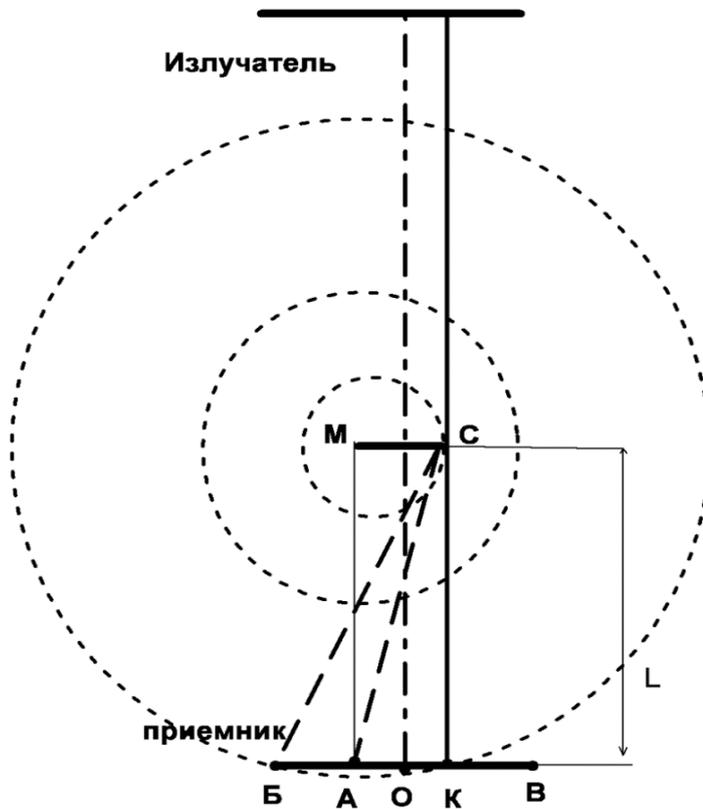


Рисунок 2.23 – Дифракционная картина по методу Кирхгофа

Предельная чувствительность теневого метода контроля одинакова для одиночных преобразователей и антенных решеток. Однако, чувствительность системы контроля будет определяться уровнем шумов электронного тракта. Амплитуда колебания ультразвука уменьшается с расстоянием l согласно

выражению 2.25. Величину сигнала на приемнике можно получить, по формуле:

$$U_{\text{пр}} = U_0 e^{-\alpha l} \frac{S_{\text{пр}}}{S_0} k_{\text{д}} k_{\text{зат}} \quad 2.25$$

где $k_{\text{зат}}$ – распределение акустического давления по центральной оси датчика, U_0 – начальное напряжение, создаваемое датчиком, $S_{\text{пр}}$ – площадь приемника, S_0 – площадь сферы на расстоянии l от излучателя.

Предположим, что в среде без затухания находится датчик с круглым поршнем. Каждая точка на его поверхности может рассматриваться как единый точечный источник, и все они имеют одинаковую амплитуду и фазу, как простые гармонические колебания, тем самым одновременно излучая непрерывные синусоидальные волны. Теперь необходимо найти звуковое давление в любой точке на его оси, если наложено звуковое давление всех точечных источников от преобразователя. Синтезированное звуковое давление в произвольной точке равно [102]:

$$p(t) = 2p_0 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{D^2 + l^2} - l) \right] \sin(\omega t - kl) \quad 2.26$$

где D – радиус круглого датчика; p – звуковое давление на осевом расстоянии l от преобразователя; l – расстояние от центра кругового поршня до точки на оси.

Из приведенной выше формулы видно, что звуковое давление периодически меняется со временем. В инженерных расчетах обычно рассматривается только амплитуда акустического давления, поэтому:

$$p = 2p_0 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{D^2 + l^2} - l) \right] \quad 2.27$$

Тогда распределение акустического давления по центральной оси датчика:

$$k_{\text{зат}} = \frac{p}{p_0} = 2 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{D^2 + l^2} - l) \right] \quad 2.29$$

На рис. 2.24 представлены результаты расчета амплитуды сигнала на приемнике в соответствии с выражением 2.29.

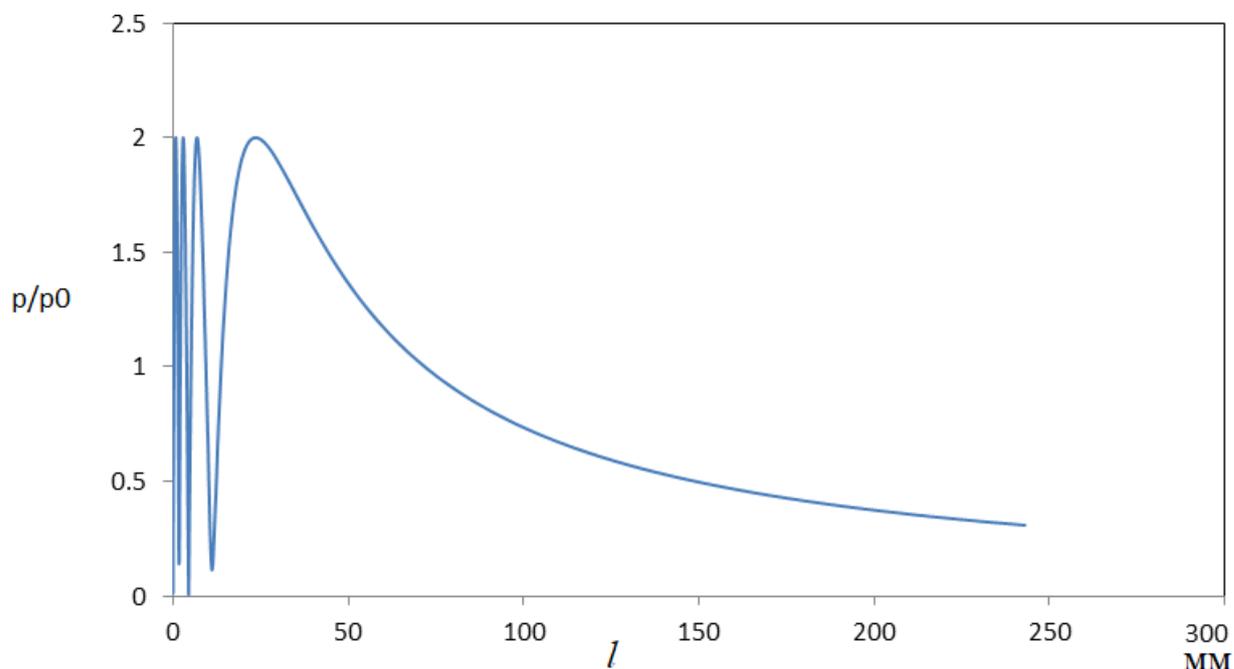


Рисунок 2.24 – Диаграмма распределения акустического давления на центральной оси преобразователя

С учетом затухания, распределения акустического поля и дифракции окончательно получается следующая формула:

$$U_{\text{пр}} = U_0 e^{-\alpha l} \frac{S_{\text{пр}}}{S_0} \left[1 - 4S_{\text{д}}S_{\text{пр}}/(\lambda \cdot h)^2 \right] \cdot 2 \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} (\sqrt{D^2 + l^2} - l) \right] \quad 2.30$$

Пороговая чувствительность может быть рассчитана по формуле[105]:

$$U = kN\sqrt{\Delta F} \quad 2.31$$

где k - усиление шума, N – спектральная плотность шумового напряжения,

обычно измеряемая в $\text{нВ}/\text{Гц}^{1/2}$, ΔF – полоса частот.

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

Для полосы пропускания усилителя в 1 МГц напряжение шумов будет 0.1 мВ. При наличии дефекта уровень сигнала будет уменьшаться пропорционально уменьшению площади приемника. На рис. 2.25 представлены результаты расчета амплитуды сигнала на приемнике в соответствии с выражением 2.30.

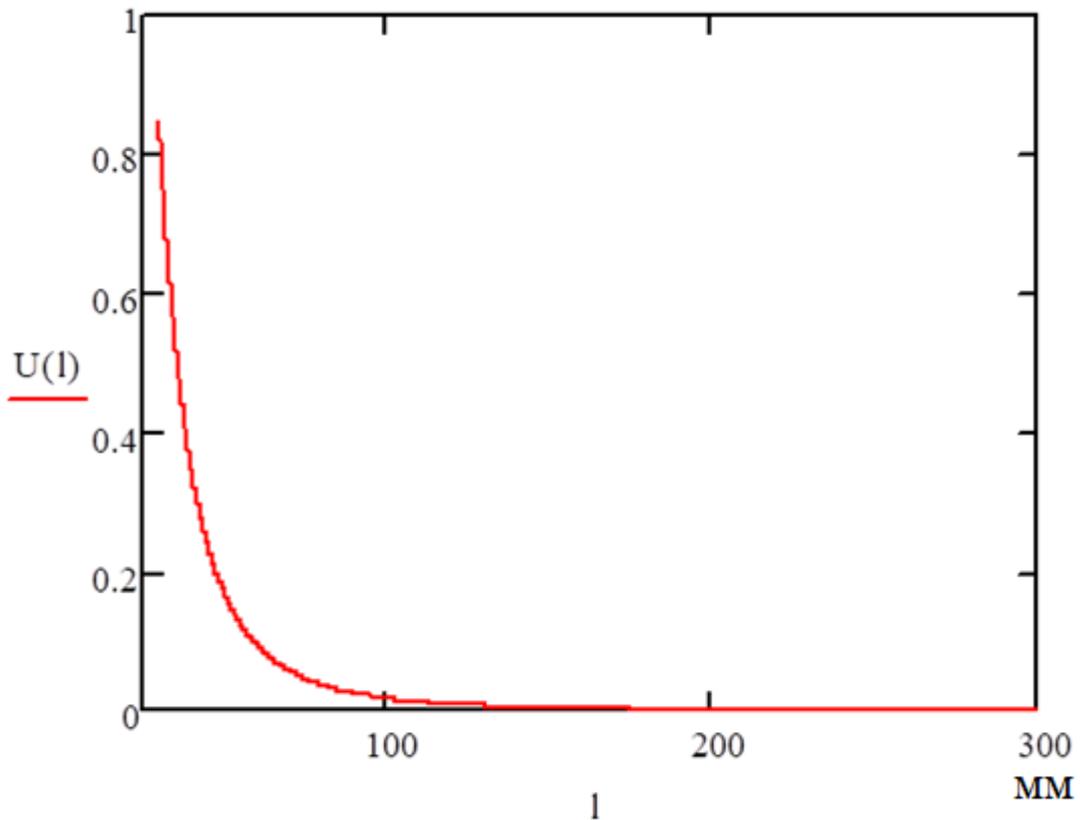


Рисунок 2.25 – Зависимость относительной амплитуды сигнала на приемнике от расстояния между приемной и излучающей решетками при размере дефекта равном размеру пьезоэлемента.

Зависимость абсолютной чувствительности от расстояния между приемной и излучающей решетками, рассчитанная в соответствии с выражением 2.30, приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Зависимость чувствительности от расстояния

Расстояние между излучателями и приемниками, мм	100	125	150	175	185	200	220
Чувствительность, мкВ	0,33	0.48	0.68	0.90	1.00	1.17	1.41

Из приведенной выше таблицы видно, что чувствительность уменьшается по квадратичному закону с увеличением расстояния.

