

На правах рукописи
УДК 620.179.16

Базулин Евгений Геннадиевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО
УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТЕННЫХ РЕШЁТОК**

Специальность 05.02.11 – Методы контроля
и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук

Москва, 2014

Работа выполнена в «Научно-производственном Центре Неразрушающего Контроля «ЭХО+».

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук

Бобров Владимир Тимофеевич

Доктор технических наук, профессор

Качанов Владимир Климентьевич

Доктор технических наук

Дымкин Григорий Яковлевич

Ведущая организация:

ГНЦ РФ ОАО «НПО ЦНИИТМАШ»

Защита состоится «___» _____ 2014 года на заседании диссертационного совета Д.212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Телефон для справок 8-499-267-09-63.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и состояние проблемы

В энергетике России, в первую очередь в атомной, в нефтехимическом производстве, в системе транспортировки нефти и газа эксплуатируется большое количество потенциально опасных объектов. С целью повышения эксплуатационной безопасности, всё больше внимания уделяется диагностике оборудования, которая позволяет на ранних стадиях проводить оценку его работоспособности, предупреждать возникновение аварийных ситуаций и, по возможности, продлевать сроки эксплуатации объектов.

Для решения этой задачи в промышленности России широко применяются традиционные импульсные методы неразрушающего ультразвукового контроля (УЗК), основанные на анализе информативных признаков эхосигнала. Время задержки эхосигнала позволяет определять место залегания несплошности, а амплитуда отражённого импульса оценить площадь эквивалентного отражателя, по которой происходит отбраковка. Основными недостатками методов традиционного УЗК является низкая точность определения размеров дефектов и сложность их классификации. Кроме того, традиционный УЗК не гарантирует выявления наиболее опасных дефектов типа трещин, вследствие сложной природы дифракции на них ультразвуковых импульсов. Всё это приводит к завышению норм отбраковки по результатам эксплуатационного УЗК практически во всех отраслях промышленности, увеличивая объём необоснованного ремонта и эксплуатационные расходы на содержание объектов.

Дальнейшее развитие методов УЗК связано с разработкой систем с когерентной обработкой эхосигналов. Эти системы восстанавливают трёхмерные изображения с высокой разрешающей способностью и низким уровнем шума, что значительно повышает точность определения размеров и типа несплошностей, и позволяет перейти к решению задач ультразвуковой дефектометрии металлов. В когерентных системах основными информационными признаками являются форма и амплитуда восстановленной границы отражателя. Достоверная информация о размерах и типе несплошности позволяет провести прочностной расчёт с оценкой технического состояния, определения ресурса, срока и возможности дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта.

Однако, изображения, полученные когерентными системами, далеко не всегда совпадают с формой отражателя, что усложняет оценку его геометрических параметров и распознавания его типа. Изображения с малым уровнем шума, повторяющие реальную форму несплошности позволили бы существенно повысить скорость, точность и достоверность контроля. Для получения таких изображений необходимо решение самостоятельной научно-технической зада-

чи по разработке когерентных методов и средств эксплуатационного УЗК повышенной информативности.

В рамках настоящей диссертации обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований автора, выполненных в Акустическом институте им. академика Н.Н. Андреева и в ООО «НПЦ «ЭХО+» в период с 1980 по 2014 годы.

Цель работы и основные задачи исследований

Цель работы заключается в повышении достоверности и информативности эксплуатационного неразрушающего ультразвукового контроля промышленных объектов для обеспечения их безаварийной эксплуатации.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать обобщённую расчётную модель, описывающую процесс формирования высококачественных изображений несплошностей:
 - а) с учётом многократного отражения ультразвукового пучка от неровных границ изотропного объекта контроля и трансформации типа волны при отражении и преломлении;
 - б) с учётом наличия изотропных областей с разными акустическими свойствами;
 - в) по эхосигналам, измеренным одноэлементными преобразователями, антенными решётками (АР) и/или матрицами (АМ) в случае механического сканирования и/или электронного сканирования.
2. Исследовать методы повышения качества изображения с целью создания алгоритмов достижения сверхразрешения.
3. Разработать методы повышения отношения сигнал/шум, в частности, в объектах со структурным шумом.
4. Решить обратную задачу рефракции для одновременного определения толщины объекта контроля и скорости звука в нём.
5. Создать концепцию построения системы УЗК, реализующей предложенные алгоритмы.
6. Разработать и внедрить систему в промышленность для проведения эксплуатационного УЗК.
7. Обосновать и утвердить методики проведения эксплуатационного УЗК.

Методы исследований

Теоретические исследования выполнялись с привлечением апробированных и корректных методов общей и прикладной акустики, математического анализа, методов вариационного исчисления, методов регуляризации, спектрального анализа и оценивания. Математическое моделирование проводилось на базе вычислительных средств общего применения и программы CIV4 (CIA

List, Франция). Экспериментальные исследования выполнялись с использованием установок, обеспечивающих регистрацию эхосигналов в контактном и иммерсионном режиме, оцифровку и передачу данных в компьютер для дальнейшей обработки и документирования.

Научная новизна

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан метод восстановления высококачественного изображения несплошностей для разных схем регистрации эхосигналов с учётом трансформации типа волны при многократном отражении ультразвукового пучка от неровных границ объекта контроля, состоящего из нескольких изотропных областей с разными акустическими свойствами.
2. Исследованы различные нелинейные методы обработки информации, предназначенные для повышения разрешающей способности изображения несплошностей и уменьшения уровня шума.
3. Предложен метод решения обратной задачи рефракции с целью одновременного определения неизвестной скорости звука и толщины объекта контроля с точностью не меньше 0.5%.
4. Получено решение одномерной обратной задачи рассеивания в импульсном режиме для случая многократного перерассеивания между отражателями, позволяющее достичь эффекта сверхразрешения.

Практическая ценность работы

1. Создана и внедрена система АВГУР-АРТ нового поколения для получения высококачественных изображений несплошностей, что позволило повысить точность оценки эксплуатационной надёжности оборудования. Система прошла метрологическую аттестацию и внесена в реестр типов средств измерений, прошла испытания в ОАО «Концерн Росэнергоатом».
2. Разработаны методики проведения эксплуатационного контроля с применением системы АВГУР-АРТ, в том, числе на ранее не контролируемых объектах.
3. Высококачественные изображения несплошностей позволят надёжнее автоматизировать процесс анализа изображения и формирования протокола контроля, что уменьшит влияние человеческого фактора на процесс контроля.
4. Системы АВГУР-АРТ внедрены на ряде предприятий России, в том числе на АЭС, что подтверждено актами о внедрении.
5. В настоящее время поставлено шесть и изготавливается пять систем АВГУР-АРТ.

Апробация работы

Материалы диссертации были изложены на двух международных и на шести Российских конференциях:

- XIV конференция «Методы и средства повышения информативности и достоверности результатов ультразвукового контроля сварных конструкций» (Санкт-Петербург, 1992).
- Международная конференция «Достоверность, точность, информативность ультразвукового контроля и использование его результатов в расчетах на прочность» (Ростов-на-Дону, 1992).
- 3-я международная конференция «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» (Москва, 2002).
- XVII Российская научно-техническая конференция с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2005).
- 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (Москва, 2010).
- XIX Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (Самара, 2011).
- XXI Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» УЗДМ-2013, (Санкт-Петербург, 2013).
- 20-я Всероссийская Научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва, 2014).

Результаты исследований были обсуждены на заседаниях учёного совета ОАО «НПО ЦНИИТМАШ», кафедры «Сварка» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на семинаре «Акустика неоднородных сред» Акустического института им. академика Н.Н. Андреева, на семинаре ЗАО «Акустические контрольные системы».

Публикации

Основные положения диссертационной работы отражены в 84 научных публикациях, в состав которых входит одна монография (с соавторами), 42 статьи в журналах по перечню ВАК РФ, 17 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 4 авторских свидетельства.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод восстановления изображения несплошностей в режиме двойного и тройного сканирования с учетом отражения ультразвукового пучка от границ объекта контроля.
2. Методы обработки информации для достижения сверхразрешения и для повышения отношения сигнал/шум, в частности, в объектах со структурным шумом.
3. Решение обратной задачи рефракции для определения толщины объекта контроля и скорости звука в нём с точностью не менее 0.5%.

4. Метод восстановления изображения отражателей с учётом многократного перерасеивания между ними.
5. Концепция построения системы АВГУР-АРТ на основе антенных решеток и матриц с когерентным получением изображения несплошностей.
6. Технология ультразвукового контроля с использованием системы АВГУР-АРТ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, основных результатов, списка работ и списка литературы, включающего 179 наименований. Объем диссертации составляет 346 страниц, включая 151 рисунок и 16 таблиц.

Краткое содержание диссертации

В введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, её научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, практическая ценность, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

В первой главе представлен обзор работ посвященных методам получения изображения несплошностей при проведении УЗК.

Классические методы УКЗ (Ермолов И.Н., Гурвич А.К., Алёшин Н.П., Крауткремер Й., Крауткремер Г.) не позволяют надёжно решать задачи дефектометрии металлов. Поэтому для получения изображения дефектов с высокой разрешающей способностью были разработаны системы с когерентной обработкой измеренных эхосигналов. В России для экспертного контроля сварных соединений (СС) трубопроводов АЭС используются системы серии «АВГУР» (Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г.), за рубежом для контроля ответственных конструкций применяются системы «Masera» фирмы «Technoatom» и «μ+» фирмы «Sonomatic». В этих системах для получения изображения рассеивателей используются алгоритмы, основанные на решении обратной скалярной задачи рассеивания в Борновском приближении. К алгоритмам такого класса относится метод Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) (Hall T.E., Doctor S.R., Erhard A., Schulz E., Montag H.-J., Wüstenberg H., Осетров А.В.) и метод Проекции в Спектральном Пространстве (ПСП), который в зарубежной литературе называется Fourier Transformation Synthetic Aperture Focusing Technique (FT-SAFT) (Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J.). При контроле бетона изображения рассеивателей восстанавливают комбинационным методом SAFT (C-SAFT) (Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Качанов В.К.). Современная вычислительная техника позволяет реализовать метод C-SAFT на программно-аппаратном уровне и создать дефектоскопы, которые позволяют в реальном масштабе времени получать изображения отражателей. Обратная сторона простоты упомянутых алгоритмов состоит в том, что изображения несплошностей

получаются далеко не всегда высокого качества. В них велик уровень ложных изображений, сформированных перерассеянными импульсами и импульсами, возникшими в результате трансформации типов волн при рассеивании на неоднородностях. Кроме того, не всегда однозначно можно судить о форме рассеивателя, так как восстанавливается изображение только той части его границы, отраженные импульсы от которой регистрируются в области приема.

С математической точки зрения неразрушающий контроль сводится к решению обратной задачи рассеивания, заключающейся в том, чтобы по известным источникам поля $q(\mathbf{r}, t)$, расположенным в области S_i , и по измеренному в области S_r рассеянному полю $p(\mathbf{r}, t)$, найти функцию $\varepsilon(\mathbf{r})$, которая описывает отражающие свойства неоднородности в области S . Интегральная форма уравнения рассеяния (уравнение Липпмана-Швингера) для частоты f записывается как (Wojarski N.N., Буров В.А.)

$$p(\mathbf{r}_r, f) = p_i(\mathbf{r}_r, f) + \int_S g(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}, f) \varepsilon(\mathbf{r}) p(\mathbf{r}, f) d\mathbf{r}, \quad \mathbf{r} \in S, \mathbf{r}_r \in R^3. \quad (1)$$

Здесь $p_i(\mathbf{r}_r, f)$ - первичное облучающее поле, которое определяется известным источником поля $q(\mathbf{r}, f)$

$$p_i(\mathbf{r}_r, f) = \int_{S_i} g(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_i, f) q(\mathbf{r}_i, f) d\mathbf{r}_i. \quad (2)$$

Сложность решения обратной задачи заключается в том, что помимо нахождения параметров неоднородностей $\varepsilon(\mathbf{r})$ требуется определить функцию $p(\mathbf{r}, f)$ во всей области восстановления изображения (ОВИ), что делает задачу **нелинейной**. В практике УЗК обычно используется Борновское приближение, когда амплитуда рассеянного поля полагается много меньше амплитуды падающего поля, то есть $p(\mathbf{r}, f) \ll p_i(\mathbf{r}, f)$. На практике это условие выполняется далеко не всегда, но переход от нелинейной задачи к более простой линейной задаче существенно упрощает задачу разработчикам аппаратуры.

