

Тихонов Дмитрий Сергеевич

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ, СОЗДАНИЕ СИСТЕМ
И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИК УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 05.02.11 – Методы контроля и диагностики в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

Москва – 2021

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно-производственном Центре Неразрушающего Контроля «ЭХО+»
(ООО "НПЦ "ЭХО+")

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

КАЧАНОВ Владимир Климентьевич

ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», профессор

доктор технических наук

Ушаков Валентин Михайлович

АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Института неразрушающих методов исследования металлов, научный руководитель

доктор технических наук

Шевалдыкин Виктор Гаврилович

ООО «АКС», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

АО «ВНИИАЭС», г. Москва

Защита состоится «01» июля 2021 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Панкратов А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и состояние проблемы

Сварные соединения оборудования и трубопроводов опасных производственных объектов подлежат неразрушающему контролю (НК) как на стадии сварки, так и в процессе эксплуатации. Однако существующие традиционные методы НК (радиографический контроль, ультразвуковой (УЗ) контроль (УЗК), вихретоковый контроль и пр.) не способны обеспечить должное качество диагностики сварных соединений и не являются достаточно информативными. Отсутствие точных данных НК о размерах, типе, расположении, количестве дефектов приводит к опасно неточным решениям о порядке дальнейшей эксплуатации этих объектов. Повышающиеся требования безопасности, задачи продления ресурса и стремление к оптимизации объёмов диагностических работ обостряют проблему недостаточной информативности НК, особенно для сварных соединений опасных производственных объектов, таких как АЭС, магистральные газопроводы и т.д.

Наиболее перспективными методами неразрушающего контроля, способными дать необходимую информацию о состоянии сварных соединений, являются методы визуализации данных ультразвукового контроля. Среди них наиболее точными являются когерентные вычислительные методы формирования трёхмерных изображений несплошностей, в том числе с использованием антенных решёток. Созданные за последние пять десятилетий физико-технические основы методов восстановления акустических изображений, прогресс в области обработки, хранения и визуализации данных позволили когерентным методам вывести ультразвуковой контроль на существенно более высокий информационный уровень и открыть принципиально новые возможности для решения задач обнаружения дефектов и определения их параметров. Методы когерентной обработки эхо-сигналов позволяют восстанавливать форму дефектов, определять их границы, а, следовательно, и реальные размеры дефектов. Эти данные, вместе с данными о типе и местоположении дефектов, позволяют провести точный прочностной расчёт для контролируемого объекта с определением его остаточного ресурса и срока дальнейшей эксплуатации.

Вместе с тем, применение этих методов сдерживается трудностями надёжного получения эхо-сигналов от всех границ дефектов, проблемами правильной интерпретации полученных изображений и отсутствием данных, подтверждающих точность определения размеров дефектов по этим изображениям. Изображения, полученные когерентными методами, не совпадают с реальной формой отражателя, зачастую замаскированы шумами и далеко не всегда могут однозначно интерпретироваться. Это усложняет распознавание типа дефекта, снижает точность определения его параметров.

Настоящая работа посвящена преодолению этих проблем и созданию научных основ практической УЗ дефектометрии, методологии и оборудования ультразвукового дефектометрического контроля сварных соединений опасных производственных объектов, для которых повышение информативности контроля наиболее актуально. К ним относятся сварные соединения АЭС большой толщины и другие сварные соединения, для которых затруднено получение полезных эхо-сигналов – аустенитные, разнородные, а также соединения с различными ограничениями доступа.

Настоящая диссертационная работа представляет собой продолжение и развитие кандидатской диссертации автора. В ней обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором в Акустическом институте им. академика Н.Н. Андреева и в ООО «НПЦ «ЭХО+» в период с 1987 по 2020 годы. Результаты получены в процессе выполнения научно-исследовательских работ, проводившихся на основе решений государственных органов и в рамках договорных работ с заинтересованными организациями.

Цель работы и основные задачи исследований

Целью работы является создание методов и оборудования УЗ дефектометрии сварных соединений опасных производственных объектов для определения их остаточного ресурса. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методы повышения точности измерения дефектов при использовании когерентных методов восстановления УЗ изображений дефектов сварных соединений;
2. Создать практические алгоритмы восстановления трёхмерных много-схемных изображений дефектов для различных задач УЗ контроля сварных соединений АЭС и других особо важных объектов;
3. Сформулировать унифицированный подход к созданию методик УЗ дефектометрии сварных соединений, снижающий влияние субъективного фактора, и на его основе создать методы контроля, обеспечивающие требуемую точность измерений;
4. Разработать и обеспечить производство оборудования автоматизированного УЗ контроля, реализующего созданные алгоритмы и методы дефектометрии различных типов сварных соединений АЭС и других особо важных объектов;
5. Обосновать значения погрешностей методов УЗ дефектометрии с целью обеспечения достоверности прочностных расчётов остаточного ресурса сварных соединений, находящихся в эксплуатации;

6. Определить принципы применения средств математического моделирования для повышения эффективности верификации методик УЗ дефектометрии;
7. Реализовать методы автоматического анализа изображений, восстановленных когерентными методами, и, на их основе, создать систему с полным циклом автоматизации всего процесса УЗ дефектометрии;
8. Внедрить разработанную аппаратуру и методы УЗ дефектометрии и диагностики сварных соединений в практику неразрушающего контроля на опасных производственных объектах.

Методы исследований

При выводе формул для алгоритмов обработки данных использовались математические методы решения прямой и обратной задач рассеяния, математические методы общей и прикладной акустики, спектрального анализа, математические модели ультразвукового поля, сформированные ограниченным источником, теория функции комплексного переменного. Математическое моделирование проводилось с использованием вычислительных средств общего назначения и программного обеспечения CIVA. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием оборудования и специализированного программного обеспечения, обеспечивающих регистрацию ультразвуковых эхо-сигналов, передачу данных в компьютер и их последующую обработку. Для подтверждения точности результатов ультразвукового контроля с применением разработанных алгоритмов использовались методы металлографического анализа, методы рентгеновской томографии, статистические математические методы обработки результатов экспериментов.

Научная новизна работы

1. Разработаны количественные критерии, позволяющие оценить эффективность применения различных схем прозвучивания при ультразвуковом контроле для получения наиболее информативных изображений области контроля с точки зрения определения формы и размеров несплошностей. Показателями эффективности применения выбранной схемы прозвучивания являются значения угловой апертуры и амплитуда изображения точечного рассеивателя, размещаемого в каждой точке области контроля, сопоставленные с аналогичными параметрами для других схем с учётом априорной информации о расположении и типе дефекта. Использование предложенных критериев позволяет количественно реализовать принцип отбора схем прозвучивания для построения суммарного изображения дефекта, заключающийся в использовании только тех схем, которые могут дать дополнительную информацию о конфигурации дефекта.

2. Разработана методология автоматического анализа изображений области контроля, которая основывается на применении серии алгоритмов обработки изображений, реализующих последовательность действий оператора при анализе данных. Среди них: алгоритм построения профиля внутренней поверхности объекта контроля по нескольким схемам формирования донного сигнала, алгоритм селекции геометрических отражателей по заданной маске объекта, алгоритм проверки наличия зон тени от высоких дефектов по снижению уровня донных сигналов, алгоритм разбиения контуров на классы по их конфигурации и расположению, позволяющий формировать признаки типа дефектов.

3. Предложен расчётный способ выравнивания чувствительности изображений несплошностей, полученных с помощью антенных решёток, с использованием эхо-сигналов только от одного эталонного отражателя путём построения компенсационной амплитудной матрицы, сформированной по расчётам прямой задачи методами геометрической оптики для данного типа эталонных отражателей, расположенных по всей области изображения.

4. Разработан способ определения параметров диаграммы направленности в трёхмерном пространстве для последующего их учёта в алгоритмах трёхмерного когерентного восстановления изображений несплошностей. Суть способа заключается в двухкоординатном сканировании по диаметральной плоскости полусферического образца и измерении поля, отражённого от сферической поверхности и последующего пересчёта пространственного спектра одночастотных распределений поля в функцию направленности.

Практическая значимость работы

1. Практическая ценность работы состоит в применении полученных результатов для создания нового поколения средств и методик автоматизированного УЗ контроля (АУЗК) с возможностью определения пространственных параметров дефектов для сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС и других особо важных объектов. На основании закономерностей, изученных в работе, разработаны, сертифицированы в Росстандарте и внедрены в эксплуатацию в различных областях промышленности более пятидесяти систем АУЗК с когерентной обработкой данных - системы АУЗК АВГУР-Т, АВГУР-ТФ, дефектоскоп ультразвуковой многоканальный с цифровой фокусировкой и автоматизированным сканированием антенными решётками АВГУР-АРТ, система калибровки пьезоэлектрических преобразователей нового поколения АВГУР 5.4.

2. Практическая ценность работы подтверждена внедрёнными в практику 49 верифицированными методиками контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов АЭС и нефтегазового комплекса, из них – тринадцать методик с установленными параметрами точности дефектометрии. Методики АУЗК оборудования и трубопроводов АЭС включены в типовые программы

периодического эксплуатационного неразрушающего контроля. Контроль по ним проводится на всех АЭС с реакторными установками РБМК и ВВЭР. Подтверждённая возможность определения размеров несплошностей позволила впервые в РФ создать нормы эксплуатационного неразрушающего контроля сварных соединений АЭС, опирающиеся на реальные размеры несплошностей, полученные в результате УЗ дефектометрии.

3. Впервые на практике реализованы трёхмерные когерентные методы восстановления изображений, полученные при двухкоординатном сканировании, как одноэлементными преобразователями, так и линейными антенными решётками. На основе алгоритма автоматического анализа данных и комплекса других алгоритмов на базе системы АВГУР-АРТ впервые создан программно-аппаратный комплекс с полным циклом автоматизации для эксплуатационного контроля сварных соединений обечаек парогенераторов реакторных установок ВВЭР. В настоящее время этот комплекс применяется на Калининской АЭС и Ленинградской АЭС-2.

Апробация работы

Материалы диссертации были изложены на двенадцати международных и пятнадцати российских научно-технических конференциях, в частности:

- XX Петербургской конференции УЗДМ-2009 «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций», г. Санкт-Петербург, 2009 г.
- Десятой Европейской Конференции по Неразрушающему Контролю, г. Москва, 2011 г.
- Восьмой международной научно-технической конференции МНТК-2012 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, 2012 г.
- XXI Петербургской конференции УЗДМ-2013 «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций», г. Санкт-Петербург, 2013 г.
- Девятой международной научно-технической конференции МНТК-2014 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, 2014 г.
- XXII Петербургской конференции УЗДМ-2016 «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов», г. Санкт-Петербург, 2016 г.
- Отраслевом круглом столе форума «Территория NDT 2016» «Техническое диагностирование и оценка риска аварий», г. Москва, 2016 г.
- XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, г. Москва, 2017 г.
- 10-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московская обл., 2017 г.