2.3.8. Разрешающая способность

Разрешающая способность дефектоскопа это наименьшее расстояние между двумя минимальными дефектами, при котором возможно их отдельная регистрация. На рис.2.26 представлен акустический тракт с двумя дефектами в зоне контроля.

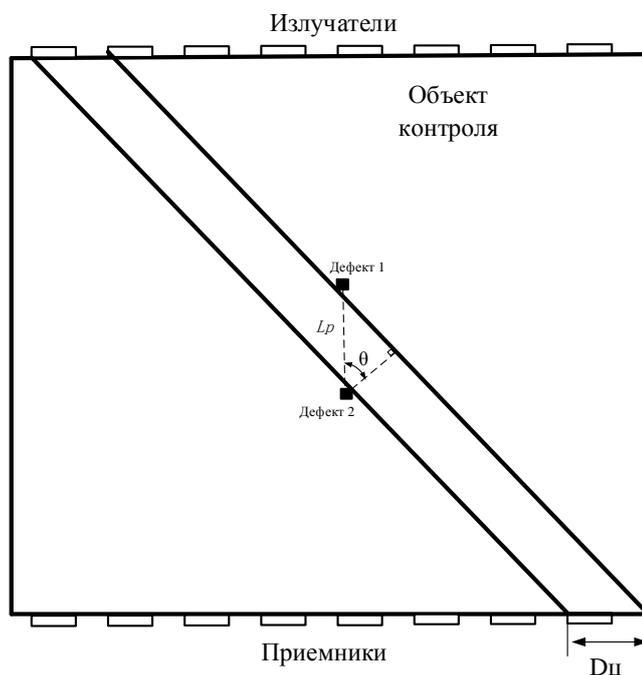


Рисунок 2.26 – Модель для расчета разрешающей способности, θ – угол между линией соединяющей два дефекта и нормалью к линии соединяющей излучатель с приемником, D – размер дефекта

В предельном случае когда невозможна отдельная регистрация дефектов,

минимальное расстояние между дефектами l_p можно определить из формулы:

$$l_p \approx (D_{ц} + D)/\cos\theta \quad (2.32)$$

Для нашей модели $\theta \geq \arctg(\frac{h}{1-2D_{ц}})$, при $D=3\text{мм}$, $D_{ц} = 10\text{мм}$, $h = 400\text{мм}$, $l = 150\text{мм}$:

$$(43 \geq l_p \geq 13) \text{мм.}$$

Если дефект расположен близко к боковой границе зоны контроля, угол θ увеличивается, что приводит к возрастанию l_p и соответственно к ухудшению разрешающей способности. Результат исследования разрешающей способности по дальности в разных областях зоны контроля проведенный на модели, представлен на рис.2.27.

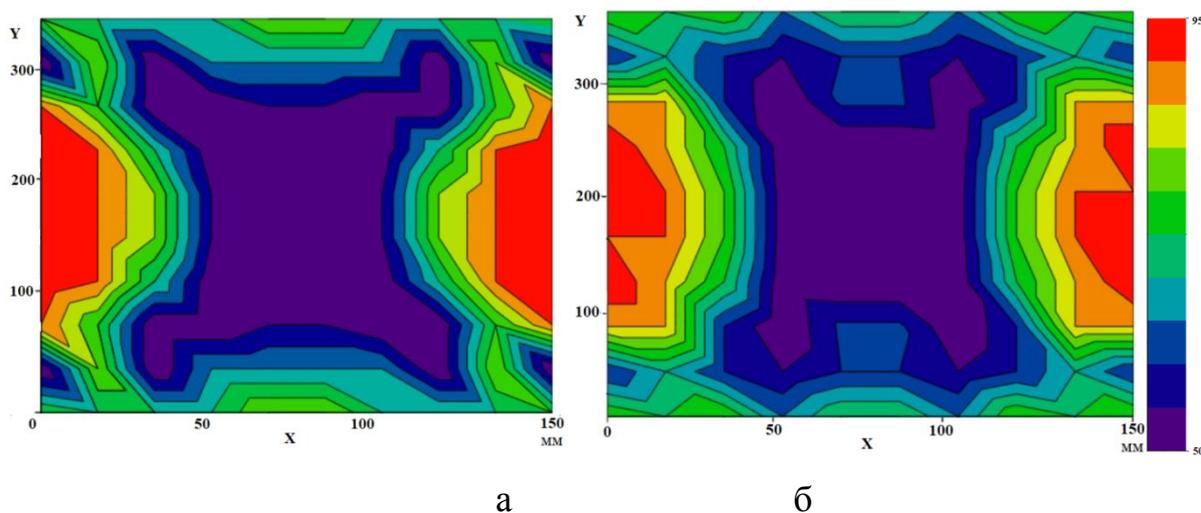


Рисунок 2.27 – Результат расчета разрешающей способности по дальности в зоне контроля: а – при аддитивной обработке, б – при мультипликативной обработке

Из рис. 2.27 видно что, во-первых, разница в разрешающей способности по дальности между аддитивной и мультипликативной обработкой небольшая, при мультипликативной обработке разрешающая способность по дальности в центре лучше, чем при аддитивной обработке. На краях зоны контроля ситуация противоположная. Во-вторых, при сравнении теоретических расчетов с результатами моделирования можно сделать вывод, что они согласуются.

Разрешающая способность по дальности в центре зоны контроля по результатам расчета составила 40 мм, а по результатам моделирования 50 мм, отклонение составило 14%. Это показывает, что полученное аналитическое уравнение согласуется с моделью и может быть использовано в теоретических исследованиях разрешающей способности по дальности.

Результат исследования угловой разрешающей способности в разных областях зоны контроля проведенный на модели, представлен на рис.2.28.

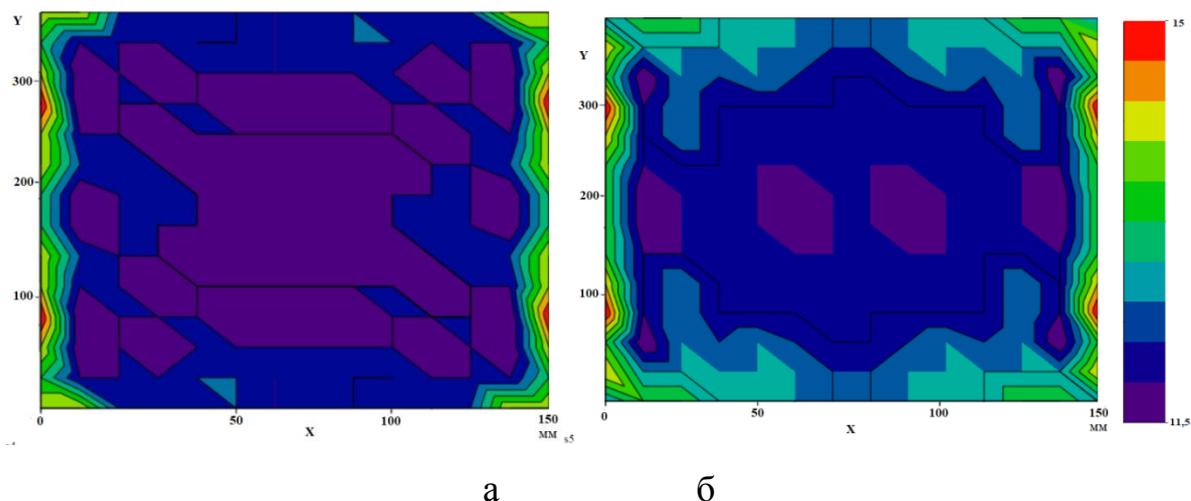


Рисунок 2.28 – Результат расчета угловой разрешающей способности в зоне контроля: а – при аддитивной обработке, б – при мультипликативной обработке.

Из рис. 2.28 видно что, во-первых, разница в угловой разрешающей способности между аддитивной и мультипликативной обработкой небольшая, при мультипликативной обработке разрешающая способность немного хуже во всех областях зоны контроля, чем при аддитивной обработке. Во-вторых, при сравнении теоретических расчетов с результатами моделирования можно сделать вывод, что они согласуются. Разрешающая способность по углу в центре зоны контроля по результатам расчета составила 13 мм, а по результатам моделирования 12 мм, отклонение составило 8,3 %.

Выводы

В этой главе поведен теоретический анализ малоракусной ультразвуковой

томографии, разработаны алгоритмы и модель. При этом для получения более точных томографических результатов используются гауссова фильтрация и мультипликативная обработка данных антенной решетки, что значительно улучшает качество томограммы, но при этом необходимо использовать соответствующие коэффициенты фильтра. Рассчитана зависимость амплитуды сигнала на приемнике от расстояния между приемным и излучающим пьезоэлементам при размере дефекта равном размеру датчика. Проведено исследование разрешающей способности и чувствительности, установлена взаимосвязь между расстоянием между решетками и чувствительностью.

ГЛАВА 3. АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

В настоящее время в качестве дополнения к оборудованию для рентгеновского контроля системы ультразвуковая томография стала важной технологией для контроля различных объектов. Этот метод позволяет контролировать внутреннюю структуру объекта контроля для выявления дефектов. Обратите внимание, что при визуализации рентгеновских лучей метод передачи используется для сопоставления количественной меры поглощения рентгеновских лучей с другой количественной мерой, такой как яркость изображения или цвет изображения, которые представляют собой распределение поглощающей способности внутренней структуры тестового объекта на томограмме. При использовании звукового поля также может быть получено изображение, отражающее коэффициент прохождения ультразвука через исследуемую структуру.

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: 1.1-1.16 – генераторов зондирующих импульсов, 2 – иммерсионная среда, 3 – излучающая антенная решетка, 4 – контролируемый объект, 5 – приемная антенная решетка, 6 – коммутаторы, 7 – усилитель, 8 – пиковый детектор, 9 – аналого-цифровой преобразователь, 10 – блок управления и обмена данными с компьютером по интерфейсу USB, 11 – компьютер.

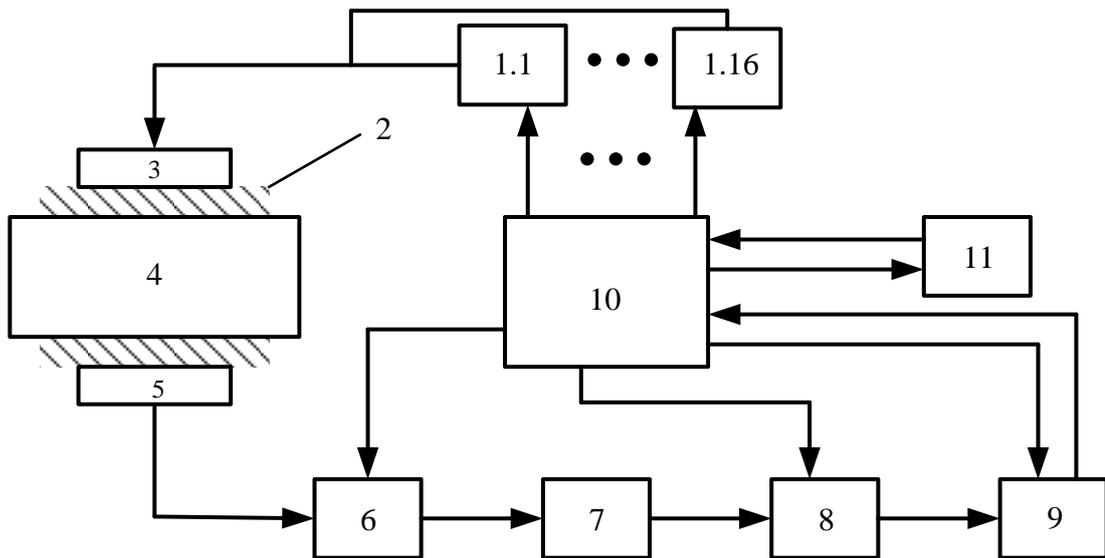


Рисунок 3.1 – Структурная схема прибора для контроля теньвым методом.