В заключении сделан вывод, что существующие в настоящее время ФАР- или ЦФА-дефектоскопы не позволяют получать высококачественные изображения для широкого класса объектов контроля. Поэтому актуальной задачей является создание системы УЗК, формирующей изображения всей границы отражателя с высокой разрешающей способностью и малым уровнем шума.

Во второй главе предложено несколько алгоритмов восстановления изображения несплошностей, позволяющих определить их тип.

Рассмотрено решение уравнения (1) в Борновском приближении в многочастотном варианте, основанное на обобщенной теореме о проекциях для случая работы одноэлементного преобразователя в совмещённом режиме. Приведено решение уравнения (1) в Борновском приближении в спектральном пространстве для случая регистрации эхосигналов в режиме двойного сканирования, когда обрабатывается множество эхосигналов измеренных двумя одноэлементными преобразователями, перемещаемыми независимо друг от друга. Так

как предложенные решения уравнения (1), не позволяют учесть многократные отражения от неровных границ объекта контроля с учётом эффекта трансформации типа волны, то поиск решения был перенесён во временную область.

Под акустической схемой будет подразумеваться описание траектории лучей с учётом отражения ультразвуковых импульсов от дна и поверхности объекта контроля для заданного количества отражений при излучении звука m_i и при приёме m_r . Для обозначения акустических схем используется принцип: такое событие, как преломление на поверхности или отражение от поверхности, будем обозначать буквой T, а буквой B будем обозначать отражение от дна (Таблица 1). Тип волны после события будем обозначать буквами L (продольная), S (поперечная).

Один из распространённых методов оценки функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ в уравнении (1) заключается в корреляционной обработке измеренного поля $p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$. Решение прямой задачи, то есть расчёт рассеянного поля $p(\mathbf{r}_r, t) = p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$ по известным функциям $q(\mathbf{r}_i, t)$ и $\varepsilon(\mathbf{r})$, в формальном виде запишем следующим образом

$$p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) = P(\varepsilon(\mathbf{r}), q(\mathbf{r}_i, t)). \quad (3)$$

Помещая точечный отражатель в произвольную точку \mathbf{r}_i ОВИ, то есть, полагая $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$, можно оценить вид функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ по корреляционной формуле

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i) = \int \int \int_{S_r, S_i, S} p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i, t) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i dt, \quad (4)$$

$$G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i, t) = P(\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i), q(\mathbf{r}_i, t)).$$

Задача восстановления изображения несплошностей сводится к многократному решению прямой задачи для функции $\varepsilon(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)$ для заданной акустической схемы. Если при расчётах функцию $s(t)$ заменить на $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} – время нарастания импульса, и рассматривать только одну акустическую схему на прямом луче, то выражение (4) трансформируется в формулу описывающую метод C-SAFT

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i) = \int \int \int_{S_r, S_i} p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) \delta(t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i dt =$$

$$\int \int_{S_r, S_i} p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i,$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i)$ – время пробега импульса от излучателя до точки \mathbf{r}_i и к приёмнику для заданной акустической схемы.

Для определения в формуле (4) функции $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i, t)$ необходимо рассчитать поле в области приёма S_r для точечного отражателя в произвольной точке \mathbf{r}_i ОВИ при размещении излучателя в точке \mathbf{r}_i области S_i . Траекторию, по которой распространяется импульс при излучении, можно описать в виде последовательности векторов $\{\mathbf{r}_i\}_{j_i}^{m_i}$, а при приёме – в виде последовательности $\{\mathbf{r}_r\}_{j_r}^{m_r}$. Скорость распространения импульса вдоль трассы при излучении задаётся списком $\{c_i\}_{j_i}^{m_i}$, а при приёме – $\{c_r\}_{j_r}^{m_r}$. Первый элемент в этих списках – скорость

продольной волны $c_{w,l}$ в призме. Для расчёта функции $G_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, t)$ при излучении и функции $G_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, t)$ при приёме можно воспользоваться приближением геометрической оптики (Бреховских Л.М., Кравцев Ю.А., Орлов Ю.И.). Так как размеры элементов АР соизмеримы с длиной волны, то будем рассматривать их как точечные излучатели-приёмники с диаграммой направленности в призме $\Theta(\alpha)$, где α_i, α_r – угол луча к нормали пьезоэлемента излучателя или приёмника. С учётом этих приближений функции $G_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, t)$ и $G_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i, t)$ можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i, t) = A_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_{irm} + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) s(t - t_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i)), \quad \{c\} = \{c_i\}_{j_i}^{m_i}, \{\mathbf{r}\} = \{\mathbf{r}_i\}_{j_i}^{m_i}, \\ t_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{m_i+1} \frac{|\mathbf{r}_n|}{c_n}, \quad A_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) = \Theta(\alpha_i) D_{w,o}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{t,1}) \frac{\prod_{n=2}^{m_i} V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})}{R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})}, \\ G_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i, t) = A_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) s(t - t_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i)), \quad \{c\} = \{c_r\}_{j_r}^{m_r}, \{\mathbf{r}\} = \{\mathbf{r}_r\}_{j_r}^{m_r}, \\ t_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{m_r+1} \frac{|\mathbf{r}_n|}{c_n}, \quad A_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) = \Theta(\alpha_r) D_{o,w}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{r,1}) \frac{\prod_{n=2}^{m_r} V(\alpha_n; c_{r,n}, c_{r,n+1})}{R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $s(t)$ – форма излучённого импульса, $t_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i)$ и $t_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i)$ – времена пробега импульса по траектории излучения $\{\mathbf{r}_i\}$ и приёма $\{\mathbf{r}_r\}$, $D_{w,o}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{t,1})$ и $D_{o,w}(\alpha_{12}; c_{w,l}, c_{r,1})$ – коэффициенты прозрачности по давлению для угла преломления α_{12} при прохождении волны из призмы в объект контроля и обратно для заданной пары скоростей звука $(c_{w,l}, c_{t,1})$ или $(c_{w,l}, c_{r,1})$. Символом $V(\alpha_n; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ обозначен комплексный коэффициент отражения от границы объекта контроля. Функция расходимости лучей $R(\{\mathbf{r}\}, \{c\})$ определяет амплитуду импульса. Для расчёта функции $G_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i, t)$ в уравнении (4) можно воспользоваться формулой (6) и записать

$$G_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i, t) = B(\mathbf{r}_i) A_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) \cdot A_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) \cdot s(t - t_{j_i}^{m_i}(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i) - t_{j_r}^{m_r}(\mathbf{r}_r + \mathbf{r}_w, \mathbf{r}_i)), \quad (7)$$

где $B(\mathbf{r}_i)$ – коэффициент отражения от рассеивателя. Так как ни форма, ни акустические свойства несплошности неизвестны, то был предложен следующий приближённый вариант определения $B(\mathbf{r}_i)$. Рассчитав угол α_Δ между лучом, упавшим на предполагаемый рассеиватель в точке (x, z) , и отражённым лучом можно найти угол падения α_d на поверхность воображаемого рассеивателя. Коэффициент отражения будет рассчитываться в предположении, что рассеиватель имеет абсолютно мягкую границу. В формуле (6) при расчёте траекторий применялся принцип Ферма, позволяющий учитывать такие эффекты, как многократные отражения от неровных границ объекта контроля с учётом трансформации типов волн. Формула (5) обобщена на случай применения двух АР произвольно расположенных на поверхности объекта контроля.

При отражении от границы объекта контроля может происходить транс-

формация типа падающей волны. При m_i отражениях максимальное число возможных комбинаций списка скоростей $\{c_i\}_{j_i}^{m_i}$ равно 2^{m_i} и учёт всех возможных вариантов скоростей на трассе по формулам (4) или (5) значительно увеличивает время формирования изображения. Акустические схемы, которые имеют разные времена распространения импульса вдоль траектории, названы независимыми, а схемы, в которых амплитуды импульсов при многократных отражениях будут выше некоего порога, названы значимыми. Была разработана процедура расчёта независимых и значимых схем, позволяющая на два порядка сократить их список, который обозначим как L_{as} .

Для заданного списка акустических схем с помощью корреляционной обработки (4) можно получить множество парциальных изображений. Итоговое изображение можно рассчитывать как модуль когерентной суммы парциальных оценок $\hat{\varepsilon}_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)$ для полного списка акустических схем L_{full} или для списка L_{as} по формуле

$$I(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = |\hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w)|, \quad \hat{\varepsilon}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) = \sum_{m_i=0}^{M_i} \sum_{m_r=0}^{M_r} \sum_{j_i=0}^{2^{m_i+1}-1} \sum_{j_r=0}^{2^{m_r+1}-1} \hat{\varepsilon}_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \approx \sum_{L_{as}} \hat{\varepsilon}_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w). \quad (8)$$

Метод получения изображений по многим акустическим схемам по формуле (8) назван методом М-С-SAFT. Если АР перемещается N_w раз для разных значений вектора \mathbf{r}_w , определяющего положение призмы на объекте контроля, то добавив когерентное суммирование изображений, восстановленных для каждого положения АР, можно получить объединённое (итоговое) изображение отражателей с ещё более высокой фронтальной разрешающей способностью по формуле

$$I(\mathbf{r}_i) = \left| \sum_{w=1}^{N_w} \sum_{L_{as}} \hat{\varepsilon}_{j_i, j_r}^{m_i, m_r}(\mathbf{r}_i; \mathbf{r}_w) \right|. \quad (9)$$

Механическое сканирование АР, работающей в режиме двойного сканирования, названо режимом тройного сканирования, а метод восстановления изображения несплошности по формуле (9) назван методом TS-M-C-SAFT. На практике эффективно воспользоваться формулой (8) или (9) удаётся не всегда по причине того, что в объекте контроля не известны с необходимой точностью ни скорости продольной и поперечной волны, ни его толщина. Чем на большем расстоянии от АР нужно восстанавливать изображение и чем больше отражений от границ нужно учесть, тем с более высокой точностью должны быть известны скорости продольной и поперечной волны в объекте контроля. Проведенная оценка указывает на то, что погрешность измерения толщины объекта контроля и скорости звука в нём должна быть меньше 0.5%.

Поэтому формула (9) была модифицирована для логического сложения модулей парциальных изображений. Для каждого парциального изображения, число которых равно $N_{as} N_w$, вводится уровень отсечки равный его среднему значению плюс три дисперсии. Если в точке \mathbf{r}_i отличны от нуля значения не менее чем в N_l парциальных изображений, то в точку \mathbf{r}_i объединённого изобра-

жения записывается сумма модулей всех парциальных изображений. В противном случае итоговое значение в точке r , полагается равным нулю. Такой способ объединения назван логическим сложением модулей парциальных изображений.

Для проведения ультразвукового контроля предложено использовать несколько АР. Порядок работы в режиме двойного сканирования пьезоэлементов одной или двух АР, положение АР или двух АР, значение коэффициента усиления приёмника, параметры зондирующего импульса, временная апертура регистрации эхосигналов

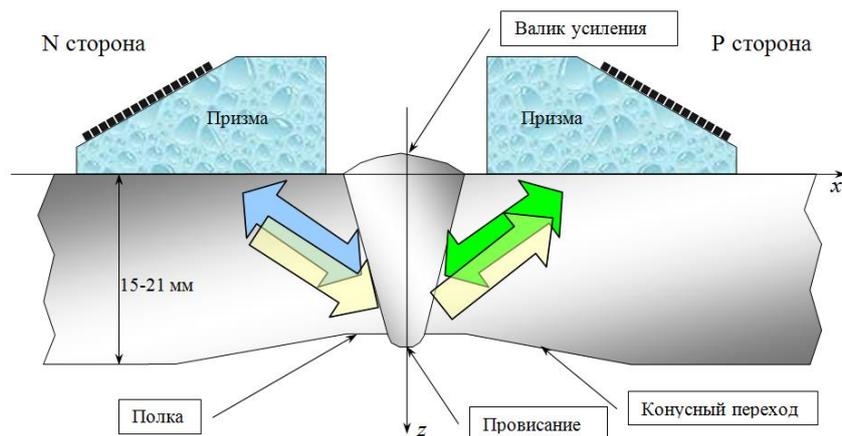


Рис. 1. Схема контроля объекта с неровным дном толщиной от 15 до 21 мм двумя АР

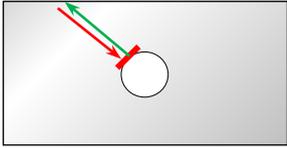
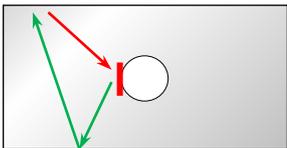
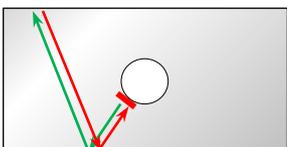
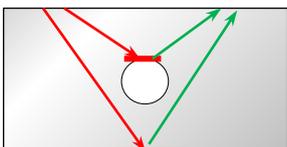
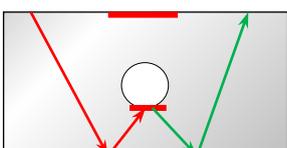
будет называться акустическим каналом. На Рис. 1 показана схема прозвучивания стыкового сварного соединения с использованием двух АР, работающих по трём акустическим каналам. Цикл измерений заключается в излучении и приеме АР с N-стороны (голубая

стрелка, N акустический канал) и с P-стороны (зелёная стрелка, P акустический канал) в излучении ультразвуковых импульсов АР с N-стороны и приеме АР с P-стороны (две желтых стрелки, NP акустический канал). Так как по каждому акустическому каналу изображения несплошностей восстанавливаются в одной и той же пространственной области, то формулу (9) можно обобщить на случай регистрации эхосигналов несколькими и, в частности, двумя АР. Для этого просто нужно добавить суммирование парциальных изображений по разным акустическим каналам.