- Одиннадцатой международной научно-технической конференции МНТК-2018 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, 2018 г.
- XXIII Петербургской конференции УЗДМ-2019 «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов», г. Санкт-Петербург, 2019 г.
- XXII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, г. Москва, 2020 г.

Результаты исследований были обсуждены на заседаниях кафедры МТ7 «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана, на семинаре ООО «Акустические контрольные системы».

Публикации

Основные положения диссертационной работы отражены в 102 научных публикациях, в состав которых входит четыре монографии (с соавторами), 29 статей в журналах по перечню ВАК РФ, 21 статья в прочих научно-технических журналах, 38 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 10 патентов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Количественный показатель качества многосхемных методик УЗ контроля и дефектометрии сварных соединений, а также способ его расчёта, учитывающий основные факторы преобразования УЗ поля в объекте контроля.
2. Метод обработки данных УЗ контроля для получения единого изображения несплошностей по данным, зарегистрированным при различных схемах прозвучивания с использованием сканирующих антенных решёток.
3. Унифицированная методология проведения АУЗК с дефектометрией для различных типов сварных соединений.
4. Алгоритмы и методика системы с полным циклом автоматизации процесса УЗ контроля.
5. Методики АУЗК с дефектометрией сварных соединений опасных промышленных объектов и методы их верификации.
6. Методология обоснования основных показателей методик УЗ контроля и дефектометрии с использованием математического моделирования.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов, списка работ и списка литературы, включающего в себя 183 наименований. Объём диссертации составляют 369 страниц основного текста, включающие 145 рисунков и 24 таблицы, и приложение на 10 страницах.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, отражена научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, указаны личный вклад автора, отмечена практическая ценность работы, а также приведены сведения об апробации работы на различных научно-технических форумах, информация об основных публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе рассматривается современное состояние задачи определения параметров дефектов УЗ методами, как основной проблемы развития методов УЗ контроля, преодолению которой посвящены работы Ермолова И.Н., Гурвича А.К., Алёшина Н.П., Вopilкина А.Х., Щербинского В.Г., Кретьова Е.Ф., Й. и Г. Крауткремеров. На протяжении многих лет основным информационным параметром в УЗ контроле являлась максимальная амплитуда эхосигнала. По этому параметру определялся факт наличия дефекта и условные размерные показатели, не имеющие определённой связи с реальными размерами дефекта.

С появлением когерентных методов визуализации, а позднее и их технологического развития в виде УЗ фазированных решёток, стало возможным получать точные трёхмерные изображения дефектов. В некоторых случаях по этим изображениям стало возможным измерять координаты крайних точек дефекта и тем самым определять границы области его существования. Таким образом, определилось новое направление исследований - УЗ дефектометрия. Выделяются три основные раздела УЗ дефектометрии: 1) теория УЗ контроля и методы решения обратной задачи рассеяния и восстановления изображений несплошностей; 2) аппаратное и методическое обеспечение УЗ дефектометрии; 3) методы верификации результатов измерений УЗ дефектометрии.

Наиболее актуальными методами получения изображений являются алгоритмы когерентной обработки данных для сканирующих одноэлементных преобразователей, антенных решёток и антенных матриц, такие как алгоритм Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT), метод Проекции в Спектральном Пространстве (ПСП), их вариации 2D-, 3D- и Multi-SAFT и другие методы (Hall T.E., Doctor S.R., Erhard A., Wüstenberg H., Качанов В.К., Вopilкин А.Х., Самокрутов А.А., Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Mayer K., Markelein R., Langenberg K.J.). Наиболее информативными и помехозащищёнными методами визуализации является группа методов, реализующая идею цифровой фокусировки антенных решёток (ЦФА). Для ЦФА используется всё множество эхосигналов, полученных от пар элементов излучатель-приёмник для последующей когерентной обработки методом комбинационного SAFT (C-SAFT). Многократные отражения от границ объекта контроля с преобразованием типов (мод) волн образуют множество схем излучения и приёма волн. Использование метода C-

SAFT с учётом влияния границ объекта контроля, многосхемных и многомодовых вариантов распространения ультразвуковых волн (методы Multi-ЦФА) открывает новые возможности повышения точности изображений дефектов.

Когерентные методы визуализации могут быть определены как решение обратной задачи рассеяния, заключающейся в нахождении функции $\varepsilon(\mathbf{r})$, описывающей свойства неоднородностей в области контроля S . За счёт использования Борновского приближения удаётся сделать задачу линейной и предложить множество способов её решения. В практически важном случае, когда область приёма ультразвука S_r не пересекается с областью залегания дефектов S , можно рассчитать суммарное поле в области S , не учитывающее эффект взаимного влияния несплошностей (переотражения), а затем пересчитать его в область S_r . Наиболее простой задачей выглядит для совмещённой схемы регистрации, когда излучение и приём происходят в одной точке пространства. В этом случае уравнение Липпмана-Швингера для расчёта поля в области приёма $p(\mathbf{r}_r, t)$ может быть записано в виде интеграла свёртки функции несплошностей $\varepsilon(\mathbf{r})$ с функцией Грина $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}, t)$:

$$p(\mathbf{r}_r, t) = \int_S G(\mathbf{r}_r - \mathbf{r}, t)^2 \varepsilon(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (1)$$

Оценку функции $\varepsilon(\mathbf{r})$ из (1) можно выполнить корреляционным методом, проводя расчёт для каждого гипотетического отражателя, представленного в виде дельта-функции Дирака, расположенного в произвольной точке \mathbf{r}_i :

$$\varepsilon'(\mathbf{r}_i) = \int_{S_i S_r S} G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) p(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i dt. \quad (2)$$

Если в формуле (2) функцию $G(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$, определяемую формой зондирующего импульса $s(t)$ заменить на дельта-функцию $\delta(t - t_{\max})$, где t_{\max} – время нарастания импульса, то для выбранной акустической схемы sc это выражение трансформируется в формулу, описывающую комбинационный метод SAFT или C-SAFT:

$$\varepsilon'(\mathbf{r}_i, sc) = \int_{S_i S_r} p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i, sc) + t_{\max}) d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_i \quad (3)$$

где $t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_i, sc)$ – время пробега предполагаемого дельта-импульса от излучателя \mathbf{r}_i до точки изображения \mathbf{r}_i и затем к приёмнику \mathbf{r}_r для заданной акустической схемы sc . Суммирование изображений, полученных для различных схем прозвучивания и различных пространственных положений антенной решётки, позволяет существенно повысить качество изображения. Режим ЦФА с дополнительным пространственным накоплением при сканировании по осям x и y обозначим как ЦФА-Х, ЦФА-У, ЦФА-ХУ в зависимости от того, по каким осям проводится когерентное суммирование.

Однако применение данных методов визуализации для задач дефектометрии осложняется как физическими факторами объекта контроля (неровная

поверхность, анизотропия упругих свойств, затухание и пр.), так и факторами ультразвукового метода – малый пространственный спектр зондирования и приёма волн, низкая разрешающая способность и т.д. Так же на пути применения методов визуализации для задач дефектометрии встают проблемы аппаратной и методической реализации методов сбора данных и последующего их анализа. Эти проблемы связаны с конструктивными особенностями различных объектов контроля и необходимостью учёта множества факторов при анализе изображений. Важнейшей частью реализации УЗ дефектометрии является обоснование полученных результатов измерений дефектов и получение значений погрешности в заданных доверительных интервалах, а также установление границ применимости методов дефектометрии. Преодоление этих проблем является необходимым условием использования УЗ дефектометрии в практической диагностике опасных производственных объектов.

Во второй главе

рассматривается многосхемный подход формирования изображений, как способ повышения их информативности за счёт расширения спектра направлений излучения и приёма ультразвуковых волн. Он состоит в формировании изображения с использованием эхо-сигналов от дефекта, прошедших различные пути от излучателя к отражателю и далее к приёмнику, с учётом преобразования типов волн при отражении от априорно известных границ объекта контроля. Применение многосхемного метода позволяет получить изображение скрытых для односхемного прозвучивания конфигураций дефектов, восстановить более точно их форму и, тем самым, обеспечить возможность определения размеров дефектов.

Для выбора схем прозвучивания и оценки их возможностей выявления и определения размеров дефектов предлагается использовать количественный показатель их качества. Используем решение прямой задачи расчёта поля для многосхемного варианта, при котором для каждой схемы излучения-приёма определяются значения амплитуды поля и направления прихода волн в каждой точке заданной области контроля. По результатам решения прямой задачи, при наличии априорной информации о локализации и индикатрисе рассеяния дефектов, можно оценить эффективность вклада каждой схемы в решение основной задачи контроля – получения необходимых эхо-сигналов от дефекта.

Расчёт поля сводится к необходимости точного вычисления функции $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, t)$ в формуле (2) для конкретной задачи контроля. Расчёт поля от точечного отражателя производится в рамках теории геометрической дифракции методом лучевых трубок. Акустическая схема на излучение или на приём определяется количеством отражений зондирующего сигнала $s(t)$ от границ объекта контроля Nt при излучении и Mr при приёме, списком скоростей $\{c_{t,1}, c_{t,2} \dots c_{t,Nt}; c_{r,1}, c_{r,2} \dots c_{r,Mr}\}$, соответствующих скорости продольных и попереч-

ных УЗ волн после соответствующего отражения от границ объекта. Также в качестве описания самой трассы используется аналогичный список векторов $\{\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r\}$, соответствующих отрезкам прямолинейного распространения лучей волны между очередными отражениями.