Прибор работает следующим образом: получая команду запуска от компьютера, блок управления и обмена данными с компьютером (10) формирует короткий импульс (рис. 3.2.а), одновременно формируется длинный импульс $t_{и1}$ (рис. 3.2.б), который поступает в коммутатор (6). Короткий импульс открывает один генератор зондирующих импульсов, соответствующий первому преобразователю на излучающей решетке. При этом на первый преобразователь 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 импульсов 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 аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

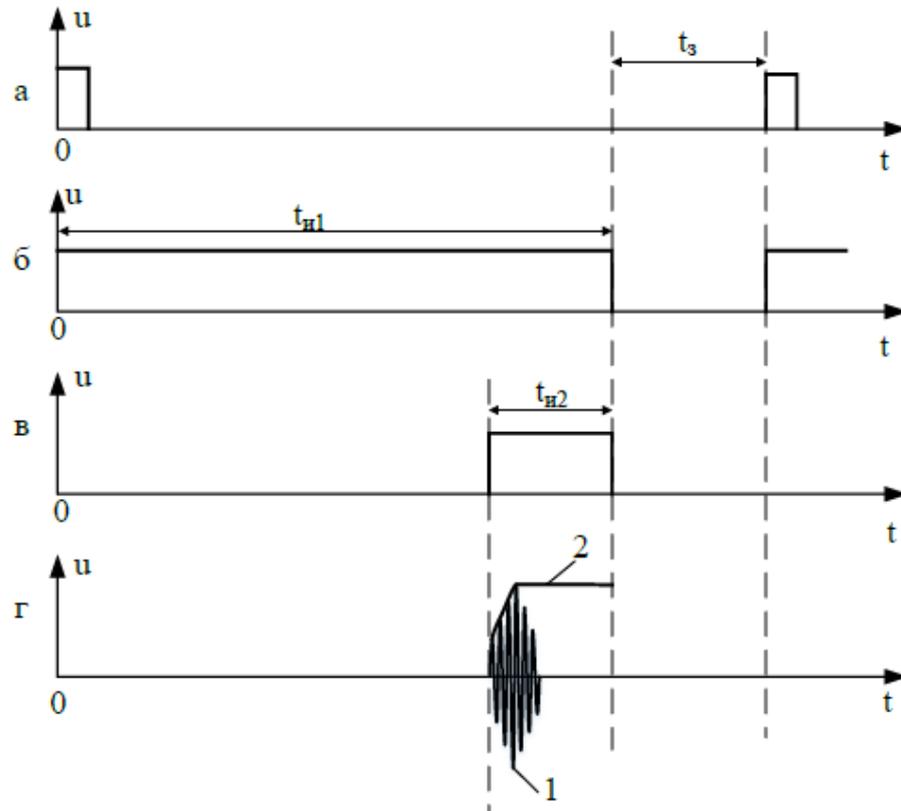


Рисунок 3.2 – Осциллограммы сигналов в разных блоках экспериментальной установки

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: 1-ый излучатель – 2-ой приемник, затем 3-ий приемник, ... последний приемник, 2-ой излучатель – 1-ый приемник, ... последний излучатель – последний приемник. Полученная матрица данных передается в компьютер через USB интерфейс.

Фотография экспериментальной установки представлена на рис.3.3.

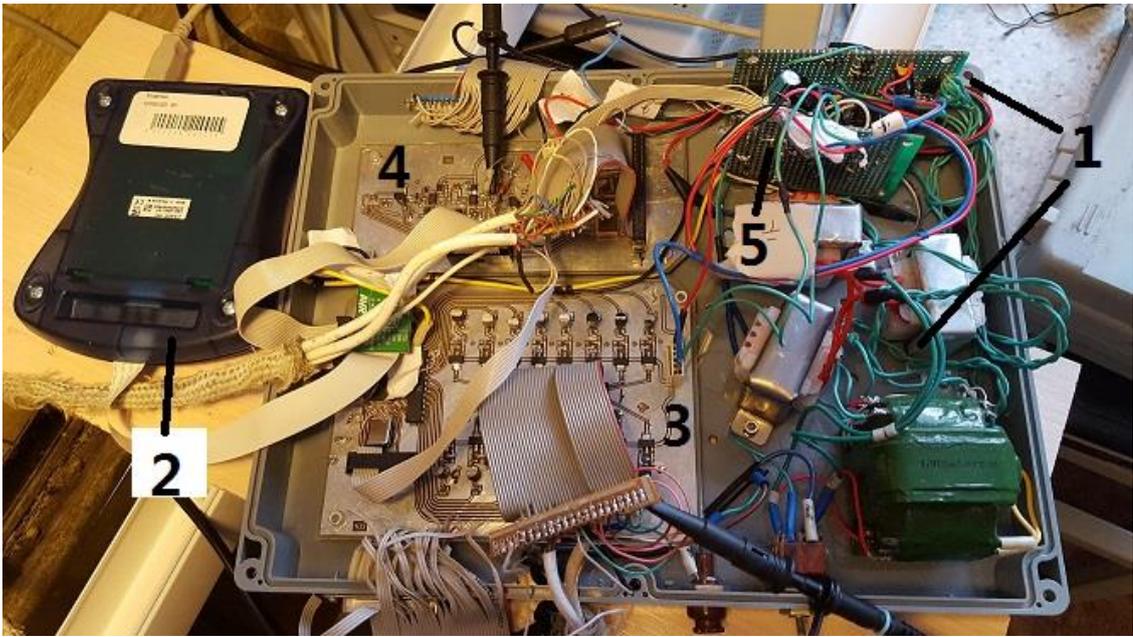


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка, 1 – вспомогательный источник питания, 2 – блок обмена данным с ПК, 3 – блок управления излучателями, 4 – блок коммутатора, усилителя и пикового детектора для приёмников, 5 – аналого-цифровой преобразователь

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

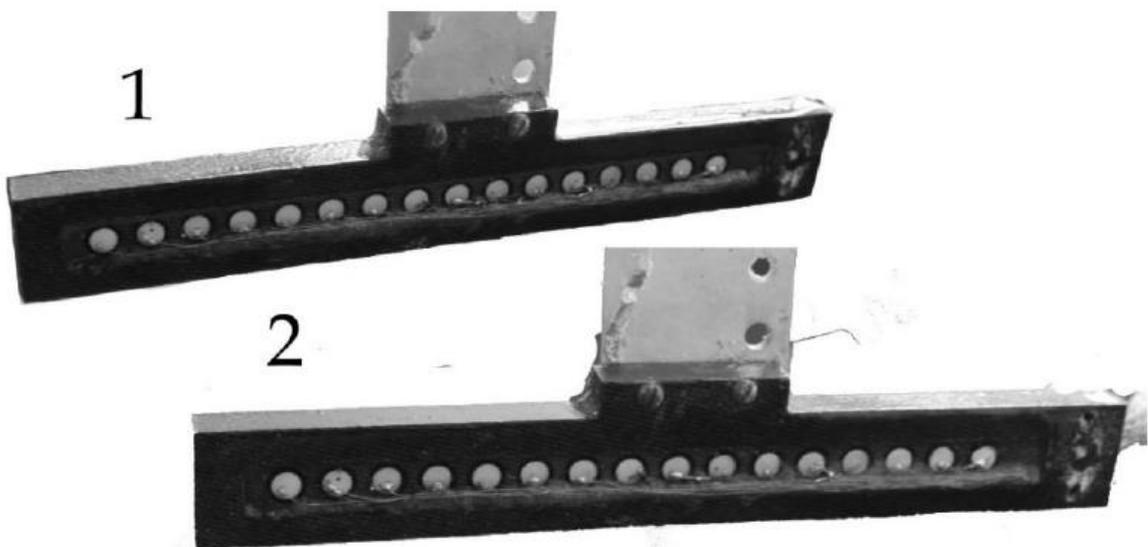


Рисунок 3.4 – Линейные антенные решётки, 1- излучающая, 2- принимающая

Эти пьезоэлементы работают на частоте 300 кГц, при температуре 25°C скорость звука в воде равна 1497 м/с, поэтому длина волны:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1497 \text{ м/с}}{300 \text{ кГц}} = 5 \text{ мм} \quad (3.1)$$

Экспериментальная установка содержит иммерсионную ванну и систему перемещения антенных решеток, закрепленную на иммерсионной ванне, рис. 3.5.

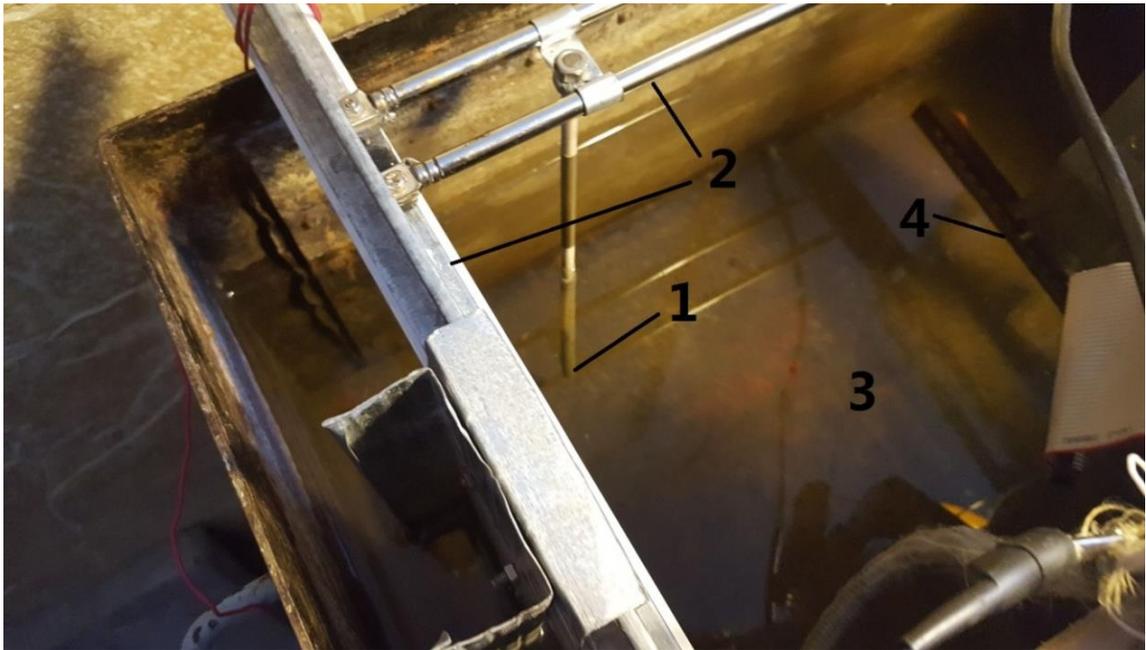


Рисунок 3.5 – Иммерсионная ванна и система перемещения антенных решеток, 1 – дефект, 2 – механизм перемещения, 3 – ванна, 4 – антенная решетка.