Для оценки эффективности работы предложенных алгоритмов были выполнены специальные экспериментальные исследования. Измерения эхосигналов в режиме двойного сканирования проводились ЦФА-дефектоскопом АВ-ГУР-АРТ в образце с отверстием бокового сверления диаметром 2 мм для имитации объемного отражателя. ЦФА-дефектоскоп был настроен на измерения по трём акустическим каналам (Рис. 1). Список используемых акустических схем для каждого акустического канала приведён в Таблица 1. В графе «Поясняющий рисунок» красными линиями показаны восстановленные фрагменты границы отверстия бокового сверления, стрелкой красного цвета схематически показан путь распространения импульса при излучении, а стрелкой зелёного цвета – при приеме.

Таблица 1.

Список акустических схем для восстановления по трём акустическим каналам

	Акустический канал	Акустическая схема	Поясняющий рисунок	Акустический канал	Акустическая схема	Поясняющий рисунок
1. 2. 3. 4.	N-сторона (для P-стороны рисунки надо зеркально отразить)	T(S)-T(S)		NP-сторона	T(L)-T(S)	
		T(S)-TB(SS)			T(S)-T(L)	
		TB(SS)-TB(SS)			T(S)-T(S)	
					TB(SS)-TB(SS)	

На Рис. 2 в слева показано одно парциальное изображение, восстановленное по акустической схеме $T(S)-T(S)$ с N-стороны. Сделать вывод о форме отражателя сложно, так как удалось восстановить только часть границы отверстия бокового сверления. Изображение отражателя, полученное по формуле (9) по акустическим схемам согласно Таблица 1, позволяет восстановить практически полностью границу отверстия бокового сверления, по которому можно определить его радиус (изображение справа).

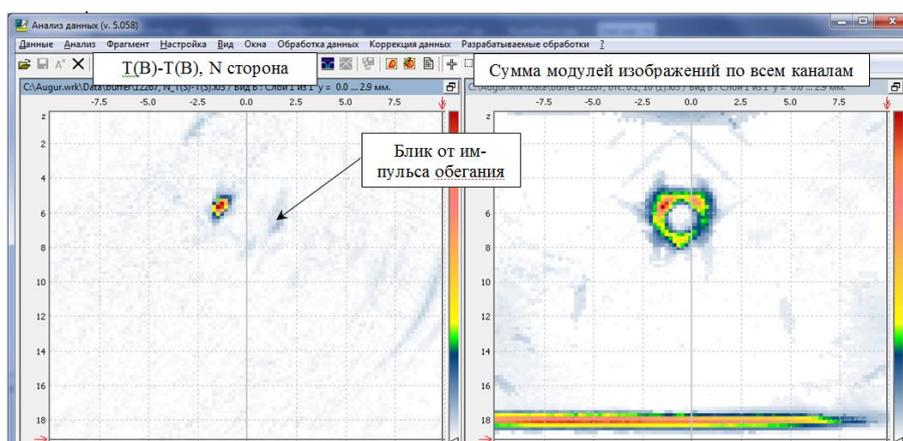


Рис. 2. Изображение границы отверстия бокового сверления диаметром 2 мм

Для повышения качества изображения границы отражателя целесообразно воспользоваться методами достижения **сверхразрешения эхосигналов**. Для обработки исходных эхосигналов был применён метод расщепления спектра совместно с методом построения его AR-модели. Это позволило расширить исходный

спектр сигнала с интервала [2.0, 7.5] МГц на интервал [0.1, 20.0] МГц. На Рис. 3 слева показано одно парциальное изображение, восстановленное по акустической схеме T(S)-T(S). Несмотря на повышение лучевой

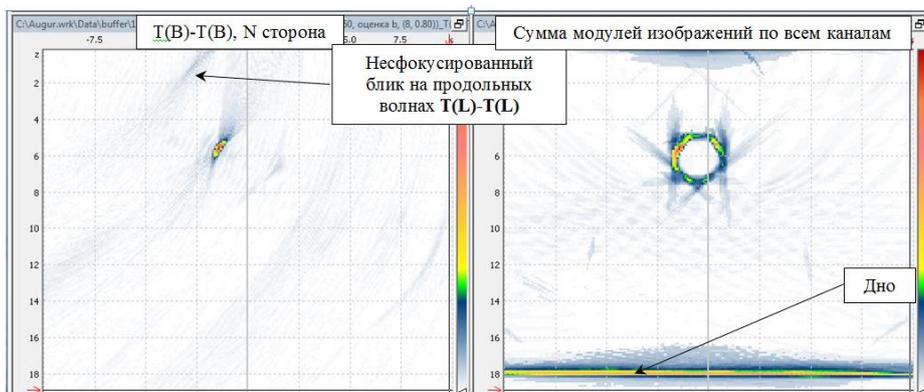


Рис. 3. Изображение границы отверстия диаметром 2 мм восстановленное по эхосигналам после обработки их методом расщепления спектра совместно с методом построения его AR-модели

разрешающей способности изображения примерно в три раза сделать вывод о форме отражателя по-прежнему сложно. А изображение, восстановленное по формуле (9) по акустическим схемам согласно Таблица 1, позволяет восстановить практически полностью границу отверстия бокового сверления с более высокой разрешающей способностью (справа).

Предложенный метод M-C-SAFT применялся для восстановления изображения модели трещины. На Рис. 4 приведена фотография стального образца с

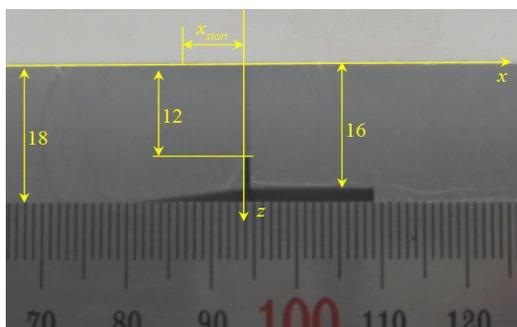


Рис. 4. Фотография образца с моделью трещины

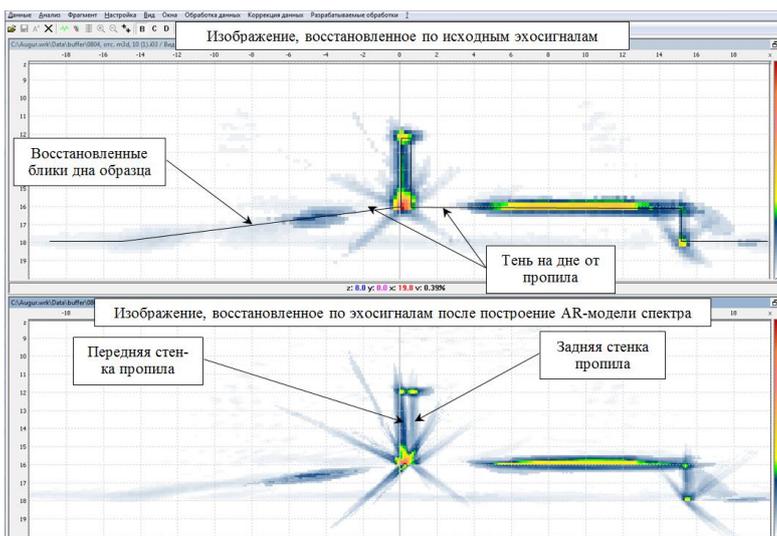


Рис. 5. Изображение модели придонной трещины высотой 4 мм в образце с неровным дном

моделью придонной трещины в виде паза шириной 0.7 мм. На Рис. 5 сверху показано изображение, полученное по формуле (9) по акустическим схемам со-

гласно Таблица 1. По данному изображению можно получить изображение дна и восстановить практически полностью границу пропила. В качестве дополнительного признака наличия трещины, растущей от дна объекта контроля, может служить «тень» от пропила на дне образца. Однако недостаточно высокая разрешающая способность не позволяет различить две вертикальные стенки пропила. После повышения разрешающей способности эхосигналов удалось разрешить переднюю и заднюю стенки пропила шириной 0.7 мм (Рис. 5, внизу). Параметры экстраполяции были такие же что и в предыдущем эксперименте.

Для контроля толстостенных объектов была разработана 3D-модификация алгоритма M-C-SAFT. Его эффективность продемонстрирована на примере восстановления изображения плоскодонного отверстия диаметром 2.5 мм (5 мм²) просверленного на глубине 195 мм под углом 55 градусов. Эхо-

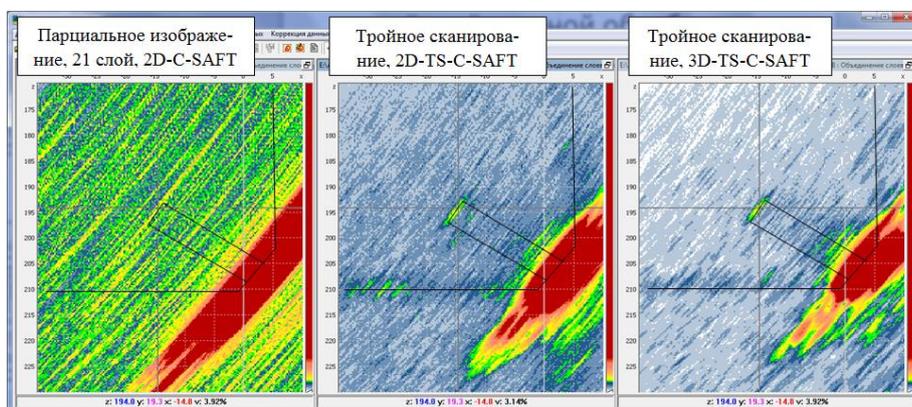


Рис. 6. Изображения В-типа плоскодонного отверстия площадью 5 мм², восстановленные разными алгоритмами

сигналы измерялись в режиме тройного сканирования, при перемещении АР с эффективной частотой 5 МГц по сорока положениям с шагом 2.5 мм. Вдоль оси у были проведены измерения в 29 слоях с шагом 1.5 мм. На Рис. 6 показаны

изображения В-типа плоскодонного отверстия диаметром 2.5 мм, объединённые по максимуму. На левой панели показано изображение, полученное для одного положения АР в плоскости, проходящей через плоскодонное отверстие. Обнаружить блик плоскодонного отверстия невозможно. При восстановлении изображения методом 2D-TS-C-SAFT в плоскости, проходящей через плоскодонное отверстие фронтальная разрешающая способность возросла более чем в четыре раза, а отношение сигнал/шум увеличилось более чем на 12 дБ, что позволило уверенно обнаружить блик плоскодонного отверстия. Изображение, восстановленное методом 3D-TS-C-SAFT, повышает уровень амплитуды блика над уровнем шума ещё примерно на 6 дБ.

В практике ультразвукового контроля встречаются объекты, состоящие из нескольких областей с разными акустическими свойствами. При расчёте лучевых траекторий в таких объектах проявляется недостаток программы, основанной на принципе Ферма, так как в процессе решения задачи минимизации может меняться количество точек пересечения траекторией границ областей с разными акустическими свойствами. Ещё одна особенность расчёта задержек

по принципу Ферма заключается в том, что в точку расположения несплошности импульс может попасть по нескольким траекториям. Поэтому для расчёта лучевых траекторий в объектах, состоящих из нескольких областей с разными акустическими свойствами, был разработан алгоритм, использующий не принцип Ферма, а принцип трассировки, то есть построение множества лучей из заданной точки излучения в некотором диапазоне углов с учётом многочисленных отражений и преломлений.