На Рис. 1 приведена схема для расчёта прямой задачи для двух пьезоэлементов. При расчёте поля антенной решётки рассчитывается суммарное поле нескольких таких элементов. При расчёте $G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i, t)$ учитываются следующие факторы, влияющие на принятое значение поля:

- $T_T = f(\alpha_T; c_w^L, c_{t,1})$ и $T_R = f(\alpha_R; c_w^L, c_{r,1})$ комплексные прямые и обратные коэффициенты прохождения через границу призма/объект контроля;
- $R_t^n = f(\alpha_{n,n+1}; c_{t,n}, c_{t,n+1})$ и $R_r^m = f(\alpha_{m+1,m}; c_{r,m+1}, c_{r,m})$ - комплексные коэффициенты отражения от мягкой границы для n -го отражения при излучении и m -го отражения при приёме;

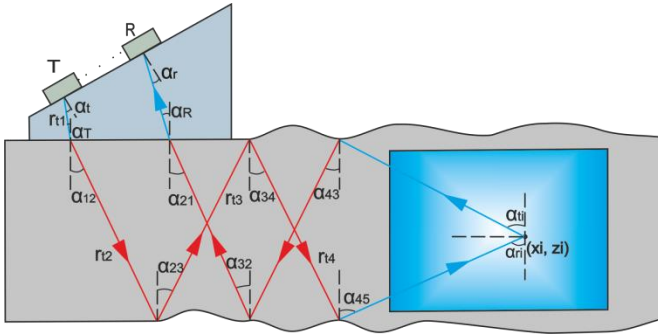


Рис. 1. Расчёт прямой многосхемной задачи для многоэлементного преобразователя

- $D_t = f(\{\mathbf{r}_t\}_{N_t}, \{c_t\}_{N_t})$ и $D_r = f(\{\mathbf{r}_r\}_{M_r}, \{c_r\}_{M_r})$ - уменьшение амплитуды эхо-сигнала при излучении и приёме при расхождении волны в предположении сохранения энергии в лучевой трубке, описываемое известными формулами для 2D- и 3D-вариантов;

- $P_t(\alpha_t)$ и $P_r(\alpha_r)$ - индивидуальные диаграммы направленности при излучении и приёме для каждого пьезоэлемента;
- $V(\alpha_{ti}, \alpha_{ri}, \mathbf{r}_i)$ - индикатрисса рассеяния дефекта.

Так для траектории излучения:

$$G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i, t; \{c_t\}_{N_t}) = Am_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{N_t}) s(t - t_t), \quad t_t(\mathbf{r}_i) = \sum_{n=1}^{N_t+1} \frac{|\mathbf{r}_{t,n}|}{c_n}$$

$$Am_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}_{N_t}) = P_t(\alpha_t) T_T \frac{\prod_{n=2}^{N_t} R_t^n}{D_t},$$

для траектории приёма:

$$G(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t; \{c_r\}_{M_r}) = Am_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{M_r}) s(t - t_r), \quad t_r(\mathbf{r}_i) = \sum_{m=1}^{M_r+1} \frac{|\mathbf{r}_{r,m}|}{c_m}$$

$$Am_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}_{Mr}) = P_r(\alpha_r) T_R \frac{\prod_{r=1}^{Mr} R_r^m}{D_r^{\frac{m-2}{2}}},$$

где $Am_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i)$, $Am_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i)$ - амплитудный фактор изменения сигнала при излучении и приёме. В результате можно записать:

$$G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t) = Am_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i; \{c_t\}) V(\alpha_{it}, \alpha_{ri}, \mathbf{r}_i) Am_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i; \{c_r\}) s(t - t_t(\mathbf{r}_i) - t_r(\mathbf{r}_i)) \quad (4)$$

На основе данной модели создана программа трассировки, с помощью которой можно рассчитывать амплитуды поля от точечных отражателей и направления их прозвучивания для каждой точки изображения и для любой выбранной схемы контроля. Количественными показателями эффективности применения выбранной схемы прозвучивания являются суммарная угловая апертура $\beta(x, z)$ и суммарный амплитудный вклад $A(x, z)$ используемых схем прозвучивания для каждой точки области контроля. Идеальный набор схем контроля получается при условии $A(x, z) = 1$ и $\beta(x, z) = 2\pi$ для всей области восстановления изображений.

Применение критериев качества схем для практических задач дефектометрии ещё более эффективно в тех случаях, когда имеется априорная информация о локализации и пространственном спектре рассеяния дефектов.

Для примера рассмотрим задачу определения высоты трещин по границе сплавления сварного соединения переходного кольца и патрубка Ду1100 парогенераторов АЭС с ВВЭР-440. В качестве модели принят плоскопараллельный объект толщиной 70 мм, с областью изображения размерами по оси X от -44 до +44 мм (Рис. 2). Расчёт выполнен для 32-элементной антенной решётки с рабочей частотой 3,85 МГц, с шагом решётки 1 мм.

На Рис. 2 показана функция распределения поля излучения-приёма $A(x, z, sc)$ для трёх из 196 (14×14) рассчитанных акустических схем sc при одном положении антенной решётки. А на Рис. 3 показан весь спектр суммарных амплитуд парциальных изображений $C_\Sigma(sc) = \sum A_{sc}(x, z, sc)$. Очевидно, что для выбранных методических параметров наиболее значимыми являются схемы при излучении продольной волны на прямом луче L-T, L-L, L-

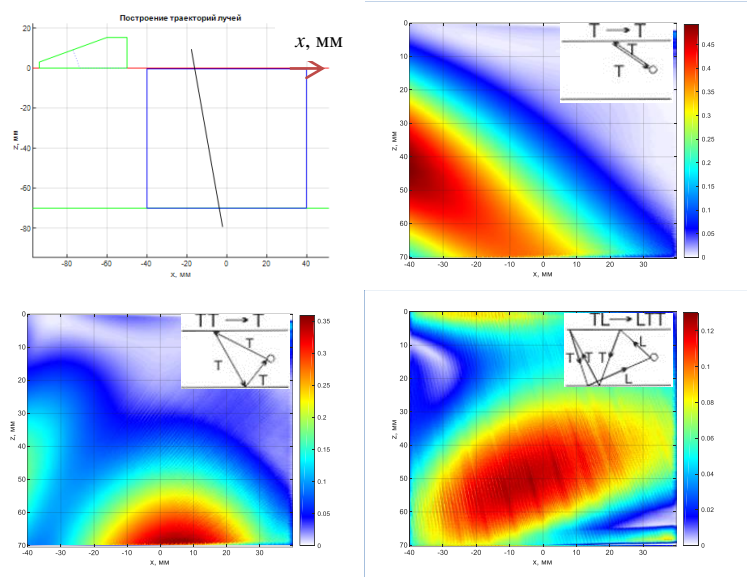


Рис. 2. Схема модели и распределение амплитуд точечных отражателей для трёх схем прозвучивания

ТТ и т.д.. Аналогичный анализ выполняется для функции $\beta(x, z)$, для которой в области расположения трещины необходимо обеспечить перекрытие углов падения и отражения от граней трещины для обеспечения гарантированного приёма эхо-сигналов от границ трещины.

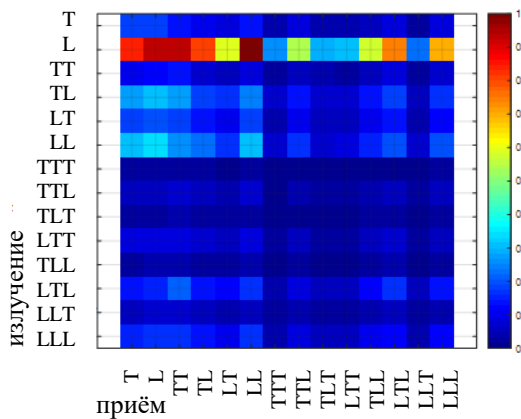


Рис. 3. Вид функций $C_{\Sigma}(sc)$ при одном положении антенной решётки

Использование критериев позволило создавать эффективные много-схемные методики контроля для систем с фазированными решётками. Примером может служить способ восстановления профиля внутренней поверхности сварного шва по многомодовому изображению, получаемому методом ЦФА с помощью двух антенных решёток, расположенных по разные стороны шва.

На Рис. 4 приведено нормированное суммарное изображение, полученное с использованием пяти схем прозвучивания и линия профиля поверхности, построенная по локальным максимумам изображения. В образце также имеется точечный отражатель, блик которого наблюдается над внутренней поверхностью образца. Реализация этой концепции позволила создать практически важную методику сплошной автоматизированной толщинометрии под валиком усиления шва.

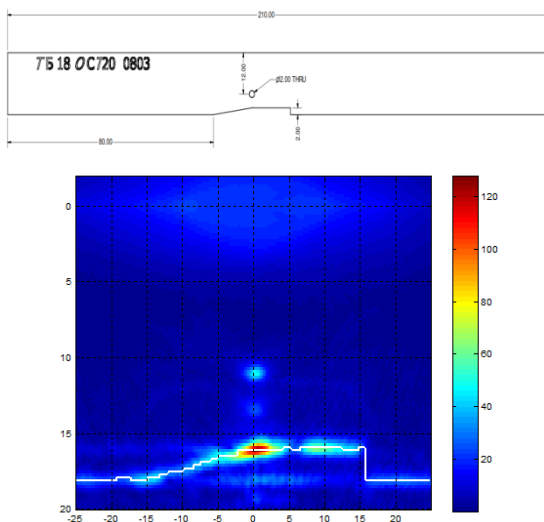


Рис. 4. Суммарное восстановленное изображение с профилем донной поверхности

Важной проблемой определения размеров дефектов является обеспечение равномерности сформированных по разным схемам амплитуд эхо-сигналов от дефекта для всей области контроля. Для решения этой проблемы предлагается в методе SAFT расчётным путём учитывать кроме задержек распространения эхо-сигнала, также и все виды потерь его энергии для выбранной схемы прозвучивания и восстановления изображения и при суммировании в результирующем изображении учи-

тывать эти потери. Этот метод для краткости будет называться далее методом инверсного SAFT как метод, решающий не только обратную задачу, но и прямую. При этом коэффициент отражения от точечного отражателя $V(\alpha_i, \alpha_r, r) = -1$. Для того, чтобы обеспечить в формуле (3) $p(\mathbf{r}_r, t) = const$ для

любого \mathbf{r}_r , в ней необходимо учесть амплитудный фактор функции $G(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, t)$ из формулы (2), например, рассчитывая потери при излучении и приёме для соответствующей схемы по аналогии с формулой (4). Формула (3) при этом модифицируется следующим образом:

$$\varepsilon'_{inv}(\mathbf{r}_i, sc) = \int_{S_t} \int_{S_r} \frac{p(\mathbf{r}_r, t - t_{del}(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_t, sc) + t_{max})}{Am_t(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_i, sc) Am_r(\mathbf{r}_r, \mathbf{r}_i, sc)} d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_t. \quad (5)$$

Восстановление по формуле (5) позволяет получать изображения с выравненной по всей области контроля чувствительностью для каждой схемы для последующего получения суммарного многосхемного изображения выровненного по амплитуде. Можно также учесть специфику индикатриссы рассеяния настроечного отражателя, если при расчёте в каждую точку изображения помещать не идеальный точечный, а выбранный тип направленного отражателя. Для этого используются методы геометрической оптики и расчёт рассеянного поля в приближении Кирхгофа. Данный подход позволил предложить метод пространственной регулировки чувствительности, существенно упрощающий процесс выравнивания чувствительности изображений – для настройки достаточно только одного эталонного отражателя.