При реконструкции томографического изображения зоны контроля исследуемого объекта, используется матрица опорных данных $A_0[t, r]$, полученная с образца без дефектов и матрица данных $A[t, r]$, полученная с контролируемого объекта, из которых вычисляется матрица коэффициентов:

$$K_d[t, r] = \frac{A(t, r)}{A_0[t, r]} \quad (3.2)$$

Алгоритм реконструкции контролируемого объекта аналогичен алгоритму восстановления местоположения дефектов в модели (рис 2.5).

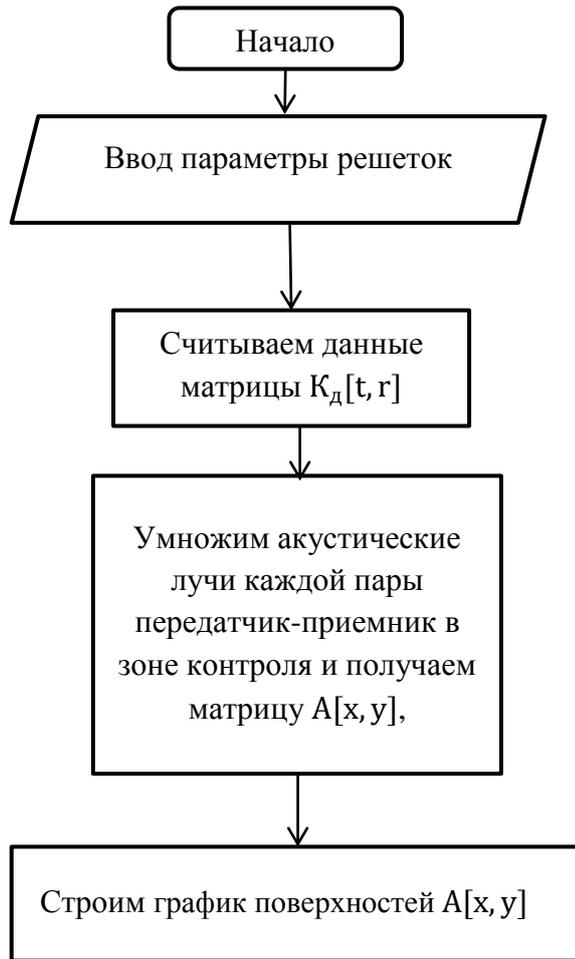


Рисунок 3.6 – Алгоритм реконструкции зоны контроля мультипликативным методом

На рис.3.7 приведена фотография ультразвукового дефектоскопа.



Рисунок 3.7 – Фотография ультразвукового дефектоскопа

Основные технические характеристики ультразвукового дефектоскопа приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Технические характеристики ультразвукового дефектоскопа

Наименование характеристики	Параметр
Размер зоны контроля	160x400 мм
Порты входа/выхода	USB
Погрешность определения координат дефекта, не более	10 %
Частота работы пьезоэлемента	500 кГц
Диаметр пьезоэлемента	6 мм
Расстояние между соседними пьезоэлементами	10 мм
Решетки	2x16элемент
Разрешающая способность - в центре зоны контроля, не более -на краю зоны контроля, не более	13.5 мм 15 мм
Чувствительность - в центре зоны контроля, не более -на краю зоны контроля, не более	1,5 мм 5 мм
Вес блока электроники	5 Кг
Вес антенных решеток	0,1 Кг
Питание	12/5 В
Условия эксплуатации	-20-50 °С
Генератор/Приемник	16 элементов
Габариты (Д x Ш x В)	400x300x100мм

Интерфейс оператора многоканального малоракурсного акустического теневого дефектоскопа «Multi-channel acoustic shadow flaw detector» используется от экспериментальной установки, описанной в разделе 3.1. Изготовленный многоканальный малоракурсный акустический теневой дефектоскоп используется для контроля композитных материалов и изделий из них.

Акустический тракт имел следующие параметры: расстояние между решётками 400мм, 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 400x400x160мм

3.2 Экспериментальные исследования

С использованием представленной выше установки были проведены экспериментальные исследования.

3.3.1 Исследование точности определения местоположения дефектов

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

а. Точность определения координат дефекта по дальности.

В первом эксперименте дефект располагался в зоне контроля в иммерсионной ванне и перемещался по направлению от излучающей решётки к приемной решётке с шагом 20мм, а расстояние между излучающей и приемной решетками равнялось 400 мм (рис. 3.8).

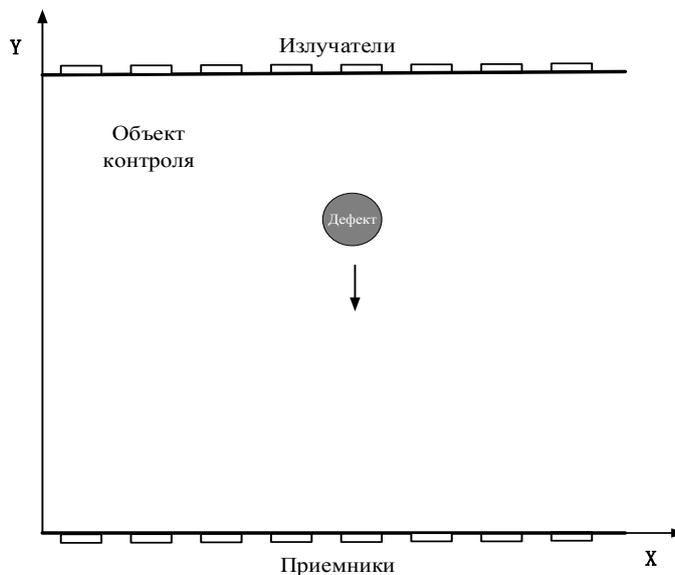


Рисунок 3.8 – Схема для исследования погрешности в определении координат дефекта

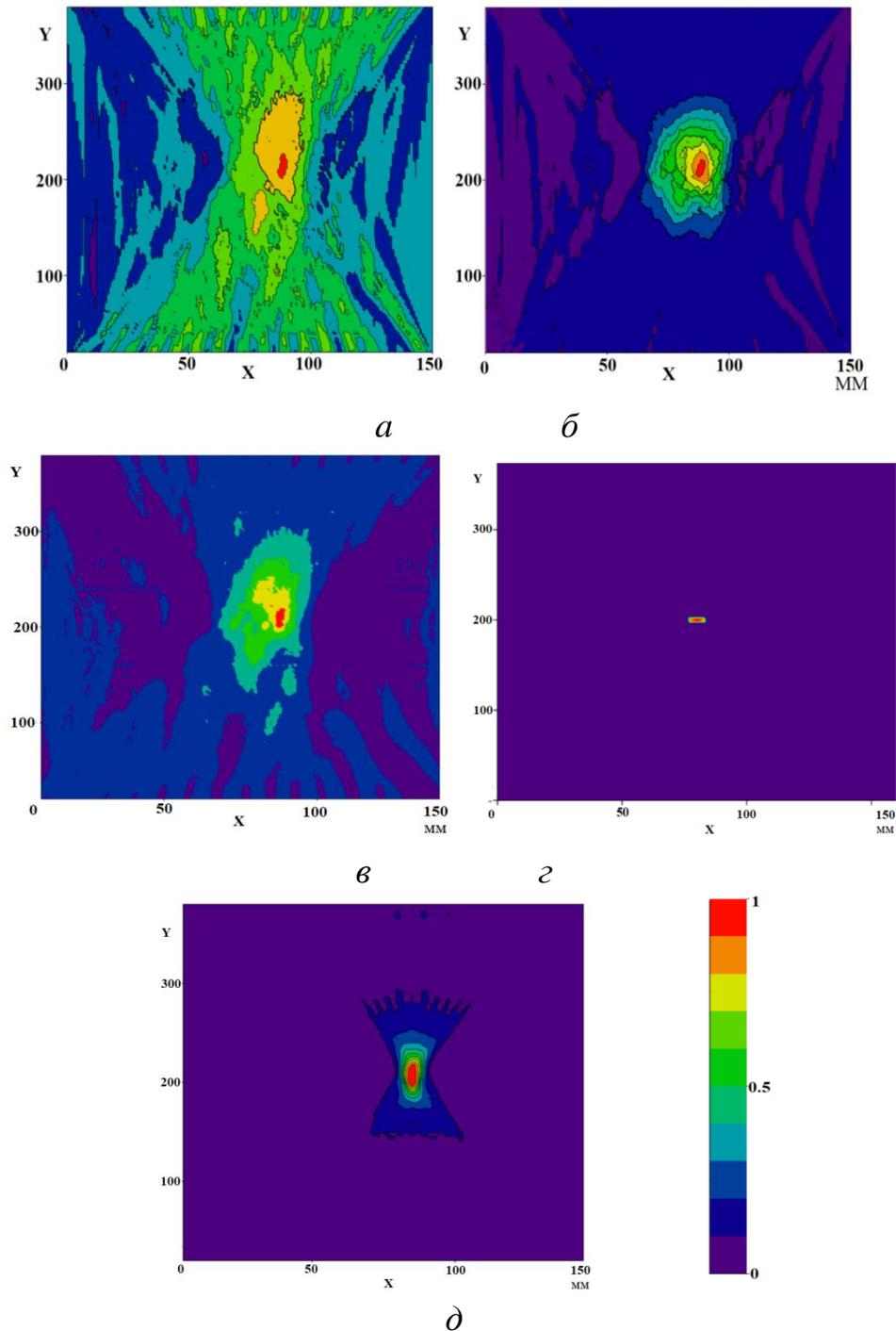


Рисунок 3.9 – Томограмма зоны контроля с одним отражателем размером 6 мм, а – аддитивная обработка; б – Гауссова фильтрация; в – мультипликативная обработки; г – реальное место положения дефекта; д – результат реконструкции при моделировании.

Томограмма зоны контроля с одним отражателем показана на рис.3.9. На рис.3.9.а показана томограмма, построенная по исходным данным, а на рис.3.9.б – на основе Гауссовой фильтрации. Из результата теоретического анализа для

обработки экспериментальных данных использовали $\sigma = 20$ (рис.3.9.б). Из рис.3.9 видно, что уровень шума равен 0,3 мкВ при аддитивной обработке, 0,036 мкВ при Гауссовой фильтрации, 0,115 мкВ при мультипликативной обработке, 0,04 мкВ при моделировании. Использование Гауссовой фильтрации и мультипликативной обработке позволяет уменьшить уровень шума в 8 и 3 раза соответственно по сравнению с аддитивной обработкой.

Как видно из приведенного выше рисунка, контуры дефекта отображаются значительно лучше после гауссовой фильтрации или обработки умножением (рис.3.9.в), но артефакты и ложные дефекты, особенно в вертикальном направлении остаются, что приведет к неверной оценке положения и размера дефекта. Проблема может быть решена путем фильтрации.

На рис. 3.10 показана зависимость погрешности определения координаты дефектов от расстояния между дефектом и излучающей решёткой.