Для проверки его работоспособности были проведены модельные эксперименты в образце толщиной 25 мм с моделью объемного дефекта в виде сквозного отверстия бокового сверления диаметром 3 мм на глубине 16 мм. Эхосигналы измерялись в режиме двойного сканирования. Изображения восстанавливались по акустическим схемам с учётом четырёх касаний границ образца. На Рис. 7 слева показано парциальное изображение границы отверстия, а справа схематический ход лучей. Красной сплошной линией отмечен восстановленный участок границы отверстия. На Рис. 8 показана сумма модулей парциальных изображений, позволяющая предположить, что обнаружен объемный отражатель.

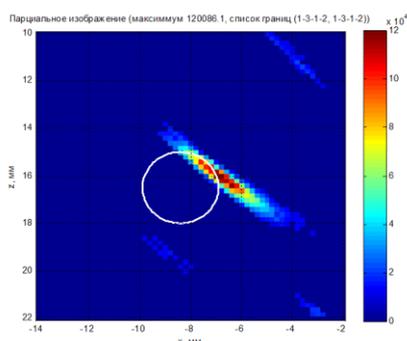


Рис. 7. Парциальное изображение границы отверстия (слева) и схематическое изображение лучей (справа)

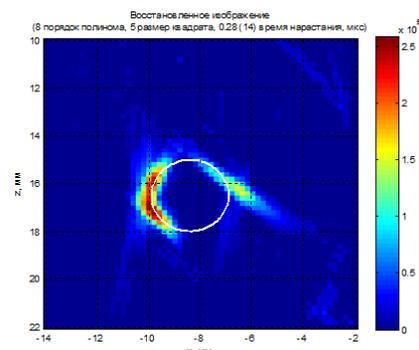


Рис. 8. Итоговое изображение границы отверстия

Далее в главе проведено сравнение возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов и сделаны следующие выводы.

1. Для автоматизированных систем УЗК целесообразнее использовать ЦФА-дефектоскопы, по следующим причинам:
 - а) ЦФА-дефектоскопы имеют более высокое фронтальное разрешение изображения несплошностей на всей ОВИ;
 - б) ЦФА-изображения, полученные при механическом сканировании АР, можно когерентно складывать. Это позволяет получить высокое и однородное фронтальное разрешение во всём визуализируемом объеме толстостенных изделий и повысить отношение сигнал/шум;
 - в) изображения, полученные методом С-SAFT, с использованием АР на призмах разной конфигурации и ориентации можно восстанавливать в

единой системе координат, что облегчает совместный анализ нескольких изображений;

г) метод C-SAFT модифицируется для трёхмерной обработки эхосигналов, что приводит к повышению фронтального разрешения в дополнительной плоскости AP;

д) ЦФА-изображения восстановленные по нескольким акустическим схемам по измеренным эхосигналам можно объединять в одно высококачественное изображение, что позволит надёжно автоматизировать процесс распознавания и образмеривания несплошностей. Решение этой проблемы особенно актуально для тонкостенных объектов контроля.

2. При разработке ЦФА-дефектоскопа можно обойтись количеством приёмно-передающих каналов в сочетании с электронным коммутатором, меньшим чем число элементов AP. При разработке ФАР-дефектоскопа количество приёмно-передающих каналов должно быть равно числу элементов AP.
3. ЦФА-дефектоскопы требуют более скоростных каналов передачи информации, в отличие от ФАР-дефектоскопов.
4. Восстановление изображений методом C-SAFT с алгоритмической точки зрения более перспективно, нежели аппаратная фокусировка на излучение и приём реализованная в ФАР-дефектоскопах.

Третья глава посвящена решению проблемы калибровки AP установленной на призму. Если реальные координаты центров пьезоэлементов AP не совпадают со значениями, которые были заданы для алгоритма восстановления изображения, то блики отражателей могут быть смещены от правильного положения на величину порядка миллиметра. Существенное влияние на точность фокусировки оказывают следующие параметры:

- координаты центра первого элемента AP, которые можно рассчитать по стреле a_w , определяемой по центральному лучу призмы, по расстоянию пробега центрального луча p_w в призме и по углу наклона β_w .
- скорость продольной волны в призме $c_{w,l}$.
- время пробега в протекторе AP t_{prot} , которое не указывается в паспорте и не всегда его значение удаётся узнать у производителя.
- угол наклона призмы β_w .
- время нарастания эхосигнала t_{max} .

Метод калибровки основан на достижении максимального совпадения по заданному критерию измеренных эхосигналов $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и их оценки $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$ при вариации таких параметров как стрела призмы a_w , расстояние пробега в призме p_w , скорость звука в призме $c_{w,l}$. Критерием максимального совпадения измеренных эхосигналов $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ и их оценки $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$ является достижение минимума целевой функции $D(\nu)$ в виде величины обратной функции корреляции

$$v = \arg \min_{v=(a_w, p_w, c_w)} \frac{1}{\left| \iint p(x,t) \hat{p}^*(x,t;v) dt dx \right|}, \quad (10)$$

где значок * означает операцию комплексного сопряжения. В качестве объекта отражающего ультразвуковые импульсы можно использовать отверстие бокового сверления, так как такой отражатель можно легко выполнить с высокой точностью, а расчёт сигналов $\hat{p}(\mathbf{r}, \mathbf{r}, t; v)$, отражённых от него, является классической задачей ультразвукового неразрушающего контроля (Голубев А.С.).

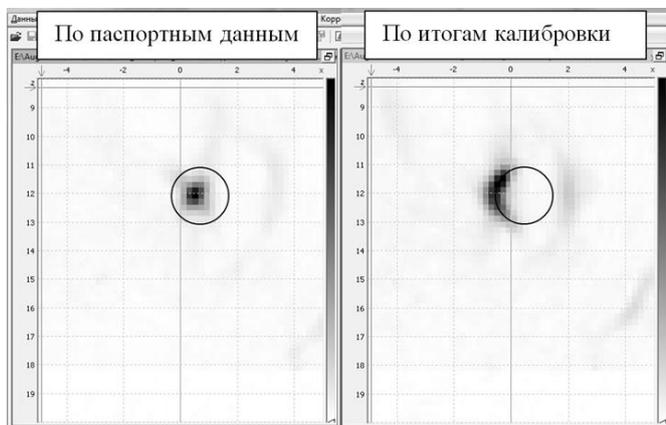


Рис. 9. Изображения границы отверстия бокового сверления

На Рис. 9 слева показано изображение, полученное при сложении модулей парциальных изображений для паспортных данных. Видно, что блик не совпадает с границей отверстия. После использования параметров, определённых при калибровке, удалось точнее восстановить изображение границы бокового сверления (Рис. 9, справа).

В четвёртой главе рассмотрены различные методы повышения разрешающей способности изображения, позволяющие повысить точность измерения размеров несплошностей.

Кроме корреляционного подхода (4) и (5) для получения изображения несплошностей применяются методы, которые сводят решение обратной задачи, то есть определения неизвестной величины ε по результатам измерений функции p при наличии шума n и известном операторе G , к решению системы линейных алгебраических уравнений

$$p = G\varepsilon + n. \quad (11)$$

Обратная задача (11) для УЗК является некорректной. Для решения таких задач Тихоновым А.Н. был разработан метод регуляризации, обосновывающий замену задачи в форме (11) на задачу оптимизации, устойчивой к малым изменениям входных данных p

$$\hat{\varepsilon}_\alpha = \arg \min_{\hat{\varepsilon} \in R^{N_{i,x} \times N_{i,z}}} \left(\chi^2(\hat{\varepsilon}) + \alpha \Omega(\hat{\varepsilon}) \right), \quad (12)$$

где $\chi^2(\hat{\varepsilon}) = \|G\hat{\varepsilon} - p\|^2$ - квадрат невязки решения, $\Omega(\hat{\varepsilon})$ - стабилизирующий функционал. В качестве стабилизирующего функционала $\Omega(\hat{\varepsilon})$ использовалась энтропия оценки функции $\hat{\varepsilon}$

$$H(\varepsilon) = - \sum_{i=1}^{N_{i,x} \times N_{i,z}} \varepsilon_i \ln \varepsilon_i = -\Omega(\varepsilon), \quad (13)$$

где $N_{i,x} \times N_{i,z}$ - число точек ОВИ (Freiden B.R., Shannon C.R., Kullback S., Байкова А.Т.). Для расчёта матрицы G можно воспользоваться формулами (6) и (7). Ре-

шение обратной задачи в форме (12) и (13) называется методом максимальной энтропии (ММЭ).

Для проверки работы ММЭ были проведены модельные эксперименты. Для регистрации эхосигналов от вершин шести моделей придонной трещины высотой 15 мм и раскрывом 0.05 мм в блоке из дюралюминия использовался прямой преобразователь с одним пьезоэлементом, имеющим ширину диаграммы направленности около 50 градусов и центральную частоту 2.5 МГц. На Рис. 10 слева представлено изображение шести вертикальных пропилов, восстановленное корреляционным методом по формуле (4), а справа – ММЭ по формулам (11) и (12). Изображение, полученное ММЭ, в сравнении с изображением, полученным корреляционным способом, имеет продольное разрешение выше

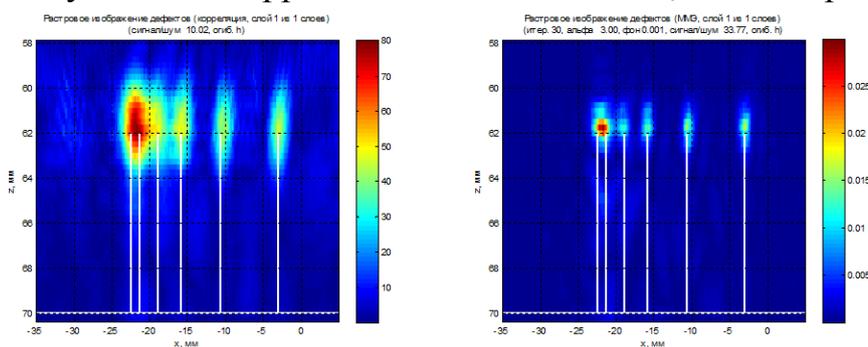


Рис. 10. Изображения вершин шести вертикальных пропилов, восстановленные корреляционным методом (слева) и ММЭ (справа)

примерно в 5 раз, фронтальное разрешение лучше примерно в три раза, а отношение сигнал/шум возросло на 10 дБ. Тем не менее, на изображении, полученном ММЭ, не удалось разрешить вершины пропилов, расположенных на расстоянии 1 мм друг от друга, что составляет 0.4 длины волны в образце. Изображения на Рис. 10 были получены по 100 случайно выбранным эхосигналам, что составляет примерно 39% из 256 измеренных эхосигналов.

Демонстрация эффективности работы ММЭ для повышения разрешающей способности проводилась на образце, который представлял собой фрагмент реального трубопровода Ду800 толщиной равной 38 мм с наплавкой толщиной около 5 мм (Рис. 11). В образце была сделана заварка из никельсодержащей стали ЦТ-36, обладающая высоким уровнем структурного шума. С одного края на границе «заварка-основной металл (перлит)» на глубинах 10, 20 и 30 мм были изготовлены три отверстия бокового сверления диаметром 2.2 мм. Из-за высокого затухания ультразвуковой волны в заварке эхосигналы регистрировались АР с эффективной частотой 2.25 МГц на призме с углом наклона 20 градусов. Измерения проводились в режиме тройного сканирования при сканировании по пяти положениям с шагом 2 мм из точки $x_{start} = -10.0$ мм по передней грани призмы. При восстановлении изображений отражателей методом TS-M-C-SAFT и при расчёте матрицы G использовалась одна акустическая схема **T(L)-T(L)**.

На Рис. 12 показано изображение границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленное методом **TS-M-C-SAFT**. На левой панели пока-

зано парциальное изображение для первого положения АР, а на правом при когерентном сложении парциальных изображений по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования. После когерентного суммирования парциальных изображений отношение сигнал/шум возросло примерно на 6 дБ, однако даже после этого самое глубокое отверстие уверенно не выявляется. Для восстановления изображений методом **TS-M-C-SAFT** использовались все 2 000 измеренных эхосигналов.