Для проверки алгоритма был проведён расчёт в программе CIVA с восстановлением изображений методами C-SAFT и инверсным C-SAFT. Моделировались эхо-сигналы от 5 отверстий бокового сверления диаметром 0,2 мм, расположенных на глубинах 2, 6, 10, 14, 18 мм на линии перпендикулярной поверхности в стальном плоскопараллельном образце толщиной 20 мм с переотражениями до получения акустической схемы с шестикратным отражением от границ образца на глубине до 140 мм. Эмулировалась работа антенной решётки с рабочей частотой 5 МГц, 32 элементами шириной 0,9 мм с шагом 1 мм на призме 35°. Измерения проводились на поперечной волне в 25 положениях антенной решётки с шагом 8 мм. На Рис. 5 приведены зависимость амплитуды бликов точечных отражателей от глубины их расположения для методов C-SAFT и invC-SAFT.

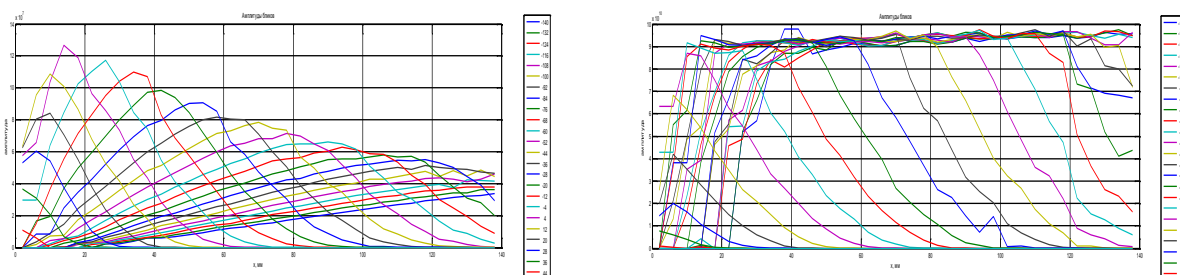


Рис. 5. Зависимость амплитуды бликов точечных отражателей от глубины их расположения для метода C-SAFT (слева), для метода invC-SAFT (справа)

Применение метода invC-SAFT делает матрицу амплитуд изображений в угловом диапазоне от первого критического до 75 градусов равномерной в пределах ± 1 дБ.

Ещё одним путём повышения точности определения размеров дефектов является применение трёхмерных методов когерентной обработки, которые позволяют повысить разрешающую способность в плоскости, соответствующей D-типу изображений. Для реализации этих методов потребовалось создать методологию и способы расчёта трёхмерной диаграммы направленности одноэлементных преобразователей, а также разработать методы компенсации искажений, связанных с неизбежным упругим люфтом, возникающим при двухкоординатном сканировании.

Для определения трёхмерной индивидуальной диаграммы направленности одноэлементного преобразователя предложен новый метод калибровки преобразователей, основанный на двухкоординатном измерении эхо-сигналов от сферической поверхности полусферического образца. Расчёт диаграммы направленности выполняется из двухмерного пространственного спектра рассчитанных голограмм по проекциям волновых чисел, соответствующих направлению прихода плоских волн.

Наиболее актуально повышение точности измерений размеров отражателей в дополнительной плоскости для задач контроля толстостенных сварных соединений, когда при трёхмерной обработке существенно повышается точность измерения размеров дефектов вдоль оси шва. В качестве примера на Рис. 6 показаны изображения плоскодонных отверстий, расположенных на глубине 200 мм в виде теста разрешающей способности. На фотографии в центре - отверстия на поверхности грани, наклонённой под углом 45 градусов к поверхности сканирования. Показаны суммарные проекции изображений C-типа, восстановленные методом 2D-ЦФА и 3D-ЦФА. Применение метода 3D-ЦФА более чем в два раза повышает фронтальное разрешение в плоскости D-сечения, что означает для данной задачи возможность определения положения границы дефекта вдоль оси сварного соединения с точностью не хуже, чем $\pm 2,5$ мм.



Рис. 6. Изображения плоскодонных отверстий (фото в центре) расположенных на глубине 200 мм, полученные методом 3D-ЦФА (слева) и 2D-ЦФА (справа)

В третьей главе излагаются принципы проведения автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений с дефектметрией.

Отличительными особенностями методик контроля с дефектметрией является наличие этапа когерентной калибровки антенных решёток и преобразователей, этапов, связанных с учётом формы внутренней и внешней поверхностей объекта контроля, а также содержание этапов обработки и анализа данных контроля, на которых определяются размерные и другие параметры дефектов.

На основе большого набора эмпирических данных были выработаны формальные принципы процесса анализа разнотипных изображений, подавляющие неопределённость и субъективизм, являющиеся одной из основных составляющих погрешности процесса измерения размеров дефектов. Это позволило перейти к полностью объективной процедуре автоматизированного анализа данных.

При анализе трёхмерных изображений основными объектами являются контура локализации несплошности, построенные путём оконтуривания локальных максимумов изображений, превышающих уровень шумового изображения. При классификации таких контуров учитывается влияние искажающих факторов, набор которых для различных объектов контроля отличается. Типовыми среди таких факторов являются: нарушения контакта при регистрации данных, нелинейные искажения сигнала (зашкаливание), препятствия равномерному сканированию, шумы, возникающие при обработке данных. На одном изображении и для одного дефекта могут фиксироваться несколько контуров локализации несплошности. Их размер и взаимное расположение определяют состояние информационных признаков данных. Вот некоторые из них:

- контур несплошности не более элемента разрешающей способности изображения (обычно точечные дефекты);
- превышение определённого амплитудного контрольного уровня (для фиксации зеркального типа отражения);
- неизменность координат несплошности от слоя к слою (обычно вдоль оси шва), в том числе нитевидное изображение (характерно для конструктивных отражателей, межваликовых протяжённых непроваров и т.п.);
- многоэлементное изображение (коррозионные дефекты, трещины различного типа и т.д.);
- цепь, группа (скопление пор, повышение уровня структурного шума и т.д.).

По выделенным контурам локализации несплошности определяются размеры дефектов по осям x , y или z как разность между наибольшим и наименьшим значением соответствующей координаты точек контура.

По сочетанию выявленных информационных признаков, используя данные о размерах и местоположении несплошности, делается заключение о реальном характере дефекта.

Для некоторых объектов контроля, в окрестностях зафиксированных несплошностей, выполняется повторное построение контуров локализации для уровня фиксации, превышающим на 6 дБ уровень шумового сигнала. Это делается с целью фиксации возможно слабых дифракционных отражений от краёв дефектов, которые определяют реальный размер дефектов. По особенностям контуров локализации (размеры, расположение, количество) разработаны принципы классификация выявленных несплошностей по типам.

Учёт основных факторов, влияющих на точность получаемых изображений, а также формализация процесса определения размеров по изображениям, позволили создать унифицированную методологию УЗ контроля с дефектметрией для большого количества типов сварных соединений. В диссертации приводятся набор основных методических параметров для перлитных сварных соединений, а также для основных типов сварных соединений с высоким уровнем структурных шумов - разнородных и аустенитных, обеспечивающих предсказуемую точность измерений параметров дефектов.

Автоматизация анализа данных

Приведённый здесь, используемый в настоящее время, порядок проведения АУЗК подразумевает активное участие квалифицированного оператора, что подчас является основным источником ошибок при контроле. Созданная формальная методология анализа данных позволила автоматизировать работу оператора с данными контроля, используя алгоритмы, берущие на себя большую часть рутинной работы оператора - поиск дефектов в большом объёме данных, обнаружение конструктивных отражателей, оконтуривание, автоматическое образмеривание и классификация дефектов, генерация заключений контроля. Создание автоматических методов анализа данных, дополнив автоматические настройку и сбор исходных данных, позволило впервые полностью автоматизировать весь процесс УЗ контроля.

Алгоритм автоматического анализа данных лежит в основе созданной методологии АУЗК. Обработка и анализ данных выполняются автоматически в следующей последовательности:

- проверка качества акустического контакта;
- проверка наличия зон тени (при необходимости);
- определение профиля донной поверхности (с проверкой оператора и уточнением при необходимости);
- совмещение маски объекта контроля с геометрическими отражателями (в режиме диалога с оператором);

- восстановление объединённых изображений по заранее созданным сценариям;
- автоматический анализ данных: выявление и фиксация несплошностей, из областей их вероятной локализации; определение отражающей способности несплошностей (эквивалентной площади); измерение размеров несплошностей; определение типа несплошностей.

При автоматическом анализе данных используется набор критериев, включающих в себя параметры нормировки, пространственных фильтров, отсечки, фиксации и объединения областей, логические параметры описания выделенных областей, настраиваемых с учётом параметров объекта контроля.

Автоматизация анализа данных позволяет «безболезненно» применять всё большее количество схем прозвучивания при контроле одного объекта, увеличивая с объёмом данных информативность УЗ контроля.

Для практического применения технологии замкнутого цикла автоматизации были выбраны кольцевые сварные соединения обечаек парогенераторов толщиной от 103 до 145 мм, которые работают на реакторных установках ВВЭР-1000. На Рис. 7 приведена дефектограмма испытательного образца и результат автоматического образмеривания с прямоугольными контурами локализации искусственных дефектов.

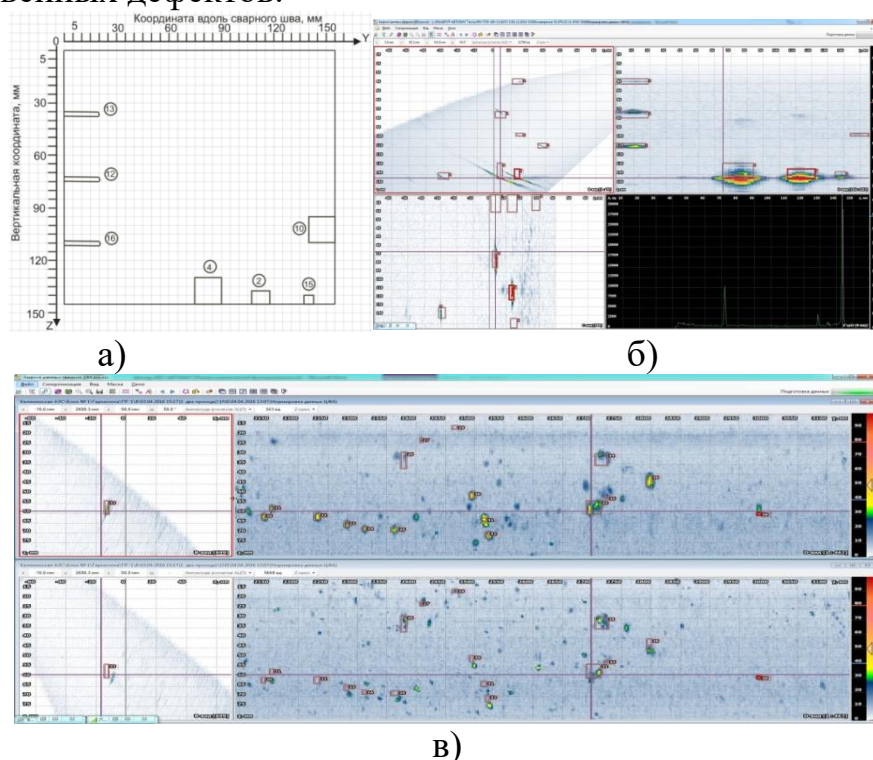


Рис. 7. Дефектограмма испытательного образца (а) – три отверстия бокового сверления (12, 13, 16), три паза выходящих на донную поверхность шва (2, 4, 15), один висячий паз (10) и результат автообразмеривания по одному из изображений с прямоугольными контурами локализации для испытательного образца (б) и для реального сварного соединения (в).