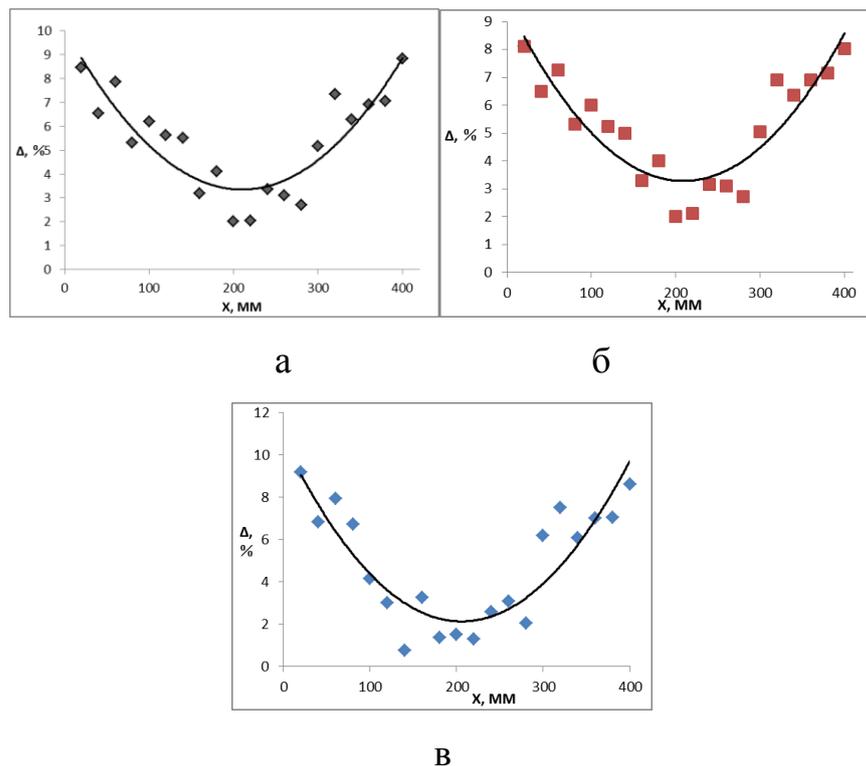


Рисунок 3.10 – Зависимость погрешности определения продольной координаты дефекта-диаметром 6мм, а – аддитивная обработка; б – обработка Гауссовой фильтрации; в – мультипликативная обработка.

Из рис. 3.10 видно, что чем ближе отражатель расположен к границе зоны

контроля, тем больше погрешность, наименьшая погрешность определения продольной координаты дефекта наблюдается в центре зоны контроля.

в. Фронтальная точность определения координат дефекта

При экспериментальном исследовании фронтальной погрешности определения координат дефекта в центре зоны контроля, дефект располагался в иммерсионной ванне и перемещался вдоль решётки с шагом 5 мм (рис. 3.11.).

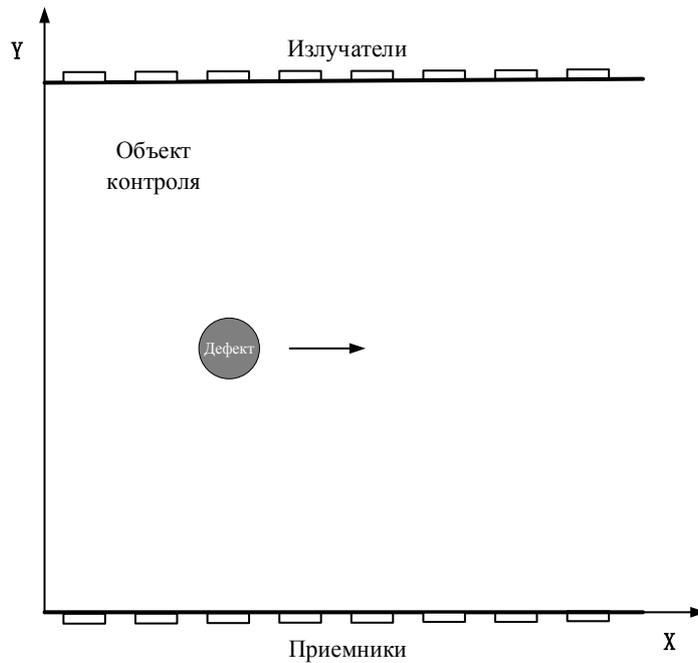


Рисунок 3.11 – Схема для исследования погрешности в определении фронтальной координаты дефекта.

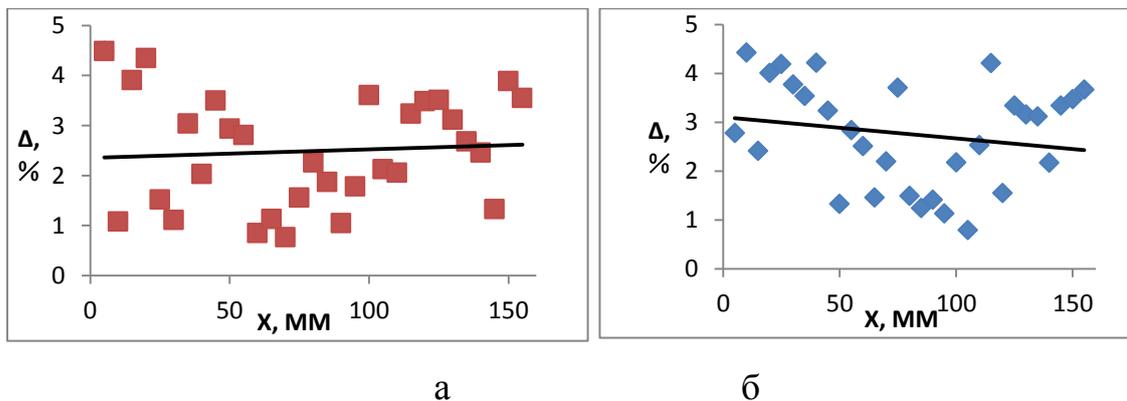


Рисунок 3.12 – Зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефекта диаметром бмм: а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка.

На рис. 3.12 показана зависимость погрешности определения фронтальной координаты дефектов от фронтального положения дефекта при расстоянии между излучающей и приемной решетками равно 400 мм. Из рис. 3.12 видно, что наименьшая погрешность определения фронтальной координаты дефекта наблюдается в центре зоны контроля.

Из выше приведенных рисунков видно что, что чем ближе дефект расположен к центру зоны контроля, тем лучше результат, и погрешность не превышает 10%.

3.3.2 Исследование чувствительности

Экспериментальное исследование чувствительности системы контроля проводилось путем размещения дефектов разных диаметров в разных местах зоны контроля. Томографические изображения результатов контроля представлены на рис.3.13 – 3.14.

На рис.3.13 представлены томограммы зоны контроля с дефектом $1,5 \text{ мм}^2$ расположенным вверху зоны контроля.

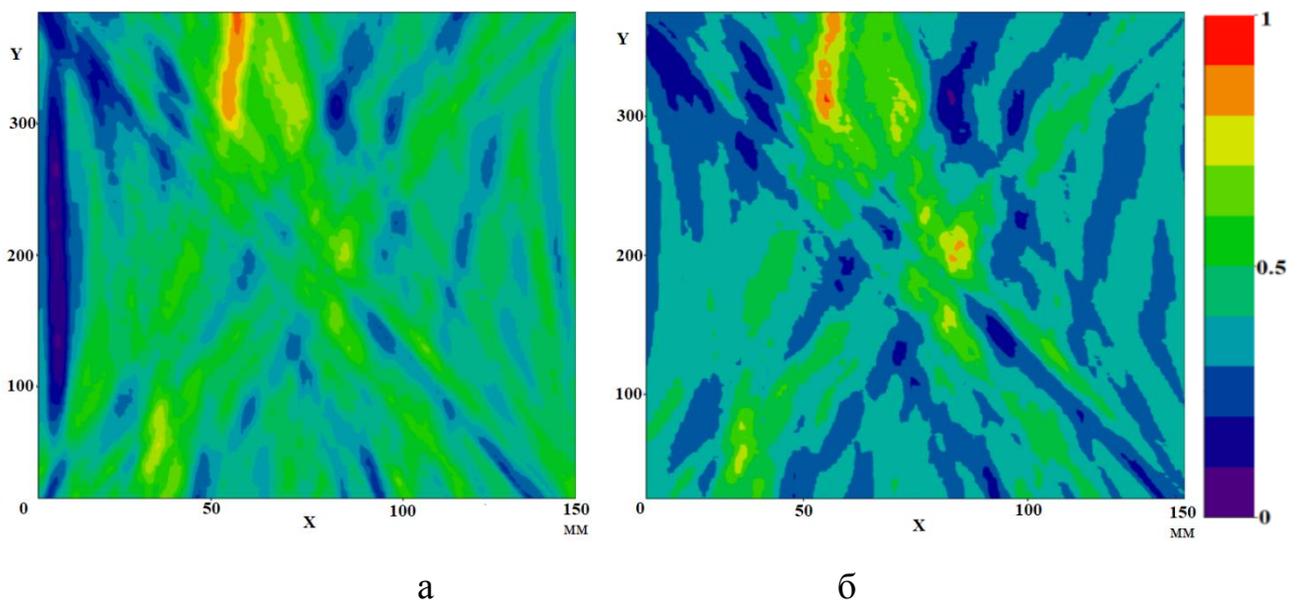


Рисунок 3.13 – Томограммы зоны контроля с дефектом размером $1,5 \text{ мм}^2$, расположенным в верхней части зоны контроля, а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка.

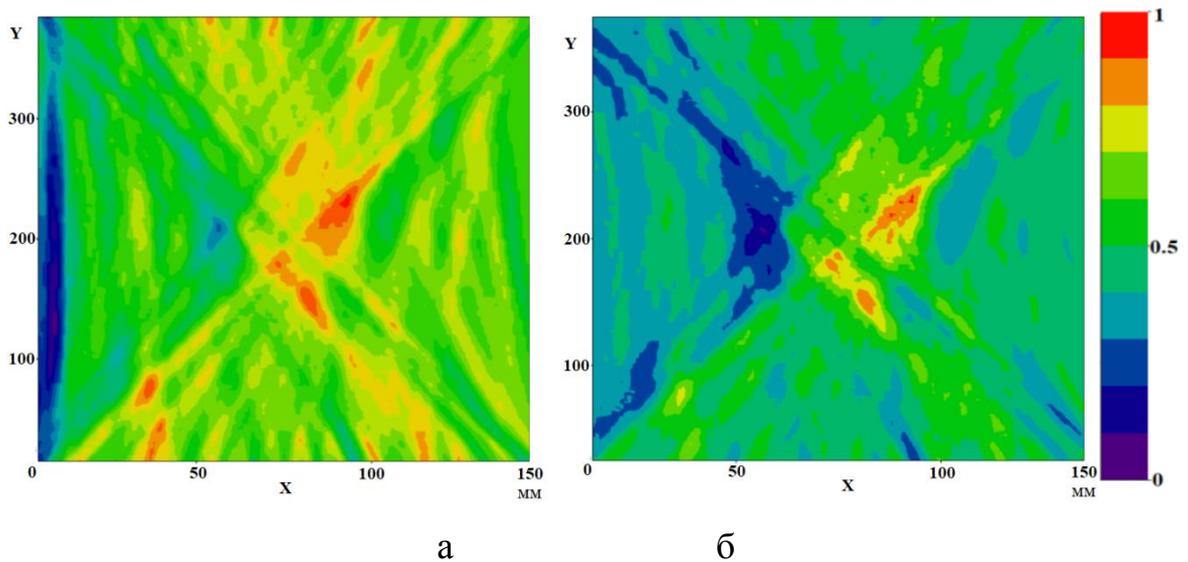


Рисунок 3.14 – Томограммы зоны контроля с дефектом размером $1,5 \text{ мм}^2$, расположенным в центре зоны контроля, а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка.