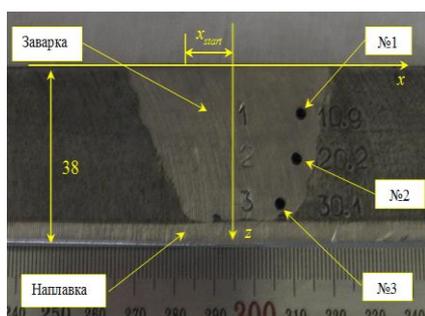


Рис. 11. Схема образца трубопровода Ду800 толщиной 38 мм с никельсодержащей заваркой

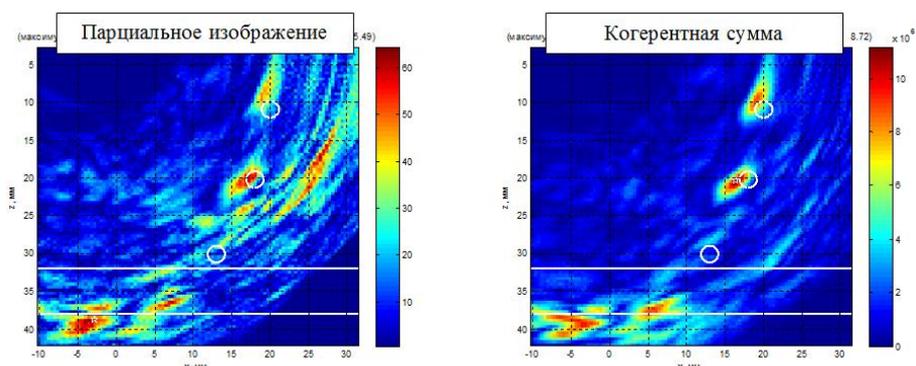


Рис. 12. Изображения границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленные методом **TS-M-C-SAFT**

На Рис. 13 представлены изображения границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленные корреляционным методом по формуле (4) и ММЭ по формулам (11) и (12). В сравнении с изображениями, полученными корреляционным методом, фронтальное и продольное разрешение изображений, полученных ММЭ, возросло примерно в два раза, а отношение сигнал/шум, увеличилось более чем на 40 дБ.

Изображения на Рис. 13 были получены по 150-ти случайно выбранным эхосигналам из 2 000 измеренных эхосигналов, что составляет примерно 8%. То есть ММЭ позволяет восстанавливать изображения по количеству эхосигналов на порядок меньшим, чем нужно для линейных методов обработки, да ещё измеренных с нарушением теоремы Котельникова.

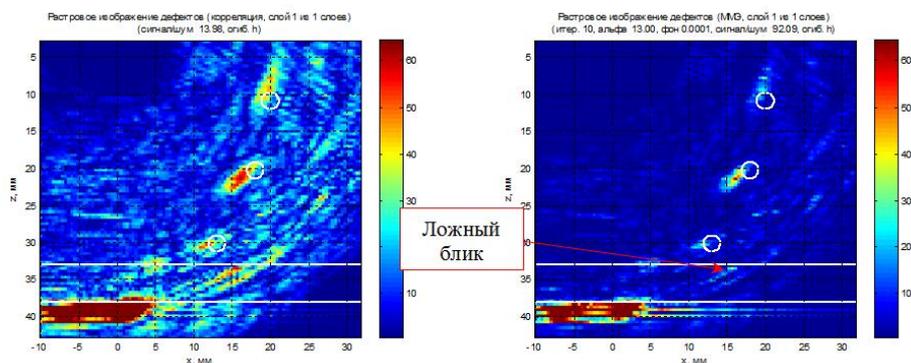


Рис. 13. Изображения границ отверстий бокового сверления и дна образца, восстановленные корреляционным методом (слева) и ММЭ (справа)

Далее в главе рассмотрены методы обработки эхосигналов для получения эффекта сверхразрешения. Для оценки спектра эхосигнала $s(t)$, состоя-

щего из набора острых пиков (как это имеет место при наличии в пределах временной апертуры нескольких импульсов), целесообразно воспользоваться AR-моделью (Box G.E., Jenkins G.M.) Пример работоспособности данного метода показан на Рис. 3 и Рис. 5.

Ещё один способ, применяемый для экстраполяции спектров эхосигналов, основан на итерационном алгоритме Гершберга-Папулиса (Gershberg R.W., Papoulis A.) для функций с ограничениями. Модификация этого метода, известная как метод адаптивной экстраполяции (Chamras D.), позволила в численном эксперименте улучшить спектральное разрешение сигналов в 2-3 раза. При реализации метода адаптивной экстраполяции используются операции быстрого преобразования Фурье, операции отсечки, что при достаточно быстрой сходимости делает его очень удобным в программной реализации.

Метод Гершберга-Папулиса легко модифицируется для экстраполяции спектров двумерных функций. На Рис. 14 представлен результат обработки двумерным алгоритмом Гершберга-Папулиса

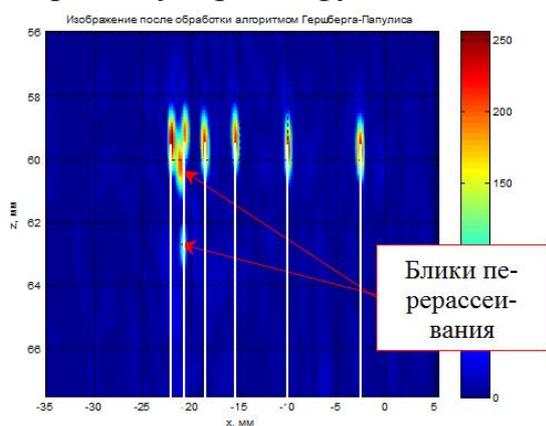


Рис. 14. Изображения вершин шести вертикальных пропилов после применения двумерного метода Гершберга-Папулиса

комплексного изображения вершин пропилов, восстановленного методом ПСП. Хорошо видно, что фронтальная разрешающая способность увеличилась настолько, что удалось разрешить вершины пропилов на расстоянии 1.0 мм друг от друга, в отличие от изображения на Рис. 10. Для применения метода Гершберга-Папулиса необходимо проводить измерения эхосигналов с шагом, удовлетворяющим теореме Котельникова, что не позволяет прореживать эхосигналы.

Контроль объектов с большим затуханием требует разработки специальных методов. Использование простых зондирующих сигналов длиной несколько периодов с одной стороны увеличивает отношение/сигнал шум восстановленного изображения отражателей, но с другой стороны приводит к ухудшению продольной разрешающей способности. Поэтому для повышения отношения сигнал/шум используют сложные сигналы, а для их сжатия можно воспользоваться ММЭ, который в отличие от линейных методов типа согласованной фильтрации, позволяет получить эффект сверхразрешения.

В модельном эксперименте обрабатывались эхосигналы от четырёх самых глубоких отверстий диаметром 2.0 мм в стандартном для ультразвуковой дефектоскопии образце СО-1. Измерения проводились пьезоэлектрическим преобразователем с резонансной частотой 4.0 МГц. Для получения простого сигнала на вход генератора подавался двуполярный импульс длиной 200 нс, а

для получения сложного сигнала преобразователь возбуждался последовательно из 32 двуполярных импульсов фазоманипулированных по M-последовательности. На левой панели Рис. 15 представлено изображение исходных эхосигналов, результата их сжатия согласованной фильтрацией и ММЭ. Длина импульса после сжатия ММЭ уменьшилась более чем в пять раз, а уровень шума и «боковых лепестков» уменьшился больше чем на 40 дБ.

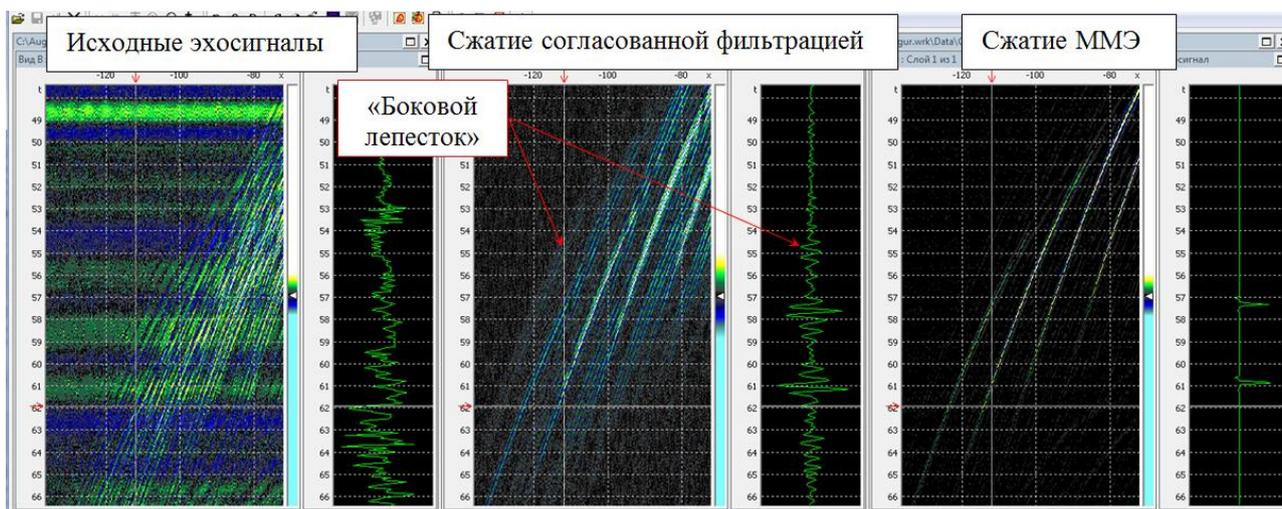


Рис. 15. Исходные эхосигналы, результат их сжатия согласованной фильтрацией и ММЭ

В пятой главе для повышения качества изображения несплошностей предложены методы определения геометрических и акустических свойств объекта контроля для корректного учёта в методах восстановления изображения.

При контроле объектов с неровной поверхностью предложено использовать в качестве иммерсионной среды кремнийорганический полимер (акваполимер), а изображения несплошностей восстанавливать в два этапа. На первом этапе необходимо определить форму поверхности объекта контроля, для чего был разработан алгоритм получения информации о профиле поверхности по измеренным эхосигналам с точностью около $\lambda/4$. На втором этапе восстанавливается изображение с учётом формы поверхности, согласно формуле (5).

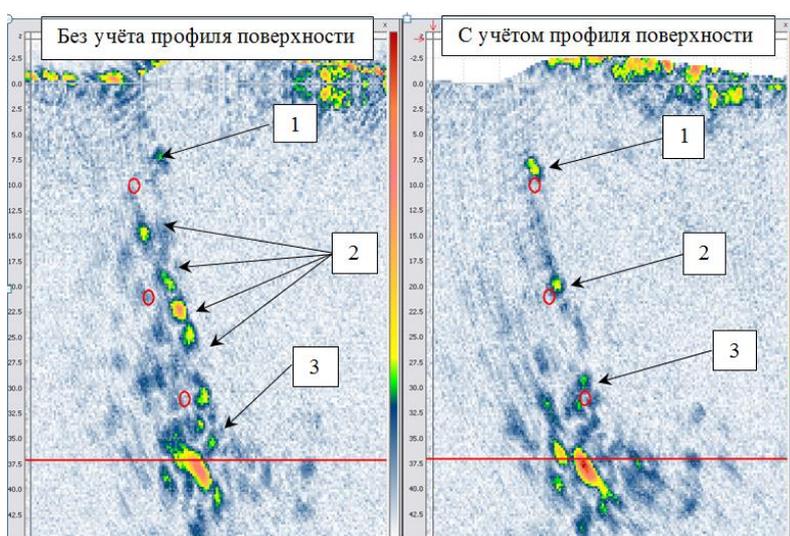


Рис. 16. Восстановление методом SAFT изображения отверстий бокового сверления в образце Ду800 без учёта профиля поверхности (слева) и с учётом (справа)

На Рис. 16 представлено изображение отверстий бокового сверле-

ния, восстановленное методом SAFT в образце Ду800 по эхосигналам, измеренным с применением «акваполимера» в качестве иммерсионной среды. Изображение дефекта 1 на рисунке слева сфокусировалось в виде блика с малой амплитудой и на другой глубине залегания. Изображение дефекта 2 на рисунке слева расфокусировалось на четыре отдельных блика. Изображение дефекта 3 смещено вдоль поверхности объекта контроля. На изображение линиями красного цвета наброшена маска образца. Изображение дефектов на Рис. 16 полученное с учётом профиля поверхности, свидетельствует о том, что «акваполимер» пригоден для проведения контроля, а алгоритм учёта профиля поверхности работает для варианта иммерсионной среды.