Модуль погрешности измерения высоты искусственных дефектов не превысил 0,2 мм, а протяжённости – 9 мм. Испытания метода на реальных объектах продемонстрировали его высокую эффективность по выявлению отражателей. На Рис. 7, в) показаны результаты фиксации допустимых несплошностей на одном из изображений, полученном на участке сварного шва протяжённостью около 1 м на действующем парогенераторе.

При выполнении рутинной работы по поиску и образмериванию несплошностей, в особенности по нескольким схемам контроля неизбежно влияние человеческого фактора. Автоматический анализ позволяет свести к минимуму влияние этого фактора. При этом по данным автоматического анализа ложных срабатываний не было, все несплошности подтверждены при повторном ручном анализе данных.

Объективность и высокая информативность результатов анализа ультразвуковых данных при дефектометрии подтверждают обоснованность применения дефектометрии вместо радиографического контроля. Обоснованные значения погрешности измерения размеров дефектов дают дополнительный иногда перевешивающий аргумент в пользу использования АУЗК с измерением размеров несплошностей вместо радиографии. В работе приводятся примеры обоснования такой замены для случаев контроля толстостенного аустенитного соединения опоры дивертора термоядерного реактора ИТЭР, кольцевых сварных соединений трубопроводов различного назначения, роторов турбин, сварных соединений трубопроводов системы компенсации давления на АЭС. Для обоснований использовались математическое моделирование, сравнительные испытания и металлографические исследования.

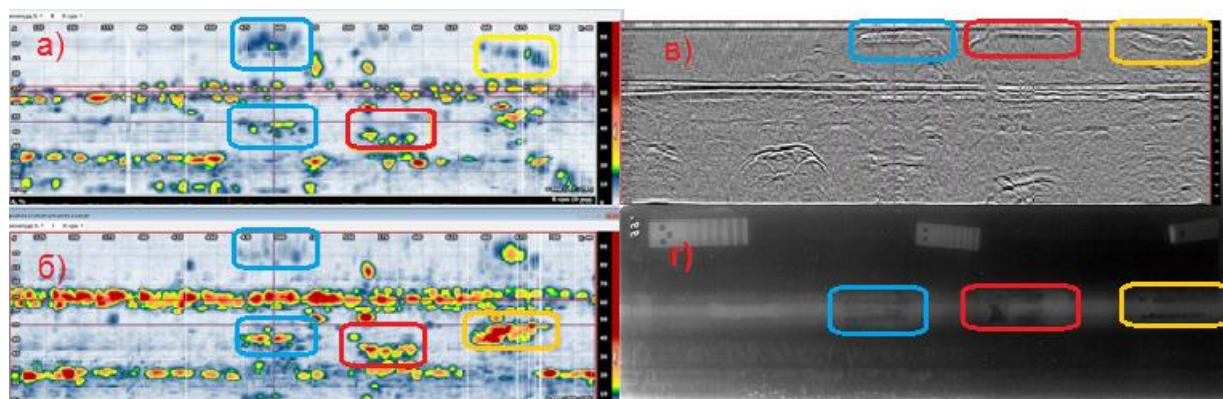


Рис. 8. Изображения межваликовых непроваров, полученные методом ФАР с двух сторон от шва (а, б), TOFD (в) и рентгеновским методом (г). Рамками одинаковых цветов обведены области, относящиеся к одним и тем же дефектам

На Рис. 8 приведён пример сопоставления данных АУЗК и радиографического контроля для кольцевого сварного соединения диаметром 720 мм и тол-

щиной 24 мм с технологическими дефектами сварки. На рисунке рамками одного цвета выделены изображения одинаковых дефектов.

В четвёртой главе рассматриваются разработанные системы автоматизированного УЗК как составляющие УЗ дефектометрии. Для традиционных мало-элементных преобразователей была создана и аттестована многоканальная система автоматизированного УЗК АВГУР-Т, реализующая все разновидности SAFT-методов получения изображений.

Система АВГУР-Т и её модификации предназначены для обнаружения и измерения параметров дефектов (их типа, размеров, координат) в сварных соединениях технологического оборудования, в том числе труб различного диаметра и толщины, выполненных из сталей перлитного и аустенитного классов. Для получения изображений и повышения их качества используются такие методы как SAFT, ПСП (2D- и 3D-), методы когерентной обработки, учитывающие преобразования типов волн, методы пространственной фильтрации и пр.

В системах АУЗК серии АВГУР-Т впервые реализован измерительный режим в УЗК, обеспечивающий измерение реальных размеров дефектов. Внешение систем АВГУР-Т в государственный реестр средств измерений РФ и аттестация методического обеспечения систем впервые проведена не только по электронно-механическим параметрам систем, но и по данным о погрешности определения размеров реальных дефектов.

Для работы в составе системы АВГУР-Т разработано множество сканирующих устройств, среди которых, кроме сканеров для типовых объектов (например, кольцевые и продольные сварные соединения трубопроводов), есть и специализированные сканеры. Фотография системы с двухкоординатным сканером для кольцевых сварных соединений приведена на Рис. 9.

Для проведения АУЗК с применением фазированных антенных решёток разработана система АВГУР-АРТ. В отличие от традиционных систем с фазированными антенными решётками в системе АВГУР-АРТ, помимо мето-



Рис. 9. Основные элементы системы АВГУР-Т

дов управления полем излучения–приёма (режим ФАР-дефектоскопа), заложены также ЦФА, ЦФА-Х, ЦФА-ХУ методы сбора и обработки данных.

Приведённая идеология определяет программно-аппаратную архитектуру системы АВГУР-АРТ, в основе которой используются 1) многоканальный дефектоскоп для регистрации эхо-сигналов, 2) сканер для перемещения преобразователей и расширения их пространственной апертуры, 3) компьютер,

оснащённый видеоплатой-ускорителем CUDA и связанный через стандартный интерфейс с дефектоскопом и 4) программное обеспечение, реализующее функции сбора, обработки, хранения и анализа данных.

На основе модулей систем АВГУР-Т и АВГУР-АРТ создана система АУЗК АВГУР-ТФ, в которой с целью создания высокопроизводительной и максимально информативной системы контроля реализованы эхо- и теневой методы УЗ контроля с использованием технологий ФАР, ФАР с возможностью зональной фокусировки, ЦФА, а также дифракционно-временной метод. Системы автоматизированного УЗК АВГУР-ТФ предназначены для контроля кольцевых сварных соединений и основного металла трубопроводов в процессе их монтажа и эксплуатации с измерением координат и размеров дефектов и амплитуд сигналов от них (см. Рис. 10).

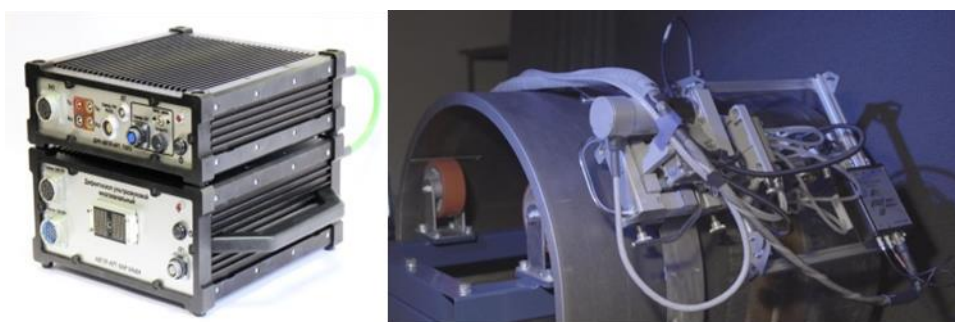


Рис. 10. Системный блок и сканер системы АВГУР-ТФ

Для калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей была создана система АВГУР 5.4 предназначенная для определения ос-

новных параметров и характеристик контактных и иммерсионных, прямых и наклонных, совмещённых и раздельно-совмещённых, фокусирующих и не фокусирующих преобразователей с частотами от 0,8 до 10 МГц.

В системе АВГУР 5.4 заложена новая идея калибровки преобразователей с использованием двухкоординатного сканирования, обеспечивающего возможность измерения трёхмерной диаграммы направленности преобразователя, необходимой для обеспечения точности применения методов 3D-SAFT. Измерение параметров контактных преобразователей выполняется путём единственного измерения набора эхо-сигналов на стандартном образце СО-3 или полусферическом образце такого же диаметра.

В пятой главе рассмотрены практические приложения унифицированной методологии ультразвуковой дефектометрии сварных соединений оборудования и трубопроводов опасных объектов, а также методы и результаты верификации методик получения размеров реальных дефектов. Рассмотрены методики с использованием одноэлементных преобразователей и методики с применением антенных решёток. Для верификации точности измерений размеров дефектов использовались следующие методы:

- математическое моделирование;

- расчётные методы (разрешающая способность, критерий качества схем прозвучивания);
- сопоставление результатов измерения с более точными данными о дефектах (металлографические исследования, внесение дефектов по аттестованным технологиям, сравнение с другими методами неразрушающего контроля).

Наибольшую точность определения размеров дефектов для одноэлементных преобразователей удалось обеспечить, применяя алгоритма 2D- и 3D-SAFT (3D-ПСП). Приведены наиболее сложные практические задачи, которые удалось решить с помощью системы АВГУР-Т и унифицированной методологии определения размеров дефектов. Среди них - задачи контроля:

- внутреннего поднакладочного сварного соединения патрубко-обечайка тройников сварных с усиливающими накладками с определением протяжённости дефектов;
- толстостенных сварных соединений толщиной 200 мм и более, характерных для сооружений химической промышленности;
- аустенитных сварных соединений толщиной от 8 до 80 мм;
- разнородных сварных соединений узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1100 парогенератора реакторной установки ВВЭР-440.