Из рис. 3.13 и 3.14 видно, что артефакты существуют в обоих методах, следовательно, чувствительность системы контроля в центре составляет $1,5 \text{ мм}^2$. Сравнивая два метода обработки можно сделать вывод что, томограмма, полученная мультипликативным способом менее зашумлена, особенно на краю зоны контроля, восстановленное изображение более наглядно.

3.3.3 Исследование разрешающей способности

Разрешающая способность является одной из основных характеристик любого метода контроля [106]. Экспериментальное исследование угловой разрешающей способности ультразвукового дефектоскопа проводилось путем размещения двух одинаковых дефектов диаметром 6 мм в разных местах зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при различных расстояниях между дефектами (рис. 3.15 – 3.18).

Из рис 3.15.в видно что, разрешающая способность при мультипликативной обработке выше. В области расположения дефектов уровень шума меньше при мультипликативной обработке, но на краю зоны контроля он выше по сравнению с аддитивной обработкой, что совпадает с результатом моделирования.

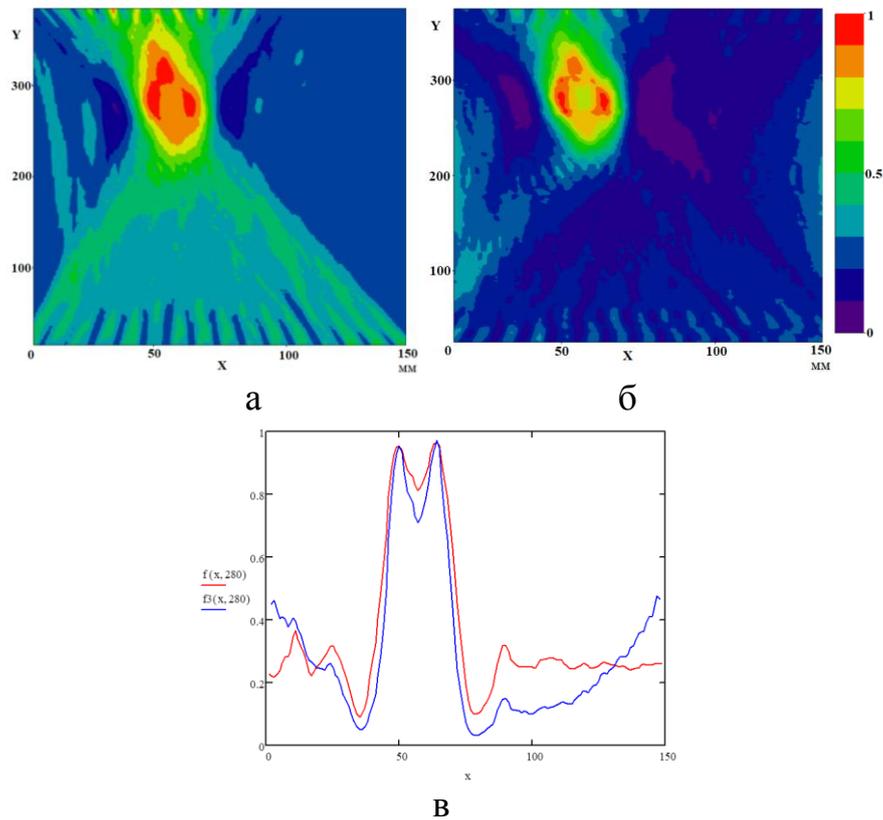


Рисунок 3.15 – Томограмма зоны контроля с двумя отражателями диаметром 6 мм расположенными в верхней части зоны контроля, расстояние между отражателями 15 мм, а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка; в – поперечный срез в области расположения дефектов, синяя линия – мультипликативная обработка, красная линия – аддитивная обработка.

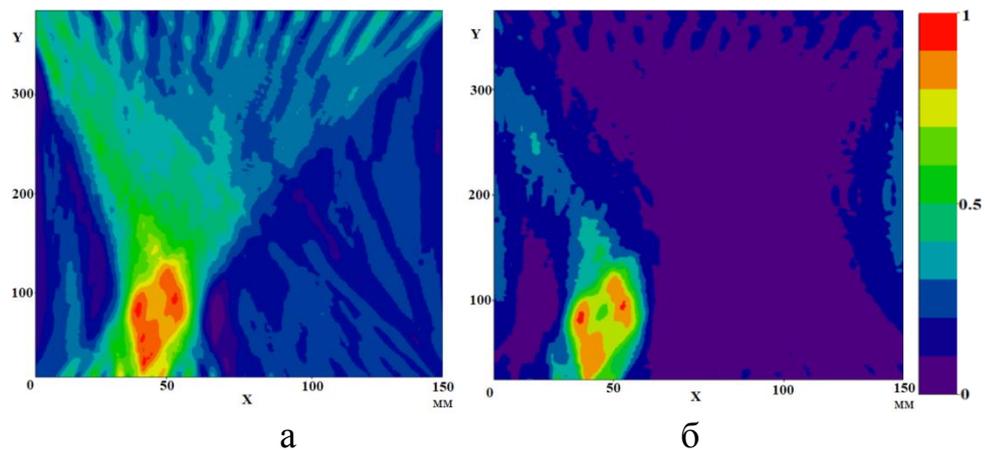


Рисунок 3.16 – Томограмма зоны контроля с двумя отражателями диаметром 6 мм, расположенными в нижней части зоны контроля, расстояние между отражателями 15 мм, а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка.

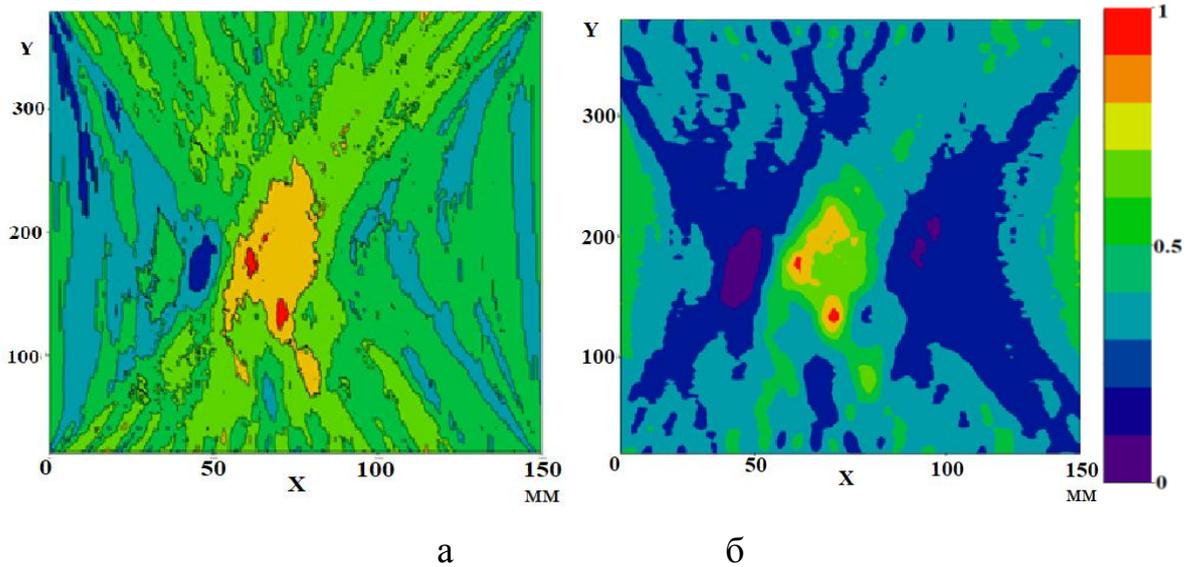


Рисунок 3.17 – Томограмма зоны контроля с двумя отражателями диаметром 6 мм, расположенными в центре зоны контроля, расстояние между отражателями 15 мм, а – аддитивная обработка; б – мультипликативная обработка.

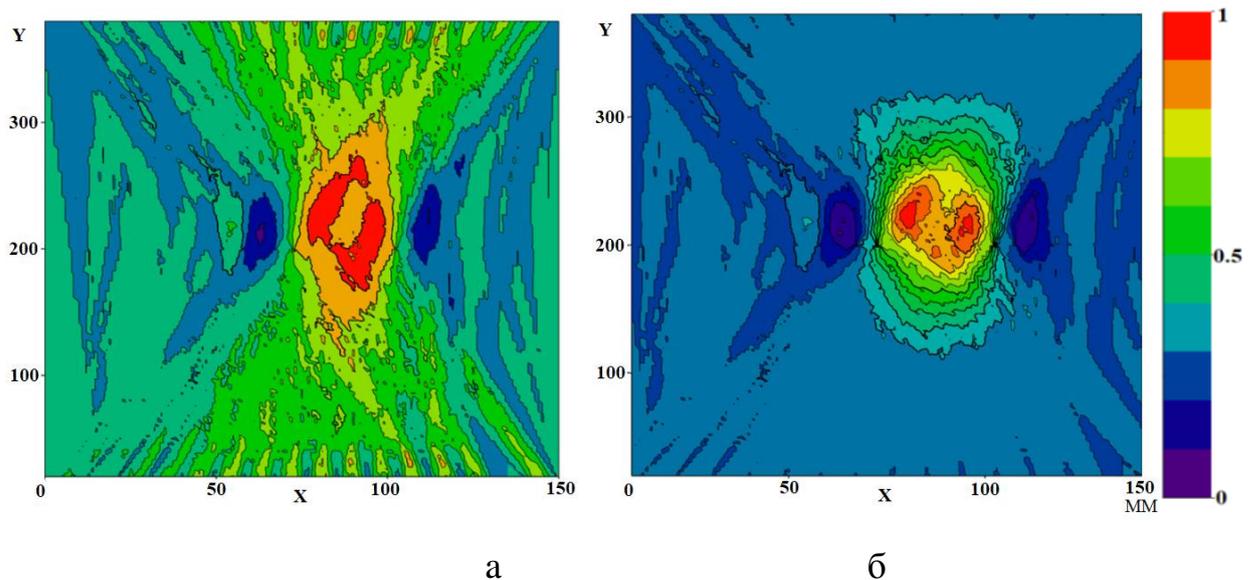


Рисунок 3.18 – Томограмма зоны контроля с двумя отражателями, а – аддитивная обработка; б – после Гауссовой фильтрации

На всех томограммах рис. 3.15 – 3.18 оба отражателя хорошо различимы. Гауссова фильтрация исходных данных позволила уменьшить уровень шумов в зоне контроля (рис.3.18.б), которые наблюдаются на исходных данных (рис.3.18.а). Сравнительный анализ рис. 3.15. показал, что томограмма, построенная на основе

аддитивной обработки имеет менее сфокусированное изображение, по сравнению с томограммой построенной на основе мультипликативной обработки. Поэтому координаты дефекта могут быть определены более точно. В случае двух отражателей сумма двух гауссовских сверток, которая использована для обработки данных и ядро свертки, определяется через координаты двух пикселей с максимальной амплитудой, что позволило получить хорошие результаты и улучшить разрешающую способность. На рис. 3.18 приведены результаты экспериментальных исследований разрешающей способности. На томограмме, построенной по исходным данным невозможно детектировать два дефекта (рис.3.18.а). После гауссовой фильтрации два дефекта детектируются отдельно (рис.3.18.б), при этом разрешающая способность по критерию Релея составила 13.5 мм при расстоянии между решётками 400 мм.