Эффективность применения метода M-C-SAFT зависит от точности задания скорости звука и толщины объекта контроля. Поэтому был разработан метод по одновременному определению скорости звука и толщины объекта контроля с плоскопараллельными границами с относительной погрешностью не менее 0.5% с использованием двух AP, работающих в режиме двойного сканирования. Значения вектора $\nu = \{c_s, h\}$, при котором достигается минимальная разница между оценкой эхосигналов $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$ и экспериментальными данными $p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)$ по формуле

$$\hat{\nu} = \arg \min (\chi^2(\hat{\nu})), \quad \text{где } \chi^2(\hat{\nu}) = \|\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu) - p(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t)\|, \quad (14)$$

и являются решением задачи. Дополнив список $\nu = \{c_l, c_s, h\}$ продольной скоростью звука можно решать задачу по одновременному определению толщины объекта контроля и скоростей звука в нём. В число переменных можно включить угол наклона дна, сняв требование параллельности границ объекта контроля. Даны рекомендации по выбору акустических схем и количеству элементов антенной решётки. Эксперименты показали, что, если для оценки эхосигналов $\hat{p}(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, t; \nu)$ использовать акустические схемы с однократным и трёхкратным отражением от поверхности и дна объекта контроля, то относительная погрешность измерения скорости звука и толщины будет меньше 0.5%. Так как метод (14) по сути своей является интерференционным, то в перспективе следует рассчитывать на достижение точности измерений не менее 0.1%.

В шестой главе рассмотрены методы повышения отношения сигнал/шум изображения несплошностей в объектах с повышенным уровнем шума.

Разработанные когерентные алгоритмы (8) и (9) являются оптимальными для случая белого аддитивного пространственно-временного шума. Обработка эхосигналов, измеренных в режиме тройного сканирования, позволяет ещё больше повысить отношение сигнал/шум за счёт когерентного накопления полезного сигнала. Это было продемонстрировано при измерениях на образце, представляющим собой фрагмент реального трубопровода Ду800 (Рис. 11). Регистрация сигналов от дефектов проводилась в режиме тройного сканирования

с использованием АР с эффективной частотой 2.25 МГц и установленной на призму с углом наклона 20 градусов. На Рис. 17 слева показано изображение

отверстий бокового сверления, полученное ФАР-дефектоскопом, а справа – ЦФА-дефектоскопом в режиме тройного сканирования. По всем параметрам, характеризующим качество изображения, ЦФА-изображение лучше, чем ФАР-изображение. Фрон-

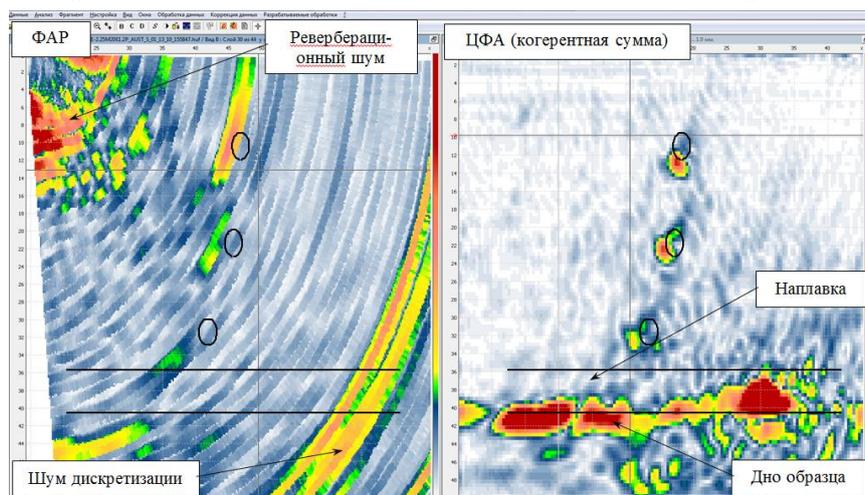


Рис. 17. Результат контроля образца с ремонтными никельсодержащими заварками трубопровода Ду800

тальная разрешающая способность ЦФА-изображения более чем в два раза выше, уровень реверберационного шума и шум, связанный с достаточно грубым шагом элементов АР, уменьшился практически на 18 дБ, отношение сигнал/шум возросло более чем на 12 дБ.

Для повышения отношения сигнал/шум была разработана **технология прореженных антенных решёток (ПРАР)**. Увеличение размеров пространственной апертуры АР приводит к уменьшению корреляции эхосигналов, измеренных в режиме двойного сканирования. Это уменьшает уровень шума и амплитуды ложных бликов. Увеличение размеров антенной решётки приводит, во-первых, к увеличению количества элементов АР до 100 и более. Во-вторых, традиционные конструкции АР при увеличении её размеров приводят к изготовлению призм огромных размеров, в которых первые элементы АР расположены практически у поверхности объекта контроля, а последние могут быть удалены от поверхности на расстояние более чем 50 мм. Если сделать АР конструкции как на Рис. 18, то упомянутые выше проблемы будут сняты. Однако большая апертура и малое количество элементов приводит к тому, что расстояние между элементами будет много больше длины волны, и в изображении появятся ложные блики большой амплитуды, для устранения которых нужно проводить измерения ПРАР в режиме тройного сканирования. Когерентно складывая все парциальные изображения согласно (8), можно получить итоговое изображение с низким уровнем шума. Для проведения измерений был изготовлен пьезопреобразователь для работы на продольных волнах на частоте 2.5 МГц с шестью пьезопластинами $\delta x=5.5$ мм (Рис. 18). Для эффективного когерентного сложения парциальных изображений была разработана специальная процедура калибровки ПРАР.

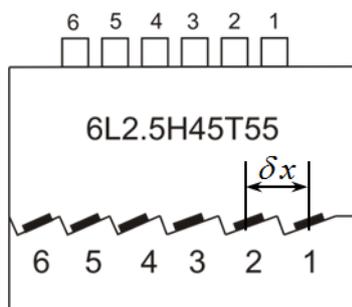


Рис. 18. Эскиз ПРАР

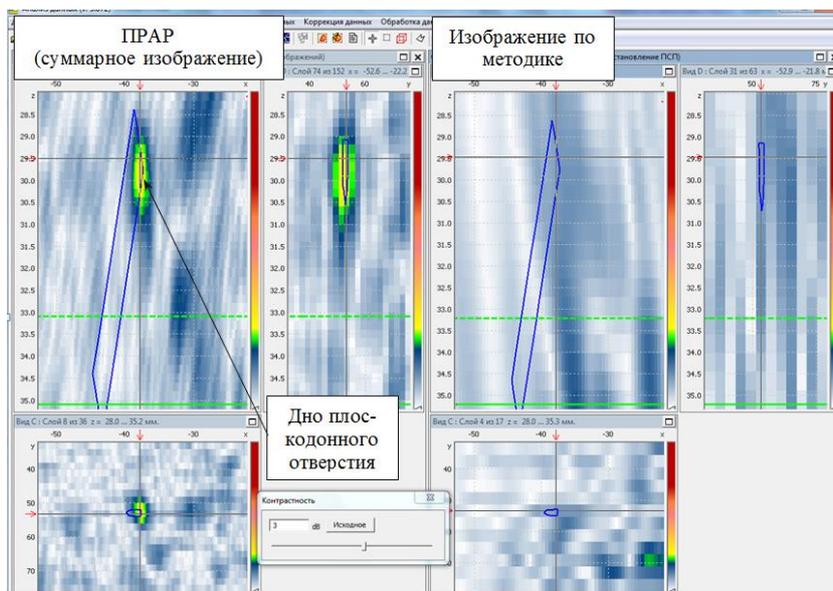


Рис. 19. Изображения плоскодонного отверстия за ремонтной заваркой

Эффективность такого подхода подтверждена контролем аустенитной ремонтной заварки в образце трубопровода Ду800. На Рис. 19 представлены изображения дна плоскодонного отверстия диаметром 1,6 мм (площадь 2 мм²), полученные по технологии ПРАР и по стандартной методике с использованием одноэлементного преобразователя с частотой 1.8 МГц, углом ввода 45 градусов при восстановлении изображения методом 2D-ПСП. На изображении слева виден блик, соответствующий дну плоскодонного отверстия. Его амплитуда превышает уровень шума более чем на 6 дБ. На изображении справа блик, соответствующий плоскодонному отверстию, идентифицировать невозможно.

Для повышения отношения сигнал/шум в аустенитных материалах применяется метод расщепления спектров (Vilgutay N. M., Newhouse V.L., Furgason, E.S.), который в диссертации был развит следующим образом. Если каждый из M парциальных спектров $S_n^m(f)$ перед выполнением обратного преобразования Фурье, экстраполировать с интервала (f_{\min}^m, f_{\max}^m) на интервал (f_{\min}^e, f_{\max}^e) , где $f_{\min}^e < f_{\min}^m$ и $f_{\max}^m < f_{\max}^e$, то после экстраполяции спектра сигнала будет получено M вариантов полезного сигнала $s_{AR}^m(t)$ в виде δ -подобных функций с неизменными временами задержек, и столько же вариантов шумового сигнала $n_{AR}^m(t)$, в котором δ -подобные функции будут случайным образом разбросаны по всей временной апертуре. Экстраполяция спектров на больший интервал (f_{\min}^e, f_{\max}^e) , приведет к уменьшению радиуса корреляции шума $n_{AR}^m(t)$, приблизив его к белому шуму, в результате чего эффект когерентного накопления будет эффективнее. Кроме того уменьшение длины зондирующего импульса приводит к снижению уровня структурного шума (Ермолов И.Н.). Применение такого подхода позволяет повысить отношение сигнал/шум на величину 6 дБ.

При контроле многослойных материалов множество перерассеянных эхосигналов порождает ложные блики в изображении, восстановленном мето-

дом ПСП или C-SAFT. Для уменьшения амплитуды ложных бликов обратная задача рассеяния в многочастотном варианте с учетом эффекта перерассеивания между рассеивателями может быть решена методом наименьших квадратов с применением регуляризации Тихонова, когда в качестве стабилизирующего функционала используется энтропия оценки измеренного поля. Так как излучение, рассеяние и регистрация ультразвукового поля можно описывать операциями с матрицами и векторами, то уравнение (1), которое учитывает эффект перерассеивания, можно записать в матричной форме.

Для упрощения задачи рассматривался одномерный случай (Рис. 20). Функция Грина без учета постоянного множителя будет иметь простейший вид $g(x, f) = e^{-ikx}$. Решение прямой задачи рассеивания в матричной (или операторной) форме можно представить в виде операторного ряда Борна-Неймана

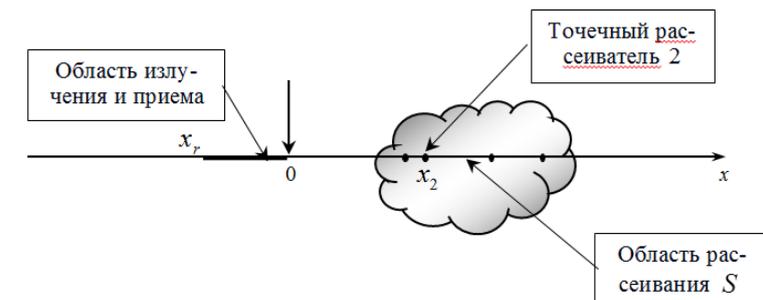


Рис. 20. Схема измерения рассеянного поля в совмещенном режиме для одномерного случая

$$p_r = Q \left[E + \sum_{m=1}^{\infty} (R\varepsilon)^m \right] \varepsilon E p_0, \quad (15)$$

где R – матрица, описывающая процесс перерассеивания, Q – матрица, описывающая распространение поля в область приёма, E – единичная матрица, p_0 – вектор, описывающий падающее поле в контролируемой области. По предложенному алгоритму решения прямой задачи (11) можно решить обратную задачу с помощью метода наименьших квадратов, когда в качестве критерия качества восстанавливаемого изображения выбирается квадрат невязки решения.

На Рис. 21 слева показан рассчитанный при моделировании трехкратного перерассеивания эхосигнал в частотном диапазоне $f_{\min} = 1.5$ и $f_{\max} = 5.5$ МГц

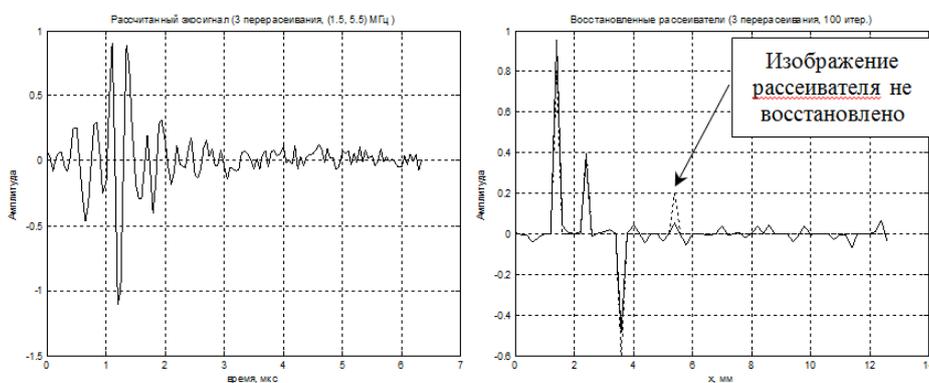


Рис. 21. Эхосигналы (слева) и изображение

восстановленных рассеивателей (справа). Изображение четырех точечных рассеивателей, полученное методом

при добавлении белого шума из диапазона 10% от максимального значения эхосигнала. Малая разрешающая способность не позволяет определить количество отражателей.