Для аустенитных сварных соединений с узкой разделкой кромок (менее 10°) толщиной до 60 мм вакуумной камеры международного экспериментального термоядерного реактора ITER на базе унифицированной методологии разработана методика контроля с восстановлением изображений методом 2D-SAFT использующая продольные и сдвиговые волны. Испытания проводились на образцах с реалистичными дефектами сварки. Точность данных о размерах дефектов гарантирована технологией изготовления дефектов. На Рис. 11 приведено изображение сварного шва с узкой разделкой образца и три проекции одного из полученных изображений.

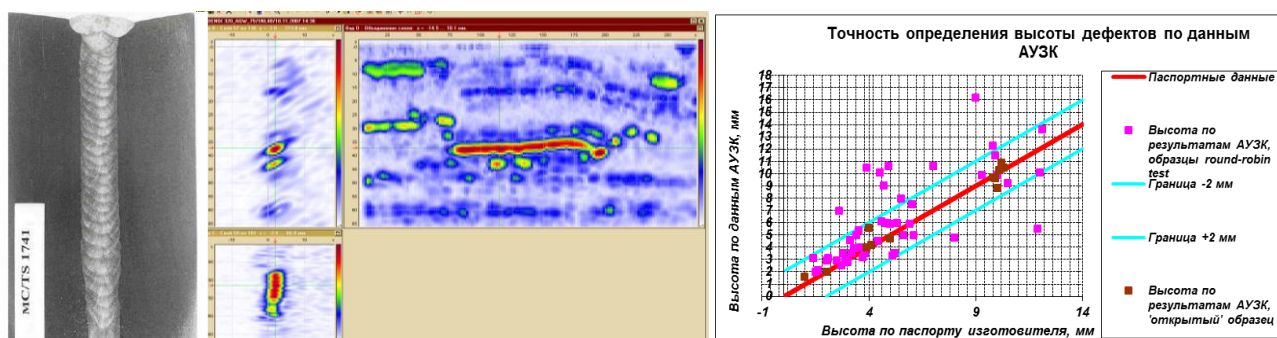


Рис. 11. Сечение сварного соединения с узкой разделкой (слева) и три проекции изображения одного из образцов (в центре) и диаграмма сопоставления результатов измерения высоты дефектов с паспортными данными образцов (справа)

Всего было изготовлено пять образцов, два из которых содержали дефекты неизвестные для контролёров. Во всех образцах выявляемость составила 94% от общего количества заложенных дефектов (выявлено 47 из 50 дефектов). На том же рисунке справа приведена диаграмма сопоставления результатов измерения высоты дефектов с паспортными данными образцов. Среднее значение абсолютной ошибки измерения высоты дефекта составило 1,9 мм; среднее значение абсолютной ошибки измерения протяжённости дефекта составило 6 мм.

Особую проблему представляет определение размеров дефектов в аустенитных и разнородных сварных соединениях, т.к. дифракционные сигналы от крайних точек дефектов по амплитуде становятся сопоставимы с сигналами структурных шумов в таких материалах. Однако при наличии априорной информации о локализации дефектов эту проблему удаётся преодолеть.

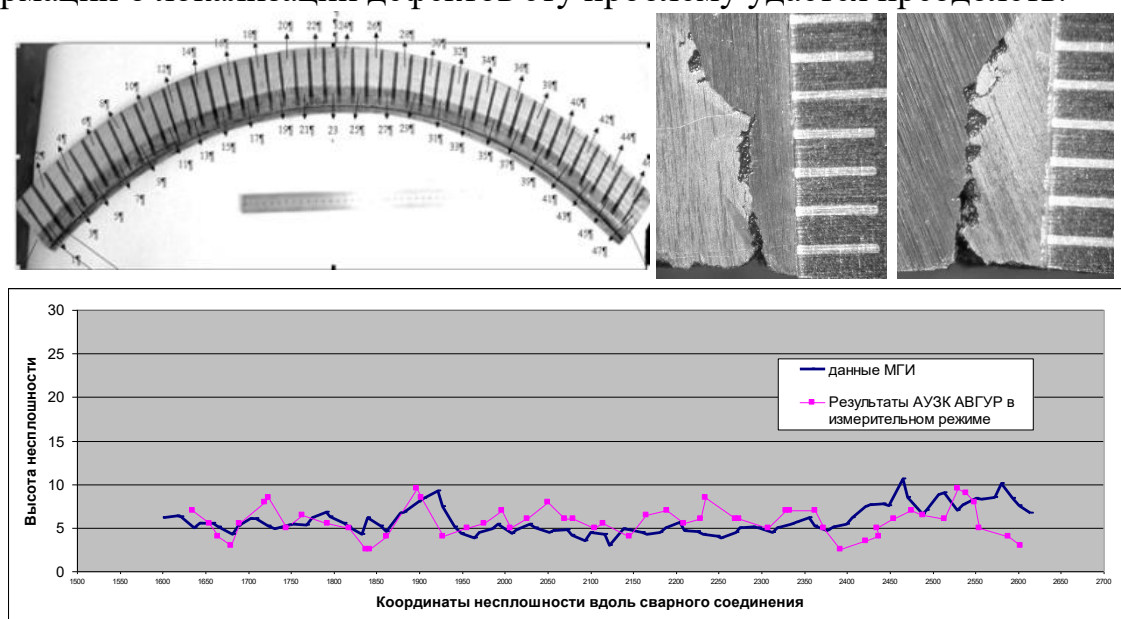


Рис. 12. Вырезанные темплеты и результаты сопоставления измеренной (АУЗК АВГУР) и фактической высоты трещины (данные МГИ)

Так в разнородных сварных соединениях узла приварки коллектора теплоносителя к патрубку Ду1100 парогенератора реакторной установки ВВЭР-440, имея информацию о локализации и типе дефектов, были определены значения погрешности измерения высоты трещины с использованием метода прямого сопоставления результатов измерения с высотой трещин, полученной методами разрушающего контроля и металлографических исследований (МГИ). На двух АЭС были вырезаны сегменты с дефектами, разрезаны на темплеты и проведены измерения высоты трещин на обеих поверхностях темплетов. На Рис. 12 показан общий вид сегмента дефектного участка сварного соединения длиной 1015 мм с разметкой для разрезки на темплеты, а также фотография двух сторон одного из таких темплетов. На этом же рисунке внизу приведён график сопоставления результатов МГИ и АУЗК с дефектометрией системой АВГУР.

На полученной выборке, составившей 50 интервалов протяжённостью по 20 мм, погрешность определения высоты трещины в 92% доверительном интервале по модулю не превысила 3,0 мм. Для этого же сварного соединения была разработана многомодовая методика АУЗК с применением антенных решёток и методов ЦФА и 2D-ЦФА, для аттестации которой кроме сравнения с результатами измерений реальных трещин, использовался метод прямого сопоставления результатов измерений и параметров более 70 отражателей с точно известными характеристиками. В результате аттестационных работ были подтверждены аналогичные показатели точности измерений. На Рис. 13 приведены результаты сопоставления измерений высоты 20 реалистичных отражателей с паспортными данными одного из испытательных образцов.

Первой в атомной энергетике РФ ультразвуковой измерительной методикой с применением антенных решёток стала методика контроля сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 реакторных установок РБМК-1000. При разработке этой методики была показана возможность измерения размеров наиболее опасных дефектов и определены значения погрешности измерений. Для этого были выполнены следующие методы верификации:

- расчётные обоснования;
- математическое моделирование;
- исследования на образцах реальных сварных соединений, содержащих модели дефектов, имитирующие эксплуатационные дефекты;
- исследования на 26 реальных сварных соединениях, содержащих представительную выборку реальных дефектов, образованных по механизму межкристаллитного растрескивания под напряжением (МКРПН).

Сопоставление данных дефектометрии и металлографических исследований позволило определить погрешность измерения высоты трещин. Всего исследовано 53 дефекта, содержащихся в 23 катушках со сварными соединениями. По данным металлографических исследований при сопоставлении были использованы трещины МКРПН различной длины от 20 мм до 136 мм и высотой от 1,7 мм до 12,8 мм (см. Рис. 14 вверху). На Рис. 14 внизу приведено распределение ошибок определения высоты трещин для 120 измерений.

Анализ полученных результатов показал, что средняя величина модуля погрешности измерения высоты дефектов составляет величину 1,7 мм. Измере-

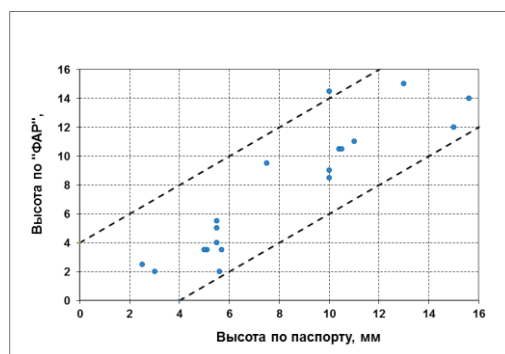


Рис. 13. Сопоставление результатов измерения высоты 20 моделей реальных дефектов с паспортными данными испытательного образца

ния длины трещин в этих катушках дали погрешность ± 8 мм. Погрешность определения размеров нормировалась только для несплошностей, имеющих высоту в диапазоне от 3 мм до 9 мм. Таких несплошностей в представленной выборке содержалось 40 шт. Для этого диапазона высот дефектов, погрешность измерения их высоты составила ± 2 мм в 95% доверительном интервале.

Для измерительного УЗК кольцевых сварных соединений узла приварки коллекторов теплоносителя к патрубкам парогенераторов Ду1200 реакторов типа ВВЭР-1000 была разработана методика с использованием методов ФАР и ЦФА. При проведении обоснования возможностей этой методики были изучены данные о дефектах узла за все время эксплуатации объекта, выполнен анализ особенностей появления

дефектов, в том числе связанных с наличием ремонтных заварок.

В связи с отсутствием представительной выборки реальных дефектов в 2013-2014 гг. проводилась опытно-промышленная эксплуатация методики. За этот период проведён сравнительный анализ результатов контроля по двум методикам АУЗК – методике контроля с применением системы АВГУР и методике с применением ФАР и ЦФА.