При экспериментальном исследовании угловой разрешающей способности было установлено, что разрешающая способность в центре зоны контроля при аддитивной обработке составила 15 мм, а разрешающая способность при мультипликативной обработке составила 13 мм по критерию Релея при расстоянии между решётками 400 мм, что хорошо согласуется с результатами теоретических исследований.

Экспериментальное исследование разрешающей способности по дальности ультразвукового дефектоскопа проводилось путем размещения двух одинаковых дефектов диаметром 6 мм в разных местах зоны контроля при расстоянии между антенными решетками 400 мм, при различных расстояниях между дефектами. (рис. 3.19). На рис. 3.19 показаны два отражателя расположенные на расстоянии 15 мм друг от друга. На обоих томограммах оба отражателя хорошо различимы. Гауссова фильтрация исходных данных позволила уменьшить уровень шумов в зоне контроля (рис. 3.19.б), которые наблюдаются на исходных данных (рис. 3.19.а).

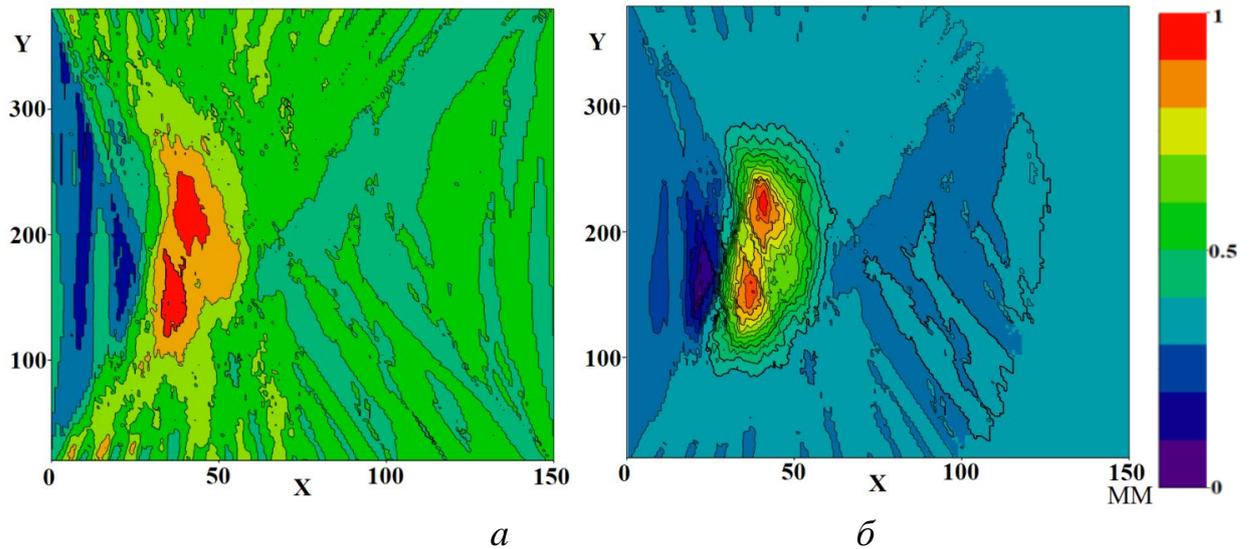


Рисунок 3.19 – Томограмма зоны контроля с двумя отражателями, а – аддитивная обработка; б – Гауссова фильтрация.

Если в качестве границы дефекта использовать точки с амплитудой 90% от максимальной, то разрешающая способность мультипликативной обработки будет на 15% выше, чем разрешающая способность при аддитивной обработке. Сравнение томограмм, полученных путем мультипликативной и аддитивной обработки, позволяет сделать вывод, что томограмма полученная при мультипликативной обработке более сфокусирована, а шум меньше.

Таким образом, определены пределы изменения радиуса окна гауссовой фильтрации и при выборе оптимального размера окна, предложенный алгоритм гауссовой фильтрации позволяет увеличить разрешающую способность примерно на 10% и повысить точность определения координат дефекта. Кроме того, гауссова фильтрация позволяет уменьшить уровень шумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы получила дальнейшее развитие теория малоракурсной акустической томографии на основе аддитивной обработки с гауссовой фильтрацией и мультипликативной обработкой сигналов акустической решетки. На основе созданной модели проведен анализ разрешающей способности и точности определения координат дефектов в объекте контроля. Проведённые исследования позволяют сформулировать следующие результаты:

Получено дальнейшее развитие теневой метод контроля, основанный на применении фильтрации и мультипликативной обработки, позволяющий повысить точность и разрешающую способность при детектировании дефектов.

Получено аналитическое выражение, описывающие зависимость разрешающей способности малоракурсного теневого дефектоскопа на основе эквидистантных линейных решеток от его геометрических и акустических характеристик.

Предложена компьютерная модель акустической малоракурсной томографии, которая позволяет определить параметры акустического тракта в зоне контроля при проектировании многоканальных малоракурсных трансмиссионных дефектоскопов без проведения затратных экспериментальных исследований

Разработан макетный образец акустического малоракурсного трансмиссионного дефектоскопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Классификация и краткая характеристика акустических методов контроля [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://library.mephi.ru/> - Загл. с экрана. (дата обращения: 19.12.2015).
2. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – с. 214-216.
3. Браутман, Л., Крок, Р., Нотон, Б. (ред.) Композиционные материалы. Том 3: Применение композиционных материалов в технике. / пер. с англ. Б.Р.
4. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
5. Люкшин, Б.А. Композитные материалы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 102 с.
6. 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.
7. Мэттьюз, Ф., Ролингс, Р. Композитные материалы. Механика и технология. - М.: Техносфера, 2004. – 408с.
8. Браутман, Л., Крок, Р. Композиционные материалы. Том 5: Разрушение и усталость / Браутман Л., Крок Р. (ред) Перевод с английского под редакцией Г.П. Черепанова. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
9. Каблов, Е.Н. (ред.) Конструкционные композиционные материалы. М.: ФГУП ВИАМ, 2012. – 58 с.
10. Мутылина, И.Н. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / И.Н. Мутылина. – Владивосток: Из-во ДВГТУ, 2007. – 167 с
11. Гуменюк, Н.С., Грушин, С.С. Применение композиционных материалов в судостроении // Современные наукоемкие технологии, 2013. – № 8 (1). – с. 116-117.

12. Тельгерекова Т.В, Орлова Н.Ю. Современные методы контроля качества слоистых композитных материалов // Сборник трудов конференции, 2014 с. 37-40.
13. Воробей, В.В., Маркин, В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. Новосибирск: Наука, 2006. — с. 94-104.
14. Конструкторско-технологические решения для обеспечения безопасности проектируемых и эксплуатируемых объектов / В.В. Евстифеев, В.И. Матюхин, В.В.Акимов – Омск: Методические указания, 2012. – с. 3- 5.
15. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. — Новосибирск: Наука, 2006. — с. 94-104.
16. 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.
17. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль. Том 3.Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – Том 3. – 864 с.
18. Natterer F. The Mathematics of Computerized Tomography (Classics in Applied Mathematics, 32), Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
19. Как, А.С. Principles of computerized tomographic imaging, Engineering, 1988, – № 33.1. – p. 327.
20. Календер, В. Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображения и области клинического использования: монография / В. Календер. - М.: Техносфера, 2006. – 344 с.
21. Raišutis, R., Voleišis, A., Kažys, R. Application of the through transmission ultrasonic technique for estimation of the phase velocity dispersion in plastic materials // ULTRAGARSAS (ULTRASOUND), 2008. – Vol.63, No.3, – pp. 15-18.
22. Raišutis, R., Kažys, R., Mažeika, L. Application of the ultrasonic pulse-echo technique for quality control of the multi-layered plastic materials. NDT&E International, 2008. – Vol. 41. – pp. 300-311.
23. Wróbel, G., Pawlak, S. A comparison study of the pulse-echo and through-transmission ultrasonics in glass/epoxy composites / Journal of Achievements of

Materials and Manufacturing Engineering, 2007. –Vol. 22(2). – pp. 51-54.

24. Rajzer, I., Piekarczyk, W., Castaño, O. An ultrasonic through-transmission technique for monitoring the setting of injectable calcium phosphate cement // Mater Sci Eng C., Vol. 2016. – 67. – pp. 20-25.

25. Guangzhen Xing, Ping Yang, Longbiao He. Estimation of diffraction effect in ultrasonic attenuation bythrough-transmission substitution technique / Ultrasonics, 2013 – Vol. 53. – pp. 825–830.

26. He, P. Direct measurement of ultrasonic dispersion using a broadband transmission technique / Ultrasonics, 1999. – Vol. 37. – pp. 67-70.

27. Peters, F., Petit, L. A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media / Ultrasonics, 2003. – Vol. 41(5). – pp. 357-363.

28. He, P., Zheng J. Acoustic dispersion and attenuation measurement using both transmitted and reflected pulses / Ultrasonics. 2001. – Vol.39. – pp. 27-32.

29. Лавинская, Е.И., Мартемьянов, С., Солнье, Ж.Б., Фомин, Н.А. Малоракурсная лазерная томография сложных газодинамических течений // Инженерно-физический журнал, 2004. – Т. 77. –№ 5. – с. 94-104.

30. Филонин, О.В. Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2003. – № 1 (3), – с. 136-145.

31. Кутовой, В.П. Малоракурсная томография при исследовании пространственных задач // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. 2014, – с. 54-55.

32. 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.

33. Повышение контрастности малоракурсных томограмм, полученных алгебраическими алгоритмами реконструкции / А.В. Лихачев // Вычислительные технологии, 2009. – Т. 14. – № 3. – с. 37-47.
34. 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.
35. Журавлев, А.К., Лукошкин, А.П., Поддубный, С.С. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 240 с.
36. Монзинго, Р.А., Миллер, Т.У. Адаптивные антенные решетки. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
37. Гвоздева, И.М. Сравнительная оценка помехоустойчивости каналов аддитивной и мультипликативной обработки акустических сигналов // Авиационно-космическая техника и технология, 2014. – №6. – с. 80-83.
38. Верлань, А. Ф. Мультипликативная обработка угловых спектров акустических когерентных изображений [Текст] / А. Ф. Верлань, И. М. Гвоздева, // Электронное моделирование, 2005. – Т. 27, №5. – с. 53 – 62.
39. Польской, П. П., Маилян, Д.Р. Композитные материалы как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // ИВД. Композитные материалы, 2012. – №4-2.
40. Current Products & Services [Электронный ресурс]//BOEING. – Режим доступа: <https://www.boeing.com/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.01.2021).
41. A380 Unique passenger experience [Электронный ресурс]//AIRBUS. – Режим доступа: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 21.01.2021).
42. Boeing Launches 7E7 Dreamliner [Электронный ресурс]//BOING. – Режим доступа: <https://boeing.mediaroom.com/2004-04-26-Boeing-Launches-7E7-Dreamliner>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 21.01.2021).
43. MW: Обновленный Су-57 станет самым мощным истребителем в мире [Электронный ресурс]//RG. – Режим доступа: <https://rg.ru/2021/01/03/mw->

- obnovlennyj-su-57-stanet-samym-moshchnym-istrebitelem-v-mire.html, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 22.01.2021).
44. BOEING 787 DREAMLINER [Электронный ресурс]//BOING. – Режим доступа: <https://www.boeing.com/commercial/787/>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 22.01.2021).
45. A350 Family [Электронный ресурс]//AIRBUS. – Режим доступа: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 27.01.2021).
46. Maltick, P.K., Newman S. Composite Materials technology. Processes and properties. Munich – Vienna – N.Y.: Hauser Publishers, 2000. – pp. 351–389.
47. Каблов, Е.Н. (ред.) Конструкционные композиционные материалы. М.: ФГУП ВИАМ, 2012. – 58 с.
48. Люкшин ,Б.А. Композитные материалы. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 102 с.
49. Юскаев, В.Б. Композиционные материалы [Текст] : учеб. пос. / В.Б. Юскаев. - Сумы : СумГУ, 2006. – 199 с.
50. Алешин, Н.П. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ / Н.П. Алешин, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков // Инженерный вестник, 2015. – №1. – с. 533 - 538.
51. Songping, L., Enming, G., Levin, V.M, Petronyuk Yu.S. Imaging of carbon-fiber-reinforced (CFR) laminates microstructure by acoustic microscopy techniques / Acoustical Imaging. Dordrecht & N.Y.: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2004. – Vol. 27. – pp. 156–162.
52. Karabutov, A.A., Murashov, V.V, Oraevsky, A.A., Podymova, N.B. Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // Conf. «Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II», San Antonio, Texas, march-april 1998. San Antonio: Published by SPIE – The Intern. Soc. for Opt. Eng., 1998. – Vol. 3396. – pp. 103–111.
53. Han, B.D. Film-based Computer tomography of nuclear-fuel damage experiments // Materials Evaluation. 1989. – Vol. 47. №6. – pp. 741–745.

54. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1 – М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.
55. Федосов, А.В. Гайнуллина, Л.А. Методы неразрушающего контроля // Электротехнические и информационные комплексные системы, 2015 – № 2, Т.11. – с. 73-78.
56. Bochkova, S.D., Volkovsky, S.A., Efimov, M.E. et al. A Method for Determining the Locations of Impacts in a Composite Material Using Fiber Optical Acoustic Emission Sensors. Instrum Exp Tech, 2020. – 63. – pp. 507–510.
57. Isa Emami Tabrizi, Adnan Kefal, Jamal Seyyed Monfared Zanjani, Cagdas Akalin, Mehmet Yildiz, Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory, Composite Structures, 2019. –V. 223. – 110971 – ISSN 0263-8223.
58. Клюев, В.В. и др. Новое поколение промышленных рентгеновских вычислительных томографов МНПО «Спектр» // Неразрушающие физические методы контроля: тез. докл. XII НТК: т. V. Свердловск, 1990. – с. 139–140.
59. Приборы радиационного неразрушающего контроля [Электронный ресурс]//СпецТехноРесурс. – Режим доступа: <http://www.measurement.ru/gk/nerazrush/04.htm>, свободный. (дата обращения: 20.05.2017).
60. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. / Под ред. В.В. Клюева, т.2, Кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
61. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий : монография / А. И. Потапов, В. А. Сясько, П. В. Соломенчук, А. Е. Ивкин, Д. Н. Чертов, Т. 2: Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. Санкт-Петербург : Нестор-История, 2015. – 438 с.
62. Шубочкин, А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М. : Спектр, 2014 . – 288 с.
63. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Изд-во Спектр, 2009. – 544 с.
64. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.:

Мир, 1988 г. – 420 с.

65. Нестерук, Д.А., Вавилов, В.П. Тепловой контроль и диагностика: учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 104 с.
66. Cai, L.W., Thomas, A.F., Williams, J.H. Thermographic Nondestructive Testing of Polymeric Composite Sandwich Panels // *Materials Evaluation*. 2001. – №9. – pp. 1061–1071.
67. Вавилов, В.П. и др. Тепловая томография углепластика: опыт кооперативных зарубежных исследований // *Неразрушающие физические методы и средства контроля: тез. докл. XIII НТК*. СПб., 1993. – с. 69–70.
68. Якубов, В.П., Шипилов, С.Э., Суханов Д.Я.. Микроволновая томография радионепрозрачных объектов. // *Дефектоскопия*, 2011. – №10. – с. 62-69.
69. Федюнин, П.А. Классификация микроволновых методов контроля электрофизических параметров гетерогенных дисперсных сред и материалов // *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2019. – №12.
70. Буй Ван Донг, Акустический контроль композитных материалов малоракурсным теневым методом: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, – Томск, 2016. – 47 с.
71. Крауткремер, Й., Крауткремер, Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
72. 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. – с. 864.
73. Способы сканирования при ультразвуковом контроле / Гурвич А.К. // *В мире неразрушающего контроля*, 2010. – № 3 (49). – с. 4-6.
74. Козлов, В.Н. Акустическая В- и С-томография крупноструктурных материалов импульсным эхометодом / В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, Н.Н. Яковлев, А.В. Ковалев, В.Г. Шевалдыкин // *Приборы и системы управления*, 1989. – №7. – с. 21-23.

75. Солдатов, А.И. Ультразвуковая контрольно-измерительная аппаратура на основе волноводной локации [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: Томский политехнический университет. — Томск, 1997. — 159 л.
76. Самойленко, В.И., Шишов, Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
77. Chang, J., Soldatov, A.I., Abouellail, A.A., Soldatov, A.A., Obach, I.I. The Resolution Capability of the Through-Transmission Method of Testing of Composites Using Linear Array // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 2019. – pp. 1-3.
78. Гостюхин, В.Л., Трусов, В.Н., Гостюхин, А.В. Активные фазированные антенные решетки. – М.: Радиотехника, 2011. – 304 с.
79. Алехин С.Г. Использование фазированных антенных решеток в сочетании с виртуальной динамической фокусировкой для ультразвуковой томографии металлоконструкций / Алехин С.Г. [и др.] // Контроль. Диагностика, 2008. – № 7. – с. 42-44
80. Amrani, M., Gondard, C., Evangelakis, G. A. Numerical computation of the acoustical field passing through a plane interface: application to new phased-array transducers // Ultrasonics, 93. – pp. 197-200.
81. Самокрутов, А.А., Шевалдыкин, В.Г. Возможности оценки характера несплошности металла ультразвуковым томографом с цифровой фокусировкой антенной решетки // Контроль. Диагностика, 2011. – № 10. – с. 63-69.
82. Vössing, K.J., Gaal, M. & Niederleithinger, E. Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers for nondestructive testing of wood-based materials. Wood Sci Technol, 2018 – № 52 – pp. 1527–1538.
83. Quattrocchi, A., Freni, F. & Montanini, R. Air-coupled ultrasonic testing to estimate internal defects in composite panels used for boats and luxury yachts. Int J Interact Des Manuf , 2020. – № 14. – pp. 35–41.
84. Li, Honggang & Zhou, Zhenggan. Detection and Characterization of Debonding Defects in Aeronautical Honeycomb Sandwich Composites Using Noncontact Air-Coupled Ultrasonic Testing Technique. Applied Sciences, 2019. – № 9. – pp. 283.

85. Armitage, P.R., Wright, C.D. Design, development and testing of multi-functional non-linear ultrasonic instrumentation for the detection of defects and damage in CFRP materials and structures, *Composites Science and Technology*, 2013. – № 9. – p. 149-156.
86. 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.
87. Цехановский, С.А. Разработка и исследование ультразвукового дефектоскопа с визуализацией дефектов на экране электронно-лучевой трубки [Текст] : Автореф. канд. техн. наук: – ТПУ, 1975 –21 с.
88. Макаров, В.С. Акустический дефектоскоп на основе принципа полисканирования для обнаружения внутренних несплошностей и неоднородностей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 – Томск, 1988. – 170 с.
89. 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.
90. Алешин, Н.П., Лупачев, В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справочное пособие. – Минск: Высшая школа, 1987. – 271 с.
91. Лукьянов, В.А., Петрусенко, Е.В. Ультразвуковая толщинометрия и дефектоскопия. – М.: РГУ нефти и газа, 2002.
92. Оборудование НК OmniScan MX2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com/ru/omniscan-mx2> (дата обращения 19.01.2020).
93. Роликовый ФР-преобразователь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.olympus-ims.com/ru/rollerform/> (дата обращения 19.01.2020).
94. LS-200-COPA – Phased Array Immersion Scanner for Automatic Inspection of Composite Panels, Skins and Stringer Components [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://scanmaster-irt.com/wp-content/uploads/2015/08/LS-200_COPA-Brochure-pdf (дата обращения 25.01.2020).
95. Филонин, О.В. Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического*

университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2003. – № 1 (3). – с. 136-145.

96. 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.

97. Кутовой, В.П. Малоракурсная томография при исследовании пространственных задач // Сборник тезисов докладов IX Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, 2014. – с. 54-55.

98. Болотина, И.О., Макаров, В.С., Цехановский, С.А. Моделирование процесса сканирования и визуализации акустического поля // Современные техника и технологии, СТТ' 2002: Труды VII междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых. – Томск, 2002. – Т. 1. – с. 226-228.

99. 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.

100. 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.

101. Hoyle, B.S. Process tomography using ultrasonic sensors // Meas. Sci. Technol, 1996. – Т. 7. – № 3. – с. 272-280

102. Скучик, Е. Основы акустики. – М.: Мир, 1976. – Том 1. – 520 с.

103. Provost, J., Lesage, F. The application of compressed sensing for photo-acoustic tomography // IEEE Trans. Med. Imaging, 2009. – Т. 28. – № 4. – с. 585-594.

104. Филонин, О.В. Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета), 2003. – № 1 (3). – с. 136-145.

105. Интегральные микросхемы. Каталог НИИЭТ. Воронеж, 2013. – 44 с.

106. Цзянлэй Чан, Солдатов, А.И. Моделирование разрешающей способности

линейных решеток при теневом методе контроля// Южно-Сибирский научный вестник, 2018. – № 4 (24).

ПРИЛОЖЕНИЕ. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

**SHENZHEN HENGJI PROPERTY MANAGEMENT CO., LTD.
HENG'AN GARDEN MANAGEMENT DIVISION
(HENGJI PROPERTY)**

Address: 10 Honghu Road, Luohu District, Shenzhen, China

Email: 15186043825@163.com

Tel: +86 15186043825

Manage of HENGJI PROPERTY



Daxiang Chen

“28” March 2021

Confirmation

of the Jianglei Chang's thesis researching results usage

The present statement is that in HENGJI PROPERTY, has implemented a multi-channel acoustic shadow flaw detector. The flaw detector is used to test composite materials. The flaw detector has been designed using research conducted by Jianglei Chang.

1. A method of small angles non-destructive testing of composite materials and products was proposed, and provided a better metrological characteristic to determine the size of the defects comparison with the known analogues.

2. The process of reconstruction of tomographic image allows determining the position of the defect.

Manage of HENGJI PROPERTY

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Daxiang Chen'.

Daxiang Chen



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



Акт
 внедрения результатов диссертационной работы

Чан Цзянлэя

Комиссия в составе: председатель: исполняющий обязанности заведующего кафедрой – руководитель отделения электронной инженерии, к.т.н., Баранов П.Ф, члены комиссии: доцент отделения электронной инженерии, Сорокин П.В., доцент отделения электронной инженерии, к.т.н. Солдатов А.А.. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Чан Цзянлэя «МАЛОРАКУРСНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ», 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 отделения электронной инженерии инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности национального исследовательского Томского политехнического университета в методических материалах дисциплины «Применение ультразвука в медицине», а также при подготовке магистерских диссертаций и курсовых проектов студентами ТПУ.

Председатель комиссии

П.Ф.Баранов

Члены комиссии

П.В.Сорокин

А.А.Солдатов