максимальной энтропии после 100 итераций, показано на Рис. 21 справа сплошной линией, а идеальное изображение – точечной линией. По данному изображению можно уверенно обнаружить три точечных рассеивателя и определить их амплитуду с ошибкой менее 20%.

В седьмой главе изложена концепция построения системы **АВГУР-АРТ**, приведено описание её аппаратного и программного обеспечения, приведено описание методик контроля СС трубопроводов Ду300 и Ду800 реактора РБМК и методики контроля СС колец ротора типа РВСД К-1200.

При разработке системы нового поколения использовался опыт создания систем серии «АВГУР» предыдущих поколений. Входящий в состав системы модули, блоки или устройства имеют модульную стандартизированную структуру, что позволяет разрабатывать аппаратуру для разных схем контроля в предельно сжатые сроки из-за максимально возможного их сопряжения. Система **АВГУР-АРТ** состоит из:

- управляющего компьютера осуществляющего конфигурирование системы для проведения контроля по конкретной методике, работу с вычислительным сервером и подготовку протокола контроля;
- вычислительного сервера, предназначенного для обработки эхосигналов с целью восстановления изображения отражателей, для обработки изображений, для операций распознавания и иной ресурсоёмкой обработки информации;
- устройства сканирования для механического перемещения ультразвуковых преобразователей по поверхности объекта контроля, установленных в прижимы.

Устройство сканирования должно обмениваться информацией с блоком сбора эхосигналов с целью синхронизации процессов излучения и приёма эхосигналов. В состав устройства сканирования может входить блок подачи контактной жидкости и блок определения формы поверхности. На Рис. 22 и Рис. 23 показаны фотографии некоторых разработанных и изготовленных сканирующих устройств для системы АВГУР-АРТ.

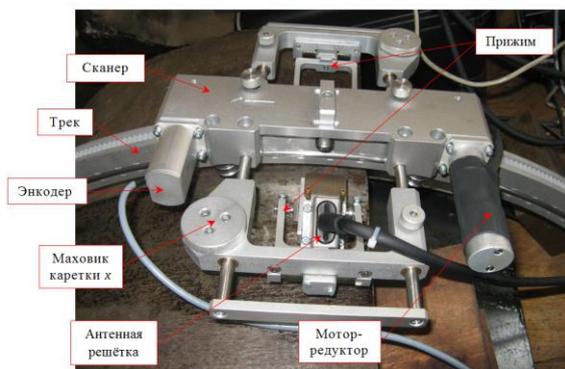


Рис. 22. Устройство сканирования трубопровода Ду800

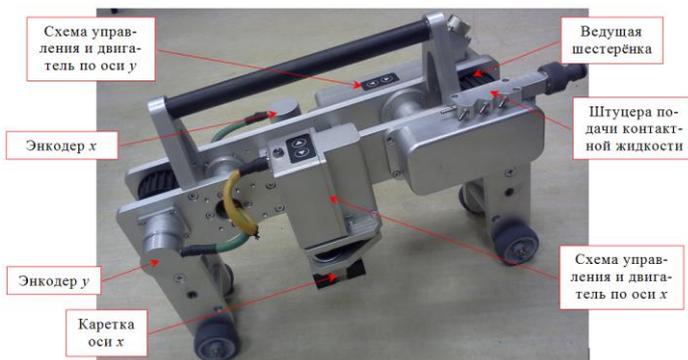


Рис. 23. Устройство сканирования СС колец ротора РВСД К-1200

Блок сбора эхосигналов состоит из бортового компьютера, модуля связи с устройством сканирования, модуля связи с управляющим компьютером и ультразвуковых модулей. В блок сбора эхосигналов может входить модуль формирования изображения для обработки эхосигналов с целью максимально быстрого восстановления изображения. При наличии модуля формирования изображения нет необходимости передавать огромный объем эхосигналов, который может достигать размера десятка Гбайт, на управляющий компьютер, и можно ограничиться только передачей восстановленных изображений, объём которых на два порядка меньше. Бортовой компьютер после конфигурирования от управляющего компьютера может автономно проводить УЗК, если не возникает нештатных ситуаций.

Ультразвуковые модули могут быть следующих типов:

- модуль высоковольтный для работы с обычными ультразвуковыми преобразователями;
- модуль ФАР для работы с антенными решётками и матрицами;
- модуль ЦФА для работы с антенными решётками и матрицами.

В блок сбора эхосигналов может входить до восьми ультразвуковых модулей. Модули должны быть способны излучать сложные сигналы в виде фазоманипулированных сигналов по Баркеру длиной 13; фазоманипулированных сигналов по М-последовательности длиной 16, 32, 64 и 128; частотно модулированных сигналов с диапазоном качания частоты от 1 до 10 МГц.

Модуль связи с устройством сканирования должен формировать импульсы для синхронизации с работой сканирующего устройства, вырабатывать сигналы для управления шаговыми и иными двигателями, реагировать на сигналы от концевых датчиков устройства сканирования и энкодеров, управлять устройством подачи контактной жидкости.

Модуль формирования изображения предназначен для быстрого суммирования выборок эхосигналов согласно формуле (6). Этот модуль может быть сделан на основе стандартных плат поддерживающих технологию NVIDIA CUDA™. Возможна его реализация на основе применения микросхем типа ПЛИС.

Далее в главе изложена методика УЗК СС трубопровода Ду300 реактора РБМК. Наличие широкого валика усиления и требование контроля всей толщины сварного соединения привело к необходимости использования метода М-С-SAFT. Контроль проводится двумя антенными решётками по N-, P- и NP акустическим каналам, как показано на Рис. 1. Антенные решётки синхронно перемещаются вдоль сварного соединения и регистрируют эхосигналы с шагом 2.0 мм. При проведении приёмочных испытаний на ЛАЭС были проконтролированы катушки трубопровода Ду300, вырезанные по итогам контроля системой АВГУР 5.2, которые были подвергнуты металлографическому контролю.

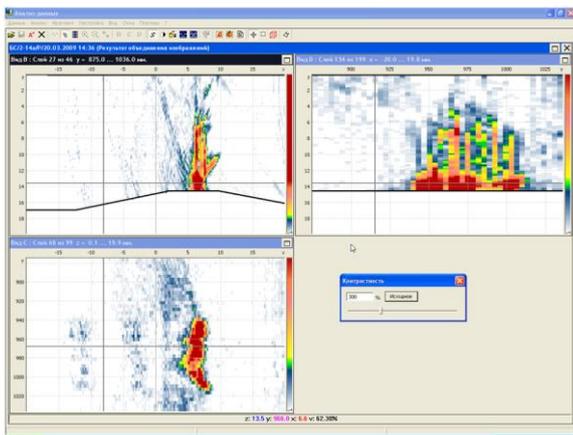


Рис. 24. Результат объединения шести парциальных изображений

По изображениям, восстановленным по эхосигналам NP-канала по акустическим схемам $L_{as} = \{T(S)-T(L), T(L)-T(S), T(S)-T(S)\}$, определяется профиль дна $h(x)$, который учитывается при восстановлении парциальных изображений по шести акустическим схемам на поперечных волнах. Объединение парциальных изображений (Рис. 24) позволяет сформировать итоговое изображение отражателя, которое обладает высокой контрастностью, что позволяет автоматизировать процесс образмеривания. Информация об отражателе записывается в базу данных, в которой хранятся результаты контроля всеми системами АВГУР предыдущих поколений. После этого формируется протокол контроля. Сравнение профилей двух трещин, восстановленных по объединённому изображению и по результатам МГИ, приведены на Рис. 25. Обработка результатов определения профилей всех трещин позволяет оценить среднюю ошибку измерения максимальной высоты трещины как равной 1.0 мм, а максимальную ошибку как 1.5 мм.

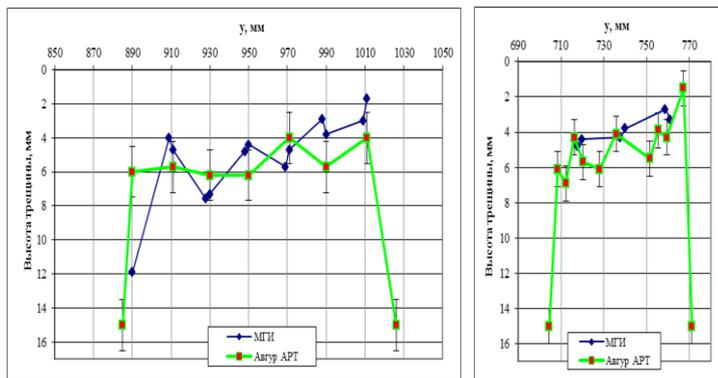


Рис. 25. Сравнение профилей трещин, полученных по объединённому изображению и по результатам МГИ

При разработке методики контроля СС трубопроводов Ду800 нужно было учесть наличие наплавки, имеющей большой коэффициент затухания. Это затруднило применение метода M-C-SAFT, использующего акустические схемы с учётом многократного отражения от границ объекта контроля. Поэтому были разработаны методические приёмы для получения информации о типе несплошности. Один из них основан на том, что коэффициент отражения поперечной волны в продольную волну при нормальном падении на гладкую границу близок к нулю. Амплитуда бликов объёмных дефектов, восстановленных по акустической схеме $T(S)-T(S)$ или схеме $T(L)-T(L)$, должна уменьшиться более чем на 6 дБ при использовании схемы $T(S)-T(L)$ или $T(L)-T(S)$. При отражении от краёв трещин амплитуда бликов не должна сильно меняться при использовании схемы $T(S)-T(L)$ или $T(L)-T(S)$.

На Рис. 26 приведены «объединённые» по максимуму изображения D-типа, полученные по схеме $T(S)-T(S)$ (слева) и схеме $T(S)-T(L)$ (справа) методом 3D-C-SAFT. На левом изображении имеется множество бликов, соответствующих, отражателями, а вот на правом изображении бликов значительно

меньше, и можно выделить две подозрительные области, отмеченные овалами красного цвета, которые могут содержать несплошности с острыми краями.

На Рис. 27 показаны изображения D-типа усталостной трещины длиной около 55 мм и высотой около 7 мм, восстановленные по акустическим схемам T(S)-T(S) (слева) и T(S)-TB(LL) (справа). Использование акустической схемы T(S)-TB(LL) позволило уверенно восстановить блики всей поверхности трещины, в то время как на изображении, восстановленном по схеме T(S)-T(S), удалось восстановить только блики краёв трещины.

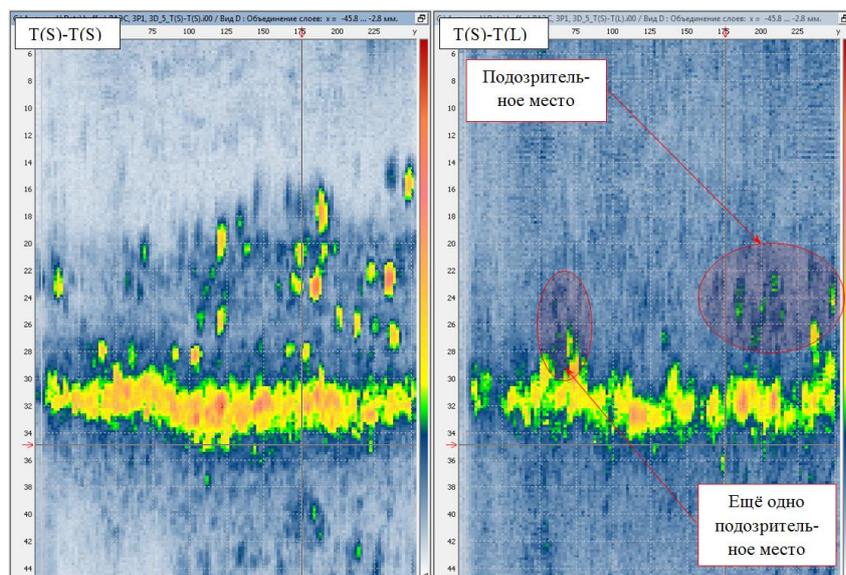


Рис. 26. Изображения несплошностей в сварном соединении Ду800, восстановленные по акустической схеме T(S)-T(S) и T(S)-T(L)

На Рис. 28 показаны изображения C-типа, полученные методом C-SAFT по схеме T(S)-T(S), на котором хорошо видна акустическая тень от усталостной трещины, что может служить дополнительным признаком типа обнаружения трещины.