Для сопоставительного анализа использовались данные всех АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Общее количество несплошностей зафиксированных по обоим методикам составило 588 штук. Сопоставление результатов контроля по методикам с применением антенных решёток и с применением системы АВГУР показало, что:

- около 85% от общего количества зафиксированных несплошностей совпало для обеих методик, при этом подавляющее большинство различий в выявлении относится к несплошностям высотой равной 2 мм и менее, протяжённостью 14 мм и менее; различия в возможностях выявления несплошностей чаще всего объясняются особенностями формирования УЗ полей по данным методикам;

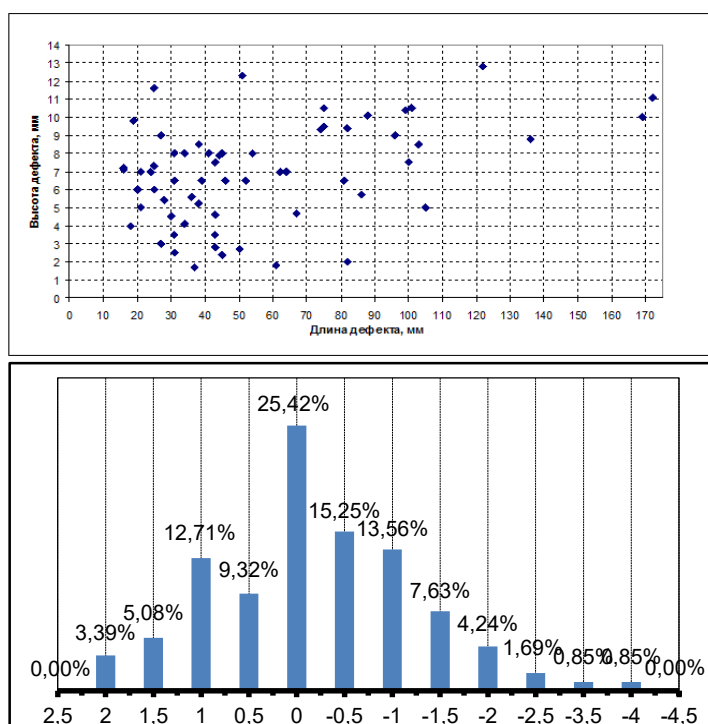


Рис. 14. Вверху - распределение размеров трещин для определения погрешности УЗ дефектометрии. Внизу – распределение величины погрешности (в мм) 120 измерений высот трещин МКРПН

щее количество несплошностей зафиксированных по обоим методикам составило 588 штук. Сопоставление результатов контроля по методикам с применением антенных решёток и с применением системы АВГУР показало, что:

- среднеквадратичное отклонение измерения размеров одних и тех же несплошностей по двум методикам составило 0,5 мм для высоты несплошностей и 5 мм для их протяжённости, что подтверждает заданную в методиках точность определения этих параметров несплошностей;
- все критичные несплошности (приведшие к ремонту) выявлены обеими методиками; для них подтверждены точность измеренных параметров локализации, высоты и протяжённости;
- подтверждается выявляющая способность и погрешность измерений из сопоставляемых методик.

На основании полученных результатов методика УЗ дефектometрии с применением ФАР и метода ЦФА была допущена для проведения неразрушающего контроля на действующих и строящихся АЭС России и активно используется. За период с 2004 г. применения методов УЗ дефектometрии для этого сварного соединения накоплена база данных контроля на 11 энергоблоках ВВЭР-1000, выявлено 13 недопустимых несплошностей (дефектов), размеры которых при проведении исследований подтвердили полученные значения погрешности измерения высоты и протяжённости дефектов. На Рис. 15 приведены примеры сопоставления оптических и акустических изображений реальных трещин.

На основании результатов верификации данных методик впервые в России были утверждены размерные критерии качества этих и других типов сварных соединений АЭС по результатам дефектometрии.

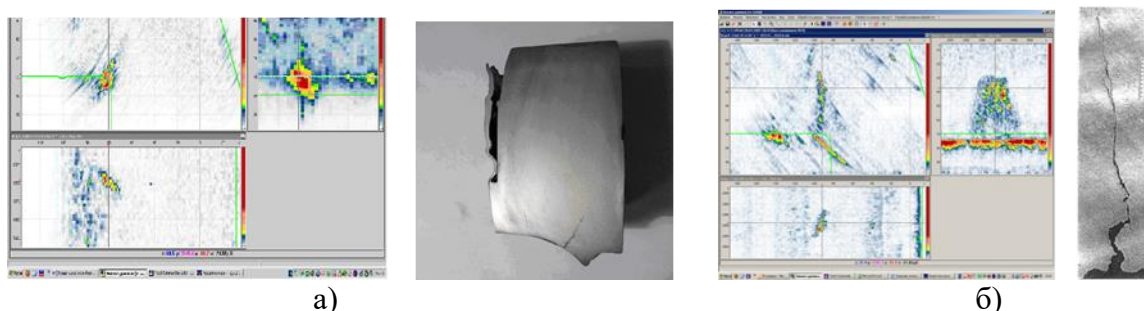


Рис. 15. Примеры сопоставления фотографий реальных трещин (а – трещина длина×высота 40×16,5 мм и б) – трещина 181×49 мм) трёх проекций их изображений полученных при эксплуатационном контроле

В пятой главе также приводятся результаты разработки и аттестации методик АУЗК с дефектometрией для сварных соединений колец роторов паровых турбин для АЭС нового поколения, кольцевых сварных соединений объектов промышленных и магистральных газопроводов из труб перлитной стали диаметром от 219 мм до 1420 мм толщиной 8-40 мм, а также результаты подтверждения эффективности практического применения технологии УЗ контроля с пол-

ным циклом автоматизации, полученные в процессе опытной эксплуатации этой технологии на действующих АЭС.

В шестой главе приведена разработанная методика проведения комплексных аттестационных испытаний методик ультразвукового контроля с использованием средств математического моделирования. Определены основные задачи моделирования, для которых его использование наиболее эффективно. Среди них задачи, связанные с аттестацией методик контроля с дефектотрией: задача оценки погрешности измерения размеров и положения дефектов; задача оценки разрешающей способности, задача определения достоверности контроля и другие. Приведены методы получения кривых зависимости вероятности обнаружения от размеров дефектов по данным, полученным при моделировании.

Эффективность испытаний методик с моделированием возрастает за счёт расширения доказательной базы, возможности получения количественных оценок достоверности контроля и погрешности определения размерных параметров дефектов. Использование математического моделирования позволяет учесть и проанализировать влияние на результаты контроля всего многообразия допустимых и возможных отклонений параметров контроля и параметров самого объекта контроля от номинальных значений, что невозможно достичь одними натурными испытаниями и даже длительной опытной эксплуатацией.

Для выполнения математического моделирования необходимо определить задачи, которые должны быть решены при моделировании, а также набор существенных параметров, влияющих на результаты контроля.

В первую очередь моделирование должно использоваться для подтверждения выполнения тех условий решаемой задачи, которые недостаточно подтверждаются экспериментальными исследованиями и результатами, полученными на испытательных образцах в процессе приёмочных испытаний. При этом экспериментальные данные необходимо использовать при моделировании как начальные с целью их экстраполяции на более широкий круг возможных условий контроля. Таким образом, моделирование должно обеспечивать:

- преодоление ограничения количества испытательных образцов и дефектов путём получения данных, которые позволяют оценить способность методики УЗ контроля;
- пополнение и обобщение результатов практических испытаний;
- подтверждение правильности выбора основных параметров методики УЗ контроля.

С учётом этого необходимо определить задачи моделирования, выбрав их из следующего перечня основных задач:

- выявление дефектов в заданной области контроля;
- моделирование наихудшей дефектной ситуации;

- выявление предполагаемых дефектов, подтверждение выбранного уровня чувствительности, интерполяция поведения методики при пробеле между экспериментальными данными;
- влияние анизотропии и неоднородности материала объекта контроля;
- оценка достоверности контроля;
- оценка работоспособности методики в заданной области изменения параметров контроля;
- оценка погрешности измерения размеров и положения дефектов;
- оценка разрешающей способности.

Для установленных задач моделирования необходимо определить основные характеристики моделирования: расчётные параметры, требования к отчётным материалам и критерии оценки полученных результатов.

Для сопоставления разных методик УЗ контроля предлагается выбрать перечень сопоставляемых выходных параметров методик, а также значения расчётных параметров для моделирования выходных параметров каждой методики. Входные параметры контроля устанавливаются одинаковыми для всех сравниваемых методик, а параметры системы УЗ контроля должны соответствовать методикам УЗ контроля. Основой сопоставления является анализ соответствующих выходных параметров сравниваемых методик. Для получения количественных показателей сравнения можно использовать балльную систему подведения итогов. Так как влияние различных выходных параметров на методику контроля различно, то для каждого выходного параметра полезно применить весовые коэффициенты, определяющие его значимость. Сумма баллов, умноженных на их веса, позволяет количественно оценивать различные методики УЗ контроля.

Основные выводы и результаты работы

Развита теория ультразвукового метода неразрушающего контроля для создания практической УЗ дефектometрии сварных соединений, как самостоятельного раздела технической диагностики. Создана методология УЗ дефектometрии сварных соединений с подтверждёнными показателями погрешности определения размеров дефектов сварных соединений опасных производств.

1. Разработан теоретический принцип создания методик УЗ дефектometрии, основывающийся на расширении пространственного спектра изображения дефектов, получаемого когерентными методами их восстановления, за счёт использования нескольких схем распространения волн в различных объектах контроля. Предложен метод оценки эффективности вклада каждой схемы при формировании объединённого изображения с использованием количественных критериев, характеризующих энергетический вклад каждой схемы и её возможности повышения точности измерения размеров дефектов. Разработан ме-

тод получения оптимального изображения несплошностей по данным, зарегистрированным при различных схемах прозвучивания.

2. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие реализацию трёхмерных методов восстановления изображений. Для этого создана методология и способы расчёта трёхмерной диаграммы направленности преобразователей, используется интерполяция для трёхмерного метода ПСП, а также разработан способ компенсации искажений, связанных с неизбежным упругим люфтом, возникающим при двухкоординатном сканировании. Реализация трёхмерных методов позволила более чем в два раза повысить фронтальную разрешающую способность и точность определения локализации дефектов по оси сварного соединения.

3. Создана унифицированная методология проведения АУЗК сварных соединений и основного металла с визуализацией данных когерентными методами, обеспечивающая определение размеров и типа дефектов. На основе этой методологии создан комплекс алгоритмов, включающий в себя алгоритм автоматического анализа данных с фиксацией несплошностей и определением их параметров, обеспечивший переход к системам с полным циклом автоматизации всего процесса УЗ контроля: от сбора данных до формирования заключений по результатам дефектометрии. Созданная впервые технология АУЗК с полным циклом автоматизации работы оператора аттестована и применяется для контроля сварных соединений корпусов парогенераторов АЭС.

4. Разработан метод выравнивания чувствительности изображений, полученных с помощью антенных решёток, путём формирования компенсационной амплитудной матрицы по расчётам методами геометрической оптики рассеянного поля для выбранных типов настроечных отражателей, расположенных по всей области изображения.