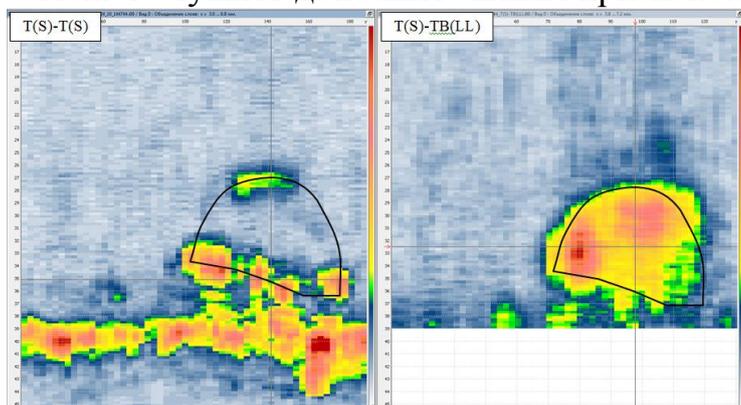


Рис. 27. Изображения D-типа усталостной трещины высотой около 7 мм

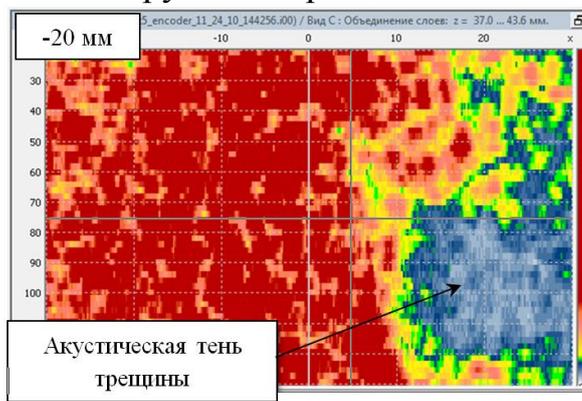


Рис. 28. Акустическая тень от усталостной трещины высотой 7 мм

Далее в главе приведён ещё один пример разработки методики контроля СС роторов РВСД К-1200 для ОАО «Ленинградский металлический завод» в рамках договора поставки системы. Чтобы согласно техническому заданию получить фронтальное разрешение на глубинах порядка 200 мм было меньше 3 мм, для восстановления изображения пришлось применить метод 3D-TS-M-C-SAFT. Для получения дополнительной информации о типе несплошности использовался приём, разработанный для методики контроля СС трубопро-

вода Ду800. На Рис. 29 показаны изображения, полученные методом 3D-TS-M-C-SAFT по акустическим схемам $T(S)-T(S)$, $T(S)-T(L)$ и $T(L)-T(L)$, при контроле СС ротора РВСД К-1200. Изображения представлены в режиме показа всех слоёв по максимуму. Видно, что на изображении $T(S)-T(L)$ амплитуды бликов на глубине около 90 мм имеют маленькую амплитуду, что служит указанием на отсутствие трещин в контролируемом объеме СС.

В конце главы приведена таблица, в которой указана связь между разработанными алгоритмами и четырьмя признаками высококачественного изображения. С её помощью можно по требованиям разрабатываемой методики подобрать методы регистрации и обработки эхосигналов.

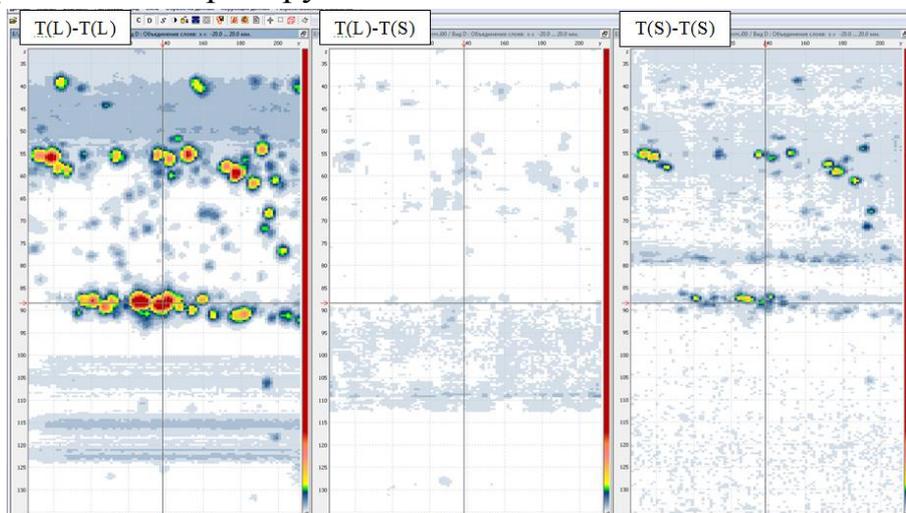


Рис. 29. Определение типа несплошностей

Основные выводы и результаты работы

1. Разработаны и внедрены алгоритмы получения высококачественного изображения несплошностей:
 - а) с восстановлением всей границы отражателя;
 - б) с фронтальным разрешением в основной плоскости порядка длины волны в объекте контроля;
 - в) с фронтальным разрешением в основной и дополнительной плоскости не зависящей от глубины;
 - г) с малой амплитудой ложных бликов и высоким отношением сигнал/шум.
 Анализ изображений позволяет оператору надёжнее определять тип несплошности и точнее измерять её размеры.
2. Для повышения качества изображения применены нелинейные методы обработки:
 - а) построение AR-модели спектров эхосигналов;
 - б) экстраполяция спектров изображений методом Гершберга-Папулиса;
 - в) метод максимальной энтропии для обработки эхосигналов.
 Это позволило более чем в два раза повысить продольную и фронтальную разрешающие способности изображения.
3. Предложены методы повышения отношения сигнал/шум в материалах со структурным шумом, повышающие отношения сигнал/шум более чем на 9 дБ в сравнении с системой АВГУР предыдущего поколения.

4. Предложен метод получения изображений несплошностей с учётом многократного перерасеивания между ними, который позволяет уменьшить более чем на 6 дБ амплитуду ложных бликов.
5. Восстанавливаемые высококачественные изображения несплошностей позволяют автоматизировать процесс анализа изображения и формирования протокола контроля, что уменьшит влияние человеческого фактора на процесс контроля.
6. Создана система нового поколения АВГУР-АРТ для проведения эксплуатационного контроля. Система прошла метрологическую аттестацию.
7. Системы АВГУР-АРТ внедрены на предприятиях:
 - а) Ленинградская АЭС (контроль швов трубопроводов диаметром 300 и 800 мм);
 - б) Кольская АЭС (контроль угловых толстостенных и композитных СС);
 - в) Балаковская АЭС (контроль швов диаметром 900 мм и аустенитных СС диаметром 426 мм);
 - г) ЗАО «Теплосетьстрой» (контроль продольных швов труб диаметром от 720 до 1420 мм);
 - д) ЗАО «Ленинградский металлический завод» (контроль СС роторов);
 - е) ООО «Техрегион» (контроль СС толстостенных объектов).
8. Разработаны и аттестованы методики для проведения эксплуатационного УЗК на объектах атомной энергетики России:
 - а) методика ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ2.ТМ2/2-К-13;
 - б) методика ультразвукового контроля сварных соединений приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000 с использованием технологии фазированных антенных решёток, МФАР.АЭ12.П1Б/8-К-12;
 - в) методика ультразвукового контроля композитных сварных соединений приварки патрубков уравнительных трубопроводов, приварки патрубков впрыска компенсаторов давления и приварки патрубков САОЗ корпуса реактора ВВЭР-440 к переходной втулке с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ11.ПОМ/26-К-11;
 - г) методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых аустенитных сварных соединений трубопроводов впрыска и трубопроводов сброса компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением антенных решёток, МФАР.АЭ12.Т2М/2-К-11;
 - д) методика автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых разнородных (композитных) сварных соединений дыхательных трубопрово-

- дов 426x40 компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением технологии фазированных решёток, МФАР.АЭ12.Т0С/4-К-11;
- е) методика автоматизированного ультразвукового контроля разнородных (композитных) сварных соединений патрубков сброса пара и впрыска с патрубками компенсатора давления реакторов ВВЭР-1000 с применением антенных решёток, МФАР.АЭ12.П0С/9-К-11.

Список основных публикаций по теме диссертации

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях.

1. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов: монография / Е.Г. Базулин [и др.]. М.: Машиностроение, 2008. 368 с. (29.7 п.л./ 3.3 п.л.)
2. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Визуализация неоднородностей методом обобщенной многочастотной акустической голографии // Акуст. журн.. 1992. №3. С. 396-401. (0.4 п.л./ 0.15 п.л.)
3. Базулин Е.Г. Повышение продольного разрешения акустических систем визуализации неоднородностей при экстраполяции спектров эхоимпульсов // Акуст. журн.. 1993. №1. С. 19-24. (0.4 п.л.)
4. Базулин Е.Г. Получение изображения рассеивателей с продольным сверхразрешением по многочастотным цифровым акустическим голограммам при построении AR-модели спектров эхосигналов // Акуст. журн.. 1993. №2. С. 213-222. (0.7 п.л.)
5. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. журн.. 2001. №6. С. 741-745. (0.3 п.л.)
6. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. журн.. 2005. №5. С. 589-601. (0.8 п.л./ 0.4 п.л.)
7. Базулин Е.Г. Повышение отношения сигнал/шум при совместном использовании методов экстраполяции и расщепления спектра // Дефектоскопия. 2006. №1. С. 68-78. (0.7 п.л.)
8. Алёшин Н.П., Базулин Е.Г., Григорьев М.В., Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Ультразвуковой голографический контроль тройников магистральных газопроводов // Сварка и диагностика. 2009. №3. С. 10-15. (0.4 п.л./ 0.08 п.л.)
9. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акуст. журн.. 2009. №6. С. 772-783. (0.8 п.л./ 0.4 п.л.)
10. Базулин Е.Г. Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле для получения изображений рассеивателей с уче-

- том эффекта перерасеивания в одномерном случае // Акуст. журн.. 2010. №1. С. 103-112. (1.0 п.л.)
11. Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов в перьях подошвы рельсов методом SAFT с учётом многократного отражения ультразвукового импульса от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. №2. С. 63-77. (0.8 п.л.)
 12. Базулин Е.Г. Когерентное восстановление изображений дефектов с учётом эффекта незеркального отражения ультразвуковых импульсов от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. №7. С. 18–29. (0.7 п.л.)
 13. Базулин Е.Г. Получение изображений дефектов с учетом многократного отражения ультразвуковых импульсов от границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2010. №10. С. 34-57. (1.3 п.л.)
 14. Базулин Е.Г. Определение типа дефекта по изображениям, полученным методом C-SAFT с учетом трансформации типов волн при отражении ультразвуковых импульсов от неровных границ объекта контроля // Дефектоскопия. 2011. №1. С. 39-56. (1.0 п.л.)
 15. Базулин А.Е., Базулин Е.Г. Измерение диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей на стандартном образце СО-3 // Акуст. журн.. 2012. №2. С. 278-283. (0.7 п.л./ 0.35 п.л.)
 16. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом неразрушающем контроле метода максимальной энтропии для получения изображения рассеивателей по набору эхосигналов // Акуст. журн.. 2013. №2. С. 235-254. (1.5 п.л.)
 17. Базулин Е.Г. Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT при многократном отражении эхосигналов от границ цилиндрического объекта контроля // Дефектоскопия. 2013. №2. С. 23-42. (1.1 п.л.)
 18. Базулин Е.Г., Коколев С.А. Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решёток // Дефектоскопия. 2013. №5. С. 45-58. (0.8 п.л./ 0.4 п.л.)
 19. Базулин Е.Г., Исмаилов Г.М. Измерение скорости звука и толщины в плоскопараллельных объектах контроля с использованием двух антенных решёток // Дефектоскопия. 2013. №8. С. 20-34. (0.9 п.л./ 0.45 п.л.)
 20. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Коколев С.А., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Применение трехмерной когерентной обработки в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2014. №2. С. 46-64. (1.2 п.л./ 0.3 п.л.)
 21. Базулин Е.Г. Определение типа отражателя по изображению, восстановленному по эхосигналам, измеренным ультразвуковыми антенными решётками // Дефектоскопия. 2014. №2. С. 12-22. (0.7 п.л.)