5. Обоснованы значения погрешностей измерения размеров известных типов дефектов в установленных доверительных интервалах. Установлено, что для аустенитных кольцевых сварных соединений труб Ду300 определение высоты коррозионных трещин методами УЗ дефектометрии проводится с точностью ± 2 мм в 95% доверительном интервале.

6. Разработана и утверждена процедура использованием средств математического моделирования при проведении аттестационных испытаний методик УЗ контроля с дефектометрией.

7. Обоснования и результаты применений унифицированной методология УЗ дефектометрии расширили доказательную базу замены радиографического контроля на ультразвуковой, что позволило, за счёт использования соответствующих методик АУЗК, повысить производительность и безопасность неразрушающего контроля при проведении монтажных работ.

8. Созданы и внедрены в промышленность три типа систем АУЗК с дефектометрией. Системы включены в реестр средств измерений Росстандарта и

аттестованы для применения на АЭС РФ и в ПАО «Газпром». Так системы АВГУР-Т и АВГУР-АРТ применяются на Кольской АЭС, Балаковской АЭС, Ростовской АЭС, Калининской АЭС, Белоярской АЭС, Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС (три АЭС с реакторами РБМК-1000), Армянской АЭС, ДО ПАО «Газпром», ОАО «Ижорские заводы», ПАО «Уралхиммаш», ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», ЗАО НПЦ «Молния», ЗАО «Промгазинжиниринг», ООО «Газпром газнадзор», ООО «Тепломонтаж», ЗАО «Ленинградский металлический завод», ООО «Техрегион» в г. С.-Петербург, ОАО «Красный котельщик» в г. Таганрог и т.д.

9. Разработаны, аттестованы и применяются при контроле объектов атомной энергетики и нефтегазового комплекса 49 методик АУЗК, в том числе 13 методик с дефектметрией, для которых впервые были подтверждены основные метрологические показатели погрешностей измерения размеров реальных дефектов. Среди методик АУЗК с дефектметрией:

- методика контроля поднакладочных швов в тройниках сварных с усиливающими накладками;
- методика контроля толстостенных сварных соединений обечаек сосудов химической промышленности толщиной 200 мм и более;
- методика контроля замыкающих сварных соединений корпусов реактора гидрокрекинга;
- методика контроля толстостенных аустенитных сварных соединений с узкой разделкой;
- методика контроля аустенитных сварных соединений трубопроводов Ду300 реакторной установки РБМК;
- методика контроля толстостенных кольцевых сварных соединений Ду1200 парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200;
- методика контроля качества сварных соединений колец роторов паровых турбин АЭС нового поколения;
- методика контроля разнородных сварных соединений Ду1100.

Список основных публикаций по теме диссертации

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях.

1. Ультразвуковая дефектметрия металлов с применением голографических методов: монография / Д.С. Тихонов [и др.]. М.: Машиностроение, 2008. 368 с. (29.7 п.л./8.3 п.л.).
2. Автоматизированный ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности: монография / Д.С. Тихонов [и др.]. М.: юбилейный сборник трудов ООО «НПЦ «ЭХО+». Москва; Санкт-Петербург: Свен, 2010. 64 с. (4.5 п.л./1.5 п.л.).

3. Ультразвуковая дефектометрия - 25 лет: юбилейный сборник трудов ООО НПЦ «ЭХО+» / Д.С. Тихонов [и др.]. Москва; Санкт-Петербург: Свен, 2015. 140 с. (8.75 п.л./3.8 п.л.).
4. Ультразвуковая дефектометрия - 30 лет: юбилейный сб.тр. ООО «НПЦ «ЭХО+» / Д.С. Тихонов [и др.]. М.: Издательский дом «Спектр», 2020. 216 с. (27,0 п.л./9,4 п.л.).
5. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Влияние поверхности объекта на восстановленное изображение при иммерсионном контроле в акустической голографии // Дефектоскопия. 1989. № 11. С. 51-60. (0.6 п.л./0.2 п.л.).
6. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Неразрушающий контроль цилиндрических объектов методами многочастотной акустической голографии // Дефектоскопия. 1991. № 10. С. 29-36. (0.6 п.л./0.2 п.л.).
7. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Визуализация неоднородностей методом обобщённой многочастотной акустической голографии // Акуст. журн.. 1992. № 3. С. 396-401. (0.4 п.л./0.15 п.л.).
8. Использование трансформированных волн для получения изображений вертикальных трещин по многочастотным цифровым акустическим голограммам / Д.С. Тихонов [и др.]. // Дефектоскопия. 1993. № 6. С. 3-9. (0.4 п.л./ 0.1 п.л.).
9. Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Использование «задонных» эхоимпульсов для повышения информативности изображения дефектов, восстановленного по цифровым акустическим голограммам // Дефектоскопия. 1993. № 7. С. 16-22. (0.4 п.л./0.2 п.л.).
10. Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Экспертная оценка типа и размеров дефекта с помощью когерентного ультразвукового дефектоскопа // Дефектоскопия. 1995. № 10. С. 3-14. (0.7 п.л./0.4 п.л.).
11. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Новый подход к ультразвуковому автоматизированному неразрушающему контролю ответственных сварных соединений // Контроль. Диагностика. 1999. № 10. С. 23-31. (0.8 п.л./0.4 п.л.).
12. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Гребенников Д.В., Тихонов Д.С. Применение методов сверхразрешения при экспертном контроле сварных швов трубопроводов АЭС // Дефектоскопия. 2000. № 1. С. 58–65. (0.45 п.л./0.15 п.л.).
13. Гапанович В.А., Вopilкин А.Х., Кононов Д.А., Тихонов Д.С., Гурвич А.К., Казанцев А.Г. Автоматизированные средства диагностирования объектов повышенной опасности методом многоакурсной акустической голографии // Технология машиностроения. 2007. № 1. С. 66-70. (0.44 п.л./0.12 п.л.).
14. Алёшин Н.П., Базулин Е.Г., Григорьев М.В., Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Ультразвуковой голографический контроль тройников маги-

- стральных газопроводов // Сварка и диагностика. 2009. № 3. С. 10-15. (0.4 п.л./0.15 п.л.).
15. Бадалян В.Г., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. Технологии ультразвукового контроля толстостенных кольцевых сварных соединений парогенераторов реакторов типа ВВЭР-1000 // Контроль. Диагностика. 2009. № 6 (132). С. 59-70. (0.8 п.л./0.4 п.л.).
 16. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Часть I. Описание системы и методики калибровки. // Контроль. Диагностика. 2009. № 9 (135). С. 8-18. (0.8 п.л./0.15 п.л.).
 17. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Коколев С.А., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С. Применение трёхмерной когерентной обработки в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 46-65. (1.2 п.л./0.4 п.л.).
 18. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г., Базулин А.Е., Самарин П.Ф., Тихонов Д.С. Использование моделирования для оптимизации методик УЗК // Сварка и Диагностика. 2014. № 6. С. 18-22. (0.3 п.л./0.05 п.л.).
 19. Бадалян В.Г., Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Тихонов Д.С. Разработка и аттестация методик АУЗК с использованием программного комплекса CIVA // Контроль. Диагностика. 2015. № 5. С. 59-68. (0.8 п.л./0.2 п.л.).
 20. Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Коколев С.А., Тихонов Д.С. Применение метода фронтальной проекции в спектральном пространстве для ультразвукового контроля трубопроводов // Сварка и диагностика. 2015. № 1. С. 19-23. (0.3 п.л./0.1 п.л.).
 21. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решётками // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 7-22. (1.0 п.л./0.4 п.л.).
 22. Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 2. Повышение отношения сигнал/шум // Контроль. Диагностика. 2015. № 9. С. 10-27. (1.2 п.л./0.5 п.л.).
 23. Тихонов Д.С. Методики автоматизированной ультразвуковой диагностики высокого разрешения с новыми информационными критериями оценки качества сварных соединений // Контроль. Диагностика. 2016. № 8. С. 34-40. (0.45 п.л.).
 24. Тихонов Д.С. Основные методы получения изображений при автоматизированной ультразвуковой диагностике сварных соединений большой толщины // Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов.: Сборник тезисов XXII Петербургской конференции УЗДМ-2016. Санкт-Петербург. 2016. С. 11. (0.01 п.л.).
 25. Тихонов Д.С. Методология автоматизированного ультразвукового контроля с определением размеров дефектов // XXI Всероссийская конференция по

- неразрушающему контролю и технической диагностике.: Сборник трудов. Москва. 2017. С. 138-139. (0.1 п.л.).
26. Тихонов Д.С. Современные автоматизированные средства и методы ультразвукового контроля для реакторных установок типа ВВЭР // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР.: Сборник трудов 10-ой международной научно-технической конференции «ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Подольск, Московская обл. 2017. С. 132. (0,02 п.л.).
27. Тихонов Д.С. Современные технологии автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений магистральных газопроводов при строительстве, ремонте и эксплуатации // Газовая промышленность. 2018. № 3 (773). С. 128-131. (0,35 п.л.).
28. Бадалян В.Г., Базулин А.Е., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С. Особенности разработки методик автоматизированного контроля в ультразвуковой дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2017. № 3. С. 26-37. (0.82 п.л./0.3 п.л.).
29. Базулин А.Е., Бутов А.В., Тихонов Д.С., Ромашкин С.В., Заушицын А.В. Применение технологии TOFD в разработках ООО НПЦ «ЭХО+» // Контроль. Диагностика. 2020. № 5. С. 28-37. (0.7 п.л./0.2 п.л.).
30. Федотовских В.Г., Тихонов Д.С., Ромашкин С.В. Опыт сплошной толщинометрии на основе ФР-дефектоскопов // Контроль. Диагностика. 2020. № 9. С. 34-49. (0.9 п.л./0.3 п.л.).
31. Система автоматизированного ультразвукового контроля: патент на полезную модель № 131492 / Вopilкин А.Х., Ромашкин С.В., Тихонов Д.С.; приоритет от 18 декабря 2012 года.
32. Способ выявления поперечно ориентированных дефектов при ультразвуковом сканировании изделия с отражающим дном: патент на изобретение № 2610516 / Базулин Е.Г., Бутов А.В., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С.; приоритет от 23 декабря 2015 г.
33. Способ ультразвукового контроля профиля внутренней поверхности изделия в зоне сварного соединения с применением антенных решёток: патент на изобретение № 26225613 / Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Пронин В.В., Тихонов Д.С.; приоритет от 22 апреля 2016 г.
34. Способ увеличения динамического диапазона сигналов измеряемых при проведении ультразвукового контроля: патент на изобретение № 2649028 / Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С.; приоритет от 29 декабря 2016 г.
35. Способ создания неполной коммутационной матрицы при использовании антенных решёток: патент на изобретение № 2646955 / Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Бутов А.В., Вopilкин А.Х., Тихонов Д.С.; приоритет от 29 декабря 2016 